

Les rapports de campagnes à la mer à bord  
du *Marion-Dufresne*

**CAMPAGNE ANTARES 3**  
MD 102

du 26 septembre au 8 novembre 1995

Sous la direction de :

Janvier 1997

**Chantal DESCOLAS-GROS**  
Laboratoire d'Hydrobiologie  
Marine et Continentale  
Université de Montpellier II  
UMR CNRS 5556  
34095 Montpellier Cedex 5

et **Patrick MAYZAUD**  
Chef de Mission  
Equipe d'Océanographie Biochimique  
et d'Écologie - LOBEPM  
Observatoire Océanologique  
06230 Villefranche sur Mer

Edité par l'Institut Français pour la Recherche et la Technologie Polaires  
Technopôle de Brest-Iroise -BP 75- 29280 Plouzané France

## SOMMAIRE

P. MAYZAUD. La campagne Antarès 3

Caractéristiques des différentes stations échantillonnées

Y-H. PARK, E. CHARRIAUD, L. GAMBERONI. Physique de la campagne Antarès III.

J. FLOCH, L. ORIOL, S. BLAIN, P. TREGUER. Variabilité spatiale et temporelle des teneurs en sels nutritifs lors de la campagne Antarès III.

S. BLAIN, T. BESSON, O. DONNARD. Metaux traces.

S. SCHMIDT, P. L'HENORET. Thorium-234 dans la couche de surface lors d'Antarès 3.

E.V. DAFNER. General regularities of the Dissolved Organic Carbon distribution in the Indian Sector of the Southern Ocean during the early Spring Season (September-November, 1995).

I. BENTALEB, M. FONTUGNE, J. GRIMALT, C. HATTE, A. JOHNSTON. Marqueurs moléculaires lipidiques et rapports isotopiques du carbone organique le long de la radiale Antarès 3.

J. LAUREILLARD, L. PINTURIER, J. FILLAUX. Dégradation et recyclage de la matière organique associée aux particules en suspension et aux particules à grande vitesse de chute (mission Antarès 3).

S. BLAIN, S. BELVISO, C. BRUNET, T. CAUBERT, E. CHARRIAUD, J. FLOCH, V. MARTIN-JEZEQUEL, M. PANOUSE, P. PONDAVEN, L. ORIOL, Y. PARK, P. TREGUER. Antarès 3 : Panache Kerguelen.

R. SEMPERE, M. GOUTX, C. YORO, F. VAN WAMBEKE, M. BIANCHI, P. KERHERVE, B. CHARRIERE. Transformations et minéralisation bactérienne de la matière organique dans le secteur indien de l'océan austral durant la campagne Antarès III.

S.C. YORO, R. SEMPERE, M. GOUTX, F. VAN WAMBEKE, M. BIANCHI, G. CAUWET, L. ORIOL, P. PONDHAVEN, J. FLOCH. Distribution verticale de l'activité bactérienne, du carbone et de l'azote organique total dans le secteur Indien de l'océan austral durant la mission Antarès III.

M. PANOUSE, M. FIALA, C. MACHADO, L. ORIOL. Distribution de la biomasse phytoplanctonique dans l'Océan Indien Austral durant le printemps. Importance des différentes classes de taille.

J-C. MARTY, I. VESCOVALI. Distribution latitudinale des pigments au cours de la campagne Antarès III et flux de carbone particulaire.

T. CAUBERT. Production primaire, production de silice biogénique(BSi), dissolution de Bsi, stock de Bsi.

S. BELVISO. Production, décomposition et flux verticaux des composés soufrés DMSP et DMS dans le secteur est de l'océan antarctique au début du printemps.

V. MARTIN-JEZEQUEL, L. LAMPERT, A-C FASQUEL, O. RAGUIN. Distribution du phytoplancton et métabolisme du carbone et de l'azote. Utilisation de marqueurs physiologiques: acides aminés libres dissous.

J. ARISTEGUI, J. ALMUNIA, M. DENIS. Variation spatiale et temporelle de l'activité respiratoire des assemblages microbiens au cours de la campagne Antarès 3 (printemps austral).

C. LEBOULANGER, J. ALMUNIA. Variations spatiales et temporelles de la concentration en glycolate dissous dans l'eau de mer lors de la campagne Antarès 3.

