

PROGRAMME NATIONAL

Les Enveloppes Fluides et l'Environnement

Demande de financement

La demande de financement doit parvenir **par courrier électronique** à :
pascale.ebner@cnsr-dir.fr.

L'envoyer en format DOC, en document attaché, nommé, avec les informations minimum suivantes : LEFE-ACTION-nom du responsable scientifique

N.B. Un exemplaire (imprimé recto-verso, simplement agrafé) signé par le directeur de laboratoire doit parvenir par courrier postal à Pascale Ebner - INSU - BP 287-16 - 75766 Paris cedex 16

ACTION (S) CONCERNÉE(S) (cocher la ou les cases dont relève le projet)

- Chimie Atmosphérique (CHAT)
- Evolution et variabilité du climat à échelle globale (EVE)
- Cycles biogéochimiques, Environnement et Ressources (CYBER)
- Interactions et Dynamique de l'Océan et de l'Atmosphère (IDAO)
- Assimilation de données

Ce projet est-il aussi soumis au Programme National de Télédétection Spatiale (PNTS) :

- Oui - Non

Ce projet est-il aussi soumis à d'autres programmes nationaux ?

Si oui, indiquez lesquels (PNTS, ECCO, TOSCA...) :

Statut du Projet (nouveau, déjà engagé) : première soumission en 2006

Projet BOUM

Biogéochimie de l'Oligotrophie à l'Ultra-oligotrophie Méditerranéenne

Responsable scientifique du projet (nom, prénom et qualité) :

MOUTIN Thierry, Maître de Conférences

Laboratoire du proposant (intitulé, appartenance, adresse et téléphone, e-mail) :

Laboratoire d'Océanographie et de Biogéochimie (LOB)

Centre d'Océanologie de Marseille

UMR CNRS 6535

Directeur : Bernard QUEGUINER

Campus de Luminy

F 13 288 Marseille Cedex 09

Tél : 04 91 82 95 60

e-mail : moutin@com.univ-mrs.fr

SOMMAIRE

FICHE SYNTHETIQUE

Résumé du projet, résultats attendus, calendrier, budget détaillé, équipement mi-lourd, demande de label

Personnel collaborant au projet

pages

Réponse au rapport de synthèse CYBER 9

DOSSIER SCIENTIFIQUE 13

Intérêt scientifique

Plan de recherche 29

Calendrier

Experts français et étrangers susceptibles d'évaluer le projet

REFERENCES DE LA COMMUNAUTE BOUM 31

MOYEN DONT DISPOSE LE PROPOSANT POUR LA REALISATION DU PROJET 38

Personnels et laboratoires impliqués

Équipement

Moyens demandés hors AO LEFE

Labélisation de sujets de thèses et post doctorat 40

Demande de financement LEFE 50

Autres financement

ANNEXES AU DOSSIER 52

LEFE Annexe 1 : Budget détaillé des analyses prévues (campagnes en mer ou projets expérimentaux de laboratoire) 53

LEFE Annexe 2 : Formulaire simplifié de demande de campagne à la mer (n'inclus pas les documents 5 à 8 de la demande OPCB non demandés ni les fiches valorisation des résultats des campagnes océanographiques : disponible sur demande) 57

LEFE Annexe 3 : Dossier scientifique : contributions spécifiques en complément du dossier scientifique et références hors communauté BOUM 68

LEFE Annexe 4 : Résumé des demandes d'équipement mi-lourd 88

LEFE Annexe 5 : Lettres de soutien (J. Hall, IMBER et E. Papathanassiou, SESAME)

Résumé du projet, résultats attendus, calendrier :

Résumé du projet :

Le fonctionnement et la productivité des systèmes oligotrophes, ainsi que le rapport entre production et minéralisation dans ces régions, sont encore sujets à débat. Initialement considérés comme des déserts biologiques, il a été récemment démontré que ces systèmes peuvent largement contribuer à l'exportation de carbone organique. Une compréhension approfondie de ces écosystèmes très vastes est nécessaire si l'on veut pouvoir les caractériser et prédire d'éventuelles modifications liées aux changements environnementaux. Ce projet a pour objectif de donner une description longitudinale de la biogéochimie et de la diversité biologique de la mer Méditerranée, et de produire une étude détaillée de la production biologique et de son devenir dans 3 sites. Ces sites représentent, à une échelle régionale, les principales caractéristiques d'environnements contrastés trouvés dans l'océan oligotrophe. Nous voulons déterminer si les processus de production de matière organique, de reminéralisation et d'exportation sont différents dans ces sites; et si ils le sont, déterminer comment ces différences sont reliées à la structure des communautés planctoniques. La comparaison entre différents sites le long d'un gradient longitudinal de disponibilité nutritive devrait nous procurer un nouvel aperçu pour identifier et comprendre les interactions fondamentales entre biogéochimie marine et écosystèmes. Nous allons nous focaliser sur plusieurs questions d'intérêt actuel concernant le couplage/découplage des processus d'apports et de pertes de carbone et d'éléments nutritifs dans la couche éclairée. Ces processus contrôlent la structure et la fonction des communautés planctoniques, et finalement, la capacité de l'océan à piéger du carbone par voie biologique. Nous allons décrire le fonctionnement de chaque écosystème dans des conditions physiques aussi stationnaires que possible, et également, examiner les réponses des écosystèmes à des perturbations (additions impulsives d'éléments nutritifs), à partir d'approches expérimentales et de modélisations.

Résultats attendus

Le projet BOUM s'articule autour de 3 objectifs principaux et permet la collaboration de physiciens, biologistes et biogéochimistes ayant des spécialités allant de l'optique marine à la modélisation. Le but du projet est d'obtenir une meilleure représentation des interactions entre les organismes planctoniques et les cycles des éléments biogènes (C,N,P,Si,Fe) pour des échelles allant de l'étude de processus à l'étude de la Méditerranée.

1. Donner une description longitudinale de la biogéochimie et de la diversité biologique en Mer Méditerranée en période de stratification maximale.

La description longitudinale de stations courtes entre Gibraltar et l'extrémité orientale de la mer Méditerranée procurera un set de données physiques et biogéochimiques de base qui alimentera la base de données CYBER et la base de données SESAME (Southern European Seas : Assessing and Modelling Ecosystems changes). Elle permettra d'étudier précisément la disponibilité nutritive actuelle en période d'oligotrophie prononcée, de quantifier les pools minéraux et organiques, dissous et particuliers des éléments biogènes sur toute la colonne d'eau, de quantifier la pénétration du CO₂ d'origine anthropique. Ces mesures serviront à la validation des modèles biogéochimiques multi-éléments à l'échelle de la Méditerranée. L'étude de la diversité biologique envisagée (taxonomie classique et biologie moléculaire) procurera une description précise des communautés planctoniques et permettra d'apprécier le rôle clef de certains microorganismes, en particulier les fixateurs d'azote, dans les cycles biogéochimiques majeurs.

2. Etudier dans 3 environnements oligotrophes contrastés la production et le devenir de la matière organique en insistant particulièrement sur l'étude des processus qui conduisent aux divergences des rapports stoechiométriques des éléments biogènes dans la matière organique, dans l'eau environnante ou dans le matériel exporté.

L'occupation pendant 5 jours de 3 sites représentant des conditions oligotrophes contrastées permettra d'acquérir à plus haute fréquence des variables physiques, optiques, biogéochimiques et biologiques. Elle permettra de préciser l'impact de la dynamique à petite échelle sur la productivité primaire en fournissant de nouvelles estimations des coefficients de diffusion verticaux, d'évaluer l'importance de la fixation d'azote dans l'apport d'azote nouveau et d'étudier son contrôle par la disponibilité du phosphate et/ou du fer (études in situ et en microcosmes). Elle permettra d'étudier la production primaire et secondaire ainsi que la minéralisation et l'exportation de matières, en mesurant d'une part les flux des éléments biogènes (C,N,P,Si) et en déterminant d'autre part les organismes majoritairement responsables de ces flux. Les caractéristiques physiologiques des organismes seront étudiées à l'échelle des espèces ou des groupes d'espèces jouant un rôle majeur dans les flux d'éléments biogènes. Le principal résultat attendu est une meilleure compréhension des interactions fondamentales entre les cycles biogéochimiques et la structure du réseau trophique planctonique dans les milieux marins oligotrophes.

3. Obtenir une représentation satisfaisante des principaux flux biogéochimiques (C,N,P,Si) et de la dynamique du réseau trophique planctonique, in situ et pour des expériences en microcosmes.

L'ensemble des données acquises durant la campagne BOUM sera rapidement mis à la disposition de la communauté internationale. Une modélisation multi-échelles est proposée dès le début du projet. A l'échelle de la Méditerranée et en relation avec le programme SESAME, les données serviront à la validation de modèles biogéochimiques (circulation-écosystèmes) dont les objectifs sont de prédire l'impact du changement climatique sur les écosystèmes méditerranéens. La modélisation à cette échelle permettra également d'évaluer la distribution du CO₂ d'origine anthropique. A une échelle plus fine, il est attendu une amélioration de la représentation de certains processus (diazotrophie, compétition phytoplancton-bactéries pour la ressource nutritive, multi-limitation) dans le modèle biogéochimique multi-éléments, multi-groupes fonctionnels ECO3M. Ceci dans l'objectif d'améliorer la représentation des flux de carbone et des éléments biogènes associés dans la couche de surface des milieux marins oligotrophes.

Calendrier :

Septembre 2007: Réunion pré-campagne de toute la communauté (Marseille)

Mars 2008: Réunion pré-campagne du comité organisateur élargi (Marseille)

Août-Septembre 2008: Mission (description détaillée en [Annexe 2](#))

Mai-Juin 2009: Réunion post-campagne de toute la communauté (Marseille)

Oct-Nov 2009 : Atelier ciblé (10 personnes max)

Fév-Mars 2010 : Atelier ciblé (10 personnes max)

Juin-Juillet 2010 : Atelier ciblé (10 personnes max)

2010 : Demande d'une session spéciale à l'Ocean Sciences Meeting

Mots clés:

Cycles biogéochimiques, Oligotrophie, Production primaire, Mer Méditerranée

Durée du projet : 4 ans.

Budget détaillé demandé au programme LEFE et aux autres financements (€ HT):

	Année 2007	Année 2008	Année 2009	Année 2010
FINANCEMENTS DEMANDES AU PROGRAMME LEFE				
Fonctionnement		6 000	10 000	15 000
Missions	17 000	4 000*	21 000	8 000
Analyses		99 000	10 000	
Petit équipement	10 500	3 200		
Équipement mi-lourd	62 920			
Total demandé à LEFE	90 420	113 050	19 000	23 000
AUTRES FINANCEMENTS DEMANDES ou OBTENUS (préciser)				
Projet européen SESAME	146 600 (obtenu) <i>120 000 consommable</i> <i>26 600 missions et autres coûts</i>		20 000 (obtenu) <i>20 000 missions et autres coûts</i>	
PAI AURORA	4 360 (demandé)	4 140 (demandé)		
ANR**		4 260 (obtenu)		
PNTS				
CARBOCEAN		4 000 (obtenu) <i>(consommable)</i>	1 000 (obtenu) <i>(consommable)</i>	
Total autres financements	154 260		21 000	

* demande à part pour les missions concernant directement la campagne océanographique (cf. détail p. 50)

** l'ANR **Ondes Internes** finance l'achat du VMP5500, l'ANR **BOOM** prend en charge la totalité des analyses concernant la diversité des coccolithophoridés (budget non estimé), l'ANR **POTES** prend en charge la totalité du matériel et des analyses hyper bar (4260 € HT).

Instruments Nationaux sollicités :

Navire océanographique « Pourquoi Pas ? » ou « l'Atalante »

Equipements mi-lourds demandés (détails en annexe 4):

Les équipements nécessaires à la campagne océanographique BOUM demandés en 2006 et actuellement acquis sont le laser OPC (demande F. Carlotti), la série des 6 APO (Oxygen Productivity Auto Sampler (demande D. Lefevre), le CHN LECO 900 (demande A. Sciandra).

L'analyseur de nitrate ISUS est prêté par la société Satlantic (M. Lewis). Le projet BOUM soutient la demande conjointe de deux entrants au CNRS, Karine Leblanc et Tsunéo Tanaka, concernant l'acquisition d'un spectrofluorimètre UV SHIMADZU (24 000 € HT), et celle de Gaby Gorsky concernant la finalisation de la construction du miniPVM adaptable sur la rosette (38 920 € HT).

Services d'observation dont le projet utilisera les données :

Dans le cadre des projets de thèses déposés par P. Raimbault et I. Biégala, des travaux sont prévus dans les services d'observation DYFAMED et SOMLIT Marseille. Le projet européen SESAME dans lequel s'inscrit également la campagne BOUM a pour ambition d'utiliser l'ensemble des données disponibles en mer Méditerranée et en particulier celles mises à la disposition de la communauté internationale par les services d'observation français.

Demande de labélisation de bourses post-doctorales ou doctorale :

Le label CYBER est demandé pour 7 sujets de thèses et un sujet de post doctorat. Le détail des sujets et des encadrants figure pages 39-49..

Sujets de thèse

- Impact de la dynamique à petite échelle sur la productivité primaire dans les régions oligotrophes : analyse des données de la campagne BOUM.
- Quantification de la fixation d'azote en Méditerranée – Importance dans l'évaluation de la production nouvelle et le bilan biogéochimique de l'azote.
- Diversité et distribution des diazotrophes pico et nanoplanctoniques en Méditerranée au moyen d'outils moléculaires
- Compétition entre autotrophes et hétérotrophes pour la disponibilité du phosphate en milieu marin oligotrophe : conséquences sur le cycle biogéochimique du carbone en mer Méditerranée, mission BOUM.
- Modélisation du couplage/découplage des cycles du carbone et des éléments biogènes associés dans la couche éclairée de milieux oligotrophes contrastés : mission BOUM en Méditerranée.
- Balance métabolique des régions océaniques oligotrophes.
- Co-limitation C-P en Méditerranée : contrôle et régulation des activités dégradatrices des procaryotes hétérotrophes en relation avec la structure fonctionnelle des communautés.

Sujet de post-doctorat

- Etude des facteurs biogéochimiques de contrôle de la fixation de N₂ en Méditerranée – Impacts des apports atmosphériques sur la fixation de N₂.

Nombre de personnes collaborant au projet (en équivalent temps plein – indiquer la ventilation par année) :

Personnel détaillé (% sur le projet), par laboratoire, et fonction dans le projet:

NOM	LABORATOIRE	FONCTION	Participation au projet		% Participation à d'autres programmes (INSU, EUROPE, ANR)
			%	Expertise	
<i>BAKLOUTI</i>	LOB	CR Modélisation	35		LATEX 15
BIEGALA / Doctorant BM fixation N ₂	IRD	CR Biol. (fixateur d'azote)	25		ANR BOA 20 EC2CO NC 30
CARLOTTI	LOB	DR Biol. (Macro-zooplankton)	20		
BOURUET-AUBERTOT	LOCEAN	MCF Phys. (Micro-turbulence)	20		ANR ONDES INT 40 TWIST 30
CATALA	LOBB	AI Biol. Cytométrie (Pico Hét)	25		MEDEA 20 ANR BIODIV 20
CHRISTAKI	ELICO	Pr Biol. (Micro-zooplankton)	20		BIOPROPHI 10 CPER 10
COURTIES	LOBB	IR Cytométrie (Pico aut.)	20		MEDINA 20
<i>DEVENON</i>	IFREMER	Pr Phys.	5		
<i>DIAZ</i>	LOB	MCF Modélisation	20		BIOPRHOFI 20 LATEX 40 GOLPHYZ 20
<i>DOLAN</i>	LOV	DR Biodiv. Herbivores	20		ANR 70
FUDA / ROUGIER	COM/LOB	Phys.-Instrument	20		
GARCZAREK	SB-Roscoff	CR Biol. Cyanobactéries	25		ANR 5 MARINE GENOMICS 25
GOYET	Univ-Perpignan	Pr Chimie CO ₂ anthropo.	20		CARBOCEAN 30
<i>GOUTX</i>	LMGEM	DR Biol. (Lipides)	10		
GUIEU / BLAIN	LOV/LOB	CR/Pr. Biogéoch. Fer	25		ANR BOA 20 DUNE 40 CEL PIEGE 5
DE VARGAS	SB-Roscoff	CR Biol. Coccolithophores	25		
GUIGUE	LMGEM	AI Biogéoch. MO	20		
<i>GUILLOU</i>	SB-Roscoff	CR Biol. Picoplancton	20		ANR 20 MELINA 10
JEANTHON	SB-Roscoff	Dr. Biol. Bactéries AAnP	25		MALINA 15 EC2CO 40
<i>LEBARON</i>	LOBB	Pr Biol. Hétérotrophes	5		MEDEA 5 MEDINA 10 ANR BIODIV 25
LEBLANC	LOB	CR Biogéoch. Si cycle	25		CASOAR 25
LEBLOND	LOV	IE Biogéoch. Pièges à séd.	30		
LEFEVRE/Doctorant bilan O ₂ /CO ₂	LMGEM	CR Biogéoch. ΔO ₂ /ΔCO ₂	20		ANR POTES 20 POMME 20 BALTEX 10 PECHE 20 KEOPS 5
<i>LEGENDRE</i>	LOV	Pr Biogéoch. cycle C	5		
LOISEL	ELICO	MCF Optique marine	20		
ORIOLE	LOBB	AI Biogéoch. El. Nutritifs	20		MEDEA (CYBER) 20%, RIOMAR (EC2CO) 20%, Plumland (LEFE) 8%, Drake (clivar) 10%
MAREC	INSU	IE Instrumentation	20		
MOUTIN	LOB	MCF Biogéoch. cycles C,P	80		

<i>OBERNOSTERER</i>	LOBB	CR Biogéoch. Bactéries	5		MEDEA 60 ANR BIODIV 25
PICHERAL / GORSKY	LOV	IE Biogéoch. PVM	25		
PRIEUR	LOV	DR Phys.	25		
PUJO PAY	LOBB	CR Biogéoch. (MO, SN)	25		MEDEA (CYBER) 15%, RIOMAR (EC2CO) 10%, Plumland (LEFE) 15%, Drake (clivar) 10%
<i>QUEGUINER</i>	LOB	Pr Biogéoch. Cycles C,Si	25		
RAIMBAULT	LOB	Dr Biogéoch. Cycles C,N	25		
<i>RAS</i>	LOV	IE Pigments HPLC	10		
Post Doctorant / RIDAME	LOCEAN-Paris	MCF Biogéoch. Fixation N ₂	40		
RIMMELIN/BARTHAUX	LOB/LOB	IR/IE SN (méthodes nano)	25		
<i>ROY BARMAN</i>	LSCE-Paris	CR Biogéoch. Traceurs géoch.			
TAMBURINI	LMGEM	CR Biogéoch. Min. profonde	20		
TANAKA	LOB	CR Biogéoch. Micro-zoo P	30		PAME IPY 20
THIBAUT-BOTHA / STEEMANN	LOB/LOV	MCF/Macro-zoo (processus)	25		
VAN WAMBEKE	LMGEM	Dr Biogéoch. Bact., cycles C-P	50		PECHE 15 BIOSOPE 10
<i>VAULOT</i>	SB-Roscoff	DR Biol. Picoplancton	5		
WEINBAUER	LOV	CR Biol. Virus	20		15
Collaborations internationales					
BERHENFELD	Etats-Unis	Chercheur Optique marine	25		
<i>LEWIS</i>	Etats-Unis	Chercheur Phys. et opt. marines	5		
MARANON	Espagne	Chercheur Biogéoch. COD	25		
<i>NEDOMA</i>	Tchéquie		25		
PSARRA	Grèce	Chercheur Biogéoch. PPrim	30		
<i>THINGSTAD</i>	Norvège	Pr Biogéoch. & Modélisation	10		
VAN MOOY	Etats-Unis	Chercheur Biogéoch. Cycle P	25		
Doctorant (Physique turbulence)	LOCEAN/LOV	Phys. Micro-échelle	100		
Doctorant (Production cycles N-C)	LOB	Biogéoch.	50		
Doctorant (Production cycles P-C)	LOB/LOBB	Biogéoch.	100		
Doctorant (Modélisation)	LOB	Biogéoch.			
Doctorant (Minéralisation)	LMGEM	Biogéoch.	100		
TOTAL équivalent temps plein			15.5		
dont collaborations internationales			1.5		

En bleu, personnel non embarquant

TOTAL équivalent temps plein par année : 2007 (7.7), 2008 (15.5), 2009 (7.7), 2010 (5.2)

RAPPORT DE SYNTHÈSE (APPEL D'OFFRE 2006) ET REPONSE DE LA COMMUNAUTE BOUM

Rapport de synthèse (Appel d'offre 2006) :

Le comité CYBER a apprécié que ce projet concernant l'oligotrophie en Méditerranée et émanant du IP FP6 SEASAME ait été soumis pour évaluation. C'est un projet s'appuyant fortement sur une campagne expérimentale construite sur un mode assez classique et bien rodé, avec des stations de stocks et des sites (en petit nombre) sur lesquels les flux sont estimés. Le projet présente une originalité thématique par rapport à des projets antérieurs (Minos, Prosopé, Cyclops...), en tout cas pour ce qui a trait à la diazotrophie des couches de surface, tant par les méthodes mises en œuvre pour aborder ces questions (et qui font beaucoup plus appel aux outils de biologie moléculaire, aux mesures précises pour les faibles concentrations d'éléments nutritifs, et aux mesures des flux d'oxygène) que par le cadre physique mieux contraint des sites expérimentaux (pour les stations longues, réseaux méso-échelle et mesures de turbulence). Les autres éléments du projet paraissent moins originaux et ne se justifient que si la place à bord du bateau est disponible et qu'ils ne contraignent pas outre mesure la durée des opérations.

Le projet manque cependant d'une stratégie claire d'analyse des résultats des campagnes de synthèse des observations, en vue de dépasser le cadre très local de quelques stations longues et d'atteindre des résultats applicables à l'ensemble du bassin, n'est pas bien développé (il doit s'agir de l'objectif 5, où est juste évoqué vaguement un modèle uni-dimensionnel, mais sans préciser l'approche qui sera utilisée).

Le choix de stations longues devrait aussi être examiné critiquement. Le comité CYBER juge que seules les stations des bassins ioniens et levantins présenteront vraiment une originalité par rapport à ce qui a été fait antérieurement (c'est aussi là que l'oligotrophie est la plus prononcée). On voit mal dans le contexte évoqué l'intérêt d'une station longue en mer d'Alboran et on peut se poser la question de l'originalité d'une station dans le bassin Algérien, par rapport à ce qui peut se faire à bien moindre coût à partir de la station DYFAMED, par exemple. Un suivi de type WOCE est probablement intéressant, mais sa justification et la liste des paramètres qui seront mesurés, demande à être justifié plus solidement. On peut aussi regretter qu'il ne soit pas fait plus appel aux mesures bio-optiques pour estimer des paramètres photophysiques en complément des mesures de production primaire (incubation in situ).

Recommandation : Le CS encourage le proposant à soumettre une nouvelle proposition lors du prochain AO CYBER, proposition qui devra tenir compte des remarques du CS CYBER.

Réponse de la communauté BOUM:

*Le comité CYBER a considéré que l'originalité thématique résidait prioritairement dans l'étude de la diazotrophie, tant au niveau de sa mesure que de la connaissance des organismes responsables de cette fonction (biologie moléculaire) et de son contrôle par la disponibilité nutritive. Les bilans de production (flux d'oxygène) et la meilleure prise en compte de la physique dans l'étude des processus ont également été mis en avant. **En conséquence, les projets de thèse pour lesquels la communauté BOUM demande le label CYBER sont les suivants.***

Un sujet de thèse sur l'impact de la dynamique à petite échelle sur la productivité primaire dans les régions oligotrophes est proposé par Pascale Bouruet-Aubertot (LOCEAN) et Louis Prieur (LOV). Pour ce qui concerne la fixation d'azote, une réunion a été organisée à Marseille en présence de Isabelle Biegala (IRD), Céline Ridame (LPO), Patrick Raimbault (LOB) et Thierry Moutin (LOB). Face aux spécificités des techniques de mesures des flux biogéochimiques et de biologie moléculaire, nous avons décidé de proposer deux sujets de thèses pour des étudiants qui devront travailler en étroite collaboration. Le premier sujet concerne **la diazotrophie dans le cycle biogéochimique de l'azote en Méditerranée** et le principal encadrant est Patrick Raimbault (LOB). Le deuxième sujet concerne **l'écologie et la diversité des diazotrophes** et le principal encadrant est Isabelle Biegala (IRD). Un sujet de post-doctorat est également demandé sur les

facteurs de contrôle de la diazotrophie avec comme principal encadrant Céline Ridame (LOCEAN, étude en microcosmes) en collaboration avec Patrick Raimbault pour les mesures de diazotrophie. Puisque la disponibilité en phosphate exerce un contrôle majeur sur les populations planctoniques (diazotrophes compris) en Méditerranée, et donc sur les flux de carbone, une thèse sur le **couplage des flux biogéochimiques de carbone et de phosphate** est proposée. Les encadrants sont Thierry Moutin (LOB) et Philippe Lebaron (LOBB). Nous demandons le label CYBER pour un projet de thèse en **modélisation du couplage/découplage des cycles du carbone et des éléments biogènes associés dans la couche éclairée de milieu oligotrophes contrastés**. Les encadrants sont Melika Baklouti (LOB) et Frédéric Diaz (LOB). Ce projet de modélisation précisé ci-dessous et détaillé en annexe 5 vise à améliorer la représentation de certains processus et flux associés (diazotrophie, etc) dans la plateforme numérique ECO3M (Baklouti et al., 2006). Le label CYBER est demandé également pour le projet de thèse « **Balance métabolique des régions océaniques oligotrophes** » proposé par Dominique Lefevre. Pour ce qui concerne l'aspect minéralisation, le sujet proposé par France Van Wambeke a été modifié pour prendre en compte de manière plus explicite le problème de la **colimitation C-P des procaryotes hétérotrophes en Méditerranée**. Les activités ectoenzymatiques, plus particulièrement l'activité phosphatase alcaline, l'assimilation de familles de composés organiques et la production bactérienne seront abordées en liaison avec la diversité phylogénétique des procaryotes hétérotrophes.

Le comité LEFE CYBER a regretté qu'il ne soit pas fait plus appel aux mesures bio-optiques. L'équipe optique de BOUM est constituée de 2 personnes. Hubert Loisel (ELICO) assure les mesures de PAR, d'absorption dans le dissous et le particulaire, de radiance et d'irradiance, de diffusion d'atténuation et de fluorescence. Mike Behrenfeld (USA) assure les mesures des paramètres photophysologiques (Fv/Fm, σ PSII, τ PSII, relations P vs I basées sur la fluorescence). Mike Behrenfeld est un chercheur américain, spécialisé dans l'optique marine, qui vient en particulier de publier très récemment un article dans Nature (Behrenfeld et al., 2006). Les spécialistes français des milieux oligotrophes collaborent avec lui depuis la mission OLIPAC (Moutin et Coste, 1996). Nous n'avons pas souhaité renforcer plus l'équipe d'optique dans la mesure où la priorité du projet BOUM concerne essentiellement le couplage biogéochimie-biologie dans un environnement physique contrôlé et que le nombre de places à bord du « Pourquoi Pas ? » est limité à 40 personnes.

Le comité LEFE Cyber a jugé que le projet manquait d'une stratégie claire d'analyse des résultats des campagnes, de synthèse des observations, en vue de dépasser le cadre très local de quelques stations longues et d'atteindre des résultats applicables à l'ensemble du bassin.

La réponse peut être faite à plusieurs niveaux.

-Au niveau des analyses des résultats et du calendrier. Le formulaire simplifié de demande de campagne à la mer demandé par le programme LEFE CYBER ne comprenait pas l'annexe 4 (Analyse et traitement des échantillons et données) incluse dans la demande complète OPCB, et cela a pu porter à confusion. Celle-ci a été rajoutée dans la nouvelle demande LEFE (Document 4 de l'annexe 2). Elle détaille l'acquisition, la mise à disposition et la diffusion des données, ainsi que le calendrier prévisionnel de publication des résultats. L'ensemble des données sera archivé dans la base de données "CYBER". Les données correspondant aux paramètres "SESAME" seront également archivées dans la base de données SESAME sous le format MEDATLAS. Le calendrier des publications figure dans la même annexe.

-Au niveau de l'extrapolation des résultats à l'ensemble des bassins. Les objectifs de la campagne BOUM sont d'étudier la production et le devenir de la matière organique en Mer Méditerranée, en participant d'une part à l'acquisition de variables biogéochimiques à l'échelle de la mer Méditerranée, et d'autre part en étudiant en détail des processus insuffisamment connus dans quelques stations longues. Parmi les variables biogéochimiques, certaines dites de première priorité (cf ci-dessous) seront acquises par 10 navires océanographiques (Pays d'origine : Bulgarie,

Espagne, France, Grèce, Israël, Italie, Roumanie, Russie, Tunisie, Turquie) qui vont sillonner simultanément la mer Méditerranée et la mer Noire dans le cadre du WP2 (Coordinated acquisition of new multidisciplinary field data in the South European Seas) du programme européen SESAME* (figure 3). Il est attendu une description biogéochimique quasi synoptique des paramètres biogéochimiques dans toute la Méditerranée (concentrations en éléments nutritifs dans la couche éclairée, profondeur des nutriclines, rapports dissous/particulaire et organique/minéral dans la concentration des éléments biogènes C,N,P,Si, pigments,...). Le choix des paramètres de première et seconde priorité, dont la liste est détaillée page 19, a fait l'objet de discussions au sein de la communauté SESAME. Il est le résultat d'un compromis entre la faisabilité par les différents partenaires et les spécificités liées à chaque mission. La description biogéochimique de la mer Méditerranée ainsi obtenue sera comparée avec les précédentes données et servira de base aux futurs travaux dédiés à l'observation des changements biogéochimiques, et en particulier de la disponibilité nutritive en mer Méditerranée. Il est prévu dans le cadre du WP2 du programme SESAME de réaliser 2 séries de campagnes océanographiques, une en mars-avril 2008 et l'autre en août-septembre de la même année. Ceci dans le but d'obtenir un "snap-shot" de variables océanographiques physiques et biogéochimiques de l'ensemble de la Méditerranée et de la mer Noire à 2 saisons très contrastées, la période pré-efflorescence printanière et la période de stratification prononcée. Pour ce qui concerne la participation française, l'acquisition des paramètres biogéochimiques est prévu en mars-avril 2008 au cours de la mission ARCHIMED dont l'objectif principal est l'étude des contaminants, et en août-septembre 2008 au cours de la campagne BOUM dont l'objectif est l'étude de la production et de son devenir dans des environnements oligotrophes contrastés. A ce sujet, des discussions ont été menées avec Daniel Cossa de l'IFREMER pour établir une stratégie d'échantillonnage commune en Méditerranée occidentale.

L'ensemble des données acquises au cours de ces campagnes va constituer un jeu de données unique. L'ensemble des efforts menés pour l'utilisation de protocoles d'analyses communs, de stratégies de prélèvement (horizontaux et verticaux), de priorisation des paramètres à suivre, d'intercalibration (en cours pour les sels nutritifs) devrait permettre d'implémenter des modèles écologiques (WP4 et WP6 de SESAME), en particulier à l'échelle de la Méditerranée (Vichi et al., 2006). Il est également prévu d'estimer la distribution du carbone d'origine anthropique en utilisant le modèle 3D de la Mer Méditerranée développé par le GHER (Université de Liège en Belgique) actuellement disponible sur une station de travail bi-opteron de l'Université de Perpignan (France). Nous travaillerons également sur des échelles plus fines adaptées à l'étude des processus physiques et biogéochimiques, c'est à dire à l'échelle de microcosmes (0D) et en 1D vertical au niveau des trois stations longues. Le but est d'améliorer la représentation de certains processus (diazotrophie, compétition phytoplancton-bactéries pour la ressource nutritive, multi-limitation) dans le modèle ECO3M (Baklouti et al., 2006). L'objectif majeur de la modélisation 1DV est de représenter la production et le devenir (exportation, reminéralisation, transferts dans le réseau trophique) du carbone organique produit dans la zone euphotique. L'utilisation d'un modèle multi-éléments (non redfieldien) permettra d'illustrer le cas échéant le découplage des cycles des éléments biogènes en milieu oligotrophe.

Le comité CYBER a souhaité que le choix des stations longues soit examiné critiqueusement. La priorité est clairement donnée pour la partie orientale de la mer Méditerranée. La station en mer d'Alboran ne semble pas justifiée dans le contexte d'oligotrophie.

C'est en effet une réflexion sur ce sujet qui a été menée pour déterminer le choix des sites des stations longues. Nous voulons étudier des processus dans une même masse d'eau, et donc nous recherchons des sites à faibles courants et/ou barotropes, et représentatifs de conditions oligotrophes contrastées. C'est donc logiquement que le positionnement des sites se fera aux centres de tourbillons anti-cycloniques. Les sites seront d'autant plus oligotrophes que l'isolement de la masse d'eau sera plus ancien. L'oligotrophie à la station DYFAMED est saisonnière et ce site peut être considéré comme mésotrophe à l'échelle annuelle. Au sud des îles Baléares, il n'y a pas de

formation d'eaux denses et l'oligotrophie peut être considérée comme permanente. Pour tenir compte à la fois des remarques du comité CYBER, et de la nécessité de travailler dans un gradient d'oligotrophie, nous proposons de réduire à une station longue très centrale (cœur de tourbillon au sud des îles Baléares) notre étude de processus en mer Méditerranée occidentale. Ceci nous permet de rajouter une radiale côte (embouchure du Rhône)-large et de nous ajuster pleinement aux objectifs SESAME, avec les deux avantages de permettre un embarquement probable proche de Marseille, et la possibilité d'échantillonner deux fois la station centrale en Méditerranée occidentale. Les deux jours de transit après cette station pourront ainsi être plus facilement valorisés. Nous profiterons des derniers acquis des campagnes EGYPT pour pré-positionner au mieux les deux sites d'études en mer Méditerranée orientale.

Remarque :

Des discussions sont en cours avec **Matthieu Roy-Barman** (références Méditerranéennes ci-dessous) pour l'analyse en différé de traceurs géochimiques (^{230}Th et ^{231}Pa).

** Le programme SESAME (Southern European Seas: Assessing and Modelling Ecosystems change) a pour objectifs scientifiques : (1) d'appréhender les changements ou modifications des écosystèmes des SES dans les 50 dernières années ainsi que les mécanismes potentiels qui relient ces changements aux changements des forçages naturels ou liés à l'activité humaine, (2) d'appréhender l'état actuel des écosystèmes des SES à travers l'analyse de données existantes et nouvellement acquises ainsi qu'au travers de simulations (modèles), (3) de prédire les changements dans la réponse des écosystèmes des SES aux probables changements climatiques durant les cinq prochaines décades, (4) d'appréhender et de prédire les changements dans la capacité des systèmes à procurer des biens et des services (ayant une forte importance sociétale potentielle). Les biens : le tourisme et les pêches. Les services: la stabilité des écosystèmes à travers la conservation de la biodiversité, et le moindre effet du changement climatique grâce à la séquestration du carbone dans les eaux et les sédiments.*

Références :

- Arraes-Mescoff, R. M. Roy-Barman, L. Coppola, K. Tachikawa, M. Souhaut, R. Sempéré S. Yoro, and C. Jeandel (2001). The behavior of Al, Mn, Ba, Sr, REE and Th isotopes during *in vitro* degradation of large marine particles. *Marine Chemistry*, 73, 1-19
- Baklouti M, Faure V, Pawlowski L, Sciandra A. Investigation and sensitivity analysis of a mechanistic phytoplankton model implemented in a new modular numerical tool (Eco3M) dedicated to biogeochemical modelling (2006). *Progress in Oceanography*, 71(1), 34-58.
- Baklouti M, Diaz F, Pinazo C, Faure V, Queguiner B. Investigation of mechanistic formulations depicting phytoplankton dynamics for models of marine pelagic ecosystems and description of a new model (2006). *Progress in Oceanography*, 71(1), 1-33.
- Behrenfeld, M.J., K. Worthington, R.M. Sherrell, F.P. Chavez, P. Strutton, M. McPhaden & D.M. Shea. Controls on tropical Pacific Ocean productivity revealed through nutrient stress diagnostics. *Nature*, 442, 1025-1028.
- Moutin T., & B. Coste : Campagne océanographique OLIPAC a bord du N/O ATALANTE du 3 novembre au 1 décembre 1994. RECUEIL DE DONNEES. Edité en janvier 1996.
- Tachikawa, K., M. Roy-Barman, A. Michard, D. Yeguichian, D. Thouron, C. Jeandel (2004) Nd isotopes in the Mediterranean Sea: Comparison between seawater and sediment signals. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 68, 3095-3106.
- Roy-Barman, M., L. Coppola and *M. Souhaut (2002) Thorium isotopes in the Western Mediterranean Sea: an insight in the marine particle dynamics, *Earth. Planet. Sci. Lett.*, 196, 161-174.
- Vichi, M., N. Pinardi & S. Masina. 2006. A generalized model of pelagic biogeochemistry for the global ocean ecosystem. Part I: theory. Submitted to *Journal of Marine Systems*.

DOSSIER SCIENTIFIQUE

1. Intérêt scientifique :

Contexte général:

Introduction:

Les apports et pertes, la dynamique et la spéciation chimique des éléments nutritifs majeurs et mineurs déterminent la disponibilité nutritive, et influencent à la fois les organismes autotrophes et hétérotrophes dans l'océan (Bruland et al., 2001). Les processus métaboliques, les dynamiques des populations et des communautés, et la structure des chaînes alimentaires dépendent fortement de la disponibilité nutritive. A titre d'exemple, un élément nutritif peut être indispensable pour le fonctionnement d'une enzyme spécifique et/ou un chemin métabolique, et ainsi exercer un contrôle considérable sur la composition des espèces marines. Les organismes osmotrophes marins (Karp-Boss et al., 1996) ont des caractéristiques spécifiques pour assimiler les éléments nutritifs et ainsi, la disponibilité en éléments nutritifs influence fortement la composition des espèces. Ceci est d'autant plus important que la disponibilité est faible par rapport aux besoins des organismes, et donc, en particulier dans les milieux oligotrophes. Il est évident que les contraintes ultimes de la production primaire autotrophe sont la lumière et la disponibilité nutritive (De Baar, 1994). Les variations de lumière sont indiscutablement un facteur essentiel contrôlant le taux de croissance des algues. Néanmoins, les conditions de lumière à la surface de l'océan peuvent être approximées à partir de calculs simples (Kirk, 1994), et les conditions de lumière en fonction de la profondeur peuvent être vues comme une conséquence de l'activité biologique dans l'océan de surface. Déterminer la disponibilité nutritive apparaît ainsi comme un facteur clé pour comprendre et éventuellement prédire la réponse biologique (en termes de structure de la chaîne trophique ou de diversité des espèces, et/ou de flux de carbone) dans la couche éclairée des océans (Moutin & Raimbault, 2002).

Réciproquement, les organismes planctoniques modifient la disponibilité nutritive. Les organismes peuvent épuiser les éléments nutritifs ou en introduire de nouveaux. A titre d'exemple, les organismes diazotrophes introduisent quantitativement de l'azote « nouveau » (Capone, 2001). Ce flux pourrait représenter 50% de l'apport allochtone d'azote dans l'océan (Gruber and Sarmiento, 1997). Les organismes peuvent produire des ligands organiques capables de modifier la disponibilité nutritive. La plupart du fer est assimilée sous une forme organique dans les environnements carencés en fer (Achilles et al., 2003). Les organismes sont responsables des principaux flux d'éléments nutritifs dans les eaux de surface des milieux oligotrophes aux travers des processus de recyclage de la matière organique (Jumars et al. 1989). Le transfert et la transformation continue de substrats minéraux en formes organiques et vice versa explique pourquoi les processus biologiques influencent fortement les cycles biogéochimiques. Une meilleure compréhension de la vie marine nécessite de poursuivre de manière simultanée des recherches en biogéochimie et sur la structure des chaînes trophiques. Si la connaissance des facteurs physiques, chimiques et biologiques qui influencent l'assimilation des éléments nutritifs et la re-minéralisation dans l'océan augmente rapidement, elle n'est pas suffisante pour permettre de construire des modèles prédictifs réalistes. Une vision holistique de l'impact des sels nutritifs majeurs et mineurs sur la structure et la fonction de la chaîne alimentaire dans différents régimes océaniques est nécessaire (IMBER, 2005).