E. FOUILLAND, C. DESCOLAS-GROS, C.COURTIES, V.PONS. Activité phytoplanctonique par classe de taille et par cellule dans le secteur Indien de l'océan antarctique au printemps austral 1995.

M. ELSKENS, M. SEMENEH, E. DAFNER, F. DEHAIRS, L. GOEYENS. The removal of nitrogenous nutrients by phytoplankton during Antarès 3, effects of nutrient distributions and phytoplankton compositions.

C. MACHADO, M. FIALA, L.ORIOL, M. PANOUSE. Distribution des acides nucléiques particulaires (ADN et ARN) dans l'Océan Indien Austral en début de printemps.

P. MENON. Etude du réseau protozooplanctonique dans le secteur Indien de l'Océan Austral.

G. GORSKI, M. PICHERAL. Rapport de la campagne Antarès. Résultats préliminaires obtenus à l'aide du profileur vidéo marin.

A. ERRHIF, J.P LABAT, P MAYZAUD. Composition et abondance du mésozooplancton et du micronecton dans le côté indien de l'océan Antarctique au début du printemps.

S. RAZOULS, J-P LABAT, J. LEFEVRE, J. MAISON, P. MAYZAUD. Zooplancton : biomasses et teneurs en carbone et azote.

V. TIRELLI, A. ERRHIF, J. MAISON, S. RAZOULS, P. MAYZAUD. Zooplancton : Evaluation de l'activité métabolique des principales espèces de copépodes.

J. LEFEVRE, M. DELAVAL. Observations préliminaires de l'hyponeuston en zone marginale de glaces.

**La campagne ANTARES 3 - MD 102  
(26/09/95 - 08/11/95) : étude des processus contrôlant  
les flux de matière dans la colonne d'eau dans le secteur  
Indien de l'Océan Austral**

**Patrick MAYZAUD**

Equipe d'Océanographie Biochimique et d'Ecologie  
Université Pierre et Marie Curie - LOBEPM URA CNRS 2077  
06230 Villefranche sur mer

## **INTRODUCTION**

ANTARES 3 - MD 102 est la troisième campagne du programme ANTARES (SO JGOFS-France) dont l'objectif principal est l'étude des cycles biogéochimiques dans l'Océan Austral. Cette campagne a regroupé 38 scientifiques appartenant à 6 nations. Elle était axée sur l'étude des processus contrôlant les flux de matière dans la couche photique et la colonne d'eau pendant la période printanière. Comme les précédentes elle fut menée le long de la radiale 62°E, entre 49°S et la limite des glaces à 58°30 S et a donc permis d'étudier trois sous-système de l'Océan Austral : les abords de la PFZ (Polar Front zone), la POOZ (Permanently Open Ocean zone) et la SIZ (Seasonal Ice zone). Pendant la mission deux lignes instrumentées ont pu être totalement ou partiellement récupérées : la ligne mouillée lors de la campagne ANTARES 2 à la station M2 et la fraction de ligne non récupérée lors de la campagne TRAPANTAR à la station ANTARFIX.

Les premiers résultats présentés dans ce volume ont fait l'objet d'exposés lors de l'atelier de travail qui s'est déroulé les 28 et 29 Mai 1996 à Montpellier.

## **CALENDRIER DE LA MISSION**

Départ de la Réunion : 27 Septembre 1995

Escale I. Kerguelen : 3 Octobre  
 Début opération "Panache fer" : 4 Octobre  
 Travail sur zone : 9 Octobre -1 Novembre  
 Escale Port aux Français (I. Kerguelen): 2 Novembre  
 Arrivée à la Réunion : 7 Novembre.

## LISTE DES PARTICIPANTS

Javier ALMUNIA	Facultad de Ciencias del Mar, U. Las Palmas, Gran Canaria, Espagne
Javier ARISTEGUI	Facultad de Ciencias del Mar, U. Las Palmas, Gran Canaria, Espagne
Markus BAUMAN	A.W.I. fur Polar und Meresforschung, Bremerhaven, Allemagne
Sauveur BELVISO	Centre des Faibles Radioactivités, Gif sur Yvette
Ilem BENTHALEB	Centre des Faibles Radioactivités, Gif sur Yvette
Stephane BLAIN	UBO, Laboratoire Flux de Matière, Brest
Christian BRUNET	Laboratoire de Physique et Chimie Marine, UPMC Paris
Tangy CAUBERT	UBO, Laboratoire Flux de Matière, Brest
Edwige CHARRIAUD	Laboratoire d'Océanographie Physique, MNHN, Paris
Janine CUZIN	LOBE-LOBEPM, Observatoire Océanologique, Villefranche sur mer
Evgeni DAFNER	Russian Federal Institute of Fishery and Oceanography, Moscou,
Marc ELSKENS	Lab. Analytical Chemistry, V.U.B. Bruxelles, Belgique
Ahmed ERRHIF	LOBE-LOBEPM, Observatoire Océanologique, Villefranche sur mer
Julien FLOCH	UBO, Laboratoire Flux de Matière, Brest
Eric FOUILLAND	Laboratoire d'Hydrobiologie Marine, U. Montpellier II
Léo GOEYENS	Lab. Analytical Chemistry, V.U.B. Bruxelles, Belgique
Madeleine GOUTX	Laboratoire de Microbiologie Marine, Marseille
Cecile GROSBOIS	Laboratoire de Physique et Chimie Marine, UPMC Paris
Andrew JOHNSTON	University of Dundee, Scotland
Pascal LHENORET	Centre des Faibles Radioactivités, Gif sur Yvette
Jean-Philippe LABAT	LOBE-LOBEPM, Observatoire Océanologique, Villefranche sur mer
Luis LAMPERT	UBO, Laboratoire Flux de Matière, Brest
Jacques LEFEVRE	UBO, Laboratoire Flux de Matière, Brest
Cordelia MACHADO	U. Santa Ursula, Rio de Janeiro, Brésil
Jerôme MAISON	Laboratoire Arago, Banyuls sur mer
Jean-Claude MARTY	L.P.C.M., Observatoire Océanologique, Villefranche sur mer
Patrick MAYZAUD	LOBE-LOBEPM, Observatoire Océanologique, Villefranche sur mer
Patricia MENON	Institut Océanographique Paul Ricard, Les Embiez
Louise ORIOU	Laboratoire Arago, Banyuls sur mer
Michel PANOUSE	Laboratoire Arago, Banyuls sur mer
Marc PICHERAL	LOBEPM, Observatoire Océanologique, Villefranche sur mer
Laurence PINTURIER	Laboratoire de Physique et Chimie Marine, UPMC Paris
Joelle PIRAUX	Lab. Analytical Chemistry, V.U.B. Bruxelles, Belgique
Philippe PONDAVEN	UBO, Laboratoire Flux de Matière, Brest
Suzanne RAZOULS	Laboratoire Arago, Banyuls sur mer
Pierre SANGIARDI	INSU-CNRS, Division Technique, Brest-Plouzané
Richard SEMPERE	Laboratoire de Microbiologie Marine, Marseille
Valentina TIRELLI	LOBE-LOBEPM, Observatoire Océanologique, Villefranche sur mer

Helmut TUG  
Eric VIRVAUX

A.W.I. für Polar und Meeresforschung, Bremerhaven, Allemagne  
SARL, ICARE

## TRAVAUX EFFECTUES

### Stations d'étude (Fig. 1)

Au total 22 stations ont été échantillonnées une ou plusieurs fois (Tableau 1) :

- dans le cadre de la relève et de la récupération des pièges à sédiments deux stations situées en M2 et KERFIX (50°40S-62°25E) ont été visitées.
- la campagne proprement dite a comporté 13 stations situées au nord-est de Kerguelen et 8 stations situées le long de 62°E entre 49°S et la limite des glaces.