La quantification de la transformation de la matière organique dans les chaînes alimentaires marines est également essentielle pour établir le cycle global du carbone et évaluer l'impact de l'excès de CO₂ atmosphérique d'origine anthropique sur le changement climatique. Evaluer l'exportation de carbone de la zone éclairée vers l'océan profond est essentiel pour caractériser la capacité de l'océan à absorber cet excès de CO₂ (Longhurst, 1991). Les régions océaniques oligotrophes représentent plus de 50 % de la superficie de l'océan global et environ 40% de la production primaire océanique (Antoine et al., 1996). Cependant, le fonctionnement et la productivité des systèmes oligotrophes, et particulièrement l'équilibre entre production et minéralisation dans ces régions, font encore l'objet de débat (Karl et al., 2003; Williams et al.,

2004). Le rôle des régions oligotrophes dans l'exportation globale du carbone par voie biologique n'est probablement pas très important puisque la majeure partie du carbone photosynthétisé est recyclé dans l'océan de surface, et rapidement ré-échangé avec l'atmosphère (Figure 1). Néanmoins, le recyclage peut conduire à l'accumulation de Carbone Organique Dissous (COD), (Thingstad et al., 1997), et ceci doit être considéré puisque l'accumulation durant la période stratifiée suivi de l'exportation de COD a été montré comme potentiellement plus important que le transport par les particules qui sédimentent dans les régions oligotrophes (Copin-Montegut & Avril, 1993; Carlson *et al.*, 1994; Avril, 2002). Dans le contexte du changement global, l'hypothèse d'une intensification de la stratification thermique a été émise. Le rôle du COD dans l'exportation de carbone pourrait également être modifié.

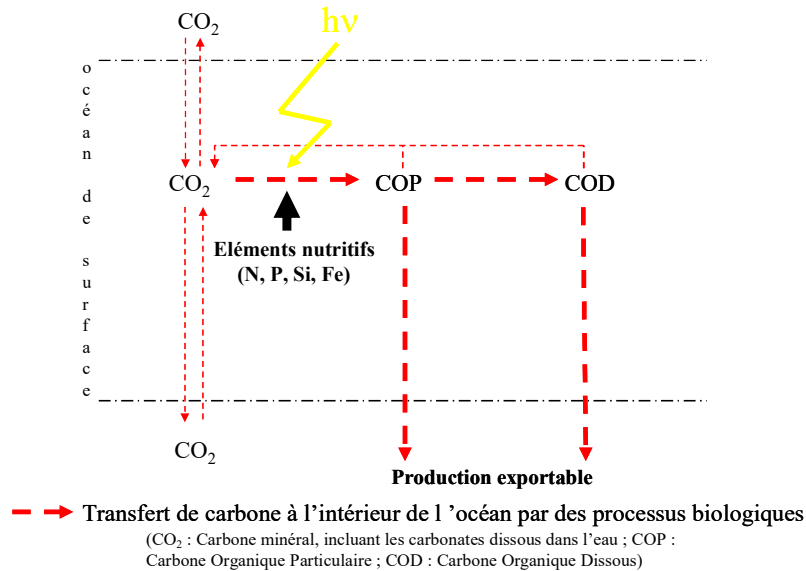


Fig. 1. Schéma de principe représentant les flux de carbone dans la couche éclairée et le contrôle de la production par la disponibilité des éléments nutritifs (Moutin, 2000).

La mer Méditerranée et l'océan oligotrophe (synthèse des précédentes missions).

Les régions marines oligotrophes sont caractérisées par une stratification thermique plus ou moins prononcée de la colonne d'eau qui délimite (a) un couche de surface chaude, mélangée, et dépourvue d'éléments nutritifs et (b) un niveau sub-superficiel avec moins de lumière et plus d'éléments nutritifs. Les régions tropicales, ainsi que les grands tourbillons anticycloniques, la mer des Sargasses et la Méditerranée ont depuis longtemps été considérée comme des systèmes oligotrophes typiques (Herbland & Voituriez, 1977). La profondeur à laquelle la concentration de nitrate approche zéro est d'environ 10 m en mer d'Alboran durant la période stratifiée et elle peut atteindre plus de 150 m dans le bassin Levantin de la mer Méditerranée (Fig. 2). Ceci est lié aux conditions hydrologiques et au fait que les deux principales sources externes de sels nutritifs, les apports par le fleuve Rhône et les entrées d'eaux Atlantiques de surface, sont dans la partie occidentale de la mer Méditerranée. La grande profondeur de la nitracline dans le basin Levantin est uniquement trouvée ailleurs dans des conditions ultraoligotrophes, comme par exemple, dans le centre de la gyre du Pacifique sud. Il peut être ainsi établi que la mer Méditerranée présente, à une échelle régionale, les principales caractéristiques océanographiques d'environnements contrastés dans l'océan oligotrophe.

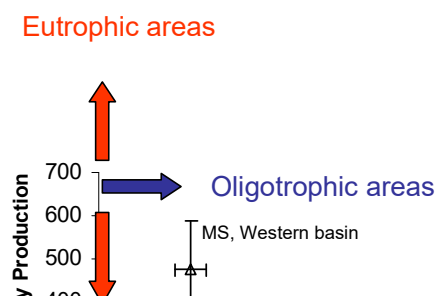


Fig. 2. Production primaire intégrée en fonction de la profondeur du sommet de la nitracline
MS = Mer Méditerranée: données de Moutin & Raimbault (2002), mission MINOS (Bassin occidental : 7 stations, bassin Ionien: 8 stations, bassin Levantin: 4 stations).
PO = Ocean Pacifique : Données non publiées de production dans le gyre Durant la mission BIOSOPE.
AO = Ocean Atlantique: données de Steinberg et al. (2001) à la station BATS.

La distribution de la production primaire, des éléments nutritifs et du flux de carbone exporté par sédimentation de la couche éclairée vers l'océan profond, a été étudiée en Mer Méditerranée durant la première mission trans-Méditerranéenne en Mai-Juin 1996 (Mission **MINOS : Mediterranean Investigation of Oligotrophic Systems**). Une diminution de la production primaire intégrée, de l'export de carbone organique particulaire et de la disponibilité nutritive a été observée en allant vers la partie orientale de la Méditerranée, alors que la concentration intégrée en chlorophylle demeurait quasiment constante. La production primaire intégrée atteignait $150 \text{ mgC m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ dans le bassin Levantin, une valeur considérée comme une limite pour le taux de production primaire en conditions ultra-oligotrophes (Moutin & Raimbault, 2002).

Le contrôle de la production photosynthétique par la disponibilité du phosphate en Mer Méditerranée a été démontrée expérimentalement par des expériences montrant une stimulation de la photosynthèse après des ajouts de phosphate (Berland et al., 1980; Diaz et al. 2001). Cependant, non seulement la production primaire, mais également la production bactérienne peuvent être contrôlées par la disponibilité du phosphate. Au cours des missions **PROSOPE (PRODUCTIVITÉ DES SYSTÈMES OCÉANIQUES PELAGIQUES)** et **TMC (TRANS MEDITERRANEAN CRUISE)** en septembre et juin 1999, il a été démontré que la limitation par le phosphate de la production bactérienne, déjà observée dans plusieurs sites (Thingstad 1998; Zohary and Robarts, 1998) était une caractéristique générale de la mer Méditerranée orientale et occidentale (Van Wambeke et al, 2002). La concentration en phosphate minéral dissous dans le haut de la couche éclairée diminuait d'Ouest en Est en atteignant des niveaux de concentration bien inférieurs à 1 nanomole par litre (Moutin et al, 2002). *Synechococcus spp.* représente la plus abondante fraction du phytoplancton dans les eaux de surface de la Méditerranée durant la période de stratification estivale (Vaulot et al. 1996). Ces organismes ont des avantages spécifiques pour l'assimilation du phosphate minéral dissous qui peuvent expliquer leur abondance dans les environnements carencés en phosphate (Moutin et al., 2002). L'adaptation à la carence en phosphate a également été démontrée pour des organismes de niveau trophique supérieur. Par exemple, les nanoflagellés mixotrophes utilisent leur capacité phagotrophe pour obtenir le phosphate des proies ingérées alors qu'ils arrêtent immédiatement si du phosphate minéral dissous devient disponible (Christaki et al. 1999). L'étude des tintinnides durant la mission PROSOPE a montré que la diversité de ce groupe reflète plus précisément la diversité de la ressource que les interactions compétitives ou la prédation (Dolan et al., 2002). Des résultats récents montrent une augmentation significative de l'abondance des œufs de copépodes sans augmentation préalable de la biomasse des autotrophes après un apport impulsif de phosphate

réalisé dans les eaux de surface de la mer Méditerranée orientale (CYCLOPS). Ceci indique que cette production peut ainsi être couplée à des niveaux trophiques inférieurs aux travers d'interactions généralement non prises en compte (Thingstad et al., 2005). **Ces mécanismes ne sont pas fondamentalement nouveaux mais ils ont été très peu étudiés, notamment pour ce qui concerne les conséquences pour le cycle océanique du carbone du court-circuit possible de la production primaire entre l'apport nutritif et la production exportable.** Dans le passé, les recherches concernant les chaînes alimentaires marines ont eu tendance à se focaliser soit sur le phytoplancton et la boucle microbienne, soit sur le zooplancton et ses prédateurs. Les chaînes alimentaires marines doivent être considérées comme des systèmes entiers parce que les perturbations à n'importe quel niveau peuvent se propager à la fois vers le bas ou le haut des niveaux trophiques.

La limitation par les éléments nutritifs de la production organique a été largement étudiée dans la mer Méditerranée et **bien qu'il existe un consensus sur le contrôle majeur exercé par la disponibilité du phosphate, celle de l'azote est également faible et la disponibilité de l'acide silicique pourrait jouer un rôle central dans le contrôle de la production exportable** (Leblanc et al., 2003). La diversité biologique peut refléter la multiplicité des limitations nutritionnelles. Ainsi, l'approche multi-élémentaire est également nécessaire pour commencer à appréhender cette diversité.

La dynamique des éléments nutritifs, et son rôle dans la variabilité des rapports stoechiométriques de la matière organique, sera un aspect central de notre étude biogéochimique. Il y a de nombreuses observations du découplage entre les cycles biogéochimiques de l'azote et du phosphate en mer Méditerranée qui concernent, (1) le rapport nitrate:phosphate élevé des eaux profondes différent de celui observé dans les autres océans, (2) les rapports nitrate:phosphate élevés, au dessus de rapport de Redfield, des eaux de sub-surface en Méditerranée orientale (Krom *et al.* 1991, Moutin & Raimbault, 2002) et occidentale (Mc Gill, 1961, Mc Gill, 1965, Raimbault and Coste, 1990), (3) Les rapports N:P élevés de la fraction particulaire (Krom et al., 2005), et (4) la profondeur plus importante de la phosphacline par rapport à la nitracline dans la partie orientale de la Méditerranée (Moutin & Raimbault, 2002). **Il n'y a, à l'heure actuelle, aucune explication définitive à cette caractéristique particulière de la mer Méditerranée, également observée dans la mer des Sargasses.** Deux processus très différents ont été proposés pour expliquer les rapports Nitrate:Phosphate typiques observés dans les eaux profondes. Premièrement, il y a le processus biologique de fixation d'azote moléculaire (Bethoux & Copin-Montegut, 1986; Bonin et al., 1989; Bethoux et al. 1992, Sachs & Repeta, 1999, Kerhervé et al., 2001; Pantoja et al., 2002) qui peut conduire à l'accumulation d'azote dans les eaux profondes, et deuxièmement le processus chimique d'adsorption de phosphate sur les particules riches en fer qui pourrait conduire au déficit de phosphate en Méditerranée (Krom *et al.*, 1991). Puisque l'élimination du phosphate de la colonne d'eau par ce dernier processus ne semble pas représenter un puit significatif (Herut et al., 1999; Ridame et al. 2003), **la fixation d'azote apparaît comme le facteur clé pour expliquer les rapports Nitrate:Phosphate élevés en mer Méditerranée. Néanmoins, très peu de mesures sont actuellement disponibles.** Quelques mesures du taux de fixation d'azote ont été récemment réalisées à la station **DYFAMED** en Méditerranée occidentale (Programme **MELISSA : MEditerranée LImitationS SAisonnières**). Alors que les taux sont typiquement faibles, des quantités significatives d'azote nouveau sont apportées par ce processus ; elles peuvent équilibrer le bilan d'azote et expliquer le rapport Nitrate:Phosphate des eaux profondes (Garcia et al., 2006). Le rôle de la fixation d'azote dans le cycle marin de l'azote a été récemment ré-évalué (Karl et al., 2002). La découverte d'organismes marins diazotrophes, autres que *Trichodesmium* spp. (Zehr et al., 2001; Montoya et al. 2004) modifie notre perception de la signification de la fixation d'azote dans l'océan. **Si une quantité significative d'azote nouveau est introduite dans l'océan par des organismes de petites tailles supposés précédemment recycler de l'azote, notre conception du fonctionnement des systèmes oligotrophes doit être révisée** (Garcia et al., en révision). Les données de $\delta^{15}\text{N}$ obtenues sur des échantillons de chlorophylle fossilisée (mission **MINOS**) ont mis en évidence une intense fixation d'azote en Méditerranée orientale (Sachs & Repeta, 1999). Ainsi,

il y a un intérêt majeur à décrire et quantifier l'apport d'azote par la fixation ainsi que les organismes responsable de cette fonction biogéochimique.

La quantité d'azote atmosphérique dissous étant inépuisable, la question du contrôle de ce flux est posée et la disponibilité en phosphate (Karl et al. 2002) ou en fer (Falkowski 1997) apparaissent comme les facteurs clefs de ce contrôle à l'échelle de l'océan global. Si l'apport d'azote par la fixation d'azote est important en Méditerranée, et que l'on considère la faible disponibilité en phosphate comme facteur clé dans le contrôle de ce flux, alors le contrôle de la production nouvelle, initialement définie comme la fraction de la production associée à l'apport nouveau d'élément nutritif (généralement nitrate) devrait être définie à partir du phosphate nouveau (Dugdale and Goering, 1967). **Il est nécessaire de parfaire notre connaissance du cycle du phosphate dans l'océan de surface, trop peu étudié (Benitez-Nelson, 2000 ; Karl, ASLO meeting 2006), pour améliorer notre compréhension de la production océanique, en particulier dans les milieux oligotrophes.** L'élément chimique phosphore (^{31}P) n'existe dans les eaux que sous formes de phosphates (degré d'oxydation V), organiques ou minéraux, particuliers ou dissous, non réductibles dans les conditions naturelles. Ainsi, les nombreuses réactions d'oxydoréduction complexes intervenant dans le cycle de l'azote n'existent pas dans le cycle du phosphate (Moutin, 2000), et permettent d'envisager le couplage avec la production et l'établissement de bilan sous un angle nouveau.

La mer Méditerranée offre une grande diversité de conditions oligotrophes pour étudier la production et le devenir de la matière organique dans les chaînes alimentaires, et procure un cas d'école pour étudier les liens entre les cycles des éléments biogènes C,N,P,Si et Fe dans ces conditions de faible disponibilité nutritive. La comparaison entre différents systèmes le long d'un gradient longitudinal de faibles disponibilités nutritives va nous procurer de nouvelles perspectives pour identifier et comprendre les interactions fondamentales entre les cycles biogéochimiques et les écosystèmes marins oligotrophes.

objectifs généraux: (A x.x renvoie à un supplement en **Annexe 3 x.x**)

OBJECTIF 1. DESCRIPTION BIOGEOCHIMIQUE ET DIVERSITE BIOLOGIQUE EN MER MEDITERRANEE

Le premier objectif de la campagne BOUM est de donner une description de paramètres biogéochimiques et de la diversité biologique selon deux axes (1) Nord-Sud de l'embouchure du Rhône au centre du bassin occidental et Ouest-Est de Gibraltar aux côtes de la Syrie, durant la période où la stratification est maximale.

Objective 1.1. Description biogéochimique

Les variables classiques température, salinité, concentration en oxygène dissous, ainsi que les pools organiques et minéraux du carbone et des éléments biogènes (C,N,P,Si), l'alcalinité, les pigments seront mesurés ainsi que d'autres variables plus spécifiques à quelques profondeurs choisies (fixation d'azote, diversité des diazotrophes, temps de recyclage du phosphate minéral dissous...). L'intérêt est de pouvoir décrire les variations des caractéristiques biogéochimiques (disponibilité nutritive dans la couche éclairée, profondeur des nutriclines, rapports dissous/particulaire et organique/minéral dans la concentration des éléments biogènes, pénétration du CO_2 d'origine anthropique, biomasses phytoplanctoniques, taux de fixation d'azote,...) à partir des deux principales sources d'éléments nutritifs qui sont d'une part l'entrée des eaux atlantique de surface à Gibraltar et d'autre part les apports par le fleuve Rhône. Cette description biogéochimique s'étendra jusqu'à la limite orientale de la Méditerranée où les conditions oligotrophes sont les plus extrêmes. Le bassin Levantin n'avait pas été échantillonné au cours de la mission PROSOPE en 1999. Par ailleurs, **notre communauté a acquis récemment de nouvelles compétences dans les mesures biogéochimiques en milieu ultra-oligotrophe qui devraient nous permettre d'améliorer significativement notre connaissance de la biogéochimie de la mer Méditerranée.** Nous ne

connaissions pas la distribution spatiale de certaines variables biogéochimiques comme la fixation d'azote, ou la concentration réelle en phosphate dans les eaux de surface qui exerce pourtant un rôle prépondérant dans le contrôle de la production planctonique. Par ailleurs, des études récentes ont montré **l'importance de la mer Méditerranée dans l'absorption de l'excès de CO₂ d'origine anthropique** à partir de données à l'entrée et à la sortie du Golfe de Cadix (Alvarez et al. 2005, Ait-Ait-Ameur & Goyet, 2005). Il est nécessaire de quantifier ce processus à l'échelle de la Méditerranée (A 1.1) et d'évaluer la quantité transportée dans l'océan Atlantique par le détroit de Gibraltar.

Question spécifique: *Quel est la distribution spatiale des principales caractéristiques biogéochimiques en mer Méditerranée en fin de période stratifiée ?*

Lien avec le programme SESAME

Simultanément, 10 navires océanographiques (Pays d'origine : Bulgarie, Espagne, France, Grèce, Israël, Italie, Roumanie, Russie, Tunisie, Turquie) vont sillonner la mer Méditerranée et la mer Noire dans le cadre du programme européen SESAME (fig. 3). Il est attendu une description biogéochimique quasi synoptique des paramètres biogéochimiques dans toute la Méditerranée. Cette description sera comparée avec les précédentes données et servira de base aux futurs travaux dédiés à l'observation des changements biogéochimiques, et en particulier de la disponibilité nutritive en mer Méditerranée. Il est prévu dans le cadre du WP2 du programme SESAME de réaliser 2 séries de campagnes océanographiques, une en mars-avril 2008 et l'autre en août-septembre de la même année. Ceci dans le but d'obtenir un "snap-shot" de variables océanographiques physiques et biogéochimiques de l'ensemble de la Méditerranée et de la mer Noire à 2 saisons très contrastées, la période pré-efflorescence printanière et la période de stratification prononcée. Pour ce qui concerne la participation française, l'acquisition des paramètres biogéochimiques est prévu en mars-avril 2008 au cours de la mission ARCHIMED dont l'objectif principal est l'étude des contaminants, et en août-septembre 2008 au cours de la campagne BOUM dont l'objectif est l'étude de la production et de son devenir dans des environnements oligotrophes contrastés. Ces deux campagnes sont au niveau européen de SESAME sous la responsabilité de Thierry Moutin. A ce sujet, des discussions ont été menés avec Daniel Cossa de l'IFREMER pour établir une stratégie d'échantillonnage commune en Méditerranée occidentale.

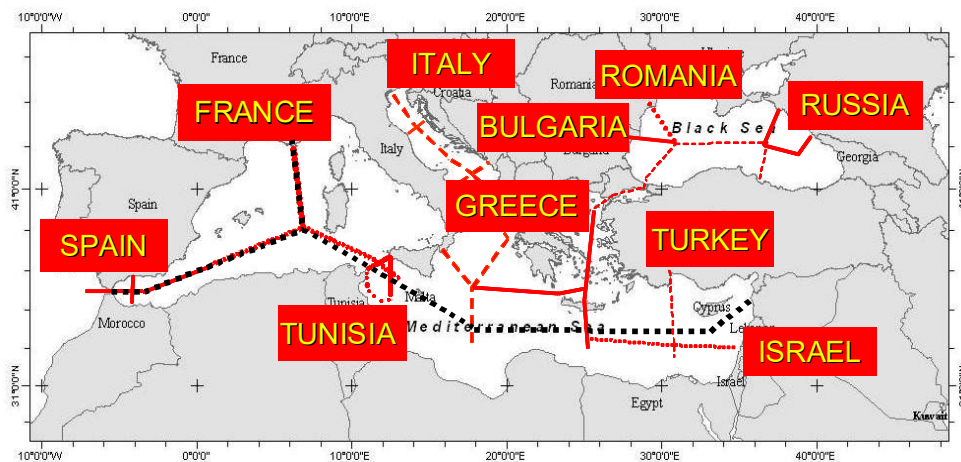


Fig. 3. Carte de localisation des navires sous la responsabilité des différents pays impliqués dans le programme européen SESAME et trajet approximatif de la campagne BOUM (en pointillé noir). La priorisation des variables a fait l'objet de discussions au sein de la communauté SESAME. Il est le résultat d'un compromis entre la faisabilité par les différents partenaires et les spécificités liées à chaque mission. Les variables de 1^{ère} priorité sont la température, la salinité, la fluorescence, la concentration en oxygène dissous et les concentrations en sels nutritifs (nitrate, nitrite, phosphate et silicate) ainsi que la concentration en chlorophylle a. Les variables de 2^{ème} priorité sont le carbone organique particulaire, l'azote et le phosphore organique particulaire, le carbone organique dissous,

l'azote et le phosphore organique dissous, la pCO₂, le pH et l'alcalinité, le carbone minéral dissous, la biomasse bactérienne, la densité et la diversité phytoplanctonique, les pigments par fractions de taille, la biomasse et la diversité zooplanctonique. Les variables de 3^{ème} priorité sont la production bactérienne, primaire et zooplanctonique et les radioéléments traceurs de masses d'eau dont l'analyse est prévue dans quelques transects en mer Méditerranée orientale.

Objective 1.2. Diversité biologique

Un objectif majeur sera une description la plus complète possible des structures des communautés planctoniques des écosystèmes pélagiques Méditerranéens, en incluant une structure fonctionnelle pour l'étude précise de certains flux. Une description détaillée de la diversité biologique est nécessaire parce que cette biodiversité est supposée augmenter la redondance fonctionnelle des écosystèmes marins. Une telle redondance pourrait jouer un rôle important dans la capacité d'un écosystème à supporter des perturbations naturelles ou d'origine anthropique (Fonseca and Ganade, 2001). La nécessité de décrire une structure fonctionnelle plus « opérationnelle » ne signifie pas qu'il ne soit pas indispensable de décrire la composition des espèces. Les variations de la composition des espèces restent probablement l'indicateur le plus sensible pour identifier des perturbations naturelles ou liées à l'activité humaine.

Une attention spéciale sera portée à l'étude de la diversité des diazotrophes. Des études récentes ont montré qu'une grande diversité de procaryotes pico et nanoplanctoniques étaient capables de fixer l'azote atmosphérique. Cette fonction était précédemment principalement attribuée à *Trichodesmium* spp., une cyanobactérie microplanctonique formant de vastes efflorescences (Zehr et al. 2001), ainsi qu'à *Richelia*, un hétérocyste endosymbionte de certaines espèces de diatomées (Gomez et al., 2005). De manière surprenante, *Trichodesmium* spp n'a jamais été observé dans la mer Méditerranée, où les taux de fixation de diazote sont supposés être élevés (Gruber and Sarmiento 1997, Karl et al. 2002). **Il est ainsi probable que les diazotrophes de petites tailles, récemment découverts (Zehr et al., 2001, Montoya et al. 2004), soient les principaux acteurs de ce flux.** Des travaux très récents ont révélé l'existence de toute une nouvelle gamme de cyanobactéries diazotrophes de très petite taille appartenant au picoplancton (<3 µm), grâce notamment à l'utilisation d'outils moléculaires (Biegala et al. soumis et en prep.). La présence de diazotrophes dans cette classe de taille avait jusqu'à présent été attribué aux bactéries hétérotrophes. Bien que ces organismes aient été découverts dans le Pacifique sud-ouest, il serait très intéressant de rechercher leur présence en Méditerranée (A 1.2). Par ailleurs, la relativement forte accumulation de silice biogénique associée au maximum profond de chlorophylle observé durant la mission PROSOPE dans le bassin Ionien (Leblanc, pers. com.) indique que **nous ne devons pas écarter les diatomées (A 1.3) associées à *Richelia* comme actrices potentielles de la fixation d'azote.** Si les diatomées apparaissent comme les principaux vecteurs de la fixation d'azote, il faudra alors considérer un nouveau lien entre les cycles biogéochimiques de l'azote et du silicium.

Le picoplancton (i.e. globalement les cellules qui passent à travers un filtre de 3 µm de porosité) est à la base de toutes les chaînes alimentaires marines. Il est composé de procaryotes (Bactéries et Archae) et d'eucaryotes. Dans ces deux groupes, les organismes peuvent utiliser directement l'énergie lumineuse (autotrophes), ou bien peuvent recycler la matière organique (hétérotrophes), ou éventuellement effectuer les deux (mixotrophes). Les cyanobactéries marines *Prochlorococcus* et *Synechococcus* représentent la majorité de la biomasse des procaryotes photosynthétiques, particulièrement dans les régions oligotrophes de l'océan mondial (Partensky et al. 1999a, Partensky et al. 1999b). **La distribution très large de ces deux genres suggère qu'ils possèdent des stratégies efficaces pour répondre aux stress environnementaux. Cependant, la description précise de ces réponses est encore largement méconnue (A 1.4).** Des travaux récents suggèrent que les bactéries phototrophiques aérobiques anoxygéniques (AAnPB) sont abondantes dans les systèmes pélagiques marins (Kolber *et al.*, 2000; 2001), et peut être plus abondantes dans les régions oligotrophes (des résultats préliminaires de la mission BIOSOPE dans le gyre du Pacifique sud suggèrent qu'elles peuvent représenter jusqu'à 20% des bactéries hétérotrophes

totales, travail en cours dans le groupe de P. Lebaron). **En considérant le grand impact potentiel que les AAnPB pourrait avoir sur le cycle marin du carbone et les quelques rapports contradictoires sur leur abondance dans l'océan mondial (Schwalbach & Furhman, 2005), il apparaît nécessaire de déterminer l'importance écologique de ces photohétérotrophes (A 1.5).** Parmi les autotrophes, les eucaryotes dominent souvent sur les procaryotes en termes de biomasse et de production (Worden et al., 2004). Dans les dernières années, les méthodes moléculaires ont révélés une très grande diversité chez les picoeucaryotes, en particulier au sein des hétérotrophes. Cependant, mis à part pour les eaux côtières (Not et al. 2004), **nous n'avons encore que très peu d'information sur les groupes dominants dans la plupart des océans et sur leur écologie (A 1.6).**

Les coccolithophores (micro-algues haptophytes calcifiantes, Thierstein and Young 2004) sont des organismes clefs impliqués dans la calcification et le transfert de matière en milieu pélagique oligotrophe (de Vargas et al. in press). C'est dans ces milieux qu'ils sont le plus diversifiés, relativement abondants, et ont développé des adaptations pour coloniser l'ensemble de la zone photique et capturer la lumière à différentes profondeurs, notamment au-dessous du maximum profond de chlorophylle. Certaines espèces sont probablement les organismes photosynthétiques qui se situent au plus profond dans la colonne d'eau et leur micro-squelette calcaire permet des agrégations de la matière organique particulaire et pourraient être le vecteur principal de la pompe biologique (Klaas and Archer 2002). La mer Méditerranée a un temps de renouvellement des eaux beaucoup plus court que les vastes océans (Lacombe,), et les effets de l'acidification des masses d'eau océaniques planétaires corrélative à l'augmentation de CO₂ d'origine anthropique devraient être observée en premier lieu en mer Méditerranée (Conférence C. Lee, Marseille, 2006). **Il est donc particulièrement crucial d'étudier la diversité des coccolithophores (A 1.7) dont la calcification est fortement dépendante du pH.**

Une étude pilote dans la Baie de Villefranche a montré que la richesse des cyanophages augmentaient avec la richesse des cyanobactéries (données non publiées de l'efflorescence phytoplanctonique printanière observée en 2005). Ceci suggère une co-variation de la diversité des hôtes et des phages, et pourrait expliquer certains mécanismes de contrôle des cyanobactéries. Malgré l'importance de ce contrôle, **les données sur la diversité virale des milieux oligotrophes, et en particulier en mer Méditerranée, sont rares (A 1.8).**

La diversité des niveaux trophiques inférieurs, i.e. les producteurs primaires, est généralement supposée induire la diversité des niveaux trophiques supérieurs. Ainsi, la diversité de la ressource serait à la base de la diversité des consommateurs. Cependant, cette relation reste hypothétique puisqu'elle a rarement été observée. En effet, certains considèrent qu'une telle relation n'existe pas pour le plancton (Irigoien et al. 2004). Elle a été pourtant récemment démontrée (Dolan 2005). Parmi les consommateurs du phytoplancton, le microzooplancton a généralement un rôle dominant et est composé majoritairement de protistes ayant des taux de croissance équivalents à ceux de leurs proies. Ainsi, les communautés microzooplanctoniques (A 1.9) sont potentiellement aussi dynamiques que leurs proies phytoplanctoniques.

Question spécifique: *Quelles structures de communauté sont caractéristiques des écosystèmes pélagiques méditerranéens à l'heure actuelle dans les conditions les plus oligotrophes (fin de période stratifiée) ? Quels sont les espèces dominantes ou les groupes responsables de fonctions spécifiques (fixation d'azote, utilisation de phosphate organique dissous, production bactérienne, taux de silification, broutage) ?*

OBJECTIF 2. PRODUCTION ET DEVENIR DE LA MATIÈRE ORGANIQUE DANS DES ENVIRONNEMENTS OLIGOTROPHES CONTRASTES

L'objectif est d'étudier **comment la production, la minéralisation et l'exportation de matière organique varient en fonction de la structure des communautés planctoniques dans un gradient de faibles disponibilités nutritives.** Nous allons particulièrement nous focaliser sur le couplage/découplage entre les processus d'apport et de perte d'éléments nutritifs et de carbone dans la couche éclairée.

Objective 2.1. Caractérisation de la disponibilité nutritive

Mesures des concentrations et de la disponibilité des éléments nutritifs (N, P, Si, Fe)

La disponibilité des éléments nutritifs dans la zone éclairée contrôle la production primaire de matière organique, et exerce une forte influence sur la structure et la composition de la chaîne trophique. Elle dépend de différents flux d'apports, de pertes et de recyclage. La concentration des éléments nutritifs représente l'état d'équilibre entre tous ces flux et apparaît comme le premier indicateur de la disponibilité nutritive. **Néanmoins, comme les concentrations sont très faibles dans les habitats oligotrophes marins, ces mesures sont très délicates et représentent elles-mêmes un enjeu.** Nous allons pour la première fois étudier la variabilité à petite échelle de temps de la nitracline en utilisant le capteur ISUS nouvellement mis au point (Johnson & Coletti, 2002) et permettant d'obtenir des profils en continu de la concentration de nitrate. La méthode de dosage nanomolaire des nitrate/nitrite sera employée en surface. Nous allons étudier la disponibilité du phosphate minéral dissous, probablement le principal facteur de contrôle des populations planctoniques et en particulier des diazotrophes (A 2.1), ainsi que le rapport N:P dans la couche éclairée (A 2.2) à partir de méthodes récemment adaptées pour les conditions ultra-oligotrophes (Rimmelin & Moutin, 2005, Tanaka et al., submitted, Thingstad & Mantoura 2005). La disponibilité de l'acide orthosilicique (A 2.3) peut également jouer un rôle central dans le contrôle de la production exportable (Leblanc et al., 2003). Des concentrations élevées en fer ont déjà été mesurées dans la partie occidentale de la mer Méditerranée à la fin de la période stratifiée (Guieu *et al.* 2002, Bonnet & Guieu *submitted*, Sarthou & Jeandel, 2001). Cependant, aucune donnée sur la disponibilité en fer (A 2.4), qui peut exercer un fort contrôle sur les taux de fixation d'azote (Kustka et al., 2002), n'est actuellement disponible pour la partie orientale de la mer Méditerranée.

Identification et quantification des principaux flux biogéochimiques d'éléments nutritifs (N, P, Si, Fe) vers la couche éclairée.

La production nouvelle, supportée par les sources externes à la couche éclairée, est faible dans les milieux oligotrophes mais représente une fraction cruciale de la production totale autotrophe. En effet, à long terme, il y a un nécessaire équilibre entre la production nouvelle et la production exportable pour maintenir une production organique dans la couche éclairée.

-Apport par des processus hydrologiques

Le flux d'éléments nutritifs à la base de la couche éclairée est le résultat des effets permanents et/ou intermittents d'advection et de diffusion et peut être représenté par le produit d'un coefficient de diffusion turbulente par le gradient des éléments nutritifs. **Ce flux est sans doute mal évalué dans les zones oligotrophes et reste un sujet crucial d'étude** (Lévy 2003, McGillicuddy & Robinson 1997, Balter et al. 2005, and comments from Lévy 2005). Dans l'étude proposée, les sites d'observation seront choisis de manière à ce que l'advection horizontale soit faible, plutôt aux centres des tourbillons anticycloniques, afin d'éviter la complexité induite par les apports latéraux. Toutefois, l'advection horizontale sera évaluée. Les gradients verticaux sont mesurables avec précision, mais les coefficients de diffusion verticaux K_z sont difficiles à mesurer, bien que les techniques de mesure des flux turbulents par la méthode des corrélations de fluctuation de vitesses verticales avec la température ou la salinité existent (Lewis et al. 1986). Malheureusement, ces techniques sont difficiles à mettre en œuvre. Ainsi, la diffusion turbulente est généralement estimée à partir de méthodes indirectes basées sur des mesures (CTD et ADCP) à échelle fine. Une méthode actuellement utilisée repose sur l'évaluation du nombre de Richardson, carré du rapport entre la fréquence de flottabilité (fonction du gradient vertical de densité) et du cisaillement vertical du courant horizontal, ce nombre permet d'estimer l'occurrence d'instabilités de Kelvin Helmholtz, sans doute responsables du principal flux vertical d'éléments nutritifs dans les régions stratifiées

(Gregg 1987, Large et al. 1994, Kantha & Clayson 1994). Une mesure correcte de ce nombre est accessible avec les sondes CTD SBE 911 couplée à une rosette équipée d'un LADCP. Une autre méthode utilisant le rapport des variances des gradients verticaux de température ou salinité à petite et moyenne échelle (10 cm et 5 m par exemple), peut être mise en œuvre. Parallèlement, des mesures de microstructure résolvant les échelles dissipatives seront réalisées en utilisant le "VMP5500" (full ocean depth un-tethered profiling system) qui sera prochainement acquis par le LPO et le LOCEAN. Ce profileur est équipé avec des capteurs haute fréquence pour la température et le cisaillement qui permettent deux estimations indépendantes de K_z . Ces deux estimations de K_z vont être utilisées pour tester la pertinence des différentes méthodes indirectes basées sur les mesures classiques à échelle fine avec la CTD et l'ADCP. La validation de ces estimations indirectes de K_z permet de les utiliser avec plus de pertinence lorsque des mesures de microstructure ne pourront être réalisées.

-Apports atmosphériques – N₂ fixation

Le transport éolien de poussière représente, à l'échelle globale, la source dominante de fer, un élément essentiel pour la croissance du phytoplancton dans l'océan (Duce and Tindale 1991; Gao et al, 2001; Jickells et al., 2005). Il a été montré que les aérosols sahariens peuvent également représenter une source significative de phosphate (Ridame & Guieu 2002). En conséquence, les apports de poussière saharienne peuvent stimuler la productivité biologique dans les écosystèmes oligotrophes comme la mer Méditerranée, et altérer la structure des communautés, la disponibilité nutritive et finalement la séquestration nette du CO₂ atmosphérique. En considérant la courte durée de notre suivi pour les stations longues (4 à 5 jours à chaque station) et la faible fréquence des apports d'aérosols par l'atmosphère, ces apports seront probablement négligeables et donc ne seront pas considérés. En revanche, **nous allons mesurer l'apport atmosphérique d'azote par la fixation d'azote, qui peut être une source majeure d'azote nouveau en mer Méditerranée orientale et occidentale (A 2.5), et étudier en microcosmes l'influence de dépôts de poussières atmosphériques sur la chaîne trophique (A 2.6), et en particulier sur les fixateurs d'azote.** Pantoja et al. (2002) ont estimé que plus de 20% de l'azote dans le bassin occidental et jusqu'à 90 % dans le bassin oriental, pourrait provenir de la fixation biologique de diazote. Malgré cela, très peu de données sont actuellement disponibles, en particulier en Méditerranée orientale.

Questions spécifiques: Est-ce que les mesures directes de coefficients de diffusion s'accordent avec les précédentes estimations ? Est ce que la fixation de diazote est une source majeure d'azote nouveau pour la production primaire dans la couche éclairée ?

Objectif 2.2. Production de matière organique et structure de la chaîne trophique

Suite à des besoins énergétiques (lumière), la matière organique marine est pratiquement entièrement produite dans le niveau superficiel éclairé des océans. Une production primaire variable, alimentée par des processus physiques agissant à un grand nombre d'échelles, interagit avec la prédation pour définir la composition en espèces des populations planctoniques (Gargett & Marra, 2002). Le concept de base de la structure de la chaîne trophique, concept qui n'a pas été sévèrement remis en cause depuis sa description originale (Johannes, 1965; Thingstad et al. 1999), est de considérer deux stratégies trophiques (Fig. 4). L'osmotrophie qui fait référence aux organismes qui se nourrissent en absorbant des éléments nutritifs dissous, et la phagotrophie qui fait référence aux organismes se nourrissant à partir de matière organique particulaire. Les osmotrophes incluent à la fois les bactéries hétérotrophes et le phytoplancton autotrophe, alors que la chaîne des prédateurs inclut à la fois les protozoaires, le mésozooplancton et les prédateurs supérieurs, tous hétérotrophes.