*Tableau 1. Caractéristiques des stations de la campagne ANTARES 3.*

STATION	POSITION	DATE	DUREE	RELEVE
KER01	49°20S 71°00E	04 Oct	2h	
KER02	48°55S 70°30E	05 Oct	3h	
KER03	49°08S 69°50E	05 Oct	3h	
KER04	48°20S 70°00E	05 Oct	2h	
KER06	48°00S 71°01E	06 Oct	2h	
KER07	48°43S 71°10E	06 Oct	3h	
KER08	49°09S 71°48E	06 Oct	2h	
KER09	48°55S 72°40E	06 Oct	2h	
KER10	48°30S 71°48E	07 Oct	3h	
KER11	47°48S 71°48E	07 Oct	2h	
KER12	48°28S 72°40E	07 Oct	2h	
KER13	47°44S 72°40E	08 Oct	3h	
KER14	48°00S 73°35E	08 Oct	2h	
A18	48°59S 62°01E	10 Oct	8h30	
A17	50°30S 61°59E	11 Oct	8h30	
M02	52°00S 61°53E	12-16 Oct	122 h	Piège dérivant
A16	52°12S 62°00E	17 Oct	4h45	ligne piège M2
A15	53°29S 62°00E	17 Oct	8h30	
A14	54°59S 62°00E	18 Oct	7h45	
A12	58°00S 61°59E	19 Oct	8h30	
M04 début	58°50S 62°03E	20 Oct	-	Piège dérivant
M04 fin	58°16S 64°38E	25 Oct	144 h	
K0	50°43S 68°25E	29-30 Oct	26h	ligne piège Kerfix

Quatre types de stations ont été étudiées :

2 stations de longue durée (120-144h) : M02 et M04

13 stations sur le plateau de Kerguelen "Panache Fer" (2-3h): KER01 à KER13

5 stations de courtes durées (7-8h) : A12, A14, A15, A17, A18

2 stations de relève de mouillage des lignes de piège à particules : A16 et K0

S'ajoute, suite à la dérive du piège dérivant à M04 sous la glace une recherche et une récupération de la ligne de mouillage dans le pack diffus le 26 Octobre.

A chaque station des profils CTD ont été effectués entre la surface et le fond, entre surface et 1000 m et entre 0 et 300 m, ainsi que des prélèvements à l'aide de la rosette de bouteilles Niskin et Go-Flo. Aux stations du "Panache Fer", les profils CTD ont varié selon la bathymétrie entre 0-200m et 0-100m. Des prélèvements à l'aide des pompes *in-situ* de l'INSU ont été réalisés dans la couche de surface et à 1000m. Des profils de particules et de macroplancton ont été réalisés à l'aide d'un profileur vidéo entre 0 et 1000m. Différents types de filets zooplancton ont été utilisés et des mesures optiques réalisées au midi solaire.

Au total, ont été effectués :

- 4 profils hydrologiques 0-200m
- 44 profils hydrologiques 0-300m
- 3 profils hydrologiques 0-500m
- 16 profils hydrologiques 0-1000m
- 2 profils hydrologiques 0-2000m
- 7 profils hydrologiques 0-4000m
- 19 palanquées de bouteilles Go-Flo
- 110 palanquées de Niskin 30 l entre 0 et 300m
- 60 prélèvements à la bouteille de 200 l entre 0 et 200m
- 8 profils optiques
- 40 profils vidéo entre 0 et 1000m
- 12 profils d'UV-B entre 0 et 20 m
- 89 filets zooplancton
- 28 prélèvements à l'aide des pompes *in situ*.

### **Relève des mouillages**

Le programme « Mouillages » de la mission ANTARES 3 a permis de réaliser correctement trois types d'opérations, dont il est important de noter que la réussite est intimement liée à une bonne évaluation des conditions météo .

Deux lignes instrumentées dérivantes identiques ont été déployées et récupérées : l'une pendant la station A16 - M2 et l'autre pendant M4. Elles étaient constituées d'un Piège à Particules Technicap - PPS5 (muni d'un inclinomètre) immergé à 200 mètres, d'un transpondeur acoustique AR661 Mors (placé 15 mètres en dessous), d'un ensemble adapté de flotteurs et d'une bouée de surface équipée de deux flashes et d'une balise Racon dont l'efficacité a été démontrée pour retrouver la ligne M4 qui avait été rattrapée par le pack.

La ligne fixe M2, mouillée en 1994 par 4300m pendant la Campagne ANTARES 2 (Mars 94), a pu être relocalisée par des moyens acoustiques, et relevée dans son intégralité. Les deux Sediment Trap PPS 5 et les deux courantomètres RCM Aanderaa ont très bien fonctionné.