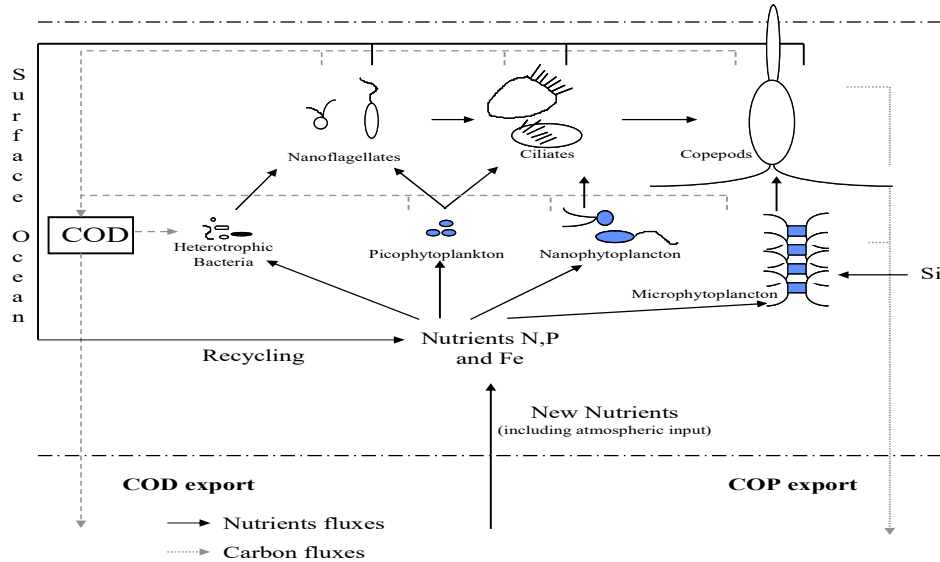


Fig. 4. Représentation schématique de la chaîne alimentaire “idéale” et des flux biogéochimiques des éléments nutritifs et du carbone (d’après Thingstad et al. 1998 & 2005)

Flux biogéochimiques en relation avec la production des osmotrophes

Les objectifs ici sont de mesurer les flux des éléments biogènes (incluant le carbone) et de déterminer les paramètres qui vont aider à la représentation de ces flux (paramètres P vs I, K_s , V_{max} , constantes d’affinité...). Les approches classiques utilisant les isotopes stables (^{15}N , ^{13}C) et instables (^{14}C , ^{33}P , ^{32}Si) pour mesurer les flux biogéochimiques, ainsi que les nouvelles approches permettant d’associer les flux à des organismes spécifiques, seront employées. **Nous allons étudier la production primaire de carbone organique dissous (A 2.7), récemment reconnue pour contribuer significativement à la production primaire totale dans les régions oligotrophes (Marañón et al., 2005). Nous allons quantifier la nitrification ainsi que l’impact de l’excrétion d’azote organique dissous dans le flux d’assimilation du nitrate « nouveau », (A 2.8). Les méthodes nouvelles concernant à la fois le tri des espèces dominantes (Lebaron et al 2001, Servais et al 2003) et les faibles niveaux de détection des analyses chimiques (Rimmelin & Moutin, 2005; Duhamel et al., in prep.) devraient nous permettre d’affiner la détermination des caractéristiques spécifiques pour l’assimilation des éléments nutritifs. Nous allons caractériser l’absorption du phosphate minéral dissous au niveau des espèces dominantes (A 2.9), et son devenir biogéochimique (A 2.10), ce qui nous procurera une plus ample connaissance des besoins chimiques nécessaire à la croissance des organismes planctoniques (Van Mooy, 2003). Le processus de silicification dans les diatomées marines (A 2.11) sera étudié à l’aide d’une nouvelle technique de marquage (Shimizu et al., 2001; Leblanc & Hutchins, 2005) qui permettra pour la première fois de quantifier la contribution de chaque espèce au flux total de production de silice biogénique.**

Production des phagotrophes (production secondaire)

La structure de la chaîne alimentaire influence le devenir de la production primaire dans l’océan et a des conséquences sur le processus de transfert du CO_2 vers les couches profondes. Il est généralement admis que si les eucaryotes phytoplanctoniques de petite taille ou les procaryotes dominent la communauté microbienne, alors les brouteurs du picoplancton sont des petits protozoaires qui ne produisent pas de pelotes fécales à fort pouvoir de sédimentation. **Malgré leur ubiquité et leur rôle central dans le transfert d’énergie à une échelle globale dans les eaux marines, l’écologie du micro-zooplancton est peu connue (A 2.12).** Plusieurs étapes de broutage

sont nécessaires pour permettre à la production primaire d'être incorporée dans les niveaux trophiques supérieurs. Ainsi, la majeure partie du carbone fixé par la photosynthèse est respirée et re-minéralisé par la communauté microbienne dans la couche de surface mélangée et il y a pas ou peu d'absorption nette de CO₂ de l'atmosphère vers l'océan. En revanche, quand les cellules phytoplanctoniques de plus grande taille dominant, elles peuvent soit sédimenter directement, soit être broutées par le mésozooplancton, essentiellement des copépodes, qui produisent des pelotes fécales à fort pouvoir de sédimentation. Cependant, il été montré récemment que les organismes du mésozooplancton pouvaient être couplés à des niveaux trophiques inférieurs dans la mer Méditerranée orientale (Thingstad et al. 2005) et que leur contribution au cycle du carbone dans les régions oligotrophes devait être revue (A 2.13). **Le meso-supérieur et le macrozooplancton, largement sous échantillonnés par les techniques de pêche classique, pourraient également contribuer de façon significative au transport vertical de matière organique (A 2.14).**

Processus biogéochimiques étudiés à partir de mesures optiques

L'utilisation de mesures d'optique pour appréhender des processus biogéochimiques à l'échelle de la journée est actuellement bien reconnue (Siegel et al., 1989; Claustre et al., 1999). **La technique de déduction du carbone organique particulaire à haute fréquence à partir de mesures d'atténuation (diffusion) a permis récemment de proposer de nouvelles estimations, plus élevées, de la production primaire dans les environnements oligotrophes** (Claustre et al., submitted.). La plupart des études couplées biogéochimie-optique ont été réalisées en utilisant le coefficient d'atténuation des particules en suspension dans la partie rouge du spectre (équivalent au coefficient de diffusion particulaire, b_p), combiné aux mesures de chlorophylle par fluorescence. Les mesures simultanées de b_p , b_{bp} (rétrodiffusion des particules, sensible aux particules submicrométriques en dehors des efflorescences) et du signal de fluorescence de la chlorophylle peuvent être utilisées pour analyser les variations temporelles de la matière organique particulaire (Loisel et al., 2002; Behrenfeld et al., 2005), et en particulier pour savoir comment les variations journalières des particules submicrométriques essentiellement détritiques, révélées par b_{bp} , se comportent comparativement à celles plus grandes et essentiellement associées à des organismes autotrophes et révélés par b_p . (A 2.15). Au cours du cycle journalier et entre les régions océaniques de disponibilités nutritives variables, la séparation physiologique des processus photosynthétiques (séparation de la charge initiale et fixation du carbone) peut induire un sévère découplage entre la fluorescence variable et la fixation du carbone. **La compréhension et la caractérisation d'un tel découplage (A 2.16) constitue la base pour relier les données de fluorescence à haute résolution (même de l'espace) au cycle du carbone dans l'océan.**

Question générale : Quelles sont les caractéristiques physiologiques des espèces dominantes pour ce qui concerne la photosynthèse, l'absorption des éléments nutritifs et la phagotrophie ?

Objectif 2.3. Minéralisation de la matière organique et structure de la chaîne trophique

Les flux de minéralisation spécifique de chaque élément biogène, si ils sont différents, peuvent conduire à un découplage des cycles biogéochimiques dans la colonne d'eau (Raimbault et al., 1999; Karl et al., 2001, Leblanc et al. 2003). Il est généralement admis que le phosphate est plus rapidement recyclé que l'azote qui est plus rapidement recyclé que le silicium. **De telles mesures en parallèle des flux de recyclage des éléments biogènes sont très rares et ce dernier postulat provient essentiellement de mesures indirectes.** L'étude de la dégradation de la matière organique se focalisera sur la relation entre production et diversité bactérienne (A 2.17). Désormais, **examiner les relations entre diversité et fonctionnalité** (activité ectoenzymatique, absorption spécifique de composés organiques spécifiques) **dans la communauté bactérienne représente un enjeu majeur pour comprendre l'impact des processus hétérotrophes sur la minéralisation de la matière organique** dans la colonne d'eau. Nous étudierons également les facteurs contrôlant la production bactérienne et les conséquences de tels contrôles sur les activités hétérotrophes (A 2.18),

la vitesse d'hydrolyse du phosphate organique dissous (A 2.19) et les effets de la pression hydrostatique sur la minéralisation de la matière organique dissoute et particulaire (A 2.20).

Question générale: *Quels sont les modifications des activités des procaryotes hétérotrophes et de la structure des communautés en relation avec les gradients horizontaux et verticaux des éléments nutritifs et de la matière organique dissoute ?*

Objective 2.4. Exportation de matière organique (particulaire et dissoute)

La structure des écosystèmes pélagiques a une influence sur le flux de carbone biogénique de la couche éclairée vers l'océan profond (Legendre and Rassoulzadegan, 1996). Ce flux vertical est essentiellement composé de larges particules telles que des pelotes fécales, des parties de zooplancton, des agrégats amorphes, de la neige marine (Fowler and Knauer, 1986; Silver and Gowing, 1991), et des diatomées scénéscentes, particulièrement suite à une efflorescence (Billet et al., 1983). Les pelotes fécales peuvent sédimenter rapidement : 20-900 m j⁻¹ pour les copépodes (Lorenzen, 1983; Welschmeyer and Lorenzen, 1985), et jusqu'à 2700 m j⁻¹ pour le grand zooplancton gélatineux (Bruland and Silver, 1981; Madin and Purcell, 1992). Des vitesses élevées peuvent conduire à une exportation efficace de carbone biogénique. Ce flux de carbone peut ainsi être largement d'origine zooplanctonique (Thibault *et al.*, 1999).

Nous allons étudier la stoechiométrie C/N/P/Si de la matière particulaire qui sédimente (A 2.21) puisque, malgré son importance en biogéochimie, il existe peu de mesures directes (Geider & La Roche, 2002). Nous allons également examiner le rôle des matières particulaires de grande taille à l'origine de la « neige marine » rarement observée dans les zones oligotrophes (A 2.22), et évaluer l'exportation instantanée par diffusion de carbone organique dissous.

Objectif 2.5. Budget en oxygène

L'équilibre entre photosynthèse et respiration dans la communauté microbienne définit l'état métabolique du système étudié (Net autotrophe ou hétérotrophe) et sa capacité à exporter du carbone. **Le bilan à l'échelle de l'océan global est incertain et la zone de l'océan où réside la principale incertitude est paradoxalement l'océan de surface (Williams, ASLO meeting 2006).** L'originalité de l'approche que nous allons mener consistera à comparer les variations de la concentration en oxygène à différentes échelles de temps, in situ et dans des bouteilles d'incubation, ainsi qu'à l'intérieur de nouveaux systèmes appelés « Productivity Autosampler » (A 2.23). En plus des données classiques du bilan journalier (production communautaire brute et nette, respiration de la communauté), les variations nyctémérales de la concentration en oxygène nous procurerons des informations sur la respiration des autotrophes et des hétérotrophes (Pringault et al. L&O method, submitted). Ceci devrait nous permettre de mieux cerner l'impact des communautés microbiennes dans le cycle du carbone.

Objectif 2.6. Réponses de la chaîne trophique à un apport impulsif d'élément nutritif (étude en microcosmes).

L'apport de phosphate dans les eaux de surface ultra-oligotrophes du tourbillon "Cyprus" en mer Méditerranée orientale, réalisé dans le cadre de l'expérience lagrangienne CYCLOPS, a entraîné des réponses inattendues de l'écosystème (Thingstad et al. 2005). Le système a montré une diminution de la concentration en chlorophylle et une augmentation de la production bactérienne et de l'abondance des œufs de copépodes. Ces résultats ont été confirmés par d'autres, obtenus simultanément à partir d'expériences réalisées à bord dans des microcosmes (Zohary et al. 2005). Bien que la croissance du phytoplancton soit co-limitée par la disponibilité de l'azote et du phosphate, ces expériences suggèrent que le phosphate ait été transféré à travers la chaîne trophique jusqu'aux copépodes selon deux voies distinctes non mutuellement exclusives : (1) le « bypass », contournement du compartiment phytoplanctonique par les bactéries hétérotrophes qui absorbent le phosphate, et (2) le « tunneling », la consommation du phosphate au delà des besoins spécifiques des organismes modifie rapidement la composition stoechiométrique des proies des copépodes (Thingstad et al. 2005). Puisque les résultats des expériences réalisées à bord dans les microcosmes

étaient très similaires à ceux obtenus *in situ* (Thingstad et al. 2005; Zohary et al. 2005), des expériences en microcosmes (A 2.24) vont nous permettre d'étudier les mécanismes énoncés ci-dessus. Parallèlement, des expériences d'enrichissement seront également réalisées à bord en utilisant des techniques ultra-propres pour étudier le rôle du fer et des poussières atmosphériques sur la fixation d'azote (A 2.24). Des études à échelles de temps de l'heure à l'année ont montré que **l'essentiel des apports nutritifs de la couche profonde vers la couche éclairée dans les milieux oligotrophes était lié à des pulses ponctuels** (Dickey et al., 2001) **dont les conséquences sur la chaîne trophique sont rarement étudiées**. Les apports atmosphériques sont également très ponctuels et il est donc particulièrement intéressant d'étudier simultanément l'écosystème *in situ* dans son état d'équilibre le plus probable ainsi que sa réponse lors d'un apport impulsif.

Questions spécifiques: *Quelles sont les conséquences d'un apport nutritif impulsif sur la chaîne trophique et les flux de carbone de milieux oligotrophes contrastés ? Quels sont les rôles respectifs du fer et du phosphate sur le contrôle des taux de fixation d'azote ?*

OBJECTIF 3. REPRESENTATION DES PRINCIPAUX FLUX BIOGEOCHIMIQUES ET DE LA DYNAMIQUE DU RESEAU TROPHIQUE PLANCTONIQUE

L'ensemble des données pluridisciplinaires acquises au cours de la mission BOUM sera rapidement mis à la disposition de la communauté internationale (base de données CYBER et SESAME) pour aider à la représentation des interactions entre climat, cycles biogéochimiques et écosystèmes marins. **Une modélisation multiéchelles est proposée dès le début du projet BOUM**. Son objectif est de compléter l'observation et l'analyse des données pour la compréhension des interactions entre les cycles biogéochimiques des éléments biogènes et la dynamique du réseau trophique planctonique. Trois échelles de modélisation sont envisagées.

Objectif 3.1. Modélisation à l'échelle de la Méditerranée

L'ensemble des données acquises au cours des campagnes réalisées dans le cadre du WP2 du programme européen SESAME (Fig. 3) va constituer un jeu de données unique en Méditerranée. Des efforts ont été conduits pour utiliser des protocoles d'analyses communs, des stratégies de prélèvements (horizontaux et verticaux) communes, pour prioriser les variables à mesurer, et pour intercalibrer les analyses (en cours pour les éléments nutritifs). La base de données, hydrologiques, chimiques et biologiques SESAME, sera utilisée pour l'implémentation, l'ajustement des paramètres et l'évaluation de modèles écologiques (WP4 et WP6 de SESAME). Elle doit également servir à la **validation d'un modèle biogéochimique à l'échelle de la Méditerranée** (Vichi et al., 2006).

A cette échelle, il est également prévu d'évaluer **la distribution du carbone d'origine anthropique en utilisant le modèle 3D de la Mer Méditerranée développé par le GHER** (Université de Liège en Belgique) actuellement disponible sur une station de travail bi-opteron de l'Université de Perpignan (France), (A 1.1).

Objectif 3.2. Modélisation à l'échelle de des processus

Nous envisageons de travailler sur des échelles plus fines adaptées à l'étude des processus physiques et biogéochimiques : c'est-à-dire à l'échelle 0D du microcosme et en 1D vertical au niveau des trois stations longues. Le but est d'améliorer la représentation de certains processus (diazotrophie, compétition phytoplancton-bactéries pour la ressource nutritive, multi-limitation) dans le modèle ECO3M (Baklouti et al., 2006a). Afin de renforcer la complémentarité entre les approches de modélisation et d'expérimentation, une stratégie commune a été mise au point dès l'élaboration du projet BOUM. Ainsi, la localisation des stations s'est faite dans des zones où la variabilité horizontale des propriétés hydrologiques et biogéochimiques est supposée être faible sur la durée d'échantillonnage permettant ainsi d'envisager une modélisation 1DV. Par ailleurs, la

plupart des besoins du modèle seront couverts par des jeux de données et de paramètres acquis *in situ* ou en milieu contrôlé au cours de la campagne.

-Expériences en milieu contrôlé (0D)

Les expériences et la modélisation à l'échelle de microcosmes sont importantes à plusieurs titres : d'une part, pour **acquérir certains paramètres du modèle (caractéristiques d'assimilation des éléments nutritifs, paramètres photosynthétiques, taux de respiration, de minéralisation...)** et d'autre part, pour **tester ou mettre au point des modèles de processus pour lesquels les formulations actuelles ne sont pas satisfaisantes ou restent non validées**. L'acquisition des paramètres au moment du prélèvement est considéré comme un enjeu essentiel pour en particulier les diazotrophes (Holl & Montoya, 2005). Le choix des processus qui feront l'objet d'une attention particulière découle d'une part de l'importance présumée de ces processus dans le fonctionnement des systèmes étudiés, mais aussi de la nécessité d'améliorer ou de valider la formulation de ces processus dans le modèle actuel. Ces processus sont :

- **la diazotrophie**. Il existe actuellement quelques modèles pour représenter la diazotrophie (e.g. Bissett et al., 1999 ; Fennel et al., 2002 ; Moore et al., 2002) mais ils reposent sur des bases empiriques déduites d'observations macroscopiques. L'amélioration de tels modèles passe par la description des mécanismes sous-jacents de la diazotrophie ainsi que par la prise en compte du contrôle par la disponibilité nutritive (phosphate, fer) de ce flux.
- **la compétition phytoplancton-bactéries pour la ressource nutritive**. Cette compétition est particulièrement cruciale dans la mesure où elle induit, notamment lors d'un apport de phosphate, des changements (bypass, tunnelling) dans les voies de transfert de matière vers les échelons supérieurs par rapport aux voies classiquement observées (Thingstad et al. 2005). La modélisation des expériences prévues dans l'objectif 4 permettra ainsi de tester la capacité du modèle à reproduire la réponse du réseau trophique à un apport impulsif de phosphate ainsi qu'à aider à l'interprétation de ces expériences.
- **La multi-limitation par l'azote et le phosphate de la croissance planctonique**. En effet, en présence de plusieurs nutriments susceptibles de limiter la croissance phytoplanctonique, les modèles actuels utilisent souvent des lois empiriques qui contraignent la croissance par la plus forte des limitations (loi de Liebig) ou par le produit de ces limitations. Le fondement de ces lois reste encore à prouver (e.g. Davidson et Gurney, 1999) et un travail sur la formulation de la multi-limitation accompagné d'expérimentations spécifiques permettra d'avancer la réflexion dans ce domaine.

La modélisation fine des processus permettra d'alimenter le modèle 1DV qui sera appliqué pour chaque station longue.

- Expériences *in situ* en station longue (1DV)

L'objectif majeur de la modélisation 1DV est de représenter les flux de carbone et des éléments biogènes associés dans la couche de surface et d'établir un bilan sur le devenir du carbone organique produit (re-minéralisation, exportation). L'utilisation d'un modèle multi-éléments (non redfieldien) permettra d'illustrer le cas échéant le découplage des cycles des éléments biogènes en milieu oligotrophe. Si l'objectif est de comprendre la production et le devenir de la matière organique dans les chaînes trophiques marines oligotrophes, et leurs rôles dans le cycle global du carbone, l'idée n'est pas de décrire en détail toutes les relations complexes qui existent entre les organismes. Elle est plutôt d'extraire celles qui semblent essentielles pour aboutir à une représentation aussi satisfaisante que possible des écosystèmes et des flux des éléments biogènes (A 3.1). La complexité des relations trophiques sera simplifiée en se focalisant sur les groupes d'espèces ayant des rôles biogéochimiques similaires (i.e. des groupes fonctionnels). La

pertinence de la modélisation 1DV dépendra tout aussi directement des mesures *in situ* effectuées en station longue que la modélisation des processus décrite ci-dessus dépendra des résultats des expériences en microcosmes. En effet, un certain nombre de paramètres qui y seront mesurés sont essentiels à connaître pour espérer une représentation réaliste de la dynamique de l'écosystème pélagique et donc une estimation précise du bilan de carbone. Ces paramètres sont par exemple tous les paramètres liés à la photosynthèse du phytoplancton ou bien encore à l'absorption des sels nutritifs par le plancton. Par ailleurs, du point de vue de la description de l'hydrodynamique dans les modèles couplés physique-biogéochimie, la paramétrisation de la turbulence constitue fréquemment une source d'erreur, d'une part parce qu'elle repose sur des lois empiriques, et d'autre part du fait que ces lois ne sont pas calibrées à nouveau pour chaque site étudié (des valeurs typiques de la littérature sont utilisées pour paramétrer ces lois). Ainsi, l'estimation précise des coefficients de diffusion verticale turbulente $-K_z$ permettra d'utiliser des profils verticaux réalistes de ce paramètre dans le modèle hydrodynamique 1DV. Ceci constitue un gage d'une représentation correcte du mélange dans la couche de surface et donc, du flux d'éléments nutritifs à la base de la couche euphotique.

Le modèle biogéochimique implémenté par défaut dans la plate-forme ECO3M (Baklouti et al., 2006a) propose une représentation mécaniste ou semi-mécaniste des processus clés de la dynamique phytoplanctonique (photosynthèse, photoacclimatation, absorption de nutriments, excrétion de MOD, respiration autotrophe). La plupart de ces processus ont été validés à l'aide d'expériences réalisées en microcosme (Pawlowski, 2004) sur un groupe fonctionnel de diatomées soumises à une carence en nitrate et en lumière (Baklouti et al., 2006b). Le modèle utilisé en 1DV dans sa version méditerranéenne repose sur une représentation similaire de ces processus, et inclue de surcroît plusieurs groupes fonctionnels ainsi que d'autres éléments biogènes que l'azote et le carbone ; ce type de modèle permet une représentation potentielle des cycles biogéochimiques des principaux éléments biogènes (C,N,P,Si et O) combinée à une représentation d'organismes qui ont une fonction clé (groupes « fonctionnels ») dans la dynamique de production et de transfert de carbone organique. En outre, ce modèle sera enrichi par l'apport des nouveaux processus étudiés dans le 1^{er} volet de modélisation (cf. point 2.), ainsi que par la considération de compartiments bactérien et microzooplanctonique (boucle microbienne). L'ensemble des données acquises au niveau de ces stations longues, et on peut penser en particulier aux données obtenues en quasi continu comme les flux et stocks d'oxygène, ou de nitrate, offriront des possibilités de validation du modèle couplé qui n'avait jusque-là jamais pu être effectuées en raison d'une mauvaise adéquation entre impératifs expérimentaux et modélisation.

Question spécifique: Est il possible de reproduire, avec une seule et unique structure de modèle, les principale caractéristiques physiques et biogéochimiques des différentes régions oligotrophes étudiées ? Dans l'affirmative, le modèle permettrait alors d'identifier les processus à l'origine de ces différences de fonctionnement. Notamment, cette approche permettrait de répondre à une question importante du projet BOUM : **les différences de fonctionnement entre les sites sont-elles attribuables à l'un ou plusieurs des processus de production de matière organique, de reminéralisation et d'exportation ?** Sinon à quels processus peuvent-elles être reliées ?

2. Plan de recherche

Le projet BOUM est basé sur la préparation, la réalisation et l'exploitation des résultats d'une campagne océanographique de 35 jours en mer Méditerranée.

Le plan de recherche détaillé de cette campagne est présenté dans l'annexe 2 (formulaire simplifié de demande de campagne à la mer).

3. Calendrier

Septembre 2007: Réunion pré-campagne de toute la communauté (Marseille)

Mars 2008: Réunion pré-campagne du comité organisateur élargi (Marseille)
Août-Septembre 2008: Mission (description détaillée en [Annexe 2](#))
Mai-Juin 2009: Réunion post-campagne de toute la communauté (Marseille)
Oct-Nov 2009 : Atelier ciblé (10 personnes max)
Fév-Mars 2010 : Atelier ciblé (10 personnes max)
Juin-Juillet 2010 : Atelier ciblé (10 personnes max)
2010 : Demande d'une session spéciale à l'Ocean Sciences Meeting

Possibilité de fournir des noms d'experts français ou étrangers (avec coordonnées complètes : adresse postale et adresse électronique) susceptibles d'évaluer le projet et avec lesquels les équipes participant au projet n'ont ni conflit d'intérêt, ni collaborations en cours.

Alain Herbland

IFREMER, Laboratoire Aquacole de Calédonie (LAC Saint Vincent)
BP 2059, 98846 Nouméa Cedex, Nouvelle Calédonie
Tél : +687 35 48 87
Fax : +687 28 78 57
E-mail : Alain.Herbland@ifremer.fr

Serge Heussner

CEntre de Formation et de Recherche sur l'Environnement Marin (CEFREM)
UMR 5110 CNRS-Université de Perpignan Via Domitia
52, Avenue Paul Alduy, 66 860 Perpignan Cedex
Tel : (33) (0)4.68.66.20.89
Fax : (33) (0)4.68.66.20.96
E-mail : heussner@univ-perp.fr

Paul Treguer

Institut Universitaire européen de la Mer (IUEM) Université de Bretagne Occidentale (UBO)
Technopôle Brest-Iroise, Place Copernic, 29280 Plouzané, France
Tel : 33 (0)2 98 49 86 01
Fax : 33 (0)2 98 49 86 09
E-mail : Paul.Treguer@univ-brest.fr

David Karl

Department of Oceanography
1000 Pope Rd. MSB 629, University of Hawaii, Honolulu, HI 96822, USA
Tel: (808) 956-8964
fax: (808) 956-5059
E-mail : dkarl@hawaii.edu

David L. Kirchman

College of Marine Studies, University of Delaware
700 Pilottown Road, Lewes, Delaware 19958 USA
Tel: 302-645-4375
Fax: 302-645-4028
E-mail : kirchman@cms.udel.edu

Michael Krom

Earth and Biosphere Institute
University of Leeds, Woodhouse Lane
Leeds LS2 9JT, Royaume-Uni
tel: +44(0) 113 343 5213
E-mail : M.Krom@earth.leeds.ac.uk

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Références de la communauté BOUM : autres références en *annexe 3*

Générale (>2002 pour la mer Méditerranée)

- Ait-Ameur, N., and C. Goyet (2006). Distribution and Transport of Natural and Anthropogenic Co₂ in the Gulf of Cadiz. *Deep Sea Research Part II*, 53: 1329-1343.
- Agis M., Granda A., Dolan, J.R. 2007. A cautionary note: examples of possible microbial community dynamics in dilution grazing experiments. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, in press.
- Arraes-Mescoff, R. M. Roy-Barman, L. Coppola, K. Tachikawa, M. Souhaut, R. Sempéré S. Yoro, and C. Jeandel (2001). The behavior of Al, Mn, Ba, Sr, REE and Th isotopes during *in vitro*/degradation of large marine particles. *Marine Chemistry*, 73, 1-19
- Arrieta, J.-M., Weinbauer, M.G., Lute, C. & G.J. Herndl. 2004. Rapid response of bacterioplankton to iron fertilization in the Southern Ocean. *Limnol. Oceanogr.* 49: 799-808
- Baklouti, M., Diaz, F., Pinazo, C., Faure, V. and Quéguiner, B. (2006a) Investigation of mechanistic formulations depicting phytoplankton dynamics for models of marine pelagic ecosystems and description of a new model. *Progress in Oceanography* 71:1-33
- Baklouti, M., Faure, V., Pawlowski, L. and Sciandra, A. (2006b) Investigation and sensitivity analysis of a mechanistic phytoplankton model implemented in a new modular numerical tool (Eco3M) dedicated to biogeochemical modelling. *Progress in Oceanography* 71:34-58.
- Ben Hamadou R, F. Ibanez, M. Picheral, G. Gorsky (2005) Identification of water columns boundaries. An application of the Walsh transform algorithm. *Ecological Modelling*. 182, 11-24.
- Behrenfeld, M.J., K. Worthington, R.M. Sherrell, F.P. Chavez, P. Strutton, M. McPhaden & D.M. Shea. 2006. Controls on tropical Pacific Ocean productivity revealed through nutrient stress diagnostics. *Nature*, 442, 1025-1028.
- Behrenfeld, M.J., E. Boss, D. A. Siegel & D. M. Shea 2005. Carbon-based ocean productivity and phytoplankton physiology from space. *Global Biogeochem. Cycles*, 19, GB1006, doi:10.1029/2004GB002299 (also cited as Editor's Choice in *Science* 307: 646)
- Behrenfeld, M.J., O. Prasil, M. Babin & F. Bruyant. 2004. In search of a physiological basis for covariations in light-limited and light-saturated photosynthesis. *J. Phycology*. 40:4-25.
- Behrenfeld, M.J., E. Boss. 2003. The beam attenuation to chlorophyll ratio: an optical index of phytoplankton photoacclimation in the surface ocean? *Deep Sea Research*. 50:1537-1549.
- Mar. Ecol. Prog. Ser.* 257:1-11.
- Behrenfeld, M.J., W.E. Esaias & K. Turpie. 2002. Assessment of primary production at the global scale. In: [P.J. Williams, D.N. Thomas & C.S. Reynolds, eds] *Phytoplankton Productivity: Carbon Assimilation in Marine and Freshwater Ecosystems*. Blackwell. pp 156-186.
- Behrenfeld, M.J., E. Marañón, D.A. Siegel & S.B. Hooker. 2002. A photoacclimation and nutrient based model of light-saturated photosynthesis for quantifying oceanic primary production. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 228: 103-117.
- Bettarel, Y., Sime-Ngando, T., Amblard, C., Dolan, J. R. 2004. Viral activity in two contrasting lake ecosystems. *Applied and Environmental Microbiology*, 70: 2941-2951.
- Betteral, Y., Dolan, J.R., Hornak, M., Lemée, R., Masin, K., Pedrotti, M.-L., Rochelle-Newall, E., Simek, K., Sime-Ngando, T. Hot, cold and missing links in a planktonic microbial community. *FEMS Microbiology Ecology*, 42:451-462.
- biodiversity. *Nature* 433:E9.
- Biegala, I.C., F. Not, D. Vaultot and N. Simon, 2003. Quantitative assessment of picoplanktonic in natural environment using taxon specific oligonucleotide probes in association with TSA-FISH (Tyramide Signal Amplification - Fluorescent In Situ Hybridization) and flow cytometry. *Applied and Environmental Microbiology*, 69, 5519-5529.
- Blain, S., C. Guieu, H. Claustre, K. Leblanc, T. Moutin, B. Quéguiner, J. Ras, and G. Sarthou. 2004. Availability of iron and major nutrients for phytoplankton in the north-east Atlantic Ocean. *Limnol. Oceanogr.* 49: 2095-2104.
- Bonnet S., Guieu C., Atmospheric Forcing on the Annual Iron Cycle in the Mediterranean Sea. A one-year Survey. 2006, En révision à *Journal of Geophysical Research*.
- Bonnet S., Guieu C., Chiaverini J., Joséphine Ras J., Agnès Stock A.,(2005), Impact of atmospheric inputs on the autotrophic communities in a low nutrient low chlorophyll system, *Limnology and Oceanography*, 50(6). 1810:1819.
- Bonnet, S., & Guieu., C., 2004. Dissolution of atmospheric iron in seawater. *Geophysical Research letters*, vol 31, N°3, L03303, 10.1029/2003GL018423.
- Borch NH, Déliat G, Pujo-Pay M, Stedmon C (2004). Fate of DOM in coastal waters. pp 43-50, In *Dissolved Organic Matter (DOM) in aquatic ecosystems: A study of European Catchments and coastal waters*. Sondergaard M & Thomas DN eds
- Bourguet, N., Torretton, J.P., Arondel, O., Galy, O., and Goutx, M. (2003) Specific and sensitive radiometric assay for measurement of real microbial lipase activities in marine water samples. *Applied Environmental Microbiology* 69: 7395-7400.
- Bourguet N., Ghiglione J-F., Pujo-Pay M., Mevel G., Momzikoff A., Guigue C., Fuda J-L., Garcia, N., Raimbault P., Pete R., Lefèvre D., and Goutx M. (submitted). Relationship between organic matter composition and bacterial dynamics during mesotrophic and oligotrophic conditions in the NW Mediterranean Sea, *Aquatic Microbial Ecology*.

- Bouruet-Aubertot, P., H. Mercier, F. Gaillard, P. Lherminier, 2005. « Evidence of strong inertia-gravity wave activity during the POMME experiment » *J. Geophysical Research*, 110, doi: 10.1029/2004JC002747
- Bouruet-Aubertot, P., J. Sommeria, B. Le Cann, C. Koudella, 2004. "Intermittency of vertical density gradients at finescale and link with mixing processes", *Deep Sea Research II*, 51, 2919-2941
- Bruyant, F., M. Babin, B. Genty, O. Prasil, M.J. Behrenfeld, H. Claustre, A. Bricaud, J. Holtendorff, M. Koblizek, L. Garczareck & F. Partensky. 2005. Diel variations in the photosynthetic parameters of *Prochlorococcus* strain PCC 9511: combined effects of light and cell cycle. *Limnol. Oceanogr.* 50(3): 850-863
- Caradec S., Grossi V., Gilbert F., Guigue C., Goutx M. (2004). Influence of redox conditions (oxic, redox oscillation, anoxic) on the degradation of microalgal triglycerides and fatty acids in marine sediments. *Organic Geochemistry*, 35, 277 – 287.
- Christaki U, Van Wambeke F, Bianchi M, 2004. Heterotrophic bacterial growth and substrate utilization in the oligotrophic Eastern Mediterranean (Aegean Sea). *Mediterranean Marine Science*, 4(1):23-39.
- Christaki U, Vaquez-Dominguez E., Courties C, Lebaron P. Grazing impact of different heterotrophic nanoflagellates on eukaryotic (*Ostreococcus tauri*) and prokaryotic picoautotrophs (*Prochlorococcus* and *Synechococcus*). *Environmental Microbiology* 2005;7:1200-1210.
- Claustre, H., Babin, M., Merien, D., Ras, J., Prieur, L., Dallot, S., Prasil, O., Dousova, H. and T. Moutin. 2005. Towards a taxon-specific parameterization of bio-optical models of primary production a case study in the North Atlantic. *Journal of Geophysical Research*, 110, (C07S12, doi:10.1029/2004JC002634).
- Claustre, H., Morel, A., Hooker, S.B., Babin, M., Antoine, D., Oubelkheir, K., Bricaud, A., Leblanc, K., Quéguiner, B. et Maritorena, S. (2002). Is desert dust making oligotrophic waters greener ? *Geophysical Research Letters*, 29 (10), 10.1029/2001GL014056.
- Conan P, Søndergaard M, Kragh T, Thingstad F*, Pujo-Pay M*, Williams P J LeB, Markager S, Cauwet G, Borch N H, Evans D, Riemann B (2006). Partitioning of organic production in marine plankton communities: The effects of inorganic nutrient ratios and community composition on new dissolved organic mater. *Limnol oceanogr*, in press.
- Denis, M., Martin, V., Momzikoff, A., Gondry, G., Stemmann, L., Demers, S., Gorsky, G. and V. Andersen. (2002) Pulsed remineralisation in the northwestern Mediterranean Sea: a hypothesis. *J. Mar. Syst.*, 916: 1– 23.
- de Vargas C and Probert I. 2004. New keys to the Past: current and future DNA studies in coccolithophores. *Micropaleontology* 50, 45-54.
- de Vargas C, Aubry MP, Probert I, and Young J. In press. Origin and Evolution of Coccolithophores: from Coastal Hunters to Oceanic Farmers. In Falkowski P. G. & Knoll A. H. (eds) “*Evolution of Aquatic Photoautotrophs*”, Academic Press, Elsevier.
- de Vargas, C., Garcia-Saez, A., Medlin, L. K. & Thierstein, H. 2004. Super-species in the calcareous plankton. In Thierstein, H. R. and Young J. R. (eds) « *Coccolithophores : from molecular processes to global impact* », Springer Verlag, New York, Berlin, Heidelberg, London, Paris, Tokyo, pp : 271-298.
- Dolan, J.R. 2005. Marine ecology- different measures of biodiversity. *Nature* 433:E9.
- Dolan J.R. 2005. An introduction to the biogeography of aquatic microbes. *Aquatic Microbial Ecology* 41: 39-48.
- Dolan J.R., McKeon K. 2005. The reliability of grazing rate estimates from dilution experiments: Have we over-estimated rates of organic carbon consumption by microzooplankton? *Ocean Science* 1:1-7.
- Dolan, J. R. Jacquet, S., Torretton, J.-P. 2006. Comparing taxonomic and morphological biodiversity of tintinnids (planktonic ciliates) of New Caledonia. *Limnology and Oceanography*, sous presse.
- Dolan, J.R. 2006. Microbial Biogeography? *Journal of Biogeography*, 33:199-200.
- Dolan, J.R., Claustre H., Carlotti F., Plounevez S., Moutin, T. 2002. Microzooplankton diversity: relationships of tintinnid ciliates with resources, competitors & predators from the Atlantic Coast of Morocco to the Eastern Mediterranean. *Deep-Sea Research I*, 47: 1217-1234
- Dolan, J.R., Lemée, R., Gasparini, S., Mousseau, L., Heyndrickx, C. 2006. Probing diversity in the plankton: using patterns in tintinnids (planktonic marine ciliates) to identify mechanisms. *Hydrobiologia*, 555: 143-157.
- Dolan, J.R., Sall, N., Metcalfe, A., Gasser, B. 2003. The effects of turbulence on the feeding and growth of a marine oligotrich ciliate. *Aquatic Microbial Ecology*, 31:183-192.
- Duhamel, S., F. Zeman & T. Moutin. 2006. A dual labelling method for the simultaneous measurements of dissolved inorganic carbon and phosphate uptakes by marine planktonic species. *Limnol. Oceanogr: Methods*. 2006, 4.
- Durrieu de Madron X, Ferré B, Le Corre G, Grenz C, Conan P, *Pujo-Pay M*; Buscail R. O. Bodiou O (2005) Trawling-induced resuspension and dispersal of muddy sediments and dissolved elements in the Gulf of Lion (NW Mediterranean). *Cont Shelf res*, 25: 2387-2409
- Durrieu de Madron, X., L. Denis, F. Diaz, N. Garcia, C. Guieu, C. Grenz, M.D. Löye-Pilot, W. Ludwig, T. Moutin, P. Raimbault & C. Ridame. 2003 Nutrients and carbon budgets for the gulf of Lions during the MOOGLI cruises. *Oceanologica Acta*, 26, 421-433.
- Echevarría, F., Gómez, F., Lafuente, J.G., Gorsky, G., Goutx, M., González, N., Bruno, M., García, C. M., Vargas, J. M., Picheral, M., Striby, L., Alonso, J. J., Reul, A., Cózar, A., Prieto, L., Jiménez, F. and M. Varela. (2002) Physical- biological coupling in the Straits of Gibraltar. *Deep Sea Research II* 49 : 4115–4130.
- Eichinger M, Poggiale J-C, Sempéré R, Van Wambeke F, Lefèvre D. 2006. Modeling DOC assimilation by pelagic bacteria in the Northeast Atlantic Ocean: implication of depth and season, *Aquatic Microbial Ecology*, 43:139-151.
- Dolan, J.R. 2005. Marine ecology- different measures of estimated rates of organic carbon consumption by microzooplankton? *Ocean Science* 1:1-7

- Falkowski P and de Vargas C. 2004. Shotgun sequencing in the Sea: a blast from the Past? *Science* 304: 58-60.
- Frada M, Not F, Probert I, and de Vargas C. 2006. COD-FISH: a new method to detect and quantify calcifying microorganisms in Open Oceans. *Journal of Phycology*, 42(6), 1160-1168.
- Fernandez C., Raimbault P. Impact of heterotrophic N cycling in new production and *f* ratio estimations in the eastern North Atlantic Ocean during winter and spring 2001. *Mar.Ecol.Progr.*, in press.
- Fouilland E, Descolas-Gros C, Courties C, Collos Y, Vaquer A. Productivity and growth of the smallest free-living eukaryaote under nitrogen deficiency and sufficiency. *Aquatic Microbial Ecology* 2004;103-110.
- Frada M, Not F, Probert I, and de Vargas C. 2006. COD-FISH: a new method to detect and quantify calcifying microorganisms in Open Oceans. *Journal of Phycology*, 42(6), 1160-1168.
- Garcia N., P. Raimbault, E. Gouze & V. Sandroni. 2006. Fixation de diazote et production primaire en Méditerranée occidentale. *Comptes rendus Biologies* 309 : 742-750.
- Garcia N., Raimbault P., Gouze E., Sandroni V. 2006 Dinitrogen fixation and primary production in Western Mediterranean Sea. *C. R. Acad. Sci.*, 329(9): 742-750
- Geisen, M., Young, J. R., Probert, I., Saez, A. G., Baumann, K., Sprengel, C., Bollmann, J., Cros, L., de Vargas, C., and Medlin, L. 2004. Species level variation in coccolithophores. In Thierstein, H. R. and Young J. R. (eds) « *Coccolithophores : from molecular processes to global impact* », Springer Verlag, New York, Berlin, Heidelberg, London, Paris, Tokyo, pp :327-366.
- Gomez, F. , Gorsky, G., Garcia-Goriz, E. and M. Picheral (2004) Control of the phytoplankton distribution in the Strait of Gibraltar by wind and fortnightly tides. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 59, 485-497
- Gorsky, G. and P. Grosjean (2003) Qualitative and quantitative assessment of zooplankton samples. *Globe Int Newsletter*, 9 (1).
- Gorsky, G., Le Borgne, R., Picheral, M. and L. Stemann (2003) Marine snow latitudinal distribution in the equatorial Pacific along 180°. *Journal of Geophysical Research*. 108, C12: 11 1-8.
- Gorsky, G., Prieur, L., Taupier-Letage, I., Stemann, L. and M. Picheral (2002) Large Particulate Matter (LPM) in the Western Mediterranean. (2002) 1- LPM distribution related to hydrodynamics. *J. Mar. Syst.* 33– 34 : 289– 311.
- Gorsky, G., Youngbluth, M.J. and Deibel, D. (2004) *Response of marine ecosystems to global change: Ecological impact of appendicularians: Introduction*. In: G. Gorsky, M. Youngbluth and D. Deibel (Eds.) *Response of marine ecosystem to global change: Ecological impact of appendicularians*. *Contemporary Publishing International*, 3-7.
- Goux M., Guigue C., Leblond N., Desnues A., Dufour A., Aritio D., and Guieu C. (2005). Particle flux in the North-East Atlantic Ocean during the POMME experiment (2001): Results from Mass, Carbon, Nitrogen and lipid biomarkers from the drifting sediment traps. *Journal of Geophysical Research* (in press).
- Goux M., Moriceau B, Lee C, Liu Z, Guigue C, Duflos M, Tedetti M, Sempere R, Wakeham SG, and J. Xue J. Composition and degradation of marine particles with different settling velocities, L&O. in press.
- Grémare A, Amouroux JM, Cauwet G, Charles F, Courties C, deBové F, Dinet A, Devenon JL, Durieu de Madron X, Ferre B, Fraunié P, Joux F, Lantoiné F, Lebaron P, Naudin JJ, Palanques A, Pujo-Pay M, Zudaire L (2003). The effects of a strong winter storm on physical and biological variables at a shelf site in the Mediterranean. Preliminary results on the impact of a major winter storm. *Oceanol Acta*, 26 : 407–419
- Groisillier, A., Massana, R., Valentin, K., Vaultot, D. & Guillou, L. submitted. Genetic diversity and oceanic distribution of “novel” Alveolates Group I and II. *Aquat. Microb. Ecol.*
- Grosjean, P., Picheral, P., Warembourg, C. and G Gorsky (2004) Enumeration, measurement and identification of net zooplankton samples using the ZOOSCAN digital imaging system. *ICES Journal of Marine Science*. 61 (4): 518-525.
- Guidi, L., L. Stemann, L. Legendre, M. Picheral, L. Prieur, and G. Gabriel. 2007. Vertical distribution of aggregates (.110 mm) and mesoscale activity in the northeastern Atlantic: Effects on the deep vertical export of surface carbon. *Limnol. Oceanog*. In press.
- Guieu C., Loÿe-Pilot M-D, Ridame C. & Thomas C.. 2002. Chemical characterization of the Saharan dust end-member; some biological implications for the western Mediterranean, *Journal of Geophysical Research*, 10.1029/2001JD000582.
- Guieu, C., Bozec Y., Blain, S., Ridame, C., Sarthou, G. & Leblond, N. 2002, Impact of high *Saharan dust inputs on dissolved iron concentrations in the Mediterranean Sea*, *Geophysical Research Letters*, 10.1029/2001GL014454
- Guillou, L., Eikrem, W., Chrétiennot-Dinet, M. J., Le Gall, F., Massana, R., Romari, K., Pedrós-Alió, C. & Vaultot, D. 2004. Diversity of picoplanktonic prasinophytes assessed by direct nuclear SSU rDNA sequencing of environmental samples and novel isolates retrieved from oceanic and coastal marine ecosystems. *Protist* 155:193-214.
- Havskum, H., Thingstad, T.F., Scharek, R., Peters, C., Berdalet, E., Sala, M., Alcaez, M., Bangsholt J.C., Zweifel, U.-L., Hagström, A., Perez, M., Dolan, J. 2003. Silicate and labile DOC interfere in structuring the microbial food web via algal-bacterial competition for mineral nutrients. Results of a mesocosm experiment. *Limnology & Oceanography*, 48:129-140.
- Holtzendorff J, Marie D, Post AF, Partensky F, Rivlin A, Hess WR (2002) Synchronized expression of *ftsZ* in natural *Prochlorococcus* populations of the Red Sea. *Environmental Microbiology* 4:644-653
- Ignatiades, L. *Psarra, S*, Zervakis, V., Pagou, K., Souvermezoglou, E., Assimakopoulou, G. & Gotsis-Skretas, O., 2002. Phytoplankton size-based dynamics in the Aegean Sea (Eastern Mediterranean). *J. Mar. Sys.*, 36: 11-28.
- Karayanni H Christaki U Van Wambeke F Denis M Moutin T 2005 Influence of ciliated protozoa and heterotrophic nanoflagellates on fate of primary production in NE Atlantic Ocean. *Journal of Geophysical Research*. 110, C07S15, doi:10.1029/2004JC002602.