La capture de la tête de mouillage a été faite par un « zodiaque » remorquant une touline.

La ligne M1, également immergée depuis ANTARES 2 mais relevée en partie avec perte d'un tronçon pendant Trapantar (Février 1995) a dû être relocalisée puis draguée à 2000m de fond avec une série de grappins fixés sur un lest remorqué par le câble acier du treuil «Siamois» de carottage lourd. Une partie seulement du tronçon de ligne (déjà bien endommagé) a pu être remontée à la surface avec un courantomètre Aanderaa , deux largueurs couplés et quatre flotteurs Hyper6; un PPS5 est malheureusement resté définitivement au fond..

## **THEMES SCIENTIFIQUES ETUDIÉS**

### **Hydrologie**

Caractéristique des masses d'eau : température, salinité, oxygène, fluorescence (E. Charriaud, P. Sangiardi, E. Virvaux).

### **Chimie-Géochimie**

- Mesure des teneurs en sels nutritifs : nitrates, silicates, phosphates, ammonium) dans la colonne d'eau. Variabilité spatiale et rythmicité à haute fréquence (J. Floch, L. Oriol, L. P. Pondaven, E. Daphner
- Analyse de la silice biogénique : production, biomasse, dissolution (T. Caubert)
- Mesure en continu du pCO<sub>2</sub> dissous dans les eaux de surface et la colonne d'eau, de l'alcalinité totale et du carbone inorganique (C. Brunet, C. Grosbois)
- Mesures du POC et PON (I. Bentaleb)
- Cinétique de transfert particulaire-dissous (Uranium/Thorium) (P. Lhenoret)

- Stock et flux de DMS et DMSP (S. Belviso, P. Lhenoret)
- Distribution des métaux traces particulaire et dissous (Al, Cd, Co, Cu, Fe, Mn, Ni, Pb, Zn) (S. Blain)
- $\delta^{13}\text{C}$  et  $\delta^{15}\text{N}$  dissous (A. Johnston)
- Mesures des radiations UV-B dans l'atmosphère (M. Bauman, H. Tug)
- Structure des lipides particuliers (L. Pinturier)

### **Biologie**

- Réseau microbien : biomasse bactérienne et production; reminéralisation du carbone et de l'azote organique totale (R. Sempéré, M. Goutx)
- Biomasse et production phytoplanctonique : productivité, fraction de taille, numération, analyse pigmentaire, ADN, assimilation de l'azote (T. Caubert, M. Elkens, L. Goyens, C. Machado, J-C. Marty, M. Panouse, J. Piraux)
- Nano- et Proto-zooplancton : dynamique et broutage sur le bacterioplancton (P. Menon)
- Mesures optiques : PAR, répartition spectrale, profils UV-B (M. Panouse, M. Bauman)
- Paramétrisation de la production autotrophe : activités ETS, carboxylases, production d'acide glycolique, contenu en protéines et acides aminés, marqueurs isotopiques, cytométrie en flux (J. Almunia, J. Aristegui, I. Bentaleb, M. Denis, E. Fouilland, A. Johnston, L. Lampert)
- Distribution verticale et évolution des tailles des particules en suspension dans la colonne d'eau et du macroplancton (M. Picheral)
- Zooplancton, hyponeuston et micronecton : structures des populations, biomasses, taux de broutage, métabolisme énergétique (respiration, stockage lipidique) et taux de ponte (J. Cuzin, A. Errhif, J.P. Labat, J. Lefevre, J. Maison, P. Mayzaud, S. Razouls, V. Tirelli)

### **CONCLUSIONS**

Il convient tout d'abord de préciser que la campagne ANTARES 3 était la 1ère mission dans l'Océan Indien Sud du navire Marion Dufresne II. La campagne ANTARES 3 s'est déroulée de façon généralement satisfaisante, même si des défauts de jeunesse sont apparus pendant différentes phases du travail. Le programme prévu a été en grande partie réalisé et dans certains domaines dépassé.

Les opérations hydrologie ont été effectuées à partir de trois zones spécifiques: l' Ilot situé a tribord (treuil d'hydrologie), au milieu du navire, le portique de carottage placé sur tribord à l'arrière, la plage arrière. Cette dernière plate- forme de travail a été vite abandonnée en raison des effets important du pilonnage par mer formée. Certaines opérations ont pu être réalisées conjointement avec d'autres localisées sur des emplacements différents, par exemple : profil CTD sur Ilot et prélèvement Niskin sur treuil de carottage. Cela a permis de gagner un

temps non négligeable à chaque station. L'utilisation du treuil d'hydrologie s'est heurtée à plusieurs problèmes : 1) absence d'amortisseur de houle mécanique-hydraulique efficace; 2) absence de local fermé et suffisamment spacieux pour rentrer les appareils (hors gel) et 3) difficultés d'utilisation du câble kevlar de 12mm pour les opérations de prélèvements de chimie propre en raison des réas en acier oxydés par lesquels passe le câble.

Des emplacements réservés sont disponibles à l'arrière, sous le pont hélicoptère, pour des conteneurs laboratoires (ou autres). Il est important qu'une politique de mise en place systématique d'au moins 4 conteneurs laboratoires soit respectée afin de permettre les opérations qui ne tolèrent pas les déplacements en étage.

Les missions de biologie et de biogéochimie sont depuis le début des années 70 demandeur de surgélateur -80°C. L'appareil récupéré du MD I était en piteux état et a donné des signes de faiblesse en fin de campagne (-40° à deux jours d'arrivée de la Réunion en ajoutant de l'azote liquide dans le coffre) qui a failli mettre en péril les échantillons récoltés au cours de la campagne. Il est impératif qu'un surgélateur en parfait état de marche soient mis à poste dans un local aéré et d'accès facile par mauvais temps.

## **REMERCIEMENTS**

La campagne ANTARES 3 a été réalisée grâce au soutien financier de l'IFRTP et du CNRS-INSU (programme France-JGOFS).

Au nom de l'ensemble de la mission, je remercie le Commandant Souliman, le Chef Mécanicien, le Second Capitaine ainsi que l'ensemble de l'équipage pour leur aide précieuse tout au long de la campagne. Le travail et le dévouement de l'ensemble du bord ont permis de pallier aux divers problèmes rencontrés et à plusieurs occasions de sauver les opérations scientifiques en cours. L'aide et les conseils du Chef des Opérations, B. Ollivier nous a été précieuse et sa compétence technique nous a été d'un grand secours en maintes occasions. L'assistance de l'ensemble des personnels IFRTP (V. Hadoux, J. Hoffman, A. Jaouen) a été fortement appréciée.

## **Caractéristiques des différentes stations échantillonnées**

CTD: Prélèvements sur la rosette de la bathysonde, en regard le numero de la sation

Heure en T.U

Z: Immersion en mètres

Tp: Température potentielle

Salinité: en ‰

Sigma Tp: Densité potentielle

O2: concentration en oxygène en ml/l mesurée par la méthode Winkler modifiée par Carpenter (1965),  
valeurs en italique: valeurs de la CTD à la remontée ,  
\*: pas de valeurs

SiO<sub>3</sub>

NO<sub>3</sub> (NO<sub>2</sub>+NO<sub>3</sub>) : Sels nutritifs ( silicates, nitrates, phosphates, ammonium) en  $\mu\text{M}$

PO<sub>4</sub>

NH<sub>4</sub>

Chla, Pheoa : Chlorophylle a et Pheophytine a mesurés par spectrofluorimétrie en  $\text{mg.m}^3$

COP, NOP: Carbone et Azote particulaires en  $\mu\text{g/l}$

### **Physique de la campagne Antares III**

**Y.-H. PARK, E. CHARRIAUD et L. GAMBERONI**

Laboratoire d'Océanographie Physique, MNHN, 43 rue Cuvier, 75005 Paris

### **STRUCTURE DES EAUX SUPERFICIELLES SUR LA SECTION 62°E**

La distribution verticale des paramètres physiques le long de la section 62°E durant Antares III a permis d'identifier, pour la première fois dans cette région antarctique, la situation hydrologique de la couche superficielle en début de printemps austral ou en fin d'hiver (octobre 1995). En comparaison avec la section d'Antares II (février 1994), les eaux surperficielles des 200 premiers mètres sont relativement homogènes avec une stratification verticale proche de celle d'eau d'hiver (Fig. 1). Le Front Polaire (PF), défini par l'isotherme 2°C à 200 m, se trouve à 49°40'S (comparé à 51°10'S durant Antares II) et la limite de la banquise, caractérisée par la température de surface proche du point de congélation, s'observe à 58°45'S.