- Krom, M.D., Woodward, E.M.S., Herut, B., Kress, N., Carbo, P., Mantoura, R.F.C., Spyres, G., Thingstad, T.F., Wassmann, P., Wexels-Riser, C., Kitidis, V., Law, C., Zodiatis, G. (2005) Nutrient cycling in the south east Levantine basin of the eastern Mediterranean: results from a phosphorus starved system. *Deep-Sea Research I*
- Lebaron, P., Servais P., Agogue H., Courties C., & Joux F. (2001) Does the high nucleic acid content of individual bacterial cells allow us to discriminate between active cells and inactive cells in aquatic systems? *Appl Environ Microbiol* 67: 1775-1782
- Leblanc, K. and Hutchins, D.A. (2005). *New applications of a biogenic silica deposition fluorophore in the study of oceanic diatoms. Limnology and Oceanography Methods*, 3:462-476.
- Leblanc, K, A. Leynaert, C. Fernandez, P. Rimmelin, T. Moutin, P. Raimbault, J. Ras, B. Queguiner. 2005. A seasonal study of diatom dynamics in the North Atlantic during the POMME experiment (2001): evidence for Si limitation of the spring bloom. *Journal of geophysical research*, 110, No. C7, C07S14 10.1029/2004JC002621
- Leblanc, K., B. Queguiner, N. Garcia, P. Rimmelin & P. Raimbault, 2003: Silicon cycle in the Northwestern Mediterranean sea: seasonal study of a coastal oligotrophic site. *Oceanologica Acta*, 26, 339-356.
- Legendre L, Courties C, Troussellier M. Flow cytometry in oceanography 1989-1999; Environmental challenges and research trends. *Cytometry* 2001; 44:164-172.
- Loisel, H., J.M. Nicolas, P.Y. Deschamps, and R. Frouin (2002), Seasonal and inter-annual variability of the particulate matter in the global ocean. *Geophys. Res. Lett.*, 29(24): 2196, DOI:10.1029/2002GLO15948.
- Lo Monaco C., C. Goyet, N. Metzl, A. Poisson and F. Touratier (2005). Distribution and Inventory of Anthropogenic CO₂ in the Southern Ocean : Comparison of three Data-based Methods. *Journal of Geophysical Research (Oceans)*. In press.
- Lopez-Urrutia, A., Harris, R. P., Acuña, J. L., Båmstedt, U., Flood, P. R., Fyhn, H. J., Gasser, B., Gorsky, G., Irigoien, X., and M. Martinussen (2004) A comparison of appendicularian seasonal cycles in four contrasting European coastal environments In: G. Gorsky, M. Youngbluth and D. Deibel (Eds.) *Response of marine ecosystem to global change: Ecological impact of appendicularians*. Contemporary Publishing International, 255-276.
- Maixandeu A, Lefèvre D, Karayanni H, Christaki U, Van Wambeke F, Thyssen M, Denis M, Fernandez C, Uitz J, Leblanc K, Queguiner B. 2005. Microbial community production, respiration and structure of the microbial food web of an ecosystem in the Northeastern Atlantic Ocean. *Journal of Geophysical Research*, vol 110, C07S17, doi:1029/2004JC002694.
- Marañón, E., M.J. Behrenfeld, N. González, B. Mouriño & M.V. Zubkov. 2003. Variability in primary production in low-nutrient, low-chlorophyll regions of the central Atlantic ocean.
- Marañón, E., Cermeño, P., Fernández, E., Rodríguez, J., Zabala, L. (2004) Significance and mechanisms of photosynthetic production of dissolved organic matter in a coastal eutrophic ecosystem. *Limnol. Oceanogr.* 49(5) 1652-1666
- Marañón, E., Cermeño, P., Pérez, V. (2005) Continuity in the photosynthetic production of dissolved organic carbon from eutrophic to oligotrophic waters. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 299, 7-17.
- Marie, D., Zhu, F., Balagué, V., Ras, J. & Vaulot, D. 2006. Eukaryotic picoplankton communities of the Mediterranean Sea in summer assessed by molecular approaches (DGGE, TTGE, QPCR). *FEMS Microbiol. Ecol.* in press:
- Mary I., Cummings D.G., Biegala I.C., Burkill P.H., Archer S.D. & Zubkov M.V. (2006) Seasonal variability of bacterioplankton composition in the English Channel. *Aquatic Microbial Ecology* 42: 119-126.
- Mills, M., C. Ridame, M. Davey, J. La Roche and R. Geider 2004. Iron and phosphorus co-limit nitrogen fixation in the Eastern Tropical North Atlantic, *Nature*, 429, 292-294.
- Moutin, T., & P. Raimbault, 2002: Primary production, carbon export and nutrients availability in western and eastern Mediterranean Sea in early summer 1996 (MINOS cruise). *Journal of Marine Systems*, 33/34, 273-288.
- Moutin, T., N. Van Den Broeck, B. Beker, C. Dupouy, P. Rimmelin & A. Le Bouteiller. 2005. Phosphate availability controls *Trichodesmium* spp. biomass in the SW Pacific ocean. *Mar. Ecol. Progr. Ser.* 297, 15-21.
- Moutin, T., T.F. Thingstad, F. Van Wambeke, D. Marie, G. Slawyk, P. Raimbault & H. Claustre, 2002: Does competition for nano-molar phosphate supply explain the predominance of the cyanobacterium *Synechococcus*? *Limnology and Oceanography*, 47, 1562-1567.
- Nedoma, J., Garcáa, J.-C., Comerma, M., Á imek, K., and Armengol J. 2006. Extracellular phosphatases in a Mediterranean reservoir: seasonal, spatial and kinetic heterogeneity. *Freshwater Biology*, 51: 1264-1276
- Nedoma J., Padisak J., Koschel R. (2003a) Utilisation of ³²P-labelled nucleotide- and non-nucleotide dissolved organic phosphorus by freshwater plankton. *Archiv für Hydrobiologie, Advances in Limnology*, 58: 87-99.
- Nedoma, J., Strojsova, A., Vrba, J., Komarkova, J., Simek K. (2003b) Extracellular phosphatase activity of natural plankton studied with ELF97 phosphate: fluorescence quantification and labelling kinetics. *Environmental Microbiology*, 5: 462-472.
- Not, F., Latasa, M., Marie, D., Cariou, T., Vaulot, D. & Simon, N. 2004. A single species *Micromonas pusilla* (Prasinophyceae) dominates the eukaryotic picoplankton in the western English Channel. *Appl. Environ. Microbiol.* 70:4064-72.
- Panagiotopoulos C., Sempéré R. (2005). Analytical methods for the determination of sugars in aquatic environments- An historical perspective and future directions. *Limnology and Oceanography-methods*, 419-454.
- Peters, F., Marassé, C., Havskum, H., Rassoulzadegan, F., Dolan, J.R., Alcaez, M., Gasol, J.M. 2002. Turbulence and the microbial food web: effects on bacterial losses to predation and on community structure. *Journal of Plankton Research*, 24: 321-331.

- Pujo-Pay M, Conan P, Joux F, Oriol L, Naudin JJ, Cauwet G (2006) Impact of phytoplankton and bacterial production on nutrient and DOM uptake in the Rhone River plume (NW Mediterranean) (2006). *Mar Ecol Prog Ser.*, 315 : 43-54.
- Pujo-Pay M, Conan P, (2003) Seasonal variability and export of dissolved organic nitrogen in the North Western Mediterranean Sea. *J Geophys Res*, 108 (C6): 1901-1911
- Pujo-Pay M, Conan P, Joux F, Oriol L, Naudin JJ, Cauwet G (2006) Impact of phytoplankton and bacterial production on nutrient and DOM uptake in the Rhone River plume (NW Mediterranean) (2006). *Mar Ecol Prog Ser.*, 315 : 43-54.
- Psarra, S., Zohary, T., Krom, M.D., Mantoura, R.F.C., Polychronaki, T., Stambler, N., Tanaka, T., Tselepides, A., Thingstad, T.F., 2005. Phytoplankton response to a Lagrangian phosphate addition in the Levantine Sea (Eastern Mediterranean). *Deep// Sea// Research II*, 52: 2944-2960
- Riandey V., Champalbert G., Carlotti F., Taupier-Letage I., Thibault-Botha, D. (2005). Mesoscale variability of the zooplankton distribution related to the hydrodynamic features in the Algerian Basin (Western Mediterranean Sea). *Deep Sea Res.* 52, 2029-2048
- Ridame C., Guieu C. 2002, Saharan input of phosphorus to the oligotrophic water of the open western Mediterranean, *Limnology and Oceanography*, 47(3), 856-869
- Ridame, C., T. Moutin & C. Guieu, 2003: Does phosphate adsorption onto Saharan dust explain the unusual N/P ratio in the Mediterranean Sea? *Oceanologica Acta*, 629-634.
- Rimmelin, P. and T. Moutin. 2005. Re-examination of the MAGIC method to determine low orthophosphate concentration in seawater. *Analytica Chimica Acta* 548: 174-182.
- Romari, K. & Vaultot, D. 2004. Composition and temporal variability of picoeucaryote communities at a coastal site of the English Channel from 18S rDNA sequences. *Limnol. Oceanogr.* 49:784-98.
- Roy-Barman, M., L. Coppola and *M. Souhaut (2002) Thorium isotopes in the Western Mediterranean Sea: an insight in the marine particle dynamics, *Earth. Planet. Sci. Lett.*, 196, 161-174.
- Servais P., Casamayor E.O., Courties C. Catala P. Parthuisot N., Lebaron P (2003) Activity and diversity of bacterial cells with high and low nucleic acid content. *Aquat Microb Ecol* 33: 41-51.
- Shaked Y and de Vargas C. 2006. Pelagic photosymbiosis: rDNA assessment of diversity and evolution of dinoflagellate symbionts and planktonic foraminiferal hosts. *Marine Ecology Progress Series*, 325, 59-71.
- Sharp JH, Beaugard AY, Burdige D, Cauwet G, Curless S, Lauck K, Nagel K, Ogawa H, Parker AE, Primm O, Pujo-Pay M, Savidge WB, Seitzinger S, Spyres G, Styles R (2004) A direct instrument comparison for measurement of total dissolved nitrogen in seawater. *Mar Chem* 84 (3-4): 181-193
- Sharp JH, Rinker KR, Savidge KB, Abell J, Benaim JY, Bronk D, Burdige DJ, Cauwet G, Chen W, Doval MD, Hansell D, Hopkinson C, Kattner G, Kaumeyer N, McGlathery KJ, Merriam J, Morley N, Nagel K, Ogawa H, Pollard C, Pujo-Pay M, Raimbault P, Sambrotto R, Seitzinger S, Spyres G, Tirendi F, Walsh TW, Wong CS (2002). A Preliminary Methods Comparison for Measurement of Dissolved Organic Nitrogen in Seawater. *Mar Chem* 78 (4): 171-184
- Siegel, D.A., S. Maritorena, N.B. Nelson, M.J. Behrenfeld, C.R. McClain. 2005. Colored dissolved organic matter and its influence on the satellite-based characterization of the ocean biosphere. *Geophys. Res. Lett.* 32, L20605, doi:10.1029/2005GL024310
- Siegel D.A., S. Maritorena, N.B. Nelson, M.J. Behrenfeld. 2005. Independence and interdependences of global ocean optical properties viewed using satellite color imagery. *J. Geophys. Res.* 110, C07011, doi:10.1029/2004JC002527
- Simek, K., Hornak, K., Masin, M., Christaki, U., Nedoma, J., Weinbauer, M.G., Dolan, J.R. 2003. Effect of resource enrichment on grazed and ungrazed bacterioplankton communities of a meso-eutrophic reservoir. *Aquatic Microbial Ecology*, 31:123-135.
- Simek, K., Nedomaa, J., Pernthaler, J., Posch, T., Dolan, J.R. 2002. Altering the balance between bacterial production and protistan bacterivory triggers shifts in freshwater bacterial community composition. *Autonie van Leeuwenhoek*, 81:453-463.
- Siokou-Frangou I., Bianchi M., Christaki U., Christou E., Giannakourou A., Gotsis O., Ignatiades L., Pagou K., Pitta P., *Psarra S., * Souvermezoglou E., Van Wambeke F., & V. Zervakis, 2002. Organic carbon partitioning and carbon flow along a gradient of oligotrophy in the Aegean Sea (Mediterranean Sea), *J. Mar. Sys.* //33-34: 335-353
- Sohrin R., Sempéré R. (in press). Seasonal variation of dissolved organic carbon in North Atlantic Ocean. An approach of a mesoscale study. *J. Geophys. Res.*
- Stemmann, L., Gorsky, G., Marty, J.C., Miquel, J.C. and M. Picheral (2002) Four years survey of Large Particles (>0.15 mm) vertical distribution (0-1000 m) in the NW Mediterranean. *Deep-Sea Res II* 49 : 2143-2162.
- Stemmann, L., Jackson, G. A. and G. Gorsky (2004) vertical model of particle size distributions and fluxes in the midwater column that includes biological and physical processes—Part II: application to a three year survey in the NW Mediterranean Sea. *Deep Sea Research Part I*, 51, 885-908
- Tamburini C. 2006. Life under pressure. Deep-sea microbial ecology. In: Ed. JS (ed) *Life as we know it. Series: Cellular Origin and Life in Extreme Habitats and Astrobiology*. Springer, Dordrecht, The Netherlands p650 pp
- Tamburini C., Garcin J, Grégori G, Leblanc K, Rimmelin P, Kirchman DL (2006) Pressure effects on surface Mediterranean prokaryotes and biogenic silica dissolution during a diatom sinking experiment. *Aquatic Microbial Ecology* 43:267-276.

- Tamburini, C., Garcin, J., and Bianchi, A. (2003) Role of deep-sea bacteria in organic matter mineralization and adaptation to hydrostatic pressure conditions in the NW Mediterranean Sea. *Aquatic Microbial Ecology* 32: 209-218.
- Tamburini, C., Garcin, J., Grégori, G., Leblanc, K., Rimmelin, P., and Kirchman, D.L. (submitted) Role of hydrostatic pressure on surface marine procaryotes responsible for biogenic silica dissolution during a simulated diatom sinking experiment. Bourguet N., Torretton J. P., Arondel V., Galy O., and Goutx M. (2003). Specific and sensitive radiometric assay for measurement of real microbial lipase activities in marine water samples. *Applied Environmental Microbiology*, 69, 7395-7400.
- Tamburini, C., Garcin, J., Ragot, M., and Bianchi, A. (2002) Biopolymer hydrolysis and bacterial production under ambient hydrostatic pressure through a 2000 m water column in the NW Mediterranean. *Deep-Sea Research II* 49: 2109-2123.
- Tanaka, T., P. Henriksen, R. Lignell, K. Olli, J. Seppälä, T. Tamminen and T. F. Thingstad (submitted) Specific affinity for phosphate uptake and specific alkaline phosphatase activity as diagnostic tools for detecting P-limited phytoplankton and bacteria.
- Tachikawa, K., M. Roy-Barman, A. Michard, D. Yeguichian, D. Thouron, C. Jeandel (2004) Nd isotopes in the Mediterranean Sea: Comparison between seawater and sediment signals. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 68, 3095-3106.
- Tchernov D, Gorbunov MY, de Vargas C, Yadav SN, Vardi A, Häggblom M, and Falkowski P. 2004. Membrane lipids of Symbiotic algae are diagnostic of sensitivity to thermal bleaching in corals. *Proceedings of the National Academy of Sciences (PNAS)* 101(37):13531-13535.
- Thibault D., S. Roy, C.S. Wong and J.K. Bishop, 1999. The downward flux of biogenic material in the NE Subarctic Pacific: Importance of algal sinking and mesozooplankton herbivory. *Deep-Sea Research II*, 46, (11-12): 2669-2697
- Thingstad, T. F. and R. F. C. Mantoura. 2005. Titrating excess nitrogen content of phosphorous-deficient eastern Mediterranean surface water using alkaline phosphatase activity as a bio-indicator. *Limnology and Oceanography: Methods* 3: 94-100.
- Thingstad, T. F., M. D. Krom, R. F. C. Mantoura, G. A. F. Flaten, S. Groom, B. Herut, N. Kress, C. S. Law, A. Pasternak, P. Pitta, S. Psarra, F. Rassoulzadegan, T. Tanaka, A. Tselepides, P. Wassmann, E. M. S. Woodward, C. Wexels Riser, G. Zodiatis and T. Zohary. 2005. Nature of Phosphorus Limitation in the Ultraoligotrophic Eastern Mediterranean. *Science* 309: 1068-1071.
- Touratier F. and C. Goyet (2004a). Definition, properties, and Atlantic Ocean distribution of the new tracer TrOCA. *Journal of Marine Systems*, 46, 169-179
- Touratier F. and C. Goyet (2004b). Applying the new TrOCA approach to estimate the distribution of anthropogenic CO₂ in the Atlantic Ocean. *Journal of Marine Systems*, 46, 181-197
- Touratier F., N. Ait-Ameur, and C. Goyet (2005). Evolution of anthropogenic CO₂ in the nineties at DYFAMED time-series station, Poster presented at the EUROCEAN meeting, September 2005, Naples, Italy
- Touratier F., Goyet C., Coatanoan C., and Andrié C. (2005). Assessments of anthropogenic CO₂ distribution in the tropical Atlantic Ocean, *Deep-Sea Research I*, 52, 2275-2284.
- Van den Broeck, N. and T. Moutin. 2002. *Phosphate in the sediments of the Gulf of Lions (NW Mediterranean Sea), relationship with inputs by the river Rhone*. *Hydrobiologia*, 472, 85-94.
- Van Den Broeck, N., T. Moutin, M. Rodier & A. Le Bouteiller. 2004. *Seasonal variations of phosphate availability in the SW Pacific Ocean near New Caledonia*. *Mar. Ecol. Progress Ser.* 268, 1-12.
- Van Mooy, B.A.S., Rocap, G., Fredricks, H.F., Evans, C.T., and Devol, A.H. (in press) Sulfolipids dramatically decrease phosphorus demand by picocyanobacteria in oligotrophic marine environments. *Proc. Natl. Acad. Sci.*
- Van Mooy, B.A.S., Devol, A.H., and Keil, R.G. (2004) Quantifying 3H-thymidine incorporation rates by a phylogenetically defined group of marine planktonic bacteria (Bacterioidetes phylum). *Environ. Microbiol.* 6:1061-1069.
- Van Mooy, B.A.S., Devol, A.H., and Keil, R.G. (2004) Relationships between bacterial community structure, light, and carbon cycling in the eastern subarctic North Pacific. *Limnol. Oceanogr.* 48:1056-1062.
- Van Mooy, B.A.S., Keil, R.G. and Devol, A.H. (2002) Impact of suboxia on sinking particulate organic carbon: Enhanced carbon flux and preferential degradation of amino acids via denitrification. *Geochim. Cosmochim. Acta*/ 66: 457-465.
- Van Mooy, B.A.S. and Keil, R.G. (2002) Seasonal variation in sedimentary amino acids and the association of organic matter with mineral surfaces in a sandy eelgrass meadow. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 227:275-280.
- Van Mooy, B. A. S. 2003. Carbon and phosphorus cycling by phylogenetically-defined groups of bacteria in the North Pacific Ocean. Ph.D. University of Washington.
- Van Wambeke F, Lefèvre D, Prieur L, Sempéré R, Bianchi M, Oubelkheir K, Bruyant F, 2004. Distribution of microbial biomass, production, respiration, dissolved organic carbon and factors controlling bacterial production across a geostrophic front (Almeria-Oran, SW Mediterranean Sea). *Marine Ecology Progress Series*, 269: 1-15
- Van Wambeke, F., Christaki, U., Giannakourou, A., Moutin, T., and K. Souvemerzoglou, 2002: Longitudinal and vertical trends of bacterial limitation by phosphorus and carbon in the Mediterranean sea. *Microbial Ecology*, 43, 119-133.
- Weinbauer, M., C. Winter, et al. (2002). "Reconsidering transmission electron microscopy based estimates of viral infection of bacterioplankton using conversion factors derived from natural communities." *Aquat. Microb Ecol* 27: 103-110.

- Weinbauer, M.G. 2004. Ecology of prokaryotic viruses. *FEMS Microbiol. Rev.* 28: 127-181
- Weinbauer, M.G., Christen, R. & M.G. Höfle. In press. The response of *Vibrio* and *Rhodobacter*-related populations of the NW Mediterranean Sea to additions of dissolved organic matter, phages, or dilution. *Microb. Ecol.*
- Winter, C, Smit, A, Herndl, G.J. & M.G. Weinbauer. 2005. Linking bacterial richness with viral abundance and prokaryotic activity. *Limnol. Oceanogr.* 50 : 968-977
- Zhu, F., Massana, R., Not, F., Marie, D. & Vaulot, D. 2005. Mapping of picoeucaryotes in marine ecosystems with quantitative PCR of the 18S rRNA gene. *FEMS Microbiol. Ecol.* 52:79-92.
- Zohary, T., B. Herut, M. D. Krom, R. F. C. Mantoura, P. Pitta, S. Psarra, F. Rassoulzadegan, N. Stambler, T. Tanaka, T. F. Thingstad, E. M. S. Woodward (*in press*). P-limited bacteria but N&P co-limited phytoplankton in the Eastern Mediterranean – a microcosm experiment. *Deep-Sea Research*

AUTRES REFERENCES EN ANNEXE

MOYENS DONT DISPOSE OU QUE DEMANDE LE PROPOSANT POUR LA RÉALISATION DU PROJET

1. Personnels et laboratoires impliqués

Le tableau récapitulatif du personnel et des laboratoires impliqués figure en page 5

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

ISUS Nitrate	Université Dalhousie/Satlantic Inc.
Spectromètre de masse	Laboratoire d'Océanographie et de Biogéochimie
Flow cytometer (FACSAria) Tri cellulaire	Laboratoire d'océanographie Biologique de Banyuls
Flow cytometer (FACSCalibur)	Laboratoire d'océanographie Biologique de Banyuls
APO (Oxygen Productivity Auto Sampler	Laboratoire Microbiologie Géochimie Ecologie Marines
Autoanalyser Bran&Luebbe (Nutrient analyser)	Laboratoire d'océanographie Biologique de Banyuls
CHN LECO 900	Laboratoire d'Océanographie de Villefranche
laser OPC	Laboratoire d'Océanographie et de Biogéochimie
TCO2/TA potentiometric system	Université de Perpignan
pCO2 system	Université de Perpignan
TRIOS radiometer (350 nm to 850 nm)	ELICO, FRE 2816-CNRS
Radiometer TRIOS (350 nm to 900 nm every 3 nm)	ELICO, FRE 2816-CNRS
Wetlabs optical package mounted on a specific frame	ELICO, FRE 2816-CNRS
PVM	Laboratoire d'Océanographie de Villefranche
Plankton nets	Laboratoire d'Océanographie de Villefranche
Zooscan	Laboratoire d'Océanographie de Villefranche
HPLC	Woods Hole Oceanographic Institution
Hybridization oven	Institut de Recherche pour le Développement
Microscopes	Laboratoire d'Océanographie et de Biogéochimie
Epifluorescence microscope	Laboratoire Microbiologie Géochimie Ecologie Marines
PCR	Laboratoire Microbiologie Géochimie Ecologie Marines
Bacterial cell culture	Laboratoire Microbiologie Géochimie Ecologie Marines
Electrophoresis	Institut de Recherche pour le Développement
CHN LECO 900	Laboratoire d'Océanographie de Villefranche
Flow injection analyser for the determination of DFe on board.	Laboratoire d'Océanographie de Villefranche
8 GoFlo bottles for ultra-clean sampling	Laboratoire d'Océanographie de Villefranche
Teflon pump for surface sampling	Laboratoire d'Océanographie de Villefranche
Flow cytometer (virus)	Laboratoire d'Océanographie de Villefranche
TOC-V analyser	Laboratoire d'océanographie Biologique de Banyuls
Autoanalyser Bran&Luebbe (Nutrient analyser)	Laboratoire d'océanographie Biologique de Banyuls
Scintillation counter (in lab)	Laboratoire d'Océanographie et de Biogéochimie
Spectrophotometer Spectronic 401	Laboratoire d'Océanographie et de Biogéochimie
Autoanalyser (Nutrient analyser)	Laboratoire d'Océanographie et de Biogéochimie
1 Spectrofluorometer Kontron SFM 25	Laboratoire Microbiologie Géochimie Ecologie Marines
2 pressure piloted generator (PGG)	Laboratoire Microbiologie Géochimie Ecologie Marines
1 High Pressure Sampler System with 10 independent sampling bottles	Laboratoire Microbiologie Géochimie Ecologie Marines
4 Temperature controlled insulated aluminium containers for incubations	Laboratoire Microbiologie Géochimie Ecologie Marines
1 centrifuge	Laboratoire d'Océanographie et de Biogéochimie
1 micro-centrifuge	Laboratoire Microbiologie Géochimie Ecologie Marines
Laboratory Optical Particles Counter	Laboratoire d'Océanographie et de Biogéochimie
Bongo Net tows	Laboratoire d'Océanographie et de Biogéochimie

3. Moyens demandés hors appel d'offre LEFE (indiquer ici les moyens demandés aux commissions scientifiques en charge de l'examen des demandes de campagnes à la mer, « Vols Avion », « Vols Ballon », les commissions de l'IDRIS pour le temps calcul, les demandes de soutien à la DT INSU, etc...). Pour les projets comportant une campagne en mer sur la flotte hauturière de l'Ifremer, les proposant doivent remplir l'**annexe 2** (<http://www.insu.cnrs.fr/pj/document/652.rtf>) et **préciser le montant financier pour le fret et les missions ainsi que les organismes à qui ils seront demandés**. Pour les autres demandes de moyens indiquer précisément la nature de la demande et la justifier (joindre éventuellement une annexe qui pour les vols avion peut-être le dossier de demande disponible sur www.saphir.fr).

Voir en annexe 2, le formulaire simplifié de demande de navires océanographiques

En ce qui concerne le fret et les missions relatives à la campagne océanographique, la demande sera faite sur la ligne soutien à la mer INSU.

4. Labelisation de bourses post-doctorales ou doctorale : Le financement de bourses doctorales ou post-doctorales ne peut pas être pris en compte dans le cadre de l'Appel d'Offre LEFE. Par contre, **un soutien sous la forme d'un label** pourra être accordé à une demande de bourse doctorale ou post-doctorale déposée auprès d'un organisme partenaire de LEFE.

Le label CYBER est demandé pour les 7 sujets de thèses et le sujet de post doctorat présentés ci-après.

Nature de la bourse (doctorale ou post-doctorale) : Doctorale

Organismes concernés par la demande : MRT

Nom de l'encadrant principal: **Pascale Bouruet-Aubertot** (LOCEAN/IPSL) et **Louis Prieur**, Docteur d'Etat, (LOV), CNRS UMR 7093

En collaboration avec Thierry Moutin (LOB)

Titre de la demande : Impact de la dynamique à petite échelle sur la productivité primaire dans les régions oligotrophes : analyse des données de la campagne BOUM.

Le flux d'éléments nutritifs (FEN) à la base de la couche euphotique (CE) est un terme majeur du cycle du carbone dans l'océan. Sur le long terme, il conditionne l'export du carbone vers les couches non éclairées et sur le court terme, le flux de production nouvelle dans CE, la production régénérée recyclant les éléments nutritifs dans CE. L'intensité de FEN est susceptible d'orienter l'écosystème de l'oligotrophie (flux faible) à l'eutrophie (flux fort) et de piloter la diversité fonctionnelle de l'écosystème (Hulot et al., 2000 ; Nature, 408, p 340-344). Dans le cadre de la campagne BOUM, ce flux doit être évalué avec précision en vue de le comparer avec une autre source externe d'azote liée à la diazotrophie.

FEN est le résultat des effets permanents et/ou intermittents d'advection et de diffusion et peut être représenté par le produit d'un coefficient de diffusion turbulente verticale par le gradient des éléments nutritifs. Toutefois il est possible qu'un apport dans la couche éclairée soit effectué par advection horizontale moyenne lorsque la submoyenne échelle est considérée. Au total FEN est sans doute mal évalué dans les zones oligotrophes où il est faible mais non nul et où la production nouvelle ne semble pas négligeable. Il reste donc un sujet crucial d'étude (Lévy 2003, McGillicuddy & Robinson 1997, Balter et al. 2005, et Lévy 2005).

La thèse consistera dans un premier temps (avant la campagne) à faire une analyse critique des théories et des observations ayant conduit à de précédentes évaluations en région oligotrophe et en particulier dans les tourbillons anticycloniques de moyenne échelle. La seconde phase consistera à acquérir des données multi-plateforme en différents points de la Méditerranée, présentant un gradient d'oligotrophie, puis à traiter les données. Enfin sera faite une synthèse des résultats qui comportera une comparaison avec les résultats de campagnes précédentes (Dynaproc, en Mer Ligure qui avait stratégie similaire mais moins instrumentée) dans des régions moins oligotrophes et/ou avec ceux obtenus par d'autres auteurs (e.g. Lewis et al. 1986, Science, 234 : 870-876)

Quelques précisions sur la stratégie et les méthodes d'évaluation prévues sont maintenant décrites : Sur le plan expérimental, l'analyse de données hydrologiques et de courantométrie « classiques » (CTD et LADCP) et de mesures directes de turbulence conduira à déterminer l'impact de la dynamique de petite échelle et de haute fréquence sur le mélange turbulent. Les mesures d'éléments nutritifs menées de pair permettront d'établir une estimation des flux à la base de la couche éclairée.

Durant la campagne, les sites d'observations seront choisis de manière à ce que l'advection horizontale soit faible, plutôt aux centres des tourbillons anticycloniques, afin d'éviter la complexité induite par les apports latéraux. Toutefois, l'advection horizontale sera évaluée et la pente des isopycnes calculée. Les gradients verticaux sont mesurables avec précision, mais les coefficients de diffusion verticaux K_z sont difficiles à mesurer, bien que les techniques de mesure des flux turbulents par la méthode des corrélations de fluctuation de vitesses verticales avec la température ou la salinité existent (Lewis et al. 1986). Malheureusement, ces techniques sont chères et difficiles à mettre en œuvre. Ainsi, la diffusion turbulente est généralement estimée à partir de méthodes indirectes basées sur des mesures (CTD et ADCP) à échelle fine. Une méthode actuellement utilisée repose sur l'évaluation du nombre de Richardson, carré du rapport entre la fréquence de flottabilité (fonction du gradient vertical de densité) et du cisaillement vertical du courant horizontal. Ce nombre permet d'estimer l'occurrence d'instabilités de Kelvin Helmholtz, conduisant à un flux vertical d'éléments nutritifs dans les régions stratifiées (Gregg 1987, Large et

al. 1994, Kantha & Clayson 1994). Une estimation précise de ce nombre est déterminée à partir des données récoltées par les sondes CTD SBE 911 couplées à une rosette équipée d'un LADCP. Parallèlement, des mesures de microstructure résolvant les échelles dissipatives seront réalisées en utilisant le "VMP5500" (full ocean depth un-tethered profiling system) qui a été acquis par le LPO et le LOCEAN (ANR). Ce profileur est équipé de capteurs haute fréquence pour la température et le cisaillement qui permettent deux estimations indépendantes de K_z . Ces deux estimations de K_z seront utilisées pour tester la pertinence des différentes méthodes indirectes basées sur les mesures classiques à échelle fine avec la CTD et l'ADCP. La validation de ces estimations indirectes de K_z permettra de les utiliser avec plus de pertinence lorsque des mesures de microstructure ne pourront être réalisées.

Sur le plan théorique, la validité de la paramétrisation conseillée par Osborn (1980, JPO 10 :83-89) pour le coefficient de diffusion vertical en $Cte.\epsilon.N^{-2}$ sera revue dans le cas des tourbillons méditerranéens. Bien que déjà ancienne, cette formulation reste souvent utilisée. Il se pourrait que cette paramétrisation soit inadéquate en Méditerranée où les ondes internes ont de faibles amplitudes, la marée est faible et où le gradient vertical de densité est faible dès 150-200 m comparé à celui de l'océan mondial.

Nature de la bourse (doctorale ou post-doctorale) : Doctorale
Organismes concernés par la demande : MRT
Nom de l'encadrant principal: **P. Raimbault** (LOB)

Titre de la demande : **Quantification de la fixation d'azote en Méditerranée – Importance dans l'évaluation de la production nouvelle et le bilan biogéochimique de l'azote.**

La mer Méditerranée est connue depuis longtemps comme une mer oligotrophe possédant une faible charge nutritive et présentant une anomalie dans le rapport entre les deux composés nutritifs majeurs que sont le nitrate et le phosphate. En effet, alors que ces composés se distribuent dans l'océan mondial dans un rapport proche de la valeur 16/1, dit rapport de Redfield, le rapport nitrate/phosphate des eaux profondes de Méditerranée varie de 20- 21/1 dans le bassin occidental, à 25/1 dans le bassin oriental. Ce déficit en phosphate a amené certains auteurs à considérer cet élément comme le facteur nutritif limitant de la production primaire en Méditerranée, comme cela est observé dans certains milieux confinés, où l'apport d'un excès azote d'origine atmosphérique entraînerait à long terme un déficit en phosphore. La fixation de diazote par voie biologique, ou diazotrophie, a ainsi été proposée comme source d'azote externe pour expliquer ces particularités méditerranéennes. Cette hypothèse est soutenue par des résultats obtenus à partir des enrichissements naturels d'azote ($\delta^{15}\text{N}$). Sachs et Repeta (1999) ont montré à partir de mesures de $\delta^{15}\text{N}$ à la fois dans le phytoplancton et le nitrate que la diazotrophie devait être un processus majeur d'apport d'azote en Méditerranée orientale. De même, la faible valeur de $\delta^{15}\text{N}$ mesurée sur la matière particulaire qui sédimente dans le golfe du Lion (Kerhervé et al., 2001) pourrait s'expliquer par une source d'azote atmosphérique.

Bien qu'à l'heure actuelle aucun organisme pélagique fixateur d'azote n'ait été observé en Méditerranée, des indices de leur possible existence ont été récemment mis en évidence. Des mesures de fixation d'azote moléculaire ont été réalisées pour la première fois en Méditerranée occidentale, dans le cadre des opérations MELISSA et PECHE (PROOF), et ont révélé l'existence de ce processus tout au long de l'année (Garcia et al., 2006 ; Sandroni et al., soumis) . Des résultats identiques ont été obtenus dans le bassin oriental (Rees et al., 2006).

Le sujet de thèse propose de préciser et de confirmer ces premiers résultats en s'appuyant sur des opérations qui couplent à la fois les mesures de taux de fixation d'azote, la reconnaissance des organismes qui pourraient en être responsable (travaux de biologie moléculaire) et l'étude des facteurs de contrôle (apports atmosphériques).

Les opérations actuellement concernées et soumises au programme CYBER-LEFE sont DIAMS (**DI**Azotrophie in **Med**iterannean **S**ea) et BOUM (**B**iogéochimie de l'**O**ligotrophie à l'**U**ltra-oligotrophie **M**éditerranéenne).

Le présent sujet sera principalement axé sur la quantification des taux de fixation et de production primaire par la méthode isotopique couplée ($^{13}\text{C}/^{15}\text{N}$), et la détermination des variations d'abondance naturelle ($\delta^{15}\text{N}$). Le couplage de ces paramètres devrait permettre de préciser le rôle de la diazotrophie dans le système productif et son importance dans le bilan biogéochimique de la Méditerranée.

Nature de la bourse (doctorale ou post-doctorale) : **Doctorale**

Organismes concernés par la demande : MRT, IRD, Bourse régionale

Nom de l'encadrant principal : **I. BIEGALA**

Titre de la demande : **Diversité et distribution des diazotrophes pico et nanoplanctoniques en Méditerranée au moyen d'outils moléculaires**

La majeure partie de la surface des océans est oligotrophe. Dans ces zones oligotrophes certains procaryotes, les diazotrophes photosynthétiques ont un avantage écologique par rapport aux autres espèces du phytoplancton car ils peuvent assimiler le diazote dissous non limitant, provenant de l'atmosphère. Cette assimilation très coûteuse en énergie se fait grâce à la présence d'une enzyme, la nitrogénase codée par le gène *nifH*. La diazotrophie des zones oligotrophes peut correspondre jusqu'à 50% de la production nouvelle et contribue significativement à la séquestration du CO₂ atmosphérique dans les sédiments (Karl et al. 1997).

Des études récentes ont montré que la diazotrophie a été largement sous estimée, elle était généralement imputée aux cyanobactéries filamenteuses du genre *Trichodesmium sp.* et *Rischelia sp.* (> 100 µm), mais leur abondance ne permet pas d'expliquer la totalité des nouvelles estimations (Grubber et Sarmiento, 1997). Récemment, une grande richesse en espèces a été découverte, grâce aux techniques de biologie moléculaire, chez des cyanobactéries unicellulaires et des bactéries hétérotrophes du plancton (< 10 µm), soit libres soit associées à d'autres organismes tels que le plancton et les coraux (Zehr et al. 2001, Lesser et al. 2004, Foster et al. 2006). En Méditerranée il a été montré récemment, au centre de la mer Ligure (station DYFAMED), que la fixation d'azote s'échelonne toute l'année (Garcia et al. 2006). Elle est maximale au printemps, mais c'est en été qu'elle contribuerait majoritairement à la production primaire nouvelle. Or jusqu'à présent parmi les cyanobactéries diazotrophes filamenteuses *Trichodesmium sp.* n'aurait pas été observé en Méditerranée et *Rischelia* à quelques reprises (Leblanc comm. Pers.). Il est donc fort probable que les cellules pico et nanoplanktoniques qui soient en grande partie responsables de cette activité.

L'objectif de la thèse permettra de répondre aux questions suivantes :

- ▶ Quelle est la diversité (richesse en espèces et abondance) des cyanobactéries diazotrophes de petites taille ?
- ▶ Quelle est la distribution spatiale et temporelle de ces organismes le long de gradients d'oligotrophie ?
- ▶ Quelle est la contribution des ces organismes à la diazotrophie globale le long de ces gradients ?

Alors que la richesse en espèces sera réalisée grâce à la technique du clonage et séquençage du gène *nifH* des cyanobactéries (Olson et al. 1998), l'abondance et la distribution des cyanobactéries sera réalisée grâce à l'utilisation de sondes moléculaires fluorescentes (TSA-FISH) spécifiques (Biegala et al. 2003, 2005). Les recherches seront menées en priorité à une station côtière méditerranéenne (SOMLIT, INSU) où une étude saisonnière sera effectuée, ainsi qu' au cours d'une campagne océanographique le long de deux transects (côte-large et occident-orient). Ces études s'inscrivent dans deux programmes CYBER-LEFE en cours de demande, DIAMS (**DI**Azotrophy in **Me**diterranean **S**ea) et BOUM (**Bi**ogéochimie de l'**O**ligotrophie l'**U**ltra-oligotrophie **M**éditerranéenne).

Nature de la bourse (doctorale ou post-doctorale) : Doctorale
Organismes concernés par la demande : MRT
Nom de l'encadrant principal: **T. Moutin** (LOB)/**P. Lebaron** (LOBB)

Titre de la demande : **Compétition entre autotrophes et hétérotrophes pour la disponibilité du phosphate en milieu marin oligotrophe : conséquences sur le cycle biogéochimique du carbone en mer Méditerranée, mission BOUM.**

Nos travaux récents ont permis de confirmer le rôle essentiel que peut jouer le phosphate dans le contrôle des flux de carbone dans la couche éclairée des régions océaniques oligotrophes (Moutin et al. 2002 ; Moutin et al., 2005), et en particulier en Méditerranée. La concentration en phosphate minéral dissous, variable-clé du cycle du phosphate, atteint dès le début du printemps des niveaux très faibles et il a été démontré récemment que cette faible disponibilité en phosphate contrôle non seulement la production primaire (Diaz et al. 2001 ; Moutin & Raimbault, 2002) mais également la production hétérotrophe bactérienne (Thingstad *et al.*, 1998, 2005 ; Van Wambeke *et al.*, 2002). Les conséquences en terme d'exportation de carbone, sous forme organique dissoute, ou particulière, de la prise en compte de ces processus sont fondamentales pour la mer Méditerranée (Avril, 2002, Thingstad et al., 2005) et d'une manière générale pour l'océan global dont les zones oligotrophes représente 50 % de la surface et environ 40 % de la production primaire (Antoine et al., 1996). L'essentiel de l'assimilation de phosphate est réalisée par les organismes de petites tailles en milieu oligotrophe. Durant la campagne PROSOPE, il a été démontré que les organismes de la fraction de taille 0.6-2 μm , probablement les *Synechococcus*, avaient en plus d'une forte affinité pour le phosphate, des vitesses maximum d'assimilation supérieures aux bactéries hétérotrophes et aux algues eucaryotes (Moutin et al. 2002). Ces avantages spécifiques concernant l'uptake à faible concentrations (5-25 nM) pourrait expliquer l'abondance des *Synechococcus* en Méditerranée durant la période stratifiée ainsi que les blooms transitoires de ces espèces observés dans l'océan ouvert. Néanmoins, l'addition de phosphate en Méditerranée orientale lors de l'expérience CYCLOPS a montré une diminution de la chlorophylle et une augmentation de la production bactérienne (Thingstad et al. 2005) qui peut uniquement être expliqué par un avantage spécifique des bactéries hétérotrophes concernant l'uptake de phosphate. Ces résultats apparemment contradictoires renforcent le besoin de connaître les caractéristiques de l'uptake de phosphate au niveau des groupes planctoniques, voire des espèces clefs (**diazotrophes inclus**) dans le contrôle des flux de phosphate et donc de carbone dans la couche éclairée de la Mer Méditerranée.

Nous proposons de coupler l'incorporation de ^{33}P (Moutin et al., 2002, Duhamel et al., in press) et les techniques de tri cellulaire (Lebaron et al 2001, Servais et al 2003) pour identifier les principaux organismes responsable de l'uptake de phosphate. Nous proposons également de décrire la diversité phylogénétique des cellules triées en utilisant le FISH et l'analyse moléculaire (collaboration **Ingrid Obernosterer**). Pour déterminer les caractéristiques d'assimilation du phosphate au niveau de l'espèce, l'utilisation de la technique FISH en combinaison avec la micro-autoradiographie (MICRO-FISH) des cellules triées est également envisagée.

Nature de la bourse (doctorale ou post-doctorale) : Doctorale
Organismes concernés par la demande : MRT (EDSE, ENSTA, ENS-Lyon)
Nom de l'encadrant principal: **M. Baklouti** (LOB)/**F. Diaz** (LOB)

Titre de la demande : **Modélisation du couplage/découplage des cycles du carbone et des éléments biogènes associés dans la couche éclairée de milieux oligotrophes contrastés : mission BOUM en Méditerranée.**

L'estimation quantitative de la production de carbone organique et de son devenir (minéralisation, exportation, transferts) en Méditerranée, et notamment en zone oligotrophe, demeure encore mal connue. Pourtant, les enjeux sociétaux actuels liés à l'action des gaz à effet de serre, et notamment du CO₂, sur le réchauffement climatique nécessitent de quantifier précisément la capacité de l'Océan à séquestrer le carbone d'origine anthropique par la pompe biologique. Les zones oligotrophes représentent 50% de la surface océanique globale et environ 40% de la production primaire (Antoine et al., 1996), et sont, par la même, largement concernées par de tels enjeux. Divers travaux ont récemment permis de confirmer le rôle essentiel que peut jouer la disponibilité en ressource nutritive, dans le contrôle des flux de carbone dans la couche éclairée des zones oligotrophes, et en particulier le phosphate en Méditerranée (Moutin et al. 2002 ; 2005). Cette faible disponibilité en phosphate contrôle non seulement la production primaire (Diaz et al. 2001 ; Moutin & Raimbault, 2002) mais également la production hétérotrophe bactérienne (Thingstad et al., 1998, 2005 ; Van Wambeke *et al.*, 2002). L'expérience d'enrichissement en phosphate réalisée en Méditerranée orientale (CYCLOPS) a permis de montrer que la compétition entre phytoplancton et bactéries, activée par la faible disponibilité en phosphate, pouvait générer des voies de transfert de matière vers les échelons supérieurs qui avaient été négligées jusque là (Thingstad et al., 2005). La fixation d'azote par le picophytoplancton pourrait similairement être un processus clé en Méditerranée dans la mesure où ce processus pourrait être une source d'azote nouveau non négligeable et à l'origine des rapports N:P anormalement élevés dans ce bassin. Les conséquences en terme d'exportation de carbone, sous forme organique dissoute, ou particulaire, de la prise en compte de ces processus sont fondamentales en Méditerranée (Avril, 2002, Thingstad et al., 2005).

Le sujet proposé a pour but d'implémenter dans la plate-forme numérique ECO3M (Baklouti et al, 2006b), une représentation réaliste d'un réseau trophique planctonique caractéristique des milieux oligotrophes méditerranéens, sous la forme d'un modèle multi-nutriments multi-groupes fonctionnels (mNmGF). Un effort particulier sera porté sur la représentation du processus de diazotrophie, de l'assimilation compétitive du phosphate par le phytoplancton et le bactérioplancton en milieu oligotrophe, ainsi que sur celle du broutage de ces groupes par le micro- et le mésozooplancton. Cette réflexion sur la formulation de processus s'appuiera notamment sur des expériences en milieu contrôlé prévues lors de la campagne BOUM. L'objectif principal de la thèse est de quantifier précisément les flux de carbone dans les systèmes oligotrophes méditerranéens. Il s'agira d'estimer en particulier le flux de fixation de CO₂ par le phytoplancton et le devenir du carbone organique (transfert vers échelons supérieurs, reminéralisation, exportation). Pour cela, le modèle mNmGF sera couplé à un code hydrodynamique 1DV (modèle Symphonie, (Estournel et al., 2003)). Les données acquises en conditions d'extrême oligotrophie au cours de la campagne BOUM serviront à paramétrer le modèle, ainsi qu'à le valider au moins partiellement. *In fine*, un outil numérique permettant d'améliorer la compréhension du fonctionnement du réseau trophique soumis aux échanges verticaux en milieu oligotrophe sera disponible.

Nature de la bourse (doctorale ou post-doctorale) : doctorale
Organismes concernés par la demande : MRT
Nom de l'encadrant principal : Dominique Lefevre (LMGEM)

Titre de la demande : **Balance métabolique des régions océaniques oligotrophes**

Une des préoccupations majeures de la communauté océanographique concerne le piégeage du CO₂ atmosphérique par l'océan et plus particulièrement le rôle des activités biologiques pour lesquelles les incertitudes sont les plus grandes. Les différentes formes du carbone inorganique océanique sont utilisées par la phytosphère et leur transformation en matière organique (activité autotrophe) représente un flux annuel de $4 \cdot 10^{15}$ moles C (Field et al., 1998). La matière organique ainsi produite est soumise ultérieurement à la reminéralisation (activité hétérotrophe). La succession de ces phases au sein de l'écosystème de surface dépend des transferts de matière qui s'y opèrent. Des études simultanées de production et de respiration ont montré que cette approche était à même de caractériser le fonctionnement d'un écosystème vis-à-vis de l'autotrophie et de l'hétérotrophie (Blight et al., 1995 ; Serret et al., 2000, Maixandeu et al 2005a et 2005b). Néanmoins, depuis 1997, un large débat est ouvert sur la balance métabolique des océans (del Giorgio et al. 1997, del Giorgio 2002, Duarte & Agusti, 1998, Williams, 1998). Plus récemment, Karl et al. 2003, Williams et al. 2004, Mouriño & McGillicuddy, 2006, ont montré l'intérêt de l'étude à haute fréquence (spatial et/ou temporelle des processus afin de dresser un bilan métabolique objectif de la zone étudiée.

Les objectifs de ce travail sont inclus dans ceux du programme BOUM (Biogéochimie de l'Oligotrophie à l'Ultra-oligotrophie Méditerranéenne) dont un des objectifs est d'étudier dans 3 environnements oligotrophes contrastés la production et le devenir de la matière organique.

Dans ces environnements à faible taux d'advection, l'objectif est de déterminer le bilan en O₂ au sein de la couche de mélange à l'aide de 4 approches indépendantes : dérivées de mesures in situ des concentrations en O₂ et éléments biogènes (SBE 43-CTD rosette, Minas et al 1986), des données issues d'un échantillonnage à haute fréquence in situ de capteur O₂ (AANDERAA sensors) à partir de plusieurs profondeurs d'immersion, des flux de production communautaire nette obtenus à l'aide d'échantillonneurs in situ (APO : auto Echantillonneur pour la production oxygène, Langdon et al 1995). Ces derniers seront déployés aux profondeurs clés de la couche de mélange, et pour une approche plus classique d'incubation en flaconnage pour la détermination de la PCN en terme de flux d' O₂ et de CO₂ Maixandeu, 2004, Maixandeu 2005a, 2005b), Lefèvre et al., 2007.

L'originalité de cette approche repose sur la comparaison des différentes échelles de temps pour la détermination de la PCN et donc une meilleure contrainte sur l'estimation de la balance métabolique de ces sites oligotrophes.

Moyens de réalisation

La personne devant réaliser ce sujet de thèse aura accès à la base de données du Programme BOUM. Les flux biologiques de CO₂ (données disponibles) sont appréhendés par le biais d'analyses chimiques des éléments mis en jeu (CO₂ et O₂, Williams & Jenkinson, 1982, Robinson & Williams, 1991) suite à des incubations à la lumière et au noir pendant 24 heures et à l'aide de moyen d'incubation in situ (APO et Deep APO) et d'une ligne de mouillage composée de capteur oxygène de type optode (Aanderaa) au sein de la couche de mélange.

Insertion dans les programmes nationaux et internationaux

Ce sujet s'intègre dans le programme BOUM - SESAME - CYBER

Nature de la bourse (doctorale ou post-doctorale) : doctorale
Organismes concernés par la demande : MRT
Nom de l'encadrant principal : France **Van Wambeke** (LMGEM)

Titre de la demande : Co-limitation C-P en Méditerranée : contrôle et régulation des activités dégradatrices des procaryotes hétérotrophes en relation avec la structure fonctionnelle des communautés.

Résumé du sujet (500 mots maximum) :

Les procaryotes hétérotrophes sont responsables de la dégradation et de la reminéralisation de la matière organique dissoute dans les océans. Ces micro-organismes utilisent toute une variété de substrats organiques. On sait, par l'étude des caractères physiologiques des souches isolées, que toutes les bactéries hétérotrophes n'ont pas les mêmes capacités métaboliques (activité ectoenzymatique, utilisation de monomères), ce qui fait varier leur diversité en fonction de la qualité de la matière organique disponible. En Méditerranée, la diversité phylogénétique des bactéries peut varier également en fonction des rapports stoechiométriques des composés disponibles, comme le carbone et le phosphore. Des changements importants de composition et des augmentations de production des communautés bactériennes sont en effet rapidement obtenus dès la levée de la limitation par le P. Il est donc nécessaire de déterminer le couplage entre l'utilisation du carbone et du phosphore organique par les bactéries hétérotrophes. Ces connaissances sont particulièrement importantes dans le contexte du réchauffement climatique, qui provoquera une stratification estivale qui durera plus longtemps et un shift vers les organismes phytoplanctoniques de petite taille ainsi que dans l'export de matière du particulaire vers le dissous. Mais comment les organismes photosynthétiques et hétérotrophes coexistent-ils en face d'un même élément limitant ? Chez les microorganismes photosynthétiques (procaryotes, eucaryotes) et chez les procaryotes hétérotrophes, quels sont les microorganismes exerçant effectivement une activité phosphatase ? Cela procurerait-il un avantage aux microorganismes fixateurs d'azote ou aux AANP, supposées jouer des rôles importants dans de tels systèmes oligotrophes ?

Egalement, une meilleure compréhension des processus de dégradation du phosphore organique dissous doit être réalisée. En effet, après hydrolyse ectoenzymatique par les phosphatases alcalines et les nucléases, le devenir de ses métabolites est encore incertain. Est-ce vraiment le radical phosphoré qui profite aux bactéries hétérotrophes, ou dans certains cas la partie organique ?

Les outils mis en œuvre sont les marquages par isotopes radioactifs et/ou les sondes fluorochromes analogues substrats des ectoenzymes (marquage au niveau cellulaire de la phosphatase alcaline avec le ELF-P), l'hybridation *in situ*, la microautoradiographie, le tri cellulaire par cytométrie en flux. Cette thématique est primordiale dans le projet BOUM en Méditerranée, où des gradients importants d'oligotrophie et de biodisponibilité en P et en C sont attendus. Ce sujet entre dans le champ des thématiques prioritaires du LMGEM et donc l'étudiant travaillera également en relation étroite avec d'autres chercheurs microbiologistes du laboratoire (C. Tamburini, G. Grégori) ainsi qu'avec le Dr Jiri Nedoma, en République Tchèque, participant également au projet BOUM.

Nature de la bourse (doctorale ou post-doctorale) : post-doctorale
Organismes concernés par la demande : CNRS
Nom de l'encadrant principal : C. Ridame

Titre de la demande : Etude des facteurs biogéochimiques de contrôle de la fixation de N₂ en Méditerranée – Impacts des apports atmosphériques sur la fixation de N₂.

La fixation de N₂ (diazotrophie) a longtemps été considérée comme un processus sans impact majeur sur les cycles du carbone et de l'azote à l'échelle globale, en raison de la sous-estimation du flux d'azote nouveau associé. Or, la fixation de N₂ constituerait plus de 50% des apports allochtones d'azote fixé à l'océan global (Gruber and Sarmiento 1997).

Comprendre l'impact du processus de diazotrophie sur le couplage du cycle du carbone et de l'azote implique de déterminer les facteurs biogéochimiques qui le contrôlent. Bien que ces facteurs restent à l'heure actuelle assez mal connus, il apparaît que le taux de fixation de N₂ et la croissance des diazotrophes sont en grande partie limités par la disponibilité en fer (Behrenfeld & Kobler 1999, Kustka 2002) et/ou en phosphate (Karl et al. 2002, Moutin et al., 2005). De plus, les apports atmosphériques constituent une source significative de fer et de phosphate à la colonne d'eau, en conditions d'oligotrophie (Bonnet and Guieu. 2004; Ridame and Guieu 2002). Un apport saharien pourrait ainsi favoriser la fixation de N₂ par les diazotrophes dans les régions oligotrophes (ce type de processus a été démontré pour la première fois en Atlantique tropical, (Mills et al. 2004). De l'azote nouveau serait ainsi injecté dans le système stimulant alors la croissance des espèces phytoplanctoniques non-diazotrophes.

La Méditerranée constitue un cadre idéal pour l'étude des facteurs de contrôle (Fe et P) de la diazotrophie et de l'impact des apports atmosphériques sur ce processus. En effet, cette mer semi-fermée est d'une part globalement oligotrophe et d'autre part fortement soumise aux apports atmosphériques, notamment d'origine éolienne. De plus, la diazotrophie semble y être une clef essentielle pour expliquer le déficit apparent dans le bilan d'azote et le fort rapport N/P dans les eaux profondes. Quelques travaux récents tendent à confirmer cette hypothèse à la fois en Méditerranée orientale (Sachs et Repeta, 1999) et occidentale (Kerhervé et al., 2001 ; Garcia et al., 2006). Pantoja et al. (2002) estiment que, jusqu'à 20% de l'azote présent dans le bassin occidental et 90% dans le bassin oriental, proviendrait de la fixation de N₂. Cependant, la diazotrophie est un processus qui a été extrêmement peu étudié et mesuré en Méditerranée, ses facteurs de contrôle sont à déterminer et les organismes diazotrophes restent à identifier. Les apports atmosphériques sahariens représentent, en Méditerranée, la source dominante de fer dissous pour les eaux de surface et une source significative de phosphate. Par conséquent, ces apports sont suspectés comme jouant un rôle fondamental dans le contrôle de la fixation de N₂, tout particulièrement en période de stratification où les concentrations de phosphate, nitrates et parfois celles de fer deviennent indétectables dans les eaux de surface méditerranéennes. En stimulant la fixation de N₂, la présence de fer pourrait être à l'origine de la limitation de la production par le phosphate (Karl et al., 1997; Wu et al., 2000, Van Den Broeck et al., 2004). Ce cas de figure pourrait bien être celui de la Méditerranée, fortement soumise aux apports sahariens riches en fer et présentant une limitation de l'activité biologique par le phosphate.

Finalement, les questions scientifiques auxquelles s'adresse cette étude sont :

- Quel est l'élément limitant ou co-limitant de la diazotrophie en Méditerranée ?
- Les apports atmosphériques peuvent-ils contrôler la fixation de N₂ en Méditerranée ?
- Quelles sont alors les conséquences qui en découlent sur la production nouvelle, le réseau trophique et les cycles biogéochimiques ?

Des expériences en microcosmes seront réalisées au cours de la campagne océanographique **BOUM** (CYBER-LEFE) dans le but d'étudier les facteurs de contrôles de la diazotrophie (Phosphate, fer) sur des assemblages naturels au moment du prélèvement. L'acquisition des variables permettant de caractériser le processus de diazotrophie **au moment du prélèvement** est considéré comme un enjeu essentiel pour en particulier les diazotrophes (Holl & Montoya, 2005). L'étude sur les assemblages naturels sera complétée au laboratoire par des expérimentations sur des cultures monospécifiques de diazotrophes unicellulaires, limités en phosphate et/ou en fer.

5 Demande de financements dans le cadre de l'appel d'offre LEFE

NB : pour les projets pluriannuels présenter un calendrier

5.1 fonctionnement : à détailler et justifier poste par poste pour toute la durée du projet.
Comprend aussi les coûts ARGOS à indiquer en nombre de jours d'émission.

Modelisation : **6 000 € HT**

Publications dans un numéro spécial : **15 000 € HT**

Autres publications : **10 000 € HT**

5.2 missions : à détailler et justifier poste par poste pour toute la durée du projet

Septembre 2007: Réunion pré-campagne de toute la communauté (Marseille) : **17 000 € HT**.

Mars 2008: Réunion pré-campagne du comité organisateur élargi (Marseille) : **4 000 € HT**.

Août-Septembre 2008: Mission (description détaillée des analyses en [Annexe 2](#))

Demande spécifique ligne budgétaire « soutien à la mer » : coût total : 128 500 € HT

Détail :

Coût estimé de 25 voyages jusqu'à Marseille (France) + deux jours (per diem) par participant :

20 500 € HT

Coût estimé de 37 voyages jusqu'à Latakia (Syrie) + deux jours (per diem) par participant :

66 000 € HT

Coût estimé du transport du matériel

30 000 € HT

Transit des containers

12 000 € HT

Remarque: d'autres solutions éventuellement moins honorables pour un débarquement à Chypre ou en Egypte sont à l'étude.

Mai-Juin 2009: Réunion post-campagne de toute la communauté (Marseille) : **17 000 € HT**

Oct-Nov 2009 : Atelier ciblé (10 personnes max) : **4 000 € HT**

Fév-Mars 2010 : Atelier ciblé (10 personnes max) : **4 000 € HT**

Juin-Juillet 2010 : Atelier ciblé (10 personnes max) : **4 000 € HT**

2010 : Organisation d'une session spéciale à l'Ocean Sciences Meeting : **15 000 € HT**

5.3 analyses : pour les analyses (in situ ou au laboratoire) une justification détaillée (e.g. coût unitaire de l'analyse et nombre d'analyses prévues, coût total par poste) des dépenses envisagées doit être fournie (remplir l'annexe 1 ci-après). Reprendre ici le montant total de la demande.

Voir en annexe 2, le détail des analyses prévues.

5.4 équipement spécifique : à détailler et justifier pour toute la durée du projet.

Budget pour la réalisation des microcosmes: **10 500 € HT**

1 four d'hybridation pour les analyses des groupes phylogénétiques des procaryotes hétérotrophes:

3 200 € HT

5.5 équipement mi-lourd : les équipements dont l'acquisition en 2007 est nécessaire à la réalisation du projet et ayant fait l'objet d'une demande INSU à l'automne 2006

devront être impérativement mentionnés ici. Pour les projets pluriannuels, dont la réalisation nécessite l'acquisition d'équipement mi-lourds au-delà de 2007, les demandes doivent être impérativement mentionnées ici accompagnées d'une justification scientifique et technique, d'une évaluation financière et d'une indication sur le co-financement.

Les équipements en cours d'acquisition nécessaire à la campagne océanographique BOUM sont le laser OPC (demande F. Carlotti), le miniPVM adaptable sur la rosette (demande G. Gorsky), la série des 6 APO (Oxygen Productivity Auto Sampler (demande D. Lefevre), le CHN LECO 900 (demande A. Sciandra).

L'analyseur de nitrate ISUS est prêté par la société Satlantic (M. Lewis) mais le projet BOUM soutient la demande d'acquisition en cours de la DT INSU ainsi que la demande conjointe de deux entrants au CNRS, Karine Leblanc et Tsunéo Tanaka, concernant l'acquisition d'un spectrofluorimètre UV.

5.6 total général des crédits demandés au programme LEFE

245 470 € HT sur 4 ans

6. Autres financements (attribués ou demandés hors de l'appel d'offre LEFE, y compris dans le cadre européen). A détailler et justifier pour toute la durée du projet.

Programme européen **SESAME** (Southern European Seas: Assessing and Modelling Ecosystems changes). Le detail du financement acquis figure page 5.

PAI AURORA. Programme d'échange avec la Norvège pour financer les séjours et indemnités de séjour des collaborateurs norvégiens de BOUM.

Les ANR suivantes contribuent à BOUM en financant des équipements spécifiques et les analyses prévues dans le cadre de la campagne.

ANR Ondes Internes

ANR-Biodiversité **BOOM**: Biodiversity of Open Ocean Microcalcifiers

ANR Potes

ANNEXES AU DOSSIER

LEFE Annexe 1 : Budget détaillé des analyses prévues (campagnes en mer ou projets expérimentaux de laboratoire)

LEFE Annexe 2 : Formulaire simplifié de demande de campagne à la mer (n'inclus pas les documents 5 à 8 de la demande OPCB non demandés ni les fiches valorisation des résultats des campagnes océanographiques : disponible sur demande)

LEFE Annexe 3 : Dossier scientifique : contributions spécifiques en complément du dossier scientifique et références hors communauté BOUM

LEFE Annexe 4 : Résumé des demandes d'équipement mi-lourd

LEFE Annexe 5 : Lettres de soutien (J. Hall, IMBER et E. Papathanassiou, SESAME)

LEFE Annexe 1 : Budget détaillé des analyses prévues (campagnes en mer ou projets expérimentaux de laboratoire)

POSTE	Nombres de mesures	Prix unitaire (€)	MONTANT total (K€)
PHYSICS+OPTICS			
Physics			
CTD variables (T,S,O2,Fluo...)	197	20	3.94
Horizontal Current on vertical profile (LADCP)			1.00
Kz estimations (VMP5500)			4.60
Optics			
PAR Downwelling irradiance			1.00
Dissolved absorption	288	5	1.44
Particulate absorption	288	5	1.44
In water upwelling radiance and irradiance (Radiometric package)			2.00
Backscattering, attenuation, fluorescence, and CTD (Optical package)			3.00
Variable fluorescence-based photochemical quantum efficiency (Fv/Fm)	480		NASA acquis
Functional absorption cross section of photosystem II (σ_{PSII})	480		NASA acquis
Electron transport rates on the acceptor side of PSII (τ_{PSII})	480		NASA acquis
Fluorescence-based photosynthesis-irradiance relationships	480		NASA acquis
BIOGEOCHEMISTRY			
Stocks			
Dissolved			
TCO2	1137	2.5	2.84
TA	1137	2.5	2.84
O2	1137	3	3.41
NO3	1148	2	2.30
NO3 nanomolaire (upper photic zone)	162	2	0.32
NO3 (ISIS)			
NO2	1098	2	2.20
NO2 nanomolaire (upper photic zone)	162	2	0.32
NH4	644	3	1.93
PO4	1148	2	2.30
PO4 nanomolar (MAGIC)	344	4	1.38
Silicates	1148	2	2.30
DFe	134	30	4.02

Fe L	32	30	0.96
DOC HTCO	1100	7	7.70
DON	1100	2.5	2.75
DOP	1100	2.5	2.75
Excess N or P (APA technic)	6	60	0.36
Free Amino acids	36	15	0.54
Combined Amino acids	36	15	0.54
Dissolved lipids	81	12	0.97
Particulate			
POC	1050	3	3.15
PON	1050	2.5	2.63
POP	1050	2.5	2.63
POP (0.2, 0.6, 2 µm)	24	10.5	0.25
BSi	954	1.25	1.19
L-Si	954	1.25	1.19
Pigments (HPLC)	480	11	5.28
Chlorophyll a (Fluo)	686	2	1.37
Phospholipids	516		NSF demandé
C, N, P, Mg, Fe, elemental analysis	207	2.5	0.52
Fluxes			
Primary production (C uptake 24h dusk-to-dusk)	384	15	5.76
Particulate primary production	120	7	0.84
Dissolved primary production	120	7	0.84
Primary production by size class (C uptake 0.2, 0.6, 2 µm)	24	25	0.60
O ₂ production (O ₂ PA)			0.50
O ₂ production (in situ) NCP, GPP, R	36	100	3.60
N ₂ fixation and C uptake, 13C/15N	162	10	1.62
N ₂ fixation and C uptake by size class, 13C/15N	72	30	2.16
N ₂ fixation and C uptake, 13C/15N (microcosmes)	92	15	1.38
N ₂ fixation and C uptake by size class, 13C/15N (microcosmes)	0	30	0.00
N and C uptake, 13C/15N	114	15	1.71
Ammonium regeneration, 15N	114	15	1.71
Nitrate regeneration or nitrification, 15N	114	15	1.71
DON release, 13C/15N	114	15	1.71
PO ₄ turnover time	342	15	5.13
PO ₄ affinity (0.2, 0.6, 2 µm)	24	18	0.43
Si uptake	102	34	3.47

Si dissolution	60	25	1.50
Bacterial production	350	12	4.20
Bacterial production (hpss)	12	67	ANR
Bacterial production (0.2, 0.6 µm)	216	15	3.24
APA	144	2	0.29
Luxury P uptake	6	20	0.12
Assimilation AA	36	15	0.54
Assimilation fatty acids	36	15	0.54
Dark assimilation HCO ₃ ⁻	36	15	ANR
Dark assimilation hco ₃ ⁻ , hpss	12	76	ANR
Lipase hydrolysis rate (3H oleate)	81	15	1.22
Lipase hydrolysis rate (muf-palmitate)	81	6	0.49
Phosphatase hydrolysis rate (muf-P)	114	6	0.68
Aminopeptidase hydrolysis rate	72	6	ANR
Aminopeptidase hydrolysis rate, hpss	12	6	ANR
ATP Hydrolysis rate (33P et 14C)	114	20	2.28
Phospholipid synthesis rates	516		NSF demandé
Mass flux, C,N,P,LSi,BSi,Ca, COP, Al, Fe (Sediment trapps)	48	77.5	3.72
Natural abundance of ¹⁵ N (δ ¹⁵ N) and ¹³ C (δ ¹³ C)	162	15	2.43
BIOLOGY-DIVERSITY			
Molecular stress "indicators"	194	43	8.34
Prochlorococcus diversity	90	27	2.43
AAPB diversity (culture approach)	90	30	2.70
AAPB diversity (molecular approach on raw sample)	9	500	4.50
AAPB quantitative PCR	90	9	0.81
Total Eukaryotes diversity (ARN 18S clone sequencing on raw samples)	36	500	Différé*
Abundance of Eukariotic specific groups (Probes)	220	50	Différé*
Abundance of Eukariotic specific groups (Quantitative PCR)	76	21	1.60
Photosynthetic Eukaryotes diversity (Molecular biology on sorted samples)	12	250	3.00
Abundance of heterotrophic Eukaryotic specific groups (Probes)	30	50	1.50
Micro phytoplankton diversity	102	10	1.02
PDMPO	60	9	0.54
Flow cytometry analysis (bacteria+pico-nano-plancton)	1143	2	2.29
Heterotrophic prokaryotic community structure SSCP	25	30	0.75
Heterotrophic prokaryotic Clone library and sequencing	6	1200	7.20
DIP uptake kinetic parameters for specific groups	12	120	1.44
Small Diazotrophs quantification and distribution TSA Fish	202	40	8.08
Small Diazotrophs species richness (clone library)	3	700	2.10

Ciliates biomass	60	20	1.20
Ciliates growth rate	6	160	0.96
Ciliates grazing rate	6	160	0.96
Nanoflagellates biomass	180	7.5	1.35
Nanoflagellates growth rate	6	60	0.36
Nanoflagellates grazing rate	6	60	0.36
Tintinnids abundance	66	20	1.32
Tintinnids diversity	66	40	2.64
Zooplankton and marine snow Mini PVM	195	20	3.90
Zooplankton and marine snow PVM	60	20	1.20
Zooplankton biomass (Net tows)	60	50	3.00
Zooplankton biomass (OPC)	159	30	4.77
Zooplankton biomass (CHN)	60	10	0.60
Zooplankton diversity (Binocular treatment)	60	50	3.00
Zooplankton grazing rate (gut fluorescence)	60	40	2.40
Zooplankton eggs production rate	12	35	0.42
Zooplankton fecal pellets production rate	60	40	2.40
Zooplankton respiration rate	12	40	0.48
Zooplankton excretion rate	12	40	0.48
Viral abundance	480	1.5	0.72
Viral production (dilution approach)	60	15	0.90
Viral diversity (PFGE, DGGE)	20	20	0.40
Bacterial diversity (CARD FISH)	69	25	1.73
Functional bacterial diversity (MICRO-CARD FISH with Leucine)	77	40	3.08
Functional bacterial diversity (MICRO-CARD FISH with fatty acids)	18	40	0.72
Functional bacterial diversity (MICRO-CARD FISH with Polymer)	18	40	0.72
Functional bacterial diversity (MICRO-CARD FISH with HCO ₃)	18	40	0.72
phosphatase positive cells (ELF P)	174	10	1.74
		Total :euro =	224 059

*Différé signifie que le coût de ces analyses s'élevant à 35 000 Euro n'est pas demandé dans LEFE mais le groupe de Philippe Lebaron prévoit de réaliser les prélèvements et la conservation des échantillons pour une analyse différée éventuelle.

LEFE_Annexe 2 : Formulaire simplifié de demande de campagne à la mer

RÉCAPITULATIF -1-	DOSSIER DE DEMANDE : BOUM DATE : janvier 2006
--------------------------	---

TITRE DE LA CAMPAGNE :

Année : 2007 Durée (sur zone) : 35 jours Escale éventuelle (à justifier) Période (si impératif) : août-septembre Zone : Mer Méditerranée orientale et occidentale Pays dont les eaux territoriales sont concernées : Pays dont la zone économique est concernée :	Chef de projet		Chefs de mission	
	Nom Prénom :	MOUTIN Thierry		(1) MOUTIN Thierry (2) VAN WAMBEKE France
	Organisme :	COM-OSU		COM-OSU
	Laboratoire :	LOB-CNRS		LMGEM-CNRS
	Adresse :	Campus de Luminy, case 901 F-13288 Marseille Cedex 09		Campus de Luminy, case 901 F-13288 Marseille Cedex 09
	Tél.:	04 91 82 95 60		04 91 82 90 49
	Fax :	04 91 82 19 91		04 91 82 90 51
	E-mail :	moutin@com.univ-mrs.fr		wambeke@com.univ-mrs.fr

Travaux : prélèvements hydrologiques, déploiement de mouillage dérivants. Traitement des données et Besoins informatiques : Navire : Pourquoi Pas ou Atalante Engin(s) : Non Gros équipements : Non Nécessité d'une campagne pour récupération d'engin ? Non	Équipe scientifique embarquée et à terre LOB Marseille, LMGEM Marseille, LOV Villefranche sur mer, SBR Roscoff, LOBB Banuyls, IRD, Université Perpignan, ULCO-ELICO Wimereux, INSU/CNRS, LOCEAN Paris Equipes étrangères : Vigo University, Espagne HCMR grèce HIASCR, République Tchèque MEG-DBUB, University of Bergen, Norvège WHOI, Etats-Unis Oregon state University Dalhousie University/Satlantic Inc., Canada
---	---

Cette proposition se rattache au(x) programme(s) (nationaux ou internationaux) avec comité scientifique : (L'avis des comités scientifiques sera sollicité) Programme européen SESAME
--

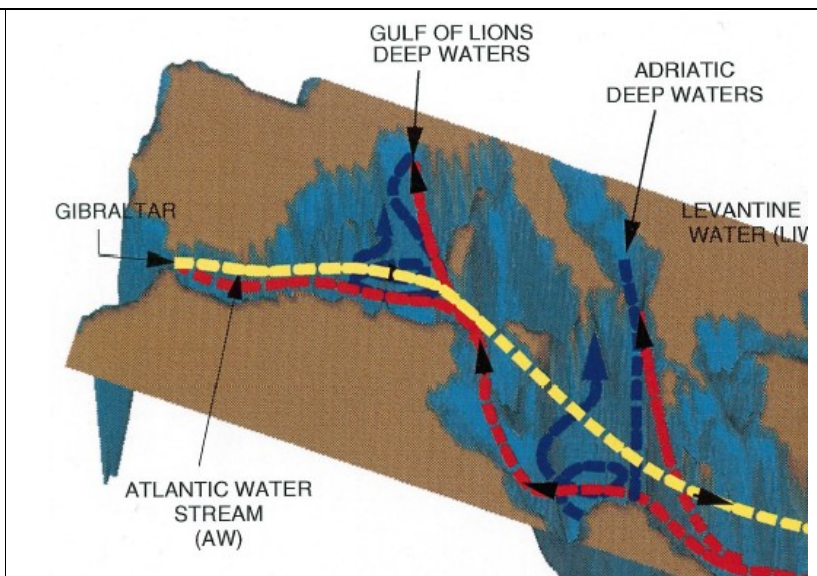
Thème scientifique : biogéochimie marine
Responsable d'unité : Bernard Quéguiner DATE : _____ SIGNATURE : _____ Nombre de dossiers présentés pour 2007 au sein de l'Unité : _____

STRATEGIE D'APPROCHE ET METHODES

- Méthodologie détaillée et liste précise des travaux pour atteindre les résultats escomptés - stratégie,
- Déroulement général de la mission, durée totale, temps sur zone, période souhaitée, escale éventuelle et raisons de ce souhait, carte de situation générale
- **Calendrier journalier prévisionnel des travaux (tableau J1 à Jx) précisant : travaux, trajets, stations, profils, les différentes zones d'études, ... documents cartographiques obligatoires. Pour les études de sismique et les levés sonars il est indispensable d'indiquer le nombre de milles nautiques des profils.**
- **Pour les trajets, estimer les durées avec les vitesses suivantes : 10 nœuds pour le Suroît et Nadir, 11 nœuds pour Thalassa et L'Atalante**

La circulation thermohaline générale (Fig. 1) est à l'origine de la grande variété de conditions oligotrophes observée dans le mer Méditerranée. La mission BOUM (Biogéochimie de l'Oligotrophie à l'Ultra-oligotrophie Méditerranéenne) sera focalisée sur une étude de deux transects Est-Ouest et Nord-Sud, et 3 stations « étude de processus » échantillonnées durant 5 jours (Fig. 2). Elles représentent un contexte unique pour comprendre à une échelle régionale, le lien entre les cycles biogéochimiques des éléments biogènes C,N,P,Si,Fe et la structure des communautés planctoniques d'environnements marins oligotrophes très contrastés. Les deux transects de stations type « core parameters », l'un de l'embouchure du Rhône au centre de la Méditerranée occidentale et l'autre de Gibraltar à l'Est du bassin Levantin, seront réalisés pour décrire de la surface jusqu'au fond les variables biogéochimiques essentielles en mer Méditerranée.

Figure 1: The schematic of the thermohaline circulation in the Mediterranean Sea with the major conveyor belt systems indicated by dashed lines with different colour. The yellow indicates the AW stream which is the surface manifestation of the zonal conveyor belt of the Mediterranean. The red indicates the mid-depth LIW recirculation branch of the zonal thermohaline circulation. The blue lines indicate the meridional cells induced by deep waters. LIW branching from the zonal conveyor belt connects meridional and zonal conveyor belts. (Pinardi & Masetti, 2000).



1- Stratégie générale à chaque station:

1-1 Stations de courtes durées

Durant les transects, 42 stations de type « core parameters » de 3-h seront réalisées. Uniquement un profil CTD avec un échantillonnage de la surface vers le fond sera réalisé pour l'analyse des paramètres de base (température, salinité, oxygène dissous O₂, DIC, alcalinité, éléments nutritifs, chlorophylle, C, N et P organiques particulaires (POC, PON, POP), silice particulaire, C, N and P organiques dissous (DOC, DON, DOP). Des bouteilles à deux profondeurs choisies (couche de mélange et sommet des nutriclines) seront utilisées pour réaliser des incubations à bord en conditions contrôlées. La distance entre les stations de courtes durées sera d'environ 60 miles nautiques, ce qui correspond à environ 5 heures de temps bateau.

Bouteilles Niskin (12 L) disponible pour l'échantillonnage:

- Profil 0-fond: 21 bouteilles Niskin (3 espaces bouteilles occupés : 1 OPC, 1 mini PVM, 1 ISUS Nitrate)

1-2 Stations de longues durées

Pour réussir notre étude de processus à chacune des 3 stations longues (1 centrale en mer Méditerranée occidentale, 1 centrale dans le bassin Ionien et 1 centrale dans le bassin Levantin), une localisation ainsi qu'une caractérisation hydrologique précises dans une zone à faible courant est nécessaire. Elles seront obtenues en utilisant toutes les méthodes actuellement disponibles. A chaque station, la succession des opérations sera la suivante :

1) Prospection horizontale.

Nous allons considérer l'imagerie satellitale (expert, Taupier Letage et Gilles Rougier) et les prévisions MERCATOR pour définir des zones où une prospection rapide (maximum 12h) en utilisant le thermosalinographe et les données ADCP nous permettra de localiser les sites à faible advection potentielle. Durant cette prospection, les prélèvements en continu de l'eau de surface seront possibles.

2) Caractérisation physique et chimique de la zone d'étude.

Le contexte hydrologique/chimique de la zone d'étude sera appréhendé par l'exploration de 16 sous-stations dans un zone géographique de 9 miles² centré sur la position préalablement définie de la station de longue durée. Des profils CTD et d'oxygène, de fluorescence et de nitrate (ISUS) seront réalisés entre 0 et 500 m à chacune de ces stations occupées 30 minutes et séparées l'une de l'autre de 1 heure maximum de temps bateau. Aucun prélèvement à la rosette de bouteilles Niskin ne sera possible durant ce suivi.