La station située à 58°S, juste au nord de la banquise, montre une poche de salinité minimale en surface (<33.8). Cette salinité minimale est associée en surface à la température minimale et également à la densité minimale, conséquence de la fonte des glaces, indiquant que l'extension la plus septentrionale de la banquise devait avoir eu lieu vers 58°S quelques temps avant l'occupation de la section. Au nord de cette latitude, la couche superficielle des 100 premiers mètres se réchauffe légèrement et la température minimale de subsurface commence à apparaître. Cette structure hydrologique durant Antares III est en grand contraste avec celle observée en été austral durant Antares II où la température minimale de subsurface (ou eau

d'hiver) était complètement isolée de la couche chaude de surface due au réchauffement estival prolongé.

## **MISE EN EVIDENCE DE LA DOUBLE DIFFUSION PRES DE LA BANQUISE**

En dessous des eaux superficielles antarctiques (AASW) se trouve l'eau profonde circumpolaire (CDW) caractérisée par les maxima profonds de température ( $>2^{\circ}\text{C}$ ) et de salinité ( $>34.75$ ), créant ainsi de fortes discontinuités thermique et saline entre la couche de surface et la couche profonde. Il faut noter que la salinité maximale ( $S_{\text{max}}$ ) est beaucoup plus profonde que la température maximale ( $\theta_{\text{max}}$ ): par exemple, à la station 43 ( $58^{\circ}\text{S}$ ) on observe  $S_{\text{max}}$  à 1350 m tandis que  $\theta_{\text{max}}$  est à 650 m de profondeur, indiquant des origines différentes de cette masse d'eau profonde.

Près de la limite de la banquise, la différence de température entre les deux couches atteint 3 à  $4^{\circ}\text{C}$  et la CDW peut être alors considérée comme une source de chaleur. En terme de stabilité statique, l'inversion de température dans la zone au dessus de la température maximale est instable tandis que la salinité est stable, contrebalançant l'effet instable de la température. Le réchauffement par le bas dans la discontinuité thermique peut induire une convection diffusives, l'un des processus majeurs de la double diffusion (la diffusion moléculaire thermique est de quelques centaines de fois plus importante que celle du sel; la convection dite "doigt du sel" ("salt finger") est davantage possible dans la couche en dessous de la salinité maximale). Ainsi nous observons fréquemment aux stations situées près de la banquise des "escaliers" réguliers sur les profils verticaux de température potentielle, de salinité et de densité potentielle (Fig. 2). Ces escaliers réguliers, caractéristiques de la double diffusion, sont encore plus évidents dans la zone de discontinuité thermique, avec une échelle verticale de 6 m en moyenne.

A ce phénomène de double diffusion est associée l'apparition fréquente de "feuilletages" isopycnales ("isopycnal interleavings") de la température et de la salinité. Des études antérieures et la théorie ont indiqué que la double diffusion peut induire des cisaillements du courant dans la colonne d'eau et donc des feuilletages des différentes masses d'eau à travers la zone frontale.

L'examen préliminaire des profils verticaux des paramètres hydrologiques en différentes stations près de la banquise suggère également l'existence d'ondes internes ayant une amplitude de quelques dizaines de mètres (Fig. 3).

L'ensemble de ces observations originales nous a permis de conclure que les différents processus tels que la double diffusion, les feuilletages et les ondes internes, semblent jouer un rôle primordial pour la diffusion et le mélange des paramètres hydrologiques à travers la discontinuité thermique entre les AASW et la CDW, en particulier près de la banquise où la discontinuité thermique est la plus importante.