3) Etude de processus pendant 96-h

Durant cette période, les profils et prélèvements seront réalisés au départ au centre du maillage avant la mise à l'eau du mouillage (ligne de production plus pièges) et ensuite près du mouillage dérivant les jours suivants (stratégie lagrangienne). La séquence des opérations sera la suivante :

Pour un lever de soleil à 6:00

Day A

- 3:00-4:00 (3 h avant l'aube): profils CTD 0-200m et 0-500m et échantillonnage pour les mesures de production (0-200 m)
- 4:15-5:00 PVM + Filet
- 5:00 6:00 Mise à l'eau de la ligne de mouillage (ligne de production in situ (C,N,P,Si,ΔCO₂,ΔO₂) + O₂ Productivity Autosampler (O₂PA) + pièges dérivant à 3 profondeurs). + mise à l'eau du VMP5500
- 6:00-7:00 **profil CTD 0-500m Physique+Cycle + grappe optique**
- 7:00-8:00 profil CTD 0-500m Physique + prélèvements de grands volumes d'eau à une seule profondeur pour les expériences en microcosmes
- 8:00-9:00 Pompes in situ
- 9:00-10:00 profil CTD 0-500m Physique + prélèvements de grands volumes d'eau à une seule profondeur pour les expériences en microcosmes + grappe optique

- 10:00-11:00 récupération du VMP5500
- 11:00-12:00 profil CTD 0-500m Physique + prélèvements de grands volumes d'eau à une seule profondeur pour les expériences en microcosmes
- 12:00-13:00 profil CTD 0-500m Physique+Cycle + grappe optique
- 13:00-14:00 PVM + Filet
- 14:00-17:00 profil CTD 0-fond couplé avec l'HPSS
- 18:00-19:00 profil CTD 0-500m Physique+Cycle + grappe optique
- 19:00-21:00 Pompes in situ
- 21:00-22:00 profil CTD 0-500m Physique+Cycle + grappe optique
- 22:00-24:00 Pompes in situ
- 24:00-1:00 profil CTD 0-500m Physique+Cycle + grappe optique

Day B

- 1:00-2:00 PVM + Filet
- 3:00-4:00 profil CTD 0-500m Physique+Cycle + grappe optique
- 4:00-5:00 PVM + Filet + mise à l'eau du VMP5500
- 5:00-6:00 Récupération de la ligne de production in situ (Zodiac)
- 6:00-7:00 profil CTD 0-500m Physique+Cycle + grappe optique
- 9:00-10:00 profil CTD 0-500m Physique+Cycle + grappe optique
- 10:00-11:00 Récupération du VMP5500 recovery
- 12:00-13:00 profil CTD 0-500m Physique+Cycle + grappe optique
- 13:00-14:00 PVM + Filet
- 15:00-16:00 profil CTD 0-500m Physique+Cycle + grappe optique
- 18:00-19:00 profil CTD 0-500m Physique+Cycle + grappe optique
- 21:00-22:00 profil CTD 0-500m Physique+Cycle + grappe optique
- 24:00-1:00 profil CTD 0-500m Physique+Cycle + grappe optique

Day C

- 1:00-1:45 PVM + Filet
- 1:45-3:00 (3 h avant l'aube): profils CTD 0-200m et 0-500m et échantillonnage pour les mesures de production (0-200 m)
- 3:00-4:00 profil CTD 0-500m Physique+Cycle + grappe optique
- 4:00-5:00 PVM + Filet + mise à l'eau du VMP5500
- 5:00-6:00 Mise à l'eau de la ligne de production (Zodiac)
- 6:00-7:00 profil CTD 0-500m Physique+Cycle + grappe optique
- 9:00-10:00 profil CTD 0-500m Physique+Cycle + grappe optique
- 10:00-11:00 Récupération du VMP5500
- 12:00-13:00 profil CTD 0-500m Physique+Cycle + grappe optique
- 13:00-14:00 PVM + Filet
- 15:00-16:00 profil CTD 0-500m Physique+Cycle + grappe optique
- 18:00-19:00 profil CTD 0-500m Physique+Cycle + grappe optique
- 21:00-22:00 profil CTD 0-500m Physique+Cycle + grappe optique
- 24:00-1:00 profil CTD 0-500m Physique+Cycle + grappe optique

Day D

- 1:00-2:00 PVM + Filet
- 3:00-4:00 profil CTD 0-500m Physique+Cycle + grappe optique
- 4:00-5:00 PVM + Filet + mise à l'eau du VMP5500
- 5:00-6:00 Récupération de la ligne de production in situ (Zodiac)
- 6:00-7:00 profil CTD 0-500m Physique+Cycle + grappe optique
- 9:00-10:00 profil CTD 0-500m Physique+Cycle + grappe optique
- 10:00-11:00 Récupération du VMP5500 recovery
- 12:00-13:00 profil CTD 0-500m Physique+Cycle + grappe optique
- 13:00-14:00 PVM + Filet
- 15:00-16:00 profil CTD 0-500m Physique+Cycle + grappe optique
- 18:00-19:00 profil CTD 0-500m Physique+Cycle + grappe optique
- 19:00-21:00 Récupération des pièges à sédiment et des lignes O₂PA
- 21:00-22:00 profil CTD 0-500m Physique+Cycle + grappe optique

- 22:00-1:00 profil CTD 0-fond couplé avec l'HPSS

Day E

- 1:00-4:00 profil CTD 0-fond Core Parameters
- 4:00 Route vers une autre station

Remarque:

84h de profils CTD toutes les 6 heures (15 profils CTD) et 75h de profils CTD toutes les 3 heures (26 profils CTD)

Bouteilles (12 L) disponibles pour l'échantillonnage:

- profil CTD 0-500m Physique+Cycle: 17 bouteilles Niskin (7 espaces occupés : grappe optique 4, OPC 1, miniPVM 1, ISUS Nitrate 1)
- profil 0-fond avec l'HPSS (High Pressure Serial Sampler): 13 bouteilles Niskin (échantillonneur hyperbar 4*2=8, OPC 1, mini PVM 1, ISUS Nitrate 1)

4) 24h de caractérisation physique et chimique

Si malgré notre volonté de choisir des sites à faible advection potentielle, de grandes variations des propriétés physiques de l'eau sont observées durant les 4 à 5 jours de suivi, alors nous répéterons à la fin les mesures sur la grille de stations déjà réalisées au début.

3 étapes seront nécessaires pour quantifier l'apport des éléments nutritifs par des processus hydrologiques dans les 3 sites contrastés.

1/Localisation précise du site d'étude et estimation de l'advection horizontale.

- Examiner peu de jour avant l'arrivée sur site les images satellitales de SST et de couleur de la mer et les champs de courant Mercator pour déterminer la zone à étudier.
- En approchant du site, faire une courte prospection dans la région du site choisi et visualiser à bord les SST et SSS et les courants. Choisir le site.
- En arrivant sur le site: Effectuer une série de profils pour contrôler les profondeurs de la couche éclairée et de la pycnocline et détailler les courants, qui seront analysés après pour évaluer les advections horizontales de chaque variable.

2/ Estimation de l'activité turbulente

Pour chaque profil vertical de la CTD rosette, les variables T,S, O₂, NO₃ seront mesurées à 24 Hz et le profil vertical du courant horizontal déduit avec une résolution verticale de 2 m (LADCP). Les traitements donneront les profils moyens et les anomalies de T, S, à haute résolution verticale, les amplitudes d'ondes internes et éventuellement les inversion de densité, marques de l'activité turbulente.

3/ Interactions physiques atmosphère-océan

Les flux de surface, de chaleur, d'eau, et de quantité de mouvement, seront calculés par la méthode globale (bulk method) afin d'évaluer le forçage atmosphérique sur la couche mélangée et sa variation temporelle.

2- Liste des variables et méthodes

Hydrodynamique et optique :

Parameter	Method
Temperature, salinity Horizontal Current on vertical profile Horizontal Current Kz SST and SSS Wind speed and direction, Air temperature and humidity, solar radiation. PAR In water upwelling radiance and irradiance Backscattering, attenuation, fluorescence, and CTD Fo, Fm, Fv/Fm, σ -PSII, τ -PSII, τ -PQ Fluorescence based PvsI	<ul style="list-style-type: none"> • CTD SBE 911 • LADCP 300 Khz (INSU) Rosette mounted • ADCP (75 KHz, 300 KHz Ship mounted) • VMP5500 • Thermosalinograph SBE 21 • On board meteo station • Downwelling irradiance measured on the Deck by a TRIOS radiometer (350 nm to 850 nm every 3 nm) • Radiometer TRIOS (350 nm to 900 nm every 3 nm) mounted on a specific frame. • Wetlabs optical package mounted on a specific frame • Custom-built bench-top fast repetition rate fluorometer (FRRf)

Biogeochemistry :

Stocks :

Parameter	Method
Inorganic nutrients concentration: Nitrate, nitrite, phosphate, orthosilicic acid Nitrate, nitrate (nanomolar) Phosphate, orthosilicic acid (MAGIC) Nitrate (ISUS in situ) Ammonium Dissolved iron concentration	<ul style="list-style-type: none"> • Visible Spectrophotometry • UV spectrophotometry • Fluorescence • Chemiluminescence
TCO ₂	• potentiometry
TA	• potentiometry
Oxygen	<ul style="list-style-type: none"> • Winkler • SBE43 sensor
Natural abundance of ¹⁵ N (δ^{15} N) and ¹³ C (δ^{13} C)	• Mass spectrometry, ¹⁵ N
Dissolved Organic Matter: DOC, DON, DOP	• Visible spectrophotometry after digestion
Particulate Matter: COP, NOP, POP, BSi and LSi C, N, P, Mg, Fe, elemental analysis Natural abundance of ¹⁵ N (δ^{15} N) and ¹³ C (δ^{13} C)	<ul style="list-style-type: none"> • CHN • Visible spectrophotometry after filtration and digestion • X-Ray Fluorescence spectroscopy • Mass spectrometry, ¹⁵N
TOC analysis	• High temperature catalytic oxidation
Carbohydrate analysis	• Liquid chromatography High Pressure Anionic Exchange Chromatography / Pulsed Amperometric Detection (HPAEC-PAD)
Lipid analysis	• Iatroscan Analyzer (Thin Layer Chromatography / Flame Ionisation Detection (TLC/FID))

Fluxes :

Parameter	Method
Primary production (carbon uptake)	• RA incorporation (¹⁴ C)
Nitrogen fixation	• Mass spectrometry, dual labelling ¹³ C/ ¹⁵ N procedure
Inorganic N uptake and primary production	• Mass spectrometry, dual labelling ¹³ C/ ¹⁵ N procedure
Ammonium regeneration	• Mass spectrometry, ¹⁵ N
Nitrate regeneration or nitrification	• Mass spectrometry, ¹⁵ N

DON release	<ul style="list-style-type: none"> • Mass spectrometry, ¹⁵N
Phosphate uptake (affinity, maximum uptake rate and Turnover time)	<ul style="list-style-type: none"> • RA incorporation (³³P)
Silicic acid uptake	<ul style="list-style-type: none"> • RA incorporation (³²Si)
NCP	<ul style="list-style-type: none"> • Δ Oxygen
GCP	<ul style="list-style-type: none"> • Δ Oxygen
DCR	<ul style="list-style-type: none"> • Δ Oxygen
Ectoenzymatic activity (lipase, protease, aminopeptidase, phosphatases)	<ul style="list-style-type: none"> • Spectrofluorometry with substrate MUF- and MCA-fluorogenic substrates
Lipase activity	<ul style="list-style-type: none"> • Radiolabelling with 3H-triolein
Turnover of DOP	<ul style="list-style-type: none"> • Radiolabelling with 33P-ATP and 3H-ATP
Prokaryotic heterotrophic production	<ul style="list-style-type: none"> • Radiolabelling with 3Hleucine and TCA extraction of the protein precipitate
Turnover of amino acids	<ul style="list-style-type: none"> • Radiolabelling with 3H-amino acids

Biology :

Phytoplankton

Parameter	Method
Pigments	<ul style="list-style-type: none"> • HPLC
Species richness of diazotrophs	<ul style="list-style-type: none"> • Genetic comparison of nifH gene
Abundance of diazotrophs	<ul style="list-style-type: none"> • Cell specific fluorescent probe hybridization (TSA-FISH technique)
Diatom abundance	<ul style="list-style-type: none"> • Optical microscopy
Coccolithophore morphology	<ul style="list-style-type: none"> • Polarization Optic Microscopy, Scanning Electron Microscopy
Coccoliths weight	<ul style="list-style-type: none"> • SYRACO (Beaufort 2005)
Coccolithophore biodiversity	<ul style="list-style-type: none"> • LSU rDNA clone libraries, after high-GC genomic extraction and PCR amplification with haptophyte specific primers.
Coccolithophore abundance	<ul style="list-style-type: none"> • COD-FISH (Frada et al. 2006)
Pico-haptophyte diversity	<ul style="list-style-type: none"> • LSU rDNA analyses

Protistan

Parameter	Method
Abundance and biomass	<ul style="list-style-type: none"> • Optical and epifluorescence microscopy
Growth rates	<ul style="list-style-type: none"> • Dialysis Bags for population estimates
Grazing rates and prey selectivity	<ul style="list-style-type: none"> • Labelled preys

Mesozooplankton

Parameter	Method
Species richness	<ul style="list-style-type: none"> • Taxonomical determination
Abundance and biomass of zooplankton	<ul style="list-style-type: none"> • OPC: Optical plankton Counter, microscopic counts and dry weight
Fecal pellets production (bulk and individual production)	<ul style="list-style-type: none"> •
Respiration	<ul style="list-style-type: none"> • O₂ consumption, CO₂ release
Excretion	<ul style="list-style-type: none"> • Dissolved inorganic ammonium and phosphate meas.
Ingestion	<ul style="list-style-type: none"> • Chlorophyll though gut fluorescence
Egg production	<ul style="list-style-type: none"> •

Uper meso- and macrozooplankton

Parameter	Method
Abundance and size spectra	<ul style="list-style-type: none"> • Specific plankton nets and Zooscan
Taxonomic determination	Zooscan + experts
Diel migration	<ul style="list-style-type: none"> • Plankton net + Underwater Video Profiler
Vertical structure of assemblages	<ul style="list-style-type: none"> • Underwater Video Profiler

Picoplankton

Parameter	Method
Planktonic abundance (specific verification)	<ul style="list-style-type: none"> Flow cytometry
Microplankton characterization	<ul style="list-style-type: none"> Lugol fixed samples
Abundance of specific picoeucaryote groups <ul style="list-style-type: none"> Prasinophyceae Photosynthetic stramenopiles Prymnesiophyceae Alveolates group I and II 	<ul style="list-style-type: none"> FISH (fluorescent in situ hybridization)

Bacteria (including AAP)

Parameter	Method
Phylogenetic diversity	<ul style="list-style-type: none"> FISH, SSCP, clone library, sequencing
Abundance of AAnPB	<ul style="list-style-type: none"> Flow cytometry, image analysis, epifluorescence and quantitative PCR
Molecular diversity of AAnPB	<ul style="list-style-type: none"> Cloning and sequencing pufM gene

Virus

Parameter	Method
Viral diversity	<ul style="list-style-type: none"> Pulsed-field gel electrophoresis and DGGE

Coupling Biogeochemistry and biology

Parameter	Methods
Phosphate uptake at a group of species specific level	<ul style="list-style-type: none"> Flow cytometry (cell sorting) and RA incorporation (³³P) Flow cytometry (cell sorting) and RA incorporation (³³P) in combination with MICRO-FISH
Si deposition rates at a species specific level	<ul style="list-style-type: none"> New fluorescent probe PDMPO and RA incorporation (³²Si)
Specific incorporation or organic molecules by individual phylogenetic groups of procaryotes	<ul style="list-style-type: none"> Micro-autoradiography coupled to FISH

Specific material

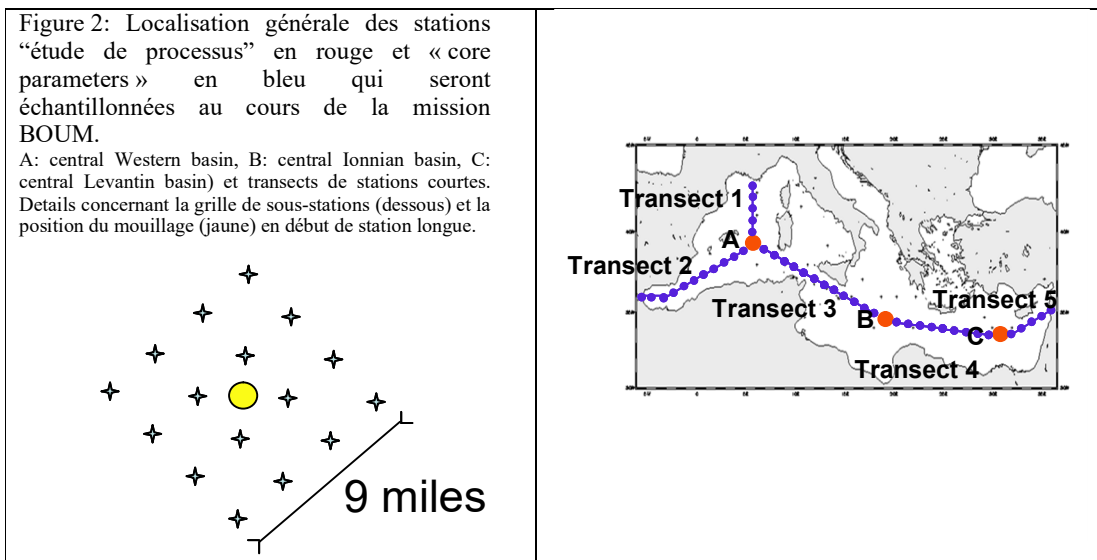
Parameter	Method
Marine snow vertical abundance	<ul style="list-style-type: none"> Underwater Video Profiler
Marine snow size spectra (integrated every 5m)	Underwater Video Profiler
Diel marine snow dynamics	<ul style="list-style-type: none"> Underwater Video Profiler
Vertical flux of calculated marine snow carbon	<ul style="list-style-type: none"> Underwater Video Profiler
Effect of hydrostatic pressure on marine procaryotes	<ul style="list-style-type: none"> High Pressure Serial Sampler
Effect of hydrostatic pressure on degradation of sinking particles	<ul style="list-style-type: none"> Particles Sinking Simulator
O ₂ production	<ul style="list-style-type: none"> O₂PA : oxygen productivity autosampler

3- Date et durée de la mission BOUM :

Durée totale: 35 jours

Période: Août-Septembre 2008

4- Emploi du temps prévisionnel et localisation des stations:



Day	location	Opérations
J1		Embarquement
J2-J3		Transect 1 (5 stations courtes)
J4-J5	Site A (1 passage)	Localisation du site A
J6-J7	Du site A à Gibraltar	48 h étude de processus
J8-J10	De Gibraltar au site A	Transit
J11	Site A	Transect 2 (11 stations courtes)
J12-J15	Site A	Grille d'échantillonnage
J16-J19	From site A to site B	96 h étude de processus
J20	Site B	Transect 3 (12 stations courtes)
J21-J24	Site B	Localisation du site B
J25-J26	From site B to site C	Grille d'échantillonnage
J27	Site C	96 h étude de processus
J28 -J31	Site C	Transect 4 (9 stations courtes)
J32-J33		Localisation of site C
J34		Grille d'échantillonnage
J35		96 h étude de processus
		Transect 5 (5 stations courtes)
		Transit
		Débarquement

MOYENS A METTRE EN OEUVRE

- Navire support, submersibles* et positionnement ;
 - Équipements de base : *matériel mis en oeuvre par GENAVIR, par l'I.F.R.T.P., ou par l'IRD et matériel propre de l'équipe demanderesse*
- Quel matériel prévoyez-vous d'emprunter aux Parcs Nationaux (INSUE, IFREMER-GENAVIR, IRD, Météo-France, EPSHOM...)
- Installations du navire qui doivent être utilisées
 - Personnel spécialisé
 - Besoins en équipements ou matériels complémentaires : quels types ? Quelles spécifications ?
 - Est-il prévu d'embarquer des produits chimiques ou radioactifs (lesquels) ?
 - Matériel fournis par des organismes extérieurs
 - Évaluation du coût de fonctionnement à la charge de l'équipe scientifique

Pour l'installation de nouveaux équipements sur le Nautille il faut se conformer à la procédure « **Qualité de l'intervention sous-marine : Procédure d'évolution du Nautille » Ref : DITI/LB/98-04 .*

*Pour la qualification des conteneurs pour les travaux sous-marins les tests doivent être réalisés selon la **spécification technique IFREMER d'intervention sous-marine** Ref : N° 31 SE 06-B. Pour obtenir ces spécifications contacter la DMON.*

The research vessel will be « L'Atalante » or the « Pourquoi pas » with all basic equipment for hydrological work (Hull-mounted ADCP (75 KHz, 300 KHz)

Material that should be asked to the DT INSU:

Equipment DT INSU	quantity
CTDOD SBE 911+ rosette 24 + 24 bottles (With special frame for min DIG-UVP)	1
Fluorimeter	1
Transmissiometer	1
PAR surface and in situ	1
pinger	1
Winch and kevlar cable	1
Oranos cable (650 m) + associated equipment	1
teflon messengers for GoFlo bottles	1
Container for iron chemistry (20 feet clean Container)	1
Drifting sediment traps. (3 traps+ argos + gonio)	1
LADCP 300 Khz (INSU) Rosette mounted	1
ADCP (75 KHz, 300 KHz Ship mounted)	1
<i>In situ</i> chemical profiler	1
<i>Milli Q</i> water system	1
<i>Packard scintillation counter</i>	1
Equipment IFREMER	quantity
Container for Radio isotopes utilization (¹⁴ C, ³² Si, ³³ P, ³ H-leucine)	1

Containers laboratoires fournis par des laboratoires français : **Container** station biologique Roscoff

Matériel fournis par des organismes extérieurs :

ISUS Nitrate : Université Dalhousie/Satlantic Inc. CANADA

HPLC : Woods Hole Oceanographic Institution USA

Custom-built bench-top fast repetition rate fluorometer (FRRf) Oregon State University USA.

ANALYSE ET TRAITEMENT DES ECHANTILLONS ET DES DONNEES

- Analyses et traitements des échantillons et des données effectués à bord (liste exhaustive, référence des méthodes de traitement)
- Analyses et traitements des échantillons et des données effectués à terre (liste exhaustive, référence des méthodes de traitement) - calendrier
- Archivage des données (lieux, supports, mise à disposition des utilisateurs)
- Stockage des échantillons (lieux et dispositifs pris pour leur conservation, leur maintenance et leur mise à disposition des utilisateurs)
- Prévision et calendrier de publication des résultats (distinguer rapports de données, articles scientifiques, thèses ...)

Aquisition des données pendant la campagne.

L'acquisition des données « navires » (navigation, météo, sonde) est sous la responsabilité de l'IFREMER et de son équipe informatique embarquée.

L'acquisition des données est sous la responsabilité des équipes pendant la campagne.

Une description exhaustive des méthodes, du type et du nombre de données acquises pendant la campagne sera réalisée en fin de mission sous la responsabilité des chefs de mission avec l'aide de L. Prieur pour la Physique. Ceci servira de canevas à la mise en place d'une base de fichiers et de son catalogue.

Mise à disposition des données pour les équipes impliquées dans le projet.

Les données, après validation par les équipes qui les ont acquises, seront transférées sous forme de fichiers électroniques dans la base de données « CYBER » à Villefranche/mer pour la constitution d'une base de fichiers à accès restreint via internet. Cette base contiendra un catalogue. Les correspondants « base de données » sont Louis Prieur et Claudie Marec pour les données d'hydrologie, France Van Wambeke pour les données de « biologie » et Cécile Guieu pour les données de « biogéochimie ». Les données correspondant aux paramètres "SESAME" seront également archivées dans la base de données SESAME sous le format MEDATLAS. L'ensemble des opérations sera sous la responsabilité de T. Moutin. Les aspects techniques de la mise en place des données seront réalisés par Marie Paule Torre qui a en charge la base de données CYBER et qui gèrera la relation avec la base de données SESAME.

Diffusion des données.

L'accès restreint concerne dans un premier temps la communauté BOUM et la communauté SESAME pour les paramètres SESAME. La mise dans le domaine public se fera deux années après la date limite de mise à disposition sur la base des fichiers conformément à la charte CYBER (<http://www.obs-vlfr.fr/proof/vt/infos/mini-charte.htm>).

Echéanciers

Type de données	Périodes acquisition données	Date limite de mise à disposition sur la base de fichiers	Date limite de mise dans le domaine public
Mesures et analyses à bord	Août-Sept 2008	Sept 2009	Sept 2010
Mesure labo post camp. Pièges	Mars 2009	Mars 2010	Mars 2010

Problèmes éventuels.

Une partie des analyses notamment de biologie moléculaire peuvent éventuellement prendre plus de temps que ce qui est mentionné de manière générale dans l'échéancier. Le comité « PROOF » sera informé au cas par cas de ces exceptions et de leur justification si elles se présentent.

Publications

- 2009 publications dans différentes revues.
- 2010 publications dans un numéro spécial.

LEFE_Annexe 3 : Dossier scientifique : contributions spécifiques et références hors communauté BOUM

A 1.1. Penetration of anthropogenic carbon

The sole time-series data available from the DYFAMED site indicate that over the past ten years, the temperature of these waters has increased and the capacity of these waters to absorb anthropogenic carbon has decreased (Touratier et al., 2005a). It is thus probable that this temporal trend observed in one area of the Mediterranean Sea is similar in other areas of the Mediterranean Sea. This has to be quantified accurately in order to determine the role of the Mediterranean Sea in the drawdown of anthropogenic carbon and consequently the role of its transport from the Mediterranean Sea to the Atlantic Ocean. It is particularly important to get data from the area of the LIW (Levantine Intermediate Water) formation in the eastern part of the Mediterranean Sea. This intermediate water plays a crucial role in the deep water formation in the western basin (Millot, 1999) and contributes to the water outflow through the Strait of Gibraltar. As a consequence, part of the carbon sequestered will be integrated in the global circulation.

The quantification of the anthropogenic distribution in the Mediterranean Sea will be computed using the simple and recent TrOCA approach (Touratier & Goyet, 2004a,b) that has been applied in the Atlantic ocean and the Gulf of Cadiz (Touratier et al., 2005b, Aït-Ameur et al., 2005) and the Antarctic ocean (Lo Monaco et al., 2005). We plan to measure TCO_2 and TA by potentiometry from discrete samples collected throughout the water column. The measurement technique is fully described in DOE (1994), and we will use reference material that we will buy from Dr. A. Dickson's lab (Scripps, CA, USA).

It is also planned to estimate the distribution of anthropogenic carbon using the 3D Mediterranean Sea model (with a resolution of $1/4^\circ \times 1/4^\circ$) developed by the GHER (University of Liège, Belgium) which is now running on a bi-optimizer workstation at the University of Perpignan, France. All C_T measurements realized during the BOUM cruise, in combination with those of the DYFAMED times-series station and the German METEOR 51/2 cruise, will be used to estimate the four parameters (a to d) involved in the interpolation model developed by Goyet and Davis (1997), using a Singular Value Decomposition procedure: $C_T = a + b\theta + c\text{AOU} + dS$. Once parameters a to d are determined, it is possible to estimate C_T when the properties θ , O_2 , and S are known. Similarly, using all A_T measurements from the BOUM cruise, we will determine the best linear relationship relying A_T to S : $A_T = eS + f$. The next step is to compute the 3D fields of initial conditions for C_T and A_T on the grid model in order to run the 3D GHER model of the Mediterranean Sea. This will be realized using the two previous relationships for C_T and A_T and the MEDAR/MEDATLAS II 2002 database from which numerous measurements are available for the three required properties θ , O_2 , and S .

All data that describe the carbonate system properties within the Mediterranean Sea will be gathered to perform the validation of the 3D model results. The model results will be used primarily to identify and understand the main meso-scale processes governing the sequestration of anthropogenic carbon. It is planned to perform simulations with a timescale varying from a year to a few decades.

A 1.2. Diversity of diazotrophs

The diversity of diazotrophs (photosynthetic or heterotrophic species either free living or associated with other organisms) will be assessed by measuring both their species richness and the abundance of each species using molecular techniques. The species richness will be investigated by the detection and the genetic comparison of *nifH* gene, which codes for nitrogenase, the enzyme responsible for di-nitrogen fixation (Zehr et al. 2001). Clone library technique will be used to assess species richness. When the abundance of each diazotroph will be measured by whole cell specific fluorescent probe hybridization (TSA-FISH technique) approaches (Biegala et al. 2003). Diversity of diazotrophs will be investigated using different size fractionation at the 4 long-term stations through the water column, from sub-surface (-1 m), going through the chlorophyll maximum and down to below the euphotic layer. Changes in diazotrophs diversity will be also investigated during 4 days microcosms experiments. For each microcosm, water from each of the 4 long-term stations will be enriched with different input in nutrients (N and/or P) and iron types. In addition, diazotroph activity will be measured in parallel to either in situ microcosm sampling (see section below).

A 1.3. Diversity of diatoms

The species present in the biogenic silica maximum observed in the Ionian Sea during the PROSOPE cruise were not identified. Diatoms are usually a minor contributor to phytoplankton abundance in very oligotrophic areas, but this deep biogenic silica indicates that some species could thrive at lower light levels where nutrients become more abundant. Whether diazotrophic diatoms such as *Rhizosolenia*, which hosts the cyanobacterium *Richelia*, may be found at deeper levels in the eastern MS is still unknown. Sample collection at several depths between the surface and the nutricline at the chosen study sites will allow a characterization of the diatom community structure and will reveal whether diazotrophic diatoms may be of importance in the N₂ fixation budget of the MS.

A 1.4. Diversity of cyanobacteria

Recently, the availability of numerous marine cyanobacteria genomes (11 *Prochlorococcus*, 12 *Synechococcus*) and of extended environmental gene sequences of both genera (Craig Venter databases) provides an unprecedented opportunity to characterize the expression of key genes involved in different biological processes (photosynthesis, carbon fixation, DNA repair, etc). This approach will allow us to study, directly in situ, physiological adaptation of cyanobacteria to environmental conditions (light, UV, temperature, CO₂, nutrient deficiency, etc), and possible responses to environmental factors/stresses.

Laboratory studies have already allowed us to identify two molecular markers : a marker for UV stress using a gene coding for a DNA repair protein (*recA*, encoding the recombinase A) and the second one for growth rate status using the *ftsZ* gene, the product of which is a key factor for the initiation of cell division (Holtzendorff et al. 2002). Furthermore, a new marker indicating the carbon fixation level (*rbcL* coding for the RUBISCO) is actually under development in our laboratory (Wawrik et al. 2002). The use of real time PCR to follow the expression of these genes will allow circumventing the low amount of material present in sea water and to quickly analyze a large amount of samples as it is necessary in an oceanographic context. The expression of these genes will be studied over depth profiles and horizontal transects along the Mediterranean trophic gradient.

A 1.5. Diversity of aerobic anoxygenic phototrophic bacteria (AAnPB)

AAnPB are strict aerobes containing bacterial photosynthetic centers composed of bacteriochlorophyll that have been discovered in organic-rich marine environments. These bacteria are facultative phototrophs; they grow heterotrophically but can use light as additional source of energy. This implies that photosynthesis could be important for this group under conditions when the availability of dissolved organic carbon is limiting growth. It was therefore initially hypothesized that these bacteria may have a large ecological advantage and thus be more abundant in the open ocean and oligotrophic areas. AAnPB genes which encode the pigment binding subunit of the bacteria photosynthetic reaction center (*pufLM* genes) have been found in estuarine and oceanic DNA samples collected around the world and their analysis has demonstrated the remarkable diversity of these bacteria (Béjà et al., 2002; Oz et al., 2005). Given the potential large impact that AAnPB may have on marine carbon cycling and some recent conflicting reports on their abundance in the world ocean (Schwalbach & Furfman, 2005), more work is needed to determine the ecological significance of these photoheterotrophs. Moreover, AAnPB may also play a significant role in the competition for phosphate in P-depleted environments.

The abundance of AAnPB will be assessed by flow cytometry (a specific protocol will be developed), image analysis and epifluorescence microscopy and quantitative PCR (Schwalbach & Furfman, 2005). The diversity of AAnPB will be assessed by cultural and molecular approaches. Different culture media will be used to isolate numerous pigmented strains in order to generate an extensive culture collection of these bacteria (Koblizek *et al.*, 2003). These isolates will be genetically identified and characterized and examined for a suite of metabolic capacities. Molecular diversity will be assessed by cloning and sequencing *pufM* genes that are specific of AAnPB in pelagic areas (Oz *et al.*, 2005). Taken together, results from these experiments will uncover the distribution and genetic and metabolic range of AAnPB.

A 1.6. Eukaryotic picoplankton diversity

Important eukaryotic groups will be quantified by Fluorescent in situ hybridization along the transect, and for different depths.

Photosynthetic picoeucaryotes. We will determine the dominant photosynthetic taxa at each station and depth and will try to establish the relationship between community composition and trophic status.

Marine Alveolates group I and II. These organisms are only known from environmental sequences and their nature is still elusive. We suspect that group II may correspond to parasites of larger phytoplankton such as Dinoflagellates. We will determine the abundance of the different clades of alveolates by FISH and will attempt to establish relationships with the microplankton community.

A 1.7. Diversity and abundance of haptophytes and coccolithophores.

The haptophytes are one of the main groups of marine microalgae and contain both calcifying (coccolithophores) and non-calcifying species (de Vargas and Probert 2004). The coccolithophores (~300 morphospecies) have evolved an astounding morphological diversity of calcified skeletons to flourish at different depths along the photic zone from surface waters to -200m. Through the process of intra-cellular biomineralization (or *coccolithogenesis*, Young et al. 1999), the coccolithophores control most of the open ocean carbonate chemistry and may be the major force for the oligotrophic biological pump their ballasting effect (Klaas and Archer 2002). Today, ocean acidification driven by anthropogenic CO₂ threaten coccolithophore calcification and its buffering effect on the ecosystem. On the other hand, the non-calcifying haptophytes maybe of fundamental importance for primary production in oligotrophic oceans. Significant amount of the carotenoid pigment *19-hexanoyloxyfucoxanthin* and prymnesiophyceae cells were respectively detected by HPLC (Andersen et al. 1996) and FISH (Not, personal communication) in oligotrophic waters of the Pacific and Atlantic oceans. These naked haptophytes are tiny cells within the picoplanktonic fraction and may account for most of the primary production in many cases (more than the *Synechococcus/Prochlorococcus* production). This biodiversity of these pico-haptophytes is yet to be explored.

At the three main BOUM-station, we will analyze the morphological and genetic diversity of coccolithophores at 6 different depths, from surface waters to below the deep chlorophyll maximum. Different sorts of filters for comparative *SEM microscopy*, *Optic Microscopy*, *DNA extraction*, and *FISH analyses* will be prepared from 30 liters of water extracted from each depth. Polarization-optic microscopy will allow us to rapidly determine and quantify the coccolithophore flora at each station. Representative samples of the different flora along the transect and across depths will then be selected and thoroughly analyzed via SEM, and some of them will serve as template for LSU rDNA clone libraries. In addition, a new method recently developed in our laboratory (the COD-FISH, Frada et al. 2006) will be used to quantify the calcifying versus non-calcifying coccolithophores, a phenotypic status which can depend on the life-cycle stage. Coccoliths weights of key species will finally be assessed in collaboration with Luc Beaufort (CEREGE; Beaufort and Dollfus 2004; Beaufort 2005). For the analysis of pico-haptophyte diversity, we will select samples particularly rich in prymnesiophytes as detected in A.2.4 by FISH data, and build at least one LSU rDNA clone library per station using haptophyte specific primers.

A 1.8. Diversity of viruses

Viruses are on average 10 times more abundant than cellular organisms and they can cause significant mortality of bacterio- and phytoplankton (Fuhrman 1999; Suttle 2005). Metagenomic analyses suggest that viruses are very diverse and that most viruses in surface waters are bacteriophages, i.e. viruses infecting bacteria. Up to 7000 different types of viruses can be found in a 200 liter water sample and this is a conservative estimate, since rare viruses are not detected (Breitbart, Salamon et al. 2002). While cellular organisms have common genes such as the small subunit of rRNA, which can be used as phylogenetic marker, even subgroups of viruses, such as tailed bacteriophages, do not have a common gene. Thus, assessing diversity of viruses is difficult. Using pulsed-field gel electrophoresis, viruses from aquatic systems can be separated based on their genome size. Although several viruses can have the same genome size, this approach was surprisingly successful in describing viral diversity of systems or detecting changes with time and space. For specific groups such as algal viruses, cyanophages or podoviruses (a type of tailed phages infecting bacteria), primers have been developed and this allows genetic fingerprinting of their communities. In general, studies on viral diversity are still rare.

PFGE needs a relatively large volume of water, ca. 5-10 liters in oligotrophic systems. After prefiltration to remove cells, viruses are concentrated using ultrafiltration and -centrifugation and the genome is separated by size on agarose gels under pulsed electric fields (Wommack, Ravel et al. 1999). Primers are available for several groups of viruses and genetic fingerprinting techniques such as denaturing gradient gel electrophoresis (DGGE) have been applied to assess viral richness, i.e. the number of different viral types

(Chen & Suttle 1995; Short & Suttle 2000). A benefit of this method is that bands can be excised from gels and sequenced to obtain a phylogenetic affiliation of the viruses.

Viral abundance can be detected by flow cytometry (Marie et al. 1999). Viral production and the impact of viruses for bacterial mortality can be studied using approaches such as transmission electron microscopy inspection of infected cells and a virus reduction approach (Weinbauer et al. 2002; Wilhelm et al. 2002).

A 1.9. Resource and Consumer (*tintinnid ciliate*) diversity

Among the microzooplankton are tintinnid ciliates which possess attributes making them ideal candidates to use as indicators of consumer diversity. Tintinnids are a monophyletic, species-rich group (> 600), all ecologically similar as consumers of phytoplankton. Species identifications are based on morphological characteristics of their shell or lorica. Thus tintinnids provide an opportunity to compare the diversity found in lower trophic levels (e.g., diatoms, cyanobacteria, eukaryotic picoplankton) to that of their consumers

Diversity in tintinnid ciliates, members of the microzooplankton, will be assessed using classical taxonomic criteria- morphology. In tintinnid ciliates, morphology is not only of taxonomic significance; morphology is also closely related to feeding ecology (Dolan et al. 2002). Diversity will be estimated in terms of taxa (species, evenness) as well as in terms of morphology: numbers of distinct size-classes and evenness (Dolan 2000; Dolan & Gallegos 2001). Spatial trends in tintinnid resources (phytoplankton) will be compared to tintinnid diversity, both taxonomic and morphological.

A. 2.1. Dissolved Inorganic Phosphate availability:

It is not always easy to identify the limiting nutrient (N or P?) and its magnitude (e.g. P-deficiency vs. P-limitation). Since PO₄ is considered to be the most readily available form of P to osmotrophs, it would appear simple to measure this pool (i.e., PO₄ availability). However the molybdenum blue reaction method, which is currently used as the 'standard method', measures not only orthophosphate but also has a potential 'background' such as from acid labile dissolved organic P and arsenate. This is why the measured phosphate is defined as soluble reactive phosphate (SRP). In addition, SRP concentrations are often below the detection limit of the standard method in euphotic layers during the stratified period. Recently Rimmelin and Moutin (2005) have improved the magnesium co-precipitation method, so-called MAGIC25, by which PO₄ in water can be detected down to 0.8 nmol L⁻¹ without significant interference by SRP background. In addition, specific affinity for PO₄ uptake for osmotrophs, which is the slope of the specific uptake for PO₄ versus PO₄ concentration curve, is a very useful diagnostic tool for detecting P limitation among planktonic systems of different trophic status (Tanaka et al. *submitted*).

At each station, water samples will be collected from different depths from euphotic down to mesopelagic layers (ca. 1000 m). To compare chemically measured PO₄ concentration, biologically required PO₄ pool, and specific affinity for PO₄ uptake, measurements in concentration and turnover time of PO₄, and bacterial biomass and production will be done down to mesopelagic layers, while those of phytoplankton biomass and production are only down in euphotic layers.

A 2.2. Longitudinal variation of N:P balance in the euphotic layer

To understand ecosystem productivity, not only the question of which nutrient is limiting, but also the excess amount of the next potentially limiting nutrient, is of great importance. Alkaline phosphatase activity (APA) has long been used as a molecular indicator of P deficiency of osmotrophs. Thingstad and Mantoura (2005) showed that APA in the P-starved eastern Mediterranean surface waters is induced by excess NH₄ and reduced by excess PO₄ and that most of the APA reduction by excess PO₄ seems to be caused by repression of AP production, combined with inactivation of the existing enzymes. Using these characteristics, they established a new method for estimating excess N by titrating P-starved water samples with PO₄ until APA disappears and excess P by titrating P-pulsed water samples with NH₄ until APA is induced during a Lagrangian experiment (Thingstad and Mantoura 2005). However this method has not yet been applied to other parts of the Mediterranean.

We plan to estimate excess N or P using the APA titration technique at each station. Water samples are collected from surface, chlorophyll maximum depth, and bottom of the euphotic layer, and incubated with different concentrations and ratios of N and P.

A. 2.3. Silicic acid availability:

Recent studies have shown that silicic acid availability could exert a control over diatom abundance and Si production in the Mediterranean Sea (Leblanc et al., 2003) where previous observations discarded the role of Si as a potential limiting factor for phytoplankton growth in this region (Crispi et al., 2002). Nonetheless, very low silicic acid surface concentrations ($<1 \mu\text{M}$) have been observed in different parts of the Mediterranean basin and are likely to limit diatom growth. The silicon cycle in the Mediterranean Sea remains poorly documented, and this project further aims at quantifying the various silicon pools (dissolved and particulate) at the chosen study sites.

A. 2.4. Iron availability :

Although low concentrations of dissolved iron were found at the DYFAMED site at the end of the bloom period ($<0.13 \text{ nM}$: Sarthou & Jeandel, 0.2 nM : Bonnet & Guieu, *submitted*) that could have an impact on biological activity at this time (in particular by lowering the intensity of the bloom after most of the iron was depleted), high DFe encountered at the end of the stratification period (due to the accumulation of atmospheric Fe during this low productivity period) (Guieu *et al.* 2002, Bonnet & Guieu *submitted*, Sarthou & Jeandel, 2001) may only have a limited effect on biological activity. However, it has been suggested by Bonnet & Guieu, (*submitted*) that the occurrence of Saharan input during summer could stimulate N_2 fixation, not only because of (high) DFe concentrations in surface waters but by providing a source of new P (Ridame & Guieu, 2001). [DFe] distribution in Mediterranean Sea is poorly documented, in particular in the Eastern Basin. The accumulation in the surface mixed layer will highly depend on the intensity of the atmospheric flux that will happen during the summer prior to the cruise and we may also expect a situation where very low Saharan inputs occur leading to poorly Fe enriched surface waters that could affect the ecosystem functioning.

Dissolved iron distribution will be determined on deep profiles at each of the 4 sites with emphasis on the surface distribution.

A 2.5. N_2 fixation

Extensive nitrogen fixation in the Mediterranean Sea has been inferred from nutrient budgets (Bethoux and Copin –Montégut, 1986; Béthoux et al., 1992) and elevated N/P ratio in deep waters. $\delta^{15}\text{N}$ data in fossil chlorophyll provide geochemical evidence of extensive nitrogen fixation in the eastern Mediterranean in the past (Sachs and Repeta, 1999). Kerhervé et al. (2001), using $\delta^{15}\text{N}$ data in settling particles suggest that dissolved atmospheric N_2 may act as a significant new nitrogen source. Based on calculations of excess dissolved fixed nitrogen (N^*) in the MS, Gruber and Sarmiento, 1997 suggested that N_2 fixation should be an essential key in explaining the high N/P ratio in Mediterranean waters. Recent work (Garcia et al., *submitted*) conducted at the DYFAMED site has revealed a significant nitrogen fixation throughout the year, in spite of absence of *Trichodesmium*. While nitrogen fixation rates were typically quite low relative to the apparent demand of the primary producers, this biological process supplies significant new nitrogen which can balance the nitrogen budget and could explain the high nitrate/phosphate ratio observed in deep water.

At the 3 long-term stations, N_2 fixation and CO_2 uptake rates will be measured throughout the water column with the tracers $^{15}\text{N}_2$ and $^{13}\text{CO}_2$, following the general procedure described in Montoya et al., (1996). Labelling with $^{15}\text{N}_2$ and $^{13}\text{CO}_2$ permitted the assessment of nitrogen fixation by diazotrophs and carbon fixation by whole plankton community. Both parameters will be measured on the total fraction and at specific depths, on different size fractions (according to those chosen for the diversity of diazotrophs, cf. objective 2). The natural abundance of ^{15}N ($\delta^{15}\text{N}$) and ^{13}C ($\delta^{13}\text{C}$) on particulate matter in the euphotic zone, and in settling particulate matter (from sediment traps) will also be measured.

A 2.6. Atmospheric dust traces in the upper water column and their potential impact on the N₂ fixation rate

Dust deposition from Saharan dust clouds or “red rains” in very oligotrophic regions of the MS may be a potential source of fertilisation for surface waters, inducing higher Fe concentrations. This type of dust deposition can be traced in the surface layer by measuring lithogenic silica (LSi) which is an important component of terrestrial dust. Higher surface concentrations of LSi in the eastern MS have previously been used to confirm a dust deposition flux in the surface layer (Claustre *et al.*, 2002). The availability of phosphate and/or iron is suspected to limit the N₂ fixation (Berman-Frank *et al.*, 2001; Sanudo-Wilhelmy *et al.*, 2001; Mills *et al.*, 2004, Moutin *et al.*, 2005). Saharan dust inputs, by supplying both iron and phosphate, may stimulate *in situ* nitrogen fixation in oligotrophic ecosystems. Lenes *et al.* (2001) and Walsh & Steidinger (2001) reported a large *Trichodesmium* bloom in response to a Saharan dust event on the West Florida shelf. More recently, Mills *et al.*, (2004) demonstrated for the first time that the addition of Saharan dust in surface waters of the Eastern Tropical Atlantic (bioassay experiment) enhanced significantly nitrogen fixation rate by diazotrophs. The Mediterranean Sea is strongly impacted by Saharan dust input (Loye-Pilot and Martin 1996; Guerzoni *et al.* 1999). We can hypothesize that Saharan dust deposition could promote N₂ fixation in the Mediterranean Sea particularly during stratification period, ie when the atmosphere may be a significant source of allochthonous nutrients to the surface waters.

Vertical profiles of lithogenic silica will be conducted at the study sites to investigate the occurrence of dust deposition events. These measurements will be coupled to satellite imagery showing the aerosol index over the MS (TOMS,

<http://toms.gsfc.nasa.gov/aerosols/aerosols.html>).

A 2.7. Dissolved vs particulate primary production:

The extracellular release of recently fixed photosynthate is a major process contributing to the production of dissolved organic carbon (DOC) in marine ecosystems. This source of DOC is particularly important for the trophic ecology of plankton, since the released compounds are susceptible to rapid uptake by heterotrophic bacteria (Cole *et al.* 1982), thus creating a link between primary and bacterial production that is essential for the cycling of matter through the microbial loop and the microbial food web (Ducklow & Carlson, 1992). Despite its widely acknowledged ecological and biogeochemical significance, DOC production is not routinely measured in most surveys of productivity in the sea, which typically include determinations of particulate organic carbon (POC) production only. For this reason, our knowledge of the dynamics of microbial DOC production in marine ecosystems is still limited. As is the case with many other marine regions, dissolved primary production has not been well studied in the Mediterranean Sea. The measurements collected during the BOUM cruise along a biogeochemical gradient will allow us 1) to gain deeper insight into the mechanisms responsible for the extracellular release of recent photosynthate, and 2) to determine quantitatively what is the relative significance of DOC production and how does this importance change with the productivity of the ecosystem and its trophic structure.

During each process study, dissolved and particulate primary production will be measured daily by ¹⁴C uptake experiments. Measurements will also be taken during intermediate stations in between process study sites. In every case, experiments will be conducted at 5-6 depths throughout the euphotic layer. In addition to end-point experiments, several 24-h time series experiments will be conducted, in order to check the linearity in production rates and also to help ascertain the underlying mechanisms involved in the release of dissolved photosynthate. This experimental approach has been successfully applied before both in eutrophic (Marañón *et al.* 2004) and oligotrophic (Marañón *et al.* 2005) marine waters.

A 2.8. Assimilation and regeneration of nitrogen: Quantification on new production in oligotrophic system

The original definition of new primary production rests on the assumption that nitrogenous substrate taken up to fuel algal growth is coming into contact with phytoplankton for the first time that year. Therefore, should the generation of nitrate from ammonium by nitrification turn out to be significant in surface waters then nitrate uptake can no longer be simply ascribed to new production. The results confirm previous limited observations (Raimbault *et al.*, 1999) suggesting that a major fraction of nitrate uptake in oligotrophic regions, previously ascribed to new production, may actually involve "recycled" nitrate. In samples from oligotrophic waters (Raimbault *et al.*, 1999, Diaz and Raimbault, 2000), ¹⁵NO₃ loss as DO¹⁵N represented up

to 20% of net NO_3^- uptake. Then estimation of new production needs to take into account nitrification as well as DON release, processes that are still poorly quantified in oligotrophic waters, leading to inaccurate f ratio estimation and export production rates.

A 2.9. Dissolved inorganic phosphate uptake at a group of species specific level

Micro-organisms in the 0.6-2 μm size fraction, probably *Synechococcus*, were found to have, in addition to high affinity for orthophosphate, significantly higher maximum PO_4 uptake rates than heterotrophic bacteria or eukaryotic algae (Moutin et al. 2002). These specific advantages concerning orthophosphate uptake at low ($< 5\text{nM}$) as well as at relatively high (5-25 nM) concentrations may explain both general *Synechococcus* abundance in the Mediterranean sea during the stratified period, and transient blooms of this species in the open ocean where episodic orthophosphate nano-pulse events are likely to occur. Nevertheless, phosphate addition to surface waters of the ultraoligotrophic phosphate starved eastern Mediterranean in a Lagrangian experiment, caused a decline in chlorophyll and an increase in bacterial production (Thingstad et al. 2005) that may only be explained by specific advantage of “large” heterotrophic bacteria concerning PO_4 uptake. These apparent contradictory results reinforce the need to define PO_4 uptake characteristics at the species level.

Aerobic Anoxygenic Photosynthetic (AAnPB) bacteria may also contribute to this phosphate uptake. Although the ecological importance and role of these bacteria are unknown, there is recent evidence that they could represent a significant proportion of total heterotrophic bacteria (up to 20% in oligotrophic waters), primarily due to their large biovolume (Lami et al in prep). Their potential role in PO_4 uptake should therefore also be considered.

We propose to couple ^{33}P incorporation and cell sorting techniques to identify the major biological players in PO_4 uptake (Lebaron et al 2001, Servais et al 2003). Cell sorting will allow us to discriminate ^{33}P incorporation into autotrophic versus heterotrophic cells of different size classes. Furthermore, we propose to describe the phylogenetic diversity of the sorted cells using single cell (e.g. FISH) and molecular analysis. To determine ^{33}P uptake at the single cell level we propose FISH in combination with microautoradiography (MICRO-FISH) of sorted cells. Additionally, *in situ* bioassay experiments based on PO_4 additions could be performed and, based on MICRO-FISH, the phylogenetic groups that are stimulated can be identified. The role of different groups like SAR11, CFB, in PO_4 uptake could be investigated in this way.

A 2.10. Biochemical fate of PO_4 incorporation

Phosphorus has long been recognized as an essential element for planktonic growth, yet there is very little quantitative information on the specific biochemical functions phosphorus serves in the typical planktonic cell. During several cruises to station ALOHA in the North Pacific subtropical gyre, the synthesis of the phosphorus-containing biochemicals RNA, DNA and lipids accounted for an average of 50%, 20% and 20% of the total incorporation of phosphate respectively (Van Mooy, 2003). However, at any given time, these rates can vary significantly from the average value. So while each of these rates reflect planktonic growth in general, the preferential synthesis of one of these groups molecules over another reflect a complexity that is not normally observed in measurements of total PO_4 incorporation. By making these observations within the coordinated framework proposed in the BOUM project, we will gain a more detailed view of the overall chemical requirements for planktonic growth. For example, enhanced RNA synthesis is a signal of protein synthesis, which is a very nitrogen intensive process. While in contrast, the synthesis of lipids demands comparatively less nitrogen, but more carbon. In addition, a transect through the Mediterranean Sea as part of the BOUM project would be an ideal place to study the impact of phosphate limitation on the synthesis of RNA, DNA and lipids; this is in contrast to the North Pacific subtropical gyre, where phosphate concentrations and turnover times are an order of magnitude higher (Björkman et al. 2000; Moutin et al. 2002). We hypothesize that under phosphate-limiting conditions, a greater fraction of total phosphate incorporation will be used for DNA synthesis; parallel research in pure cultures has revealed a number of adaptations that can allow plankton devote significantly less phosphate to RNA and lipid synthesis when dissolved phosphate is scarce in the environment.

Incubations spiked with radiolabeled phosphate will be conducted in the upper 250m at stations along the transect. These incubations will be terminated by filtration on 0.2 micrometer membranes. The membranes will be frozen in liquid nitrogen and then shipped to my laboratory at Woods Hole Oceanographic Institution after the cruise. There quantitative extractions for RNA, DNA and lipids will be conducted. The quantity of

radiolabeled phosphate in these incubations will then be quantified by liquid scintillation counting, the rates of RNA, DNA and lipid synthesis will be determined.

A 2.11. Silicic production and diversity of diatoms

A new labelling technique was developed in order to trace the silicification process in marine diatoms, and offers new insights in the biological Si cycle by allowing for the first time a discrimination between active and non-active siliceous biomass (Shimizu et al., 2001; Leblanc & Hutchins, 2005). This new fluorescent probe (PDMPO) is incorporated into the diatom siliceous wall, also called frustule, during its formation, and fluoresces under UV-light wherever new biogenic silica is formed. This new molecular tool, coupled with the isotopic measurement of Si uptake rate (using the radioactive isotope ^{32}Si), will allow the determination of the relative contribution of each species within a mix of diatoms to total Si production. A full characterization of the Si cycle in surface waters (dissolved and particulate silicon pools, as well as Si production and export fluxes) will allow quantification of the relative contribution of diatoms to primary production and to the sinking particle flux.

A 2.12. Ciliates production

Protozooplankton is an ubiquitous and abundant component of the microzooplankton community in a large number of aquatic systems. This group is mainly represented by heterotrophic Nan flagellates and ciliates which are generally the major grazers in oligotrophic systems where pico- and nanoplankton dominate biomass and primary production (Kuipers and Witte, 2000, Burkill et al., 1995, Karayanni et al., 2005). Food availability appears to exert the major impact on the productivity of ciliates however the standing stocks of protozoa are little informative because due to strong top-down control by copepods (e.g. Christaki & Van Wambeke, 1995). Thus, evaluating protozooplankton growth rates is a key parameter in order to assess a better understanding of the functioning and productivity of the oligotrophic systems. There are still innumerable problems for fixing, identifying and estimating their grazing and production rates. In the few existing in situ studies dealing with ciliate production rates the most popular method is the size fractionation method (Wright & Coffin 1984) with more or less long incubations in polycarbonate bottles. The major problem of this approach is the decrease of the abundance of protists during the incubations due to manipulation and bottle effect (Gifford & Caron 2000). In situ incubation of water in dialysis bags allows diffusion of dissolved organic material and minimise bottle effect (Verity 1986). We will assess: (i) Protistan (nanoflagellates and ciliates) abundance and biomass (optical and epifluorescence microscopy), ii) Protistan growth rates using two alternative experimental methods a) size fractionation incubation in bottles b) size fractionation incubation in dialysis bags. This approach will be completed by the estimation of protistan carbon demand and their potential grazing rates using a theoretical approach (Fenchel, 1987).

A 2.13. Mesozooplankton production

The role of the zooplankton component in the pelagic ecosystem is often limited to the study of the main (often larger) copepods, while small species like *Oithona*, *Oncea* and gelatinous zooplankton (ctenophores, siphonophores, salps) displaying a large range of functional response could play an important role in oligotrophic regions. Mesozooplankton, i.e. copepods are important contributor to the Nitrogen pool through dissolved excretion. PO_4 excretion might also be important in this P-limited region. Experiment using enriched P-medium can highlight the potential limiting role of this nutrient in the development of local population. The way how copepods may be coupled to lower trophic levels in such conditions should be revisited (Thingstad et al. 2005).

Species richness (taxonomical determination), abundance and biomass of zooplankton (OPC: Optical plankton Counter, microscopic counts and dry weight).

On going measurement of plankton size spectrum will be performed between stations using the boat flow-through system.

Fecal pellets production (bulk and individual production), respiration (O_2 consumption, CO_2 release), excretion (colorimetric methods for NH_4 , PO_4), ingestion (chlorophyll though gut fluorescence) of main zooplankton contributors (copepods and main gelatinous organisms)

A 2.14. Uper meso- and macrozooplankton

The mesozooplankton size class is comprised between 200 and 2000 μm . The dominant group herein is the copepod group. However, the proportion of zooplanktonic organisms above 1 mm under-sampled or

damaged in the net samples is unknown. In oligotrophic zones, the role of planktonic predators and especially those belonging to the gelatinous compartment is important. In addition numerous 'gelatinous filter-feeder taxa' play an important role in the oligotrophic geochemistry. In fact the retention and the packaging efficiency of appendicularians and doliolids and their ability to feed on detritic particles make them suitable for the colonization of extreme environments such as the oligotrophic or the deep sea. The lack of information on these groups is due also to the fragility of these organisms and due to the vanishing taxonomic expertise. Appendicularians are known to play a major role in the formation of marine snow. In several oligotrophic zones the vertical migration of zooplankton is perturbed and often inexistent. The up-down control in these cases is exerted mostly through the gelatinous 'low energy' predators.

The problems inherent to net sampling are: 1) depths or space integration, 2) avoidance and sub-sampling and 3) damage of the organisms. A new plankton net is in construction in LOV. It will allow the acquisition of more than 10 samples during its oblique ascent. The problems described above will be reduced by discrete sampling, the study of optimal porosity and the decreased of noise of the gear as well as through the optimisation of samples handling and preservation. The samples will be analysed using the Zooscan system described at the site www.zooscan.com. The Underwater Video Profiler is described at www.obs-ylfr.fr/LOV/ZooPart/UVP/ and here below.

A 2.15. Diel variations of submicrometer and mostly non-living particles

Among the different particulate components, small-sized, mostly non-living submicrometer, particles are believed to be generally a dominant source of the particulate backscattering coefficient, b_{bp} , in surface waters of the open ocean under conditions of no phytoplankton bloom [Morel & Ahn, 1991; Stramski & Kiefer, 1991]. While scattering (b_p) is most sensitive to micron-sized particles, backscattering of spherical particles is relatively more responsive to submicrometer particles. Therefore simultaneous measurements of b_p , b_{bp} , and of the Chl-fluorescence signal may be used to analyse the diel scale of the particulate organic matter, and of its different components especially to know how the diel variations of submicrometer and mostly non-living particles, as revealed by b_{bp} , behave compared to those of larger and mostly autotrophic particles as revealed by b_p ?

In contrast to b_p , b_{bp} may be assessed from space (Loisel & Stramski, 2000). Based on this principle, we have shown in the Mediterranean Sea (Loisel et al., 2001), and over the global ocean (Loisel et al., 2002) some remarkable temporal patterns between b_{bp} and Chl. These patterns can be caused by the net accumulation of small, mainly non-living particles in the summer stratified layer, but also by the variation in the chlorophyll-to-carbon (Chl/C) ratio in surface phytoplankton population undergoing photoacclimation [Loisel et al., 2002]. A recent study stated that most of the b_{bp} seasonal variability are due to the C/Chl variability [Behrenfeld et al., 2005]. The different measurements in the BOUM cruise will then allow us to examine these different assumptions at the diel scale for futures interpretations of the remotely sensed b_{bp} .

A conductivity-temperature and depth (CTD) profiler (Sea-Bird, Inc.) and an optical package (WET Labs, Inc.) will be deployed every 3 hours. The optical package included a chlorophyll fluorometer, a beam transmissometer (at wavelength $\lambda=650$ nm), and two ECO-VSF (at $\lambda=532$ nm and 650 nm, respectively).

3 radiometers for measurements of downwelling irradiances (in water and above water-reference) between 350 and 700 nm will also be deployed around noon.

Water samples will be collected for measurement of absorption by dissolved and particulate material.

A 2.16. Decoupling of electron flow in phytoplankton thylakoid membranes and photosynthetic carbon fixation

Measurements of phytoplankton variable fluorescence provide information on the initial steps of photochemical charge separation and electron transport in thylakoid membranes. For ecological and biogeochemical issues, carbon fixation [and more specifically, net primary production (NPP)] is the photosynthetic parameter of greatest relevance. While variable fluorescence data are related to NPP, there are many biochemical steps between initial charge separation and carbon fixation. Over the diel cycle and between ocean regions of changing nutrient stress, this physiological separation of photosynthetic processes can cause a severe decoupling between variable fluorescence and carbon fixation patterns. The understanding and characterization of such decouplings constitutes the basis for relating high-resolution (even space-based) fluorescence data to carbon cycling in the sea. It also provides detailed insights toward interpreting spatial and temporal variability in photosynthetic rates as measured in the field using carbon isotopes. Parameters of particular importance include initial and maximal fluorescence (F_0 , F_m),

photochemical efficiencies (Fv/Fm), functional absorption cross-sections (σ -PSII), and electron turnover times downstream of photosystem II (τ -PSII, τ -PQ).

Variable fluorescence measurements will be made using a custom-built bench-top fast repetition rate fluorometer (FRRf). The instrument employs a measurement protocol that allows single-turnover and multiple-turnover determinations of F_o , F_m , and F_v/F_m , single-turnover σ -PSII and τ -PSII, and multiple-turnover τ -PQ. Measurements will be conducted continuously during the entire cruise using a flow-through of clean seawater. Vertical profiles of variable fluorescence parameters will also be collected using discrete samples (<500 ml) collected from the rosette. The FRRf can also measure changes in variable fluorescence parameters with changes in background illumination. This capability allows assessment of 'photosynthesis-irradiance' relationships at the level of electron transport.

A 2.17. Organic matter mineralization and bacterial diversity

At the base of microbial loop, heterotrophic bacteria play the key role of re-mineralizing detrital and dissolved organic matter. The importance of chemical composition of organic matter on bacterial metabolisms and dynamics is well known. Organic matter in the ocean is mainly under the form of polymeric substrates and ecto-enzymatic hydrolysis by specific enzymes is a preliminary step to assimilation of most substrates. Ecto-enzymes are specific of chemical forms and are generally inducible. After hydrolysis, small organic forms are directly assimilated into bacteria cells for bacterial production. It has been recognized that the preliminary hydrolysis of bio-polymers by ectoenzymatic activity is often a rate-limiting step for bacterial degradation of organic matter. In addition, at a given environmental condition corresponds a given taxonomic composition of heterotrophic procaryotes. Molecular phylogenetic methods have provided means for identifying types of organisms that are present in microbial communities without cultivation. Fluorescence *in situ* hybridisation (FISH) with r-RNA-targeted oligonucleotides probes selectively visualizes prokaryotic cells with defined phylogenetic affiliation. The recently developed catalyzed reporter deposition FISH (CARD-FISH) method allows the use of oligonucleotide probes labeled with horseradish peroxidase, resulting in a sensitivity comparable to that of polynucleotide probes (Pernthaler et al. 2002). There is also increasing methodological development dealing on functional diversity aspects; notably microautoradiography coupled to *in situ*-hybridization (MICRO-FISH, Cottrell & Kirchman, 2000) which has also shown that cell specific bacterial production encompasses a large range. By MICRO-FISH technique, a variety of substrates have been tested which are not used in the same proportion by all phylogenetic groups (Elifantz et al, in press). In addition, ectoenzymes are expressed in some specific strains only (Martinez et al., 1996). Due to their species-specific heterotrophic activities, free-living procaryotes are able to modify the biochemical composition of organic matter. Hence, examining relationships between diversity and functionality (ectoenzymatic activity, uptake of specific organic compounds representative of a chemical family) within bacterial community is a major challenge for understanding the impact of prokaryotic heterotrophic processes on mineralization of organic matter along the water column. But there is scarce information in the Mediterranean, particularly in the East, and scarce information on transformation of organic matter in deep waters. Recent studies showed that the relative abundance of free-living *Archaea* increases throughout the water column and becomes about equal to the abundance of *Eubacteria* in deep-sea waters (Karner et al. 2001).

We propose to measure simultaneously 3 families of ectoenzymatic activities (lipase, protease, phosphatase) and the assimilation of their by-products (amino acids, fatty acids, and see A 3.19 for the fate of the DOP hydrolyzed) in combination with MICRO-FISH technique to target phylogenetic groups mostly responsible of heterotrophic activity. This will be made in the upper layer, in the twilight zone and in deep water layers (Van Wambeke et al 2002, Bourguet et al 2003, Cottrell & Kirchman, 2000). The chemo-autotrophic potential of *Archaea* will be determined by measuring dark incorporation of radiolabelled bicarbonate. The chemical composition of organic matter (dissolved lipids, aminoacids, DOP, DOC, DON) could provide information on the quality of substrates available for bacteria from the surface to the deep water column in relation to their heterotrophic activities.

A 2.18. Factors controlling bacterial production and consequence on heterotrophic activities.

Two main tools are generally used to detect P stress within bacteria and phytoplankton: phosphatase alkaline activities and enrichment experiments. Interpretation of the enrichment experiments are not always very clear and often, co-limitation of bacterial production is suggested, notably C - P (Carlson and Caron 2001, Sala et al 2002, Van Wambeke et al. 2002). The second approach is based on the measurements of the activity of the

ectoenzyme alkaline phosphatase. Bacteria develop alkaline phosphatase (AP) activities on exogenous substrates to fulfil their phosphorus requirement for growth when available phosphate becomes limiting. AP activities have generally been studied with fluorogenic substrate but only from the point of view of kinetics, or in the frame of global biogeochemical approach (measurements in the bulk sea water). However, by this method it is impossible to target organisms responsible of the activity. Knowing these enzymatic activities at the cell level appears necessary to evaluate the impact of phosphate limitation on aquatic ecosystem diversity. Localization of phosphatase active bacteria and phytoplankton is now possible at the cellular level by the use of a new fluorogenic substrate: the ELF-97 (Molecular Probes) that precipitates and fluoresces yellow-green after cleavage by alkaline phosphatase (Nedoma et al 2003). Such approaches will be made in situ and on surface sea-water amended with different combinations of nutrient amendments (N, P, labile C). Determination of the main phylogenetic groups responsible of heterotrophic activity (Cottrell and Kirchman 2000) as well as quantification of cells-exhibiting phosphatases activity, will give information about these potential co-limitation processes.

We will measure bacterial production (^3H leucine technique) and estimate major phylogenetic groups involved in bacterial production (microautoradiography coupled to hybridization in situ). Alkaline phosphatase activity will be determined for the whole water samples with the fluorogenic substrate MUF-P and at the single cell level with ELF-97. We will also determine the effects of nutrients amendments on bacterial production, respiration, diversity of phylogenetic groups, and the participation of the major phylogenetic groups to bacterial production.

A 2.19. Dissolved organic phosphate hydrolysis

There are 2 major groups of enzymes involved in terminal step of hydrolysis of dissolved organic phosphate (DOP) and thus responsible for inorganic phosphate (PO_4) regeneration: alkaline phosphatases (AP), and 5'-nucleotidases (5NP). AP are localized both in algae and bacteria, they are synthesized in response to P-deficiency (or P-stress), which means they can be used in P-deficiency diagnosis both at system and cellular level, and their activity can be relatively easily measured with fluorogenic substrates, e.g. MUF-P (system level) or ELF-97 phosphate (single-cell level, Nedoma et al., 2003b). The use of fluorogenic substrates like MUF-P, although giving semi-quantitative information by the use of kinetic parameters derived from enzymatic kinetics (V_m/K_m), do not allow realistic estimates of DOP hydrolysis rates. The other group, 5NP, are mainly of bacterial origin, they are mostly constitutive, which means they have no diagnostic value in P-deficiency assessment, and there is no fluorogenic substrate suitable for their activity estimation - measurement of their activity requires using radiolabelled nucleotide, mostly ^{32}P -labelled ATP (Ammerman & Azam, 1991). As nucleotides (eg. ATP) are hydrolysed *both* by AP and 5NP, they can be used as universal substrates to measure DOP turnover. In freshwater, DOP turnover is always shorter when measured with nucleotide (^{32}P -ATP, hydrolyzed by AP+5NP) than with non-nucleotide (MUF-P, ^{32}P -glucose-6-phosphate hydrolysed by AP only) (Nedoma et al. 2003a).

However, DOP turnover rate provides only relative measure of the regeneration process intensity (e.g. in the units of $\% \text{ h}^{-1}$). To get flux (e.g. in the units of $\text{nmol l}^{-1} \text{ h}^{-1}$), it is necessary to multiply turnover rate by the size of the relevant DOP pool, i.e by the concentration of that fraction of DOP, which can be enzymatically hydrolyzed yielding orthophosphate (enzymatically hydrolysable dissolved organic phosphate, EHDOP). The most suitable method of EHDOP estimation available is enzymatic: filtration of the sample, incubation of the natural DOP in the $0.2 \mu\text{m}$ filtrate with pure AP from *E. Coli* at optimum hydrolysis conditions, and chemical measurement of the PO_4 liberated (Labry, 2001).

Although it is recognized that prokaryotes in the deep strata are limited by bioavailability of C, surprisingly some relative high values of alkaline phosphatase have been detected in deep Indian Ocean waters (Hoppe 1999). This activity should not be related to the necessity for phosphate uptake but rather on the organic C compounds which simultaneously produced during hydrolysis and which could probably not be taken up prior to the hydrolytic detachment of phosphate. These enzymes may be important for the slow, but steady regeneration of phosphate and organic C in mesopelagic waters. Besides depth profiles of AP activities, parallel measurement and comparison of turnover rates ^{33}P and ^3H from ^{33}P - and ^3H -labelled ATP, respectively, could provide indirect information about relation between bacterial P- and C-demand and thus potential P- or C-limitation of bacteria in surface and deep waters.

We will measure turnover rates of orthophosphate and organic moieties of a model radiolabelled DOP substrate (^{33}P -ATP, ^3H -ATP) hydrolyzed by natural extracellular enzymes, and an enzymatic estimation of EHDOP (biodegradable DOP) pool.

A 2.20. Effects of hydrostatic pressure on organic matter mineralization

Most of the organic material produced in the photic zone is recycled in the upper layer of the ocean. However, part of this production is exported downwards through the water column both by sinking particulate matter and by diffusion of the dissolved organic matter. During its transit towards the seafloor, most particulate organic carbon (POC) is returned to inorganic forms. Mineralization of the exported material (and subsequent production of CO₂, a greenhouse gases) depends on the prokaryotic activities in mesopelagic and deep water masses. Attached and free-living bacteria both contribute to the oceanic carbon cycle. The fate of biogenic particles during their fall depends on processes leading to mineralization of the organic matrix, and on processes leading to the dissolution of the mineral matrix. Regeneration is now known to play a major role in oceanic Si cycling but the mechanisms that regulate the process are relatively well identified. Bidle & Azam (1999) demonstrated that bacteria accelerate diatom silica dissolution by colonizing and enzymatically degrading the organic matrix of diatom frustules. During a sinking particle fall experiment with axenic diatom detritus, Tamburini et al. (submitted) have shown that the degradation of the organic matrix of diatom frustules by aminopeptidase activities of bacteria were lower during sinking particles fall than those measure at atmospheric pressure conditions. This should help us to understand both the role of mesopelagic and bathypelagic procaryotes in the mineralization of organic matter and their contribution to regeneration to the euphotic zone of mineral ballast (e.g. silica and carbonates). This information is essential for improving models to describe organic matter mineralization by procaryotes and the transfer of carbon and energy to the dark ocean and for exploring the consequences of these processes in the global carbon cycle. During the BOUM cruise, both sinking particles experiments and measurement of deep-sea prokaryotic activities (ectoenzymatic activity, prokaryotic – *Archaea* and *Bacteria* – production) maintained in *in situ* pressure conditions by will be performed. Moreover an emphasis on the phosphatase activity (and the responsible from) will be made. Finally, the prokaryotic structure (deep vs surface, attached to particle vs free-living) will be done. We will use high pressure serial sampler and particle sinking simulator able to maintain and increase hydrostatic pressure, respectively.

A 2.21. C/N/P stoichiometry of settling particulate matter

The degree to which the C/N/P stoichiometry of marine particulate matter can deviate from the Redfield ratio of 106/16/1 is critical to our understanding of the role of phytoplankton in biogeochemistry (Falkowski, 2000). The Redfield ratio is used in oceanography for calculation of export production, and for nutrient-based production calculations, as well as in models of ocean productivity. The evolution of the N:P ratio can marks the transition between N- and P-limitation of phytoplankton growth and can be associated with nitrate- and phosphate-replete conditions (Geider & La Roche, 2002). These ratios can reflect a physiological or biochemical constraint on the elemental composition of primary production. Large variations of C/N/P ratios compared to Redfield have been reported (see Geider & La Roche, 2002). They are clearly related to variations in phytoplankton species dominance. Despite its relevance for modelisation, the stoichiometric composition of material exported to depth is not well constrained by observations (Geider & La Roche, 2002). Comparison between C/N/P stoichiometry of particulate matter in the water column and in the settling particulate matter will allow examining whether one element is preferentially mineralized than another one before particles sink out of surface waters.

Sediment traps will be deployed at 3 depths between the bottom of the euphotic layer and the bottom of the Surface Mediterranean Water. The C/N/P and Si ratios will be measured and compared to the ratios in the water column.

A 2.22. Large Particulate Matter – Marine snow

Marine snow is an important pool of atmospheric carbon storage in the ocean's interior. Processes of aggregation and of dissolution are continuous. Processes of re-aggregation are often concentrated in distinct layers in the mesopelagic depths. Data on the distribution and the dynamics of the marine snow in the oligotrophic sea are scarce. In order to estimate correctly the carbon cycle in the Mediterranean, it is important to determine the proportion of the superficial biological activity trapped and transported to the deep layers in the form of large particles. According to Jackson et al. (1999), by volume the particles > 1 mm are the most important particulate pool of organic carbon in the oceans.

The Underwater Video Profiler (UVP) is used extensively since 1991. The instrument is specifically well adapted to the oligotrophic situation and is measuring fragile objects in an undisturbed and precisely

determined water volume. The UVP is acquiring and treating automatically reliable data on the marine snow abundance, size structure, vertical distribution as well as on the macrozooplankton vertical stratification. These data can be transformed into carbon values and vertical fluxes can be assessed down to 1000 m depth. The UVP has its own CTD, turbidity meter and fluorometer mounted on the frame. Therefore it is possible to relate the vertical distribution of the POC to the physical structures. One 0-1000 m deployment of the UVP lasts 40 min deck to deck. We are constructing a new model that could be mounted on a rosette instead of one bottle.

A 2.23. Oxygen budget

We propose to couple in these low advective environments the O₂ budget within the mixed layer and subsurface layer from 4 approaches: data derived from O₂ field measurements (obtained on the SBE 43 sensor of the CTD, Minas et al 1986), data derived from high frequency O₂ field measurement on immersed optodes (AANDERAA sensors) at selected depths, and rate measurements of net community production derived from *in situ* auto sampler (Langdon et al 1995) deployed at 6 depths which are designed to collect water at the depth of their immersion. After deployment, the oxygen concentration is continuously monitored in the closed chamber which is regularly opened and closed again for pre-selected periods, allowing measurements of respiration (dark period) and net community production (light period). Finally, the more classical approaches deriving net community production from O₂ and TCO₂ variations during bottle incubations will be also carried out (Williams & Jenkinson 1982, Goyet & Hacker 1992, Johnson 1993). This more traditional technique will allow complementary estimates on the coupling between O₂ and CO₂ fluxes. Photosynthetic quotient and respiratory quotients are representatives of the ecosystem functioning.

The originality consists in comparison of different time scales of O₂ variations to reconcile *in situ* observations which integrate the whole community processes compared to discrete bottle incubations. In addition, the study of the kinetic of O₂ change during the day obtained in the PA chamber will provide information on autotrophic *versus* heterotrophic respiration.

A 2.24. Microcosm experiments design

We plan to perform on-board microcosm experiments at each station. Water samples are collected from one or two different depths (e.g. surface and chlorophyll maximum) and pre-filtered through 200 µm mesh to eliminate mesozooplankton. This is because the “microcosm”-size incubator (ca. 10 L) will result in different numbers of mesozooplankton among the microcosms and also create stress to mesozooplankton. A 2x2 factorial design is adapted (i.e. control, PO₄, NH₄, PO₄+NH₄ treatments) in triplicate. Key parameters, such as concentrations of dissolved and particulate nutrients, PO₄ turnover time, alkaline phosphatase activity, luxury P uptake, biomass of osmotrophs and phagotrophs, primary and bacterial carbon production, and copepod egg production, will be measured during incubation. Using the X-Ray Fluorescence spectroscopy (XRF), elemental analysis will be performed for biological materials (content and composition of C, N, P, Mg, Fe, etc). Since the XRF is a quite new instrument and not destructive, it is possible to use the same filter samples for further analyses (e.g. POC, PON).

Five additional treatments (in triplicate over 48h) will be achieved using trace-metal clean techniques to address in particular the role of Fe and dust on N₂ fixation: control, +P, +Fe, +Saharan dust, + anthropogenic dust. These nutrient-addition bioassays are designed to investigate which nutrient (P or Fe) limits N₂ fixation in MS. Additions of dust will be made to assess the potential impact of dust deposition on the primary and diazotrophic production. Labelling with ¹⁵N₂ and ¹³CO₂ will allow the assessment of nitrogen fixation by diazotrophs and carbon fixation by the whole plankton community. Changes in diazotrophs diversity will be also investigated during the incubation time. Other key parameters such as total dissolved iron, organic iron, phosphate concentrations (MAGIC method), chlorophyll-a will be followed over 48h.

A 3.1. Modelisation

The multi-element multi-functional group (mNmFG) biogeochemical mNmFG model will be implemented in the modular tool Eco3M (Ecological Mechanistic and Modular Modelling) developed in the Centre d’Océanologie de Marseille through cross-institution collaborations between LOB and IRD. This new numerical tool has been devised to handle mNmFG models (Baklouti et al. submitted) with the main objective of being wholly modular as regards the model state variables and the associated functions for biogeochemical processes. New variables or processes can therefore be added or removed with great

simplicity. In addition, a numerical library of functions of biogeochemical processes is already available in Eco3M and many of these parameterizations rely on mechanistic basis.

The structure of the mNmFG will be close to the idealized food web structure proposed by Thingstad et al. (1998, 2005) though we aim at deriving simpler models relying on the same basis through microcosm experiments.

Due to the sampling strategy that will be undertaken during the BOUM cruise (drifting mooring), we will consider in a first approximation that all samples will concern the same water column and then focus on the vertical exchanges into this water mass. In this context, the mNmFG model will be coupled with a 1-D version of the physical model Symphonie to try to catch the vertical fluxes of nutrients as well as living and detritic organic matter (dissolved and particulate) measured at each experimental site. In practice, starting from arbitrary initial conditions for the state variables and thanks to experimental measurements concerning the vertical diffusion and the biogeochemical kinetics, simulations will be undertaken until reaching a cyclic steady-state (corresponding to light-dark variations). This steady-state solution will be compared with organic (phytoplankton, DOM, POM, microzooplankton) and inorganic (nutrients, DIM, PIM) concentrations collected every six hours.

References cited (except that of BOUM community>2002)

- Achilles, K. M., T.M. Church, S.W. Wilhelm, G.W. Luther III, & D. Hutchins, 2003: Bioavailability of iron to *Trichodesmium* colonies in the western subtropical Atlantic Ocean. *Limnology and Oceanography*, 48, 2250-2255.
- Alvarez M., Pérez F., Shoosmith D., and H.L. Bryden (2005). Unaccounted role of Mediterranean Water in the drawdown of anthropogenic carbon. *JGR*, Vol. 110.
- Ammerman J.W. and Azam F. (1991): Bacterial 5'-nucleotidase activity in estuarine and coastal marine waters: Characterization of enzyme activity. - *Limnol. Oceanogr.* 36: 1427-1436.
- Andersen RA, Bidigare RR, Keller MD, and Latasa M (1996). A comparison of HPLC pigment signatures and electron microscopic observations for oligotrophic waters of the North Atlantic and Pacific Oceans. *Deep Sea Research II* 43:517-537.
- Antoine, D., André, J.M. and A. Morel (1996). Oceanic primary production : II. Estimation at global scale from satellite (Coastal Zone Color Scanner) chlorophyll, *Global Biogeochemical Cycles*, 10, 57-69.
- Avril, G., 2002: DOC Dynamics in the northwestern Mediterranean Sea (DYFAMED site). *Deep-Sea Research II*, 49, 2163-2182.
- Beaufort L and Dollfus D, 2004. Automatic recognition of coccolith by dynamical neural network. *Marine Micropaleontology*, 51/1-2: 57-73.
- Beaufort L, 2005. Weight estimates of coccoliths using the optical properties (birefringence) of calcite. *Micropaleontology*, 51(4): 289-298.
- Béjå, O., L. Aravind, E. V. Koonin, M. T. Suzuki, A. Hadd, L. P. Nguyen, S. B. Jovanovich, C. M. Gates, R. A. Feldman, J. L. Spudich, E. N. Spudich & E. F. DeLong. 2000. Bacterial rhodopsin: evidence for a new type of phototrophy in the sea. *Science* 289: 1902-1906.
- Béjå, O., M. T. Suzuki, J. F. Heidelberg, W. C. Nelson, C. M. Preston, T. Hamada, J. A. Eisen, C. M. Fraser & E. F. DeLong. 2002. Unsuspected diversity among marine aerobic anoxygenic phototrophs. *Nature* 415: 630-633.
- Berger, W.H., 1989: Global maps of ocean productivity. In: Berger, W.H., Smetacek, V.S., Wefer, G. (Eds.), *Productivity in the Ocean: Present and Past*. Wiley, Chichester, UK, pp. 429-455.
- Berland, B. R., D.J. Bonin & S.Y. Maestrini, 1980: Azote ou phosphore? Considérations sur le "paradoxe nutritionnel" de la mer méditerranéenne. *Oceanologica Acta*, 3, 135-141.
- Berman-Frank, I., J. T. Cullen, Y. Shaked, R. M. Sherrell and P. G. Falkowski 2001. Iron availability, cellular iron quotas, and nitrogen fixation in *Trichodesmium*. *Limnology and Oceanography* 46(6): 1249-1260.
- Bertilsson, S., O. Berglund, D.M. Karl & S.W. Chisholm, 2003: Elemental composition of marine *Prochlorococcus* and *Synechococcus*: Implications for the ecological stoichiometry of the sea. *Limnology and Oceanography*, 48, 1721-1731.
- Béthoux J.P., P. Morin, C. Madec, B. Gentili. Phosphorus and nitrogen behaviour in the Mediterranean Sea. *Deep Sea Res.*, 39 (1992) 1641-1654N. Garcia, P. Raimbault, E. Gouze, V. Sandroni. Nitrogen fixation and biogeochemical budget in Western Mediterranean Sea (submitted)
- Béthoux, J. P., P. Morin, C. Madec & B. Gentili, 1992: Phosphorus and nitrogen behaviour in the Mediterranean Sea. *Deep-Sea Research*, 39, 1641-1654.
- Béthoux, J.P., G. Copin-Montégut. Biological fixation of atmospheric nitrogen in the Mediterranean Sea. *Limnol. Oceanogr.*, 31 (1986) 1353-1358
- Bidle KD, Azam F (1999) Accelerated dissolution of diatom silica by marine bacterial assemblages. *Nature* 397:508-512
- Billet, D.S.M., Lampitt, R.S., Rice, A.L., Mantoura, R.F.C., 1983. Seasonal sedimentation of phytoplankton to the deep-sea benthos. *Nature* 302, 520-522.
- Bissett, W.P., Walsh, J. J., Dieterle, D. A. and Carder, K. L. Carbon (1999) cycling in the upper waters of the Sargasso Sea: I. Numerical simulation of differential carbon and nitrogen fluxes. *Deep Sea Research* 46: 205-269
- Björkman, K., A. L. Thomson-Bulldis, and D. M. Karl. 2000. Phosphorus dynamics in the North Pacific subtropical gyre. *Aquat. Microb. Ecol.* 22: 185-198
- Bonin, D. J., Bonin, M. C., & T. Berman., 1989: Mise en évidence expérimentale des facteurs nutritifs limitants de la production du micro-nanoplancton et de l'ultraplancton dans une eau côtière de la Méditerranée orientale (Haïfa, Israël). *Aquatic Sciences*, 51, 132-148.
- Bonnet, D. & F. Carlotti, 2001. Laboratory study on development and egg production of *Centropages typicus* Krøyer Copepoda Calanoida fed by different food types. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, 224, 133-148.
- Burkill, P.H., E.S. Edwards, A.W.G. John, and Sleight, M.A. (1993), Microzooplankton and their herbivorous activity in the northeastern Atlantic Ocean, *Deep-Sea Res. II* 40, 479-493.
- Breitbart, M., P. Salamon, et al. (2002). "Genomic analysis of uncultured marine viral communities." *Proc Natl Acad Sci U S A* 99(22): 14250-5.
- Bruland, K. W., E. L. Rue and G. J. Smith. "Limnology and Oceanography and 1661-1674., 2001: Iron and macronutrients in California coastal upwelling regimes: Implications for diatom blooms. *Limnology and Oceanography*, 46, 1661-1674.
- Bruland, K.L.W., Silver, M.W., 1981. Sinking rates of fecal pellets from gelatinous zooplankton (salps, pteropods, doliolids). *Marine Biology* 63, 295-300.
- Capone, D. G., 2001: Marine nitrogen fixation: what's the fuss? *Current opinion in microbiology*, 4, 341-348.
- Carlotti, F. & H.J. Hirche, 1997. Growth and egg production of female *Calanus finmarchicus*: individual-based physiological model and experimental validation. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, 149, 91-104.
- Carlotti, F. & U. Wolf, 1998. A Lagrangian ensemble model of *Calanus finmarchicus* coupled with a 1-D ecosystem model. *Fisheries Oceanography*, 7(3/4): 191-204
- Carlson, C. A., H.W. Ducklow & A.F. Michaels, 1994: Annual flux of dissolved organic carbon from the euphotic zone in the northwestern Sargasso Sea. *Nature*, 371, 405-408.

- Carlsson, P., and Caron, D.A. (2001) Seasonal variation of phosphorus limitation of bacterial growth in a small lake. *Limnology and Oceanography* 46: 108-120.
- Carrick HJ Fahnestiel GL 1992 Growth and production of planktonic protozoa in Lake Michigan: In situ versus in vitro comparisons and importance to food web dynamics. *Limnol Oceanogr* 37(6):1221-1235
- Chen, F. and C. A. Suttle (1995). "Amplification of DNA polymerase gene fragments from viruses infecting microalgae." *Appl Environ Microbiol* 61: 1274-1278.
- Chistaki, U., S. Jaquet, J.R. Dolan, D. Vaultot & F. Rassoulzadegan, 1999: Growth and grazing on *Prochlorococcus* and *Synechococcus* by two ciliates. *Limnology and Oceanography*, 44, 52-61.
- Christaki U Giannakourou A Van Wambeke F Gregori G 2001 Nanoflagellate predation on auto- and heterotrophic picoplankton in the oligotrophic Mediterranean Sea. *J Pl Res* 23:1297-1310
- Christaki U Van Wambeke F. 1995. Simulated phytoplankton bloom input in top-down manipulated microcosms: Comparative effect of zooflagellates, ciliates and copepods. *Aquatic Microbial Ecology*, 9:137-147
- Claustre, H., Morel, A., Babin, M., Cailliau, C., Marie, D., Marty, J.-C., and D. Vaultot (1999). Variability in particle attenuation and stimulated fluorescence in the tropical and equatorial Pacific : scales, patterns and some biogeochemical implications. *Journal of Geophysical Research*, **104**, 3401-3422.
- Cole, J. J., Likens E. E., Strayer D. L. (1982) Photosynthetically produced dissolved organic carbon: an important carbon source for planktonic bacteria. *Limnol. Oceanogr.* 27: 1080-1090.
- Copin-Montégut, C., 2000. 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* 47, 447-477.
- Copin-Montégut, G., & B. Avril, 1993: Vertical distribution and temporal variation of dissolved organic carbon in the North-Western Mediterranean Sea. *Deep-Sea Research*, 40, 1963-1972.
- Cottrell M. and Kirchman D. (2000) Natural assemblages of marine proteobacteria and members of the Cytophaga-Flavobacter cluster consuming low- and high-molecular-weight dissolved organic matter. *Applied and Environmental Microbiology* 66: 1692-1697.
- Davidson, K. and Gurney, W. S. C. (1999) An investigation of non-steady algal growth. II. Mathematical modelling of co-nutrient-limited growth. *Journal of Plankton Research* 21(5):839-858.
- De Baar, H. J. W., 1994: Von Liebig's Law of the Minimum and Plankton Ecology (1899-1991). *Progress in Oceanography*, 33, 347-386.
- Delmas D., Frikha E.A., Linley E.A. (1990) Dissolved primary amine measurement by flow injection analysis with o-phthalaldehyde: comparison with high-performance liquid chromatography. *Mar Chem* 29:145-154.
- Diaz, F., P. Raimbault, B. Boudjellal, N. Garcia & T. Moutin, 2001: Early spring phosphorus limitation of primary productivity in a NW Mediterranean coastal zone (Gulf of Lions). *Marine Ecology Progress Series*, 211, 51-62.
- Dickey, T., Zedler, S. Yu, X., Doney, S.C. Frye, D., Jannasch, H., Manov, D., Sigurdson, D., McNeil, J.D., Dobeck, L., Gilboy, T., Bravo, C., Siegel, D.A., Nelson, N., (2001) Physical and biogeochemical variability from hours to years at the Bermuda Testbed Mooring site: June 1994-March 1998. *Deep-Sea Res. II*, **48**: 2,105-2,140
- DOE (1994). *Handbook of Methods for Analysis of the Various Parameters of the Carbon Dioxide System in Seawater*; version 2, A.G. Dickson et C. Goyet, eds, ORNL/CDIAC-74
- Dolan, J. R. 2000. Tintinnid ciliate diversity in the Mediterranean Sea: longitudinal patterns related to water column structure in late spring-early summer. *Aquat. Microb. Ecol.* 22:69-78.
- Dolan, J. R., Gallegos, C. L. 2001. Estuarine diversity of tintinnids (planktonic ciliates). *Est Coast. Shelf Sci.* 23:1009-10027.
- Duce, R. A. and N. W. Tindale 1991. Atmospheric transport of iron and its deposition in the ocean. *Limnol. Oceanogr.* 36(8): 1715-1726.
- Ducklow, H. W., Carlson, C. A. (1992) Oceanic bacterial production. *Adv. Microb. Ecol.* 12: 113-181.
- Elifantz H., Malmstrom R., Cottrell M., Kirchman D.L. (in press) Assimilation of polysaccharides and glucose by major bacterial groups in the Delaware estuary. *Applied and Environmental Microbiology* 71.
- Estournel, C., Durrieu de Madron, X., Marsaleix, P., Auclair, F., Julliard, C. and Véhil, R. (2003) Observation and modelisation of the winter coastal oceanic circulation in the Gulf of Lions under wind conditions influenced by the continental orography (FETCH experiment). *Journal of Geophysical Research* 108(C3):8059, doi: 10.1029/2001JC000825
- Fennel, K., Spitz, Y. H., Letelier, R. M., Abbott, M. R. and Karl, D. M. (2002) A deterministic model for N₂ fixation at Station ALOHA in the subtropical North Pacific Ocean. *Deep-Sea Research II* 49: 149-174.
- Fonseca, C. R., G. Ganade, 2001: Species functional redundancy, random extinctions and the stability of ecosystems. *Journal of Ecology*, 89, 118-125.
- Fowler, S.W., Knauer, G.A., 1986. Role of large particles in the transport of elements and organic compounds through the oceanic water column. *Progress in Oceanography* 16, 147-194.
- Fenchel, T., (1987). *Ecology of protozoa. The Biology of free-living Phagotrophic protists.* Science Tech Publishers, Springer-Verlag (Eds), pp. 193.
- Fuhrman, J. A. (1999). "Marine viruses and their biogeochemical and ecological effects." *Nature* 399: 541-548.
- Gao, Y., Y. J. Kaufman, D. Tanre, D. Kolber and P. G. Falkowski 2001. Seasonal distributions of aeolian iron fluxes to the global ocean. *Geophysical Research Letters* 28: 29-32.
- Gargett, A. E., and J. Marra. 2002. Effects of upper ocean physical processes - turbulence, advection, and air-sea interaction - on oceanic primary production. *The Sea, Vol.12*, ed. A. R. Robinson, J. J. McCarthy, and B. J. Rothschild, John Wiley & Sons, NY, 19-49. (copyright John Wiley and Sons).
- Geider R J, La Roche J 2002. Redfield revisited: Variability of C: N: P in marine microalgae and its biochemical basis. *Eur J Phycol*, 37 : 1-17

- Gifford, D. J. and Caron, D. A., (2000). Sampling, preservation, enumeration and biomass of marine protozooplankton. Zooplankton methodology manual. Edited by R. P. Harris, P. H. Wiebe, J. Lenz, H. R. Skjoldal and M. Huntley. ICES. Academic Press. Chap 5, 193-221.
- Gomez, F., Furuya, K., Takeda, S., 2005: Distribution of the cyanobacterium *Richelia intracellularis* as an epiphyte of the diatom *Chaetoceros compressus* in the western Pacific Ocean. *Journal of Plankton Research*, 27, 323-330.
- Gorsky G., Picheral, M. and Stemmann, L. (2000) Use of the Underwater Video Profiler for the Study of Aggregate Dynamics in the North Mediterranean. *Estuar. Coast. Shelf Sci.* 50 (1) : 121-128.
- Gorsky, G., Flood, P.R., Youngbluth, M.J., Picheral, M. & Grisoni, J.-M. (2000) Zooplankton Distribution in Four Western Norwegian Fjords. *Estuar. Coast. Shelf Sci.*, 50 : 135-141.
- Goyet C. & S.D. Hacker 1992. Procedure for calibration of a coulometric system used for total inorganic carbon measurements of seawater. *Marine Chemistry* 38 (1-2) 1992. 37-51.
- Gregg, MC, 1987. Diapycnal mixing in a thermocline: a review. *J. Geophys. Res.*, 92, 5249-5286.
- Grosjean, P., Picheral, P., Warembourg, C. and G Gorsky (2004) Enumeration, measurement and identification of net zooplankton samples using the ZOOSCAN digital imaging system. *ICES Journal of Marine Science*. 61 (4): 518-525.
- Gruber, N. and J. L. Sarmiento 1997. Global patterns of marine nitrogen fixation and denitrification. *Glob. Biogeochem. Cycle* 11: 235-266.
- Guerzoni, S., R. Chester, F. Dulac, B. Herut, M.-D. Loÿe-Pilot, C. Measures, C. Migon, E. Molinaroli, C. Moulin, P. Rossini, C. Saydam, A. Soudine and P. Ziveri 1999. "The role of atmospheric deposition in the biogeochemistry of the Mediterranean Sea." *Prog. Oceanogr.* 44(1-3): 147-190.
- Herbland, A., B. Voituriez, 1977: Production primaire, nitrate et nitrite dans l'Atlantique tropical. 1. Distribution du nitrate et production primaire. *Cah. ORSTOM, (Sér. Océanogr.)*, 15, 47-56.
- Herut, B. Z. T., Robarts R.D., & N. Kress, 1999: Adsorption of dissolved phosphate onto loess particles in surface and deep Eastern Mediterranean water. *Marine Chemistry*, 64, 253-265.
- Holl C., & J.P. Montoya, 2005. Interactions between nitrate uptake and nitrogen fixation in continuous cultures of the marine diazotroph *Trichodesmium* (Cyanobacteria). *J. of Phycol.*, 41(6), 1178-1183.
- Holmes R.M., Aminot A., Kerouel R., Hooker B.A., Peterson B.J., 1999. A simple and precise method for measuring ammonium in marine and freshwater ecosystems. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.*, 56: 1801 – 1808
- Hoppe H.G., and Ullrich S. (1999). Profiles of ectoenzymes in the Indian Ocean: phenomena of phosphatase activity in the mesopelagic zone. *Aquat Microb Ecol* 19: 139-148.
- IMBER (2005) Science Plan and Implementation Strategy. IGPB Report No. 52, IGPB Secretariat, Stockholm. 76pp.
- Irgoien, X., Huisman, J., Harris, R.P. 2004. Global biodiversity patterns of marine phytoplankton and zooplankton. *Nature* 429:863-867.
- Jickells T.D. 1995. Atmospheric inputs of metals and nutrients to the oceans: their magnitude and effects. *Marine Chemistry* 48: 199-214.
- Jickells, T. D., Z. S. An, K. K. Andersen, A. R. Baker, G. Bergametti, N. Brooks, J. J. Cao, P. W. Boyd, R. A. Duce, K. A. Hunter, H. Kawahata, N. Kubilay, J. laRoche, P. S. Liss, N. Mahowald, J. M. Prospero, A. J. Ridgwell, I. Tegen, and R. Torres 2005. Global Iron Connections Between Desert Dust, Ocean Biogeochemistry, and Climate. *Science*, 308: 67-71.
- Johnson K.M., 1993. Operator's Manual. Single-Operator Multiparameter Metabolic Analyzer (SOMMA) for Total Carbon Dioxide (C_T) with Coulometric Detection. New York : 11
- Johnson K.S., Coletti L.J., 2002. In situ ultraviolet spectrophotometer for high resolution and long term monitoring of nitrate, bromide, bisulfide in the ocean. *Deep Sea Res.*, 49: 1291-1305
- Jumars, P. A., D.L. Penry, J.A. Baross, M.J. Perry, B.W. Frost, 1989: Closing the microbial loop: dissolved carbon pathway to heterotrophic bacteria from incomplete ingestion, digestion and absorption in animals. *Deep-Sea Research*, 36, 483-495.
- Juranek, L. W. P. D. Q., 2005: In vitro and in situ gross primary and net community production in the North Pacific Subtropical Gyre using labeled and natural abundance isotopes of dissolved O₂. *Glob Biogeochem Cycles*, 19, 1-15.
- Kantha, LH and Clayson, CA, 1994. An improved mixed layer model for geophysical applications. *J. Geophys. Res.*, 99,C12, 25235-25266.
- Karl, D. M., E.A. Laws, P. Morris, P.J. leB. Williams, S. Emerson, 2003: Metabolic balance of the open sea. *Nature*, 426, 32.
- Karl, D. M., K. M. Björkman, J. E. Dore, L. Fujieki, D. V. Hebel, T. Houlihan, R. M. Letelier and L. M. Tupas, 2001: Ecological nitrogen-to-phosphorus stoichiometry at station ALOHA. *Deep-Sea Research II*, 48, 1529-1566.
- Karl, D., A. Michaels, B. Bergman, D. G. Capone, R. C. Carpenter, R. Letelier, F. Lipschultz, H. W. Paerl, D. M. Sigman and L. Stal 2002. Dinitrogen fixation in the world's oceans. *Biochemistry* 57-58: 47-98.
- Karner M., DeLong E., and Karl D. (2001) Archaeal dominance in the mesopelagic zone of the Pacific Ocean. *Nature* 409: 507-510.
- Karp-Boss, L., E. Boss & P.A. Jumars, 1996: Nutrient fluxes to planktonic osmotrophs in the presence of fluid motion. *Oceanography and Marine Biology*, 34, 71-107.
- Kerhervé, P., M. Minagawa, S. Heussner and A. Monaco 2001. Stable isotopes (¹³C/¹²C and ¹⁵N/¹⁴N) in settling organic matter of the northwestern Mediterranean Sea: biogeochemical implications. *Oceanol. Acta* 24 supplement: S77-S85.
- Kirk, J. T. O., 1994: Light & photosynthesis in aquatic ecosystems. 2nd ed. Cambridge University Press, 509 pp.
- Klaas C, Archer DE. 2002. Association of sinking organic matter with various types of mineral ballast in the deep sea: Implications for the rain ratio. *Global Biogeochemical cycles* 16 (4): art no 1116, Dec 5.
- Koblizek, M., O. Bějá, R. R. Bidigare, S. Christensen, B. Benitez-Nelson, C. Vetriani, M. K. Kolber, P. G. Falkowski & Z. S. Kolber. 2003. Isolation and characterization of *Erythrobacter* sp. strains from the upper ocean. *Arch. Microbiol.* 180: 327-338.
- Kolber, Z. S., C. L. Van Dover, R. A. Niederman & P. G. Falkowski. 2000. Bacterial photosynthesis in surface waters of the open ocean. *Nature* 407: 177-179.
- Kolber, Z. S., F. G. Plumley, A. S. Lang, J. T. Beatty, R. E. Blankenship, C. L. Van Dover, C. Vetriani, C. Koblizek, C. Rathgeber

- & P. G. Falkowski. 2001. Contribution of aerobic photoheterotrophic bacteria to the carbon cycle in the ocean. *Science* 292: 2492-2495.
- Krom, M. D., N. Kress & S. Brenner, 1991: Phosphorus limitation of primary productivity in the eastern Mediterranean Sea. *Limnology and Oceanography*, 36, 424-432.
- Kuipers, B.R. and Witte, H.J., (2000), Prochlorophytes as secondary prey for heterotrophic nanoflagellates in the deep chlorophyll maximum layer of the (sub)tropical North Atlantic, *Marine Ecology Progress Series*, 204, 53-63 Kustka A, Carpenter EJ, Sañudo-Wilhelmy SA (2002) Iron and marine nitrogen fixation: progress and future directions. *Res. Microbiol.* 153:255-262
- Labry Claire. 2001. Dynamique du phosphore et rôle comme facteur limitant de la production planctonique dans les eaux du plateau continental Sud-Gascogne. Thèse de l'Université de la Méditerranée.
- Lacombe, H. (1990), A model of the world ocean, water, salt heat, and wind in the Mediterranean, *Oceanus*, 33, 26– 36.
- Langdon, C., Marra J., Knudson C. 1995. Measurements of net and gross O₂ production, dark O₂ respiration, and ¹⁴C assimilation at the Marine Light-Mixed Layers site (59°N, 21°W) in the northeast Atlantic Ocean. *Journal of Geophysical Research*, Volume 100, Issue C4, p. 6645-6654. 10.1029/94JC02286.
- Large, WG, McWilliamw,JC and Doney,SC, 1994. Oceanic vertical mixing: a review and a model with a non local boundary layer paramétrisation. *Rev.Geophysics*, 32,4 363-403.
- Legendre, L., Rassoulzadegan, F., 1996. Food-web mediated export of biogenic carbon in oceans: hydrodynamic control. *Marine Ecology Progress Series* 145, 179-193.
- Lenes, J. M., B. P. Darrow, C. Cattrall, C. A. Heil, M. Callahan, G. A. Vargo, R. H. Byrne, J. M. Prospero, D. E. Bates, K. A. Fanning and J. J. Walsh 2001. Iron fertilization and the *Trichodesmium* response on the West Florida shelf. *Limnology and Oceanography* 46(6): 1261.
- Lévy, M., 2003. Mesoscale variability of phytoplankton and of new production. Impact on the large scale nutrient distribution. *J. Geophys.Res.* 108(C11)3358:1-22.
- Lévy, M., 2005. Nutrients in remote mode. *Nature*, 437, 29 Sept 2005, 628-631
- Lewis,MR, Horne,EPH, Cullen,JJ, Oakey,NS, and T.Platt, 1986,. Vertical nitrate fluxes in the oligotrophic ocean. *Science*, 234, 870-872.
- Loisel, H. and A. Morel (1998). Light scattering and chlorophyll concentration in case 1 waters: A reexamination, *Limnology and Oceanography*, 43, 847-858.
- Loisel, H., and D. Stramski (2000), Estimation of the inherent optical properties of natural waters from irradiance attenuation coefficient and reflectance in the presence of Raman scattering, *Appl. Opt.*, 39, 3001-3011.
- Loisel, H., Bosc, E., Stramski, D, Oubelkheir, K. and P.Y. Deschamps (2001). Seasonal variability of the backscattering coefficient in the Mediterranean Sea based on satellite SeaWiFS imagery. *Geophysical Research Letters*, 28, 4203-4206.
- Longhurst, A. R., 1991: Role of the marine biosphere in the global carbon cycle. *Limnology and Oceanography*, 36, 1507-1526.
- Lorenzen, C.J., 1983. The in situ sinking rates of herbivore fecal pellets. *Journal of Plankton Research* 5, 929-933.
- Loÿe-Pilot, M.-D. and J.-M. Martin 1996. Saharan dust input to the Western Mediterranean: an eleven years record in Corsica. *The impact of desert dust across the Mediterranean*. S. Guerzoni and R. Chester, Kluwer Academic Publishers: 191-199.
- Madin, L.P., Purcell, J.E., 1992. Feeding, metabolism, and growth of *Cyclosalpa bakeri* in the subarctic Pacific. *Limnology and Oceanography* 37, 1236-1251.
- Marie, D., C. Brussaard, et al. (1999). "Enumeration of marine viruses in culture and natural samples by flow cytometry." *Appl. Environ. Microbiol.* 65: 45-52.
- Martinez J., Smith D.C., Steward G.F., Azam F. (1996) Variability in ectohydrolytic enzyme activities of pelagic marine bacteria and its significance for substrate processing in the sea. *Aquatic Microbial Ecology* 10: 223-230.
- Mc Gill, D.A. A preliminary study of the oxygen and phosphate distribution in the Mediterranean Sea. *Deep Sea res.*, 8 (1961) 259-269
- Mc Gill, D.A. The relative supplies of phosphate, nitrate and silicate in the Mediterranean Sea. *Comm. Int. Mer Médit.*, 18 (1965) 737-744
- Mc Gillicuddy, DJ. and Robinson, AR., 1997. Eddy induced nutrient supply and new production in the Sargasso sea. *Deep Sea Res. I*, 44(8) 1427-1450.
- Millot, C. 1999. Circulation in the western Mediterranean Sea. *J. of Marine Systems*. 20, 423-442.
- Minas, H.J., M. Minas, T.T. Packard. 1986. Productivity in upwelling areas deduced from hydrographic and chemical fields. *Limnol. And Oceanogr*: 1182-1206.
- Montoya, J. P., C.M. Holl, J.P. Zehr, A. Hansen, T.A. Villareal and D.G. Capone, 2004: High rates of N₂ fixation by unicellular diazotrophs in the oligotrophic Pacific Ocean. *Nature*, 430, 1027-1032.
- Montoya, J.P., Voss, M., Kahler P. and Capone, D.G. 1996. A simple, high-precision, high-sensitivity tracer assay for N₂ fixation, *Appl. Environ. Microbiol.*, Vol. 62, Issue 3, 986-993.
- Moore, J. K., Doney, S. C., Kleypas, J. A., Glover, D. M. and Fung, I.Y. (2002) An intermediate complexity marine ecosystem model for the global domain. *Deep-Sea Research II* 49: 403–462
- Morel, A., and Y.-H. Ahn (1991), Optics of heterotrophic nanoflagellates and ciliates: A tentative assessment of their scattering role in oceanic waters compared to those of bacterial and algal cells, *J. Marine Res.*, 49, 177-202.
- Mourino-Carballido, B., & D.J. McGillicuddy Jr, 2006: Mesoscale variability in the metabolic balance of the Sargasso Sea. *Limnology and Oceanography*, 51, 2675-2689.
- Moutin, T. 2000. Cycle biogéochimique du phosphate : rôle dans le contrôle de la production planctonique et conséquences sur l'exportation de carbone de la couche éclairée vers l'océan profond. *Océanis*, 36-4.
- Oz, A., G. Sabehi, M. Koblizek, R. Massana & O. Béjà. 2005. Roseobacter-like bacteria in Red and Mediterranean Sea aerobic anoxygenic photosynthetic populations. *Appl. Environ. Microbiol.* 71: 344-353.
- Palter, JB, Lozie, MS, Barber,RT, 2005. The effect of advection on the nutrient reservoir in the North Atlantic subtropical gyre. *Nature*, 437, 29 Sept 2005, doi:10.1038/nature03969

- Pantoja, S., D. J. Repeta, J. P. Sachs and D. M. Sigman 2002. Stable isotope constraints on the nitrogen cycle of the Mediterranean Sea water column. *Deep Sea Res. Part I* 49(9): 1609-1621.
- Partensky F, Blanchot J, Vaultot D (1999a) Differential distribution and ecology of *Prochlorococcus* and *Synechococcus* in oceanic waters: a review. In: Charpy L, Larkum AWD (eds) *Marine Cyanobacteria*. Musée Océanographique, Monaco, p 457-475
- Partensky F, Hess WR, Vaultot D (1999b) *Prochlorococcus*, a marine photosynthetic prokaryote of global significance. *Microbiology and Molecular Biology Reviews* 63:106-127
- Pawlowski, L. (2004) Modélisation de l'incorporation du Carbone photosynthétique en environnement marin piloté par ordinateur. Thèse de doctorat de l'université Paris 6.
- Pernthaler A., Preston C., Pernthaler J., DeLong E., and Amann R. (2002) Comparison of fluorescently labeled oligonucleotide and polynucleotide probes for the detection of pelagic marine bacteria and archaea. *Applied and Environmental Microbiology* 68: 661-667.
- Pinardi, N. & E. Masetti. 2000. Variability of the large scale general circulation of the Mediterranean Sea from observations and modelling: a review. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 158 (2000) 153–173.
- Prieur, L. and Legendre, L. 1988. Oceanographic criteria for new phytoplankton production. In : *Toward a theory on biological-physical interactions. in the world Ocean*. B. J. Rothschild (ed), Kluwer academic publishers, 71-112.
- Pringault, O., V. Tassas, E. Rochelle-Newall, 2006, Consequences of Light Respiration on the Production/Respiration Ratio in Pelagic Systems. L & O methods submitted.
- Pujo-Pay M, Conan P, Raimbault P (1995) Particulate and dissolved organic nitrogen and phosphorus in the north western Mediterranean Sea (EROS 2000 - Discovery cruise 1993). In: *Water Pollution Research Reports "EROS 2000"*, J M Martin, Barth H eds. p 79-86
- Pujo-Pay M, Conan P, Raimbault P (1997) Excretion of dissolved organic nitrogen by phytoplankton assessed by wet oxidation and ^{15}N tracer procedures. *Mar Ecol Prog Ser*, 153:99-111
- Pujo-Pay M, Raimbault P (1994) Improvement of the wet-oxidation procedure for simultaneous determination of particulate organic nitrogen and phosphorus collected on filters. *Mar Ecol Prog Ser*, 105: 203-207
- Raimbault P., Slawyk G., Boudjellal B., Coatanoan C., Conan P., Coste B., Garcia N., Moutin T., Pujo-Pay M., 1999. Biomass, new production and export in the equatorial Pacific at 150°W : Evidence for intense nitrogen recycling. *J. Geophys. Res.* 104, 3341-3356.
- Raimbault P., Slawyk G., Boudjellal B., Coatanoan C., Conan P., Coste B., Garcia N., Moutin T., Pujo-Pay M., 1999. Biomass, new production and export in the equatorial Pacific at 150°W : Evidence for intense nitrogen recycling. *J. Geophys. Res.* 104, 3341-3356.
- Raimbault, P., & B. Coste, 1990: Very high values of nitrate:phosphate ratio (>30) in the subsurface layers of the western Mediterranean Sea. *Rapp. Comm. Int. Mer. Médit.*, 32, C-18.
- Raimbault, P., B. Coste. Very high values of the nitrate/phosphate ratio (>30) in the subsurface layers of the western Mediterranean Sea. *Rapp. P.V. Reun. Comm. Int. Mer Mediterr.*, 32(1) (1990): C-18
- Redfield, A.C., B.H. Ketchum, F.A Richards. The influence of organisms on the composition of sea water. IN: *The Sea, ideas and observations on progress in the study of the sea*, Vol. 2 [Ed. M.M. Hill], pp. 26-77. (1963) J. Wiley and Sons, New-York.
- Sacchs, J. P., & D. Repeta, 1999: Oligotrophy and nitrogen fixation during eastern Mediterranean sapropel events. *Science*, 286, 2485-2488.
- Sachs J.P., D.J. Repeta. Oligotrophy and nitrogen fixation during eastern Mediterranean sapropel events. *Science*, 286 (1999) 2485-2488
- Sala, M.M., Peters, F., Gasol, J.M., Pedros-Alio, C., Marrasse, C., and Vaque, D. (2002) Seasonal and spatial variations in the nutrient limitation of bacterioplankton growth in the northwestern Mediterranean. *AME* 27: 47-56.
- Sanudo-Wilhelmy, S. A., A. B. Kustka, C. J. Gobler, D. A. Hutchins, M. Yang, K. Lwiza, J. Burns, D. G. Capone, J. A. Raven and E. J. Carpenter 2001. Phosphorus limitation of nitrogen fixation by *Trichodesmium* in the central Atlantic Ocean. *Nature* 411(6833): 66-69.
- Sarthou G. & Jeandel C., 2001, Seasonal variations of iron concentrations in the Ligurian Sea and iron budget in the Western Mediterranean, *Marine Chemistry*, 74(2-3): 115-129.
- Schwalbach, M. S. & J. A. Fuhrman. 2005. Wide-ranging abundances of aerobic anoxygenic phototrophic bacteria in the world ocean revealed by epifluorescence microscopy and quantitative PCR. *Limnol. Oceanogr.* 50: 620-628.
- Shimizu, K., Del Amo, Y., Brzezinski, M.A., Stucky, G.D. & Morse, D. E. (2001). A novel fluorescent silica tracer for biological silicification studies. *Chemistry and Biology*, 136, 1-10.
- Short, S. and C. Suttle (2000). "Denaturing gradient gel electrophoresis resolves virus sequences amplified with degenerate primers." *BioTechniques* 28: 20-26.
- Siegel, D.A., D. Dickey, L. Washburn, M. K. Hamilton, and B. G. Mitchell (1989). Optical determination of particulate abundance and production variations in the oligotrophic ocean. *Deep-Sea Res.* 36: 211–222.
- Silver, M.W., Gowing, M.M., 1991. The particles flux: origins and biological components. *Progress in Oceanography* 26, 75-113.
- Sourisseau M. & Carlotti, F. 2005. Spatial distribution of zooplankton size spectra in the Bay of Biscay during two cruise. *J G R*, (in press).
- Steinberg, D. K., A. C. Carlson, N. R. Bates, R. J. Johnson, A. F. Michaels, A. H. Knap, 2001: Overview of the US JGOFS Bermuda Atlantic Time-series Study (BATS): a decade-scale look at ocean biology and biogeochemistry. *Deep-Sea Research II*, 48, 1405-1447.
- Stramski, D., and D. A. Kiefer (1991), Light scattering by microorganisms in the open ocean, *Progress in Oceanography*, 28, 343-383.

- Striby L., Lafont R., Goutx M. (1999) Improvement in the Iatroskan thin-layer chromatography flame ionisation detection analysis in marine lipids. Separation and quantification of mono and diacyl glycerols in the standards and natural samples. *Journal of chromatography A* 849, 371-380.
- Suttle, C. A. (2005). "Viruses in the sea." 437(7057): 356-361.
- Teira E, Reinthaler T, Pernthaler A, Pernthaler J, Herndl GJ (2004) Combining catalyzed reporter deposition-fluorescence in situ hybridization and microautoradiography to detect substrate utilization by bacteria and Archaea in the deep ocean. *Applied and Environmental Microbiology* 70:4411-4414
- Thierstein HR and Young JR 2004. Coccolithophores: from molecular processes to global impact. Springer, Berlin, Heidelberg, New York: pp. 1-565.
- Thingstad, T. F., 1998: A theoretical approach to structuring mechanisms in the pelagic food web. *Hydrobiologia*, 363, 59-72.
- Thingstad, T. F., E. F. Skjoldal and R. A. Bohne. 1993. Phosphorus cycling and algal-bacterial competition in Sandsfjord, western Norway. *Marine Ecology Progress Series* 99:239-259.
- Thingstad, T. F., Hagström A. & F. Rassoulzadegan, 1997: Accumulation of degradable DOC in surface waters: Is it caused by a malfunctioning microbial loop? *Limnology and Oceanography*, 42, 398-404.
- Van Wambeke F, Goutx M., Striby, L, Sempéré S., Vidussi F, (2001). Bacterial dynamics during the transition from spring bloom to oligotrophy in the Northwestern Mediterranean Sea. Relationships with particulate detritus and dissolved organic matter. *Marine Ecology Progress Series.*, 212:89-105.
- Vaulot, D., N. Lebot, D. Marie & E. Fukai, 1996: Effect on phosphorus on the *Synechococcus* cell cycle in Surface Mediterranean Waters during Summer. *Applied and Environmental Microbiology*, 62, 2527-2533.
- Verity P 1986 Growth rates of natural tintinnid populations in Narragansett Bay *Mar Ecol Prog Ser* 29:117-126
- Vichi M., Pinardi N, Masina S. (2006a), A generalized model of pelagic biogeochemistry for the global ocean ecosystem. Part I: theory. *J. Mar. Syst.*, *in press*.
- Vichi M., Masina S., Navarra A. (2006b), A generalized model of pelagic biogeochemistry for the global ocean ecosystem. Part II: numerical simulations. *J. Mar. Syst.*, *in press*.
- Walsh, J.J. and Steidinger, K.A. (2001). Saharan dust and Florida red tides: the cyanophyte connection. *J. Geoph. Res.*, Vol. 106, No. C6. 11597-11612.
- Wawrik B, Paul JH, Tabita FR (2002) Real-time PCR quantification of *rbcL* (ribulose-1,5-bisphosphate carboxylase/oxygenase) mRNA in diatoms and pelagophytes. *Appl Environ Microbiol* 68:3771-3779
- Welschmeyer, N.A., Lorenzen, C.J., 1985. Chlorophyll budgets: zooplankton grazing and phytoplankton growth in a temperate fjord and the Central Pacific Gyres. *Limnology and Oceanography* 30, 1-21.
- Wilhelm, S., S. Brigden, et al. (2002). "A dilution technique for the direct measurement of viral production: a comparison in stratified and tidally mixed coastal waters." *Microb. Ecol.* 43: 168-173.
- Williams, P. J. I. B., P.J. Morris & D.M. Karl, 2004: Net community production and metabolic balance at the oligotrophic ocean site, station ALOHA. *Deep-Sea Research I*, **51**, 1563-1578.
- Williams P.J. Leb. & N.W. Jenkinson. 1982. A transportable microprocessor-controlled precise Winkler titration suitable for field station and shipboard use. *Limnol. Oceanogr.* 27, 576-585.
- Wommack, K. E., J. Ravel, et al. (1999). "Population dynamics of Chesapeake Bay virioplankton: total-community analysis by pulse-field gel electrophoresis." *Appl Environ Microbiol* 65: 231-240.
- Worden, A. Z., Nolan, J. K. & Palenik, B. 2004. Assessing the dynamics and ecology of marine picophytoplankton: The importance of the eukaryotic component. *Limnol. Oceanogr.* 49:168-79.
- Wright RT & Coffin RB 1984 Measuring microzooplankton grazing on planktonic marine bacteria by its impact on bacterial production. *Microb Ecol* 10 : 137-149
- Young, J. R., S. A. Davis, P. R. Bown, and S. Mann. 1999. Coccolith ultrastructure and biomineralisation. *Journal of Structural Biology* 126: 195-215.
- Zehr, J. P., J.B. Waterbury, P.J. Turner, J.P. Montoya, E. Omoregle, G.F. Steward, A. Hansen and D.M. Karl., 2001: Unicellular cyanobacteria fix N₂ in the subtropical North Pacific ocean. *Nature*, 412, 635-638.
- Zohary, T., & R.D. Robarts, 1998: Experimental study of microbial P limitation in the eastern Mediterranean. *Limnology and Oceanography*, 43, 387-395.
- Zohary, T., B. Herut, M. D. Krom, R. F. C. Mantoura, P. Pitta, S. Psarra, F. Rassoulzadegan, N. Stambler, T. Tanaka, T. F. Thingstad, E. M. S. Woodward, 2005. P-limited bacteria but N&P co-limited phytoplankton in the Eastern Mediterranean – a microcosm experiment. *Deep-Sea Research Part II* 52: 3011-3023.

. LEFE_Annexe 5 : Le mini-PVM5

Le mini-PVM5 est un système embarqué d'acquisition et de traitement d'images dédié au plancton marin et à la matière particulaire en suspension.

Il est conçu comme un capteur pouvant être utilisé seul ou installé sur un vecteur comme un AUV, ROV, Glider, Filet tracté ou sur une CTD-Rosette (fig. 1).

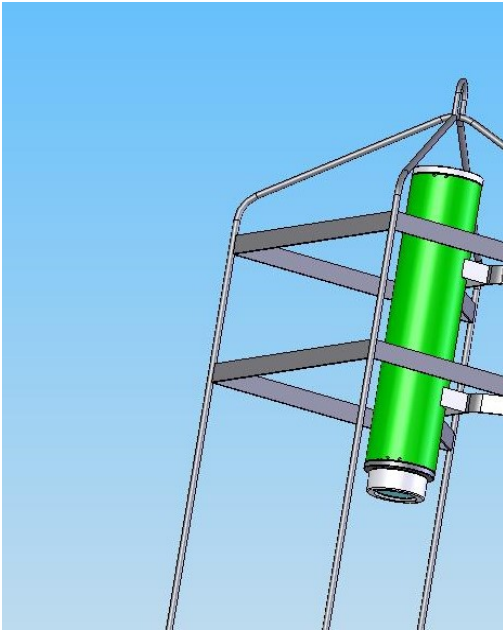


Figure 1. Le mini-PVM5 dans une configuration « stand-alone ». Longueur 1m, largeur 35 cm.

Dans le bâti (en vert) se trouve la caméra, la carte mère, la carte à μ P de commande, le disque dur, le capteur de pression et les batteries, en bleu les éclairages.

Ce système qualifié pour la profondeur de 3000 m permettra d'une part de quantifier la matière particulaire $> 60 \mu\text{m}$ à haute résolution spatiale et d'estimer son contenu carboné, et d'autre part quantifier puis classer le macrozooplancton. Le système pourra être relié et fonctionner de façon synchrone avec la majeure partie des instruments océanographiques immergés. C'est le cas en ce qui concerne la demande de l'équipement Mi-Lourd dans lequel le mini-PVM5 fait partie d'une plateforme instrumentée tractée.

Dans le cadre du programme BOUM, seul le mini-PVM5 est sollicité. Le somme demandé pour finaliser ce projet est de 38 920,00 Euro HT et elle concerne la carte à microprocesseur construite par la société TES Solutions Electroniques d'après notre cahier de charges. Environ 37 000 Euro HT ont déjà été investis dans la construction du mini-PVM5 et le modem FSK sera financé par d'autres sources. Le financement de la carte électronique de commandes permettra de compléter et achever la construction et débiter les essais durant le premier semestre 2007. La carte électronique de commande est indispensable au fonctionnement de l'appareil.