### **INTRUSION VERS LE NORD DES EAUX ANTARCTIQUES SUPERFICIELLES À L'EST DE KERGUELEN**

Les distributions horizontale et verticale des paramètres hydrologiques observés à l'Est de Kerguelen durant Antares III (expérience "panache") indiquent un écoulement intense des AASW très froides et salées ( $1.5 < \theta < 2^{\circ}\text{C}$ ;  $33.9 < S < 34.0$ ), se dirigeant vers le nord parallèlement à la pente continentale à l'Est de Kerguelen (Figs. 4 et 5). Ces eaux antarctiques concentrées dans une bande méridienne étroite (100 km) forment un front intense notamment avec les eaux plus chaudes et moins salées ( $\theta > 2.4^{\circ}\text{C}$ ;  $S < 33.7$ ) sur le plateau au nord de Kerguelen.

L'examen des trajectoires historiques de bouées dérivantes ainsi que l'analyse des données hydrologiques disponibles démontrent et confirment, sans aucune ambiguïté, que le PF contourne Kerguelen par le sud ( $50^{\circ}\text{S}$ ), puis se dirige vers le nord à l'Est de Kerguelen, collant fortement à la pente continentale jusqu'à  $48^{\circ}\text{S}$  au moins, et longeant approximativement l'isobathe 200 m (Fig. 6).

L'analyse des données hydrologiques sur une zone plus étendue couvrant l'ensemble du Plateau de Kerguelen indiquent que la source principale de ces eaux antarctiques très denses observées à l'Est de Kerguelen (beaucoup plus froides et salées que celles observées juste au sud de Kerguelen) devait être un courant provenant de beaucoup plus sud ( $55^{\circ}\text{S}$ ) et qui se dirige vers le NW tout au long de la pente continentale de la partie Est du plateau (Fig. 7). La mise en évidence de ce courant géostrophique est nouvelle mais la cause dynamique de son origine serait à étudier par simulation numérique, par exemple. Une explication possible serait que le passage profond sur le plateau entre  $58^{\circ}$  et  $55^{\circ}\text{S}$  permettrait un transport important du

courant circumpolaire qui, après ce seuil, se dirigerait vers le NW le long de la pente continentale du plateau. La conservation de la vorticité potentielle semble être le facteur principal de cette circulation.

### Légende des Figures

Fig. 1. Sections méridiennes des paramètres hydrologiques observés durant Antares III (droite), comparées à celles durant Antares II (gauche).

Fig. 2. Profils verticaux de température potentielle, de salinité et de densité potentielle à la station 45 (58°30'S), montrant des "escaliers" réguliers en dessous de la couche mélangée de surface, caractéristiques de la double diffusion (droite). L'"angle de Turner" supérieur à 160° est un indice de fortes convections diffusives (gauche) et l'échelle verticale de cette double diffusion est évidente sur le profil vertical de la fréquence de Väisälä (milieu).

Fig. 3. Regroupement des profils verticaux des paramètres hydrologiques des stations 46 à 49 (courbes pointillées) et des stations 60 à 68 (courbes continues). L'apparition des ventres et des noeuds sur ces profils pourrait indiquer l'existence d'ondes internes.

Fig. 4. Distributions horizontales de température et de salinité à 50 m (haut) et à 200 m (bas) observées à l'Est de Kerguelen durant Antares III (expérience "panache"). A 50 m, la zone ayant une température inférieure à 1.8°C et une salinité supérieure à 33.9 est hachurée. La présence d'une bande méridienne étroite des eaux antarctiques superficielles très froides et salées est claire.

Fig. 5. Distributions verticales des paramètres hydrologiques sur les deux radiales quasi-zonales durant l'expérience "panache".

Fig. 6. Distribution horizontale de température potentielle à 200 m dans une zone autour de Kerguelen, établie à l'aide des données historiques. La position du Front Polaire, définie par l'isotherme 2°C, est indiquée en gras.

Fig. 7. Distributions horizontales de salinité et de densité potentielle à 200 m dans une zone plus étendue autour du Plateau de Kerguelen, établie à l'aide des données historiques. A partir de 55°S, une langue d'eaux antarctiques très salées et denses se dirige vers le NW le long de la pente continentale de la partie Est du Plateau de Kerguelen, indiquant un courant associé relativement intense.

### **Variabilité spatiale (transect nord-sud) et temporelle (station A16) des teneurs en sels nutritifs pendant la campagne AntaresIII.**

**Julien FLOCH<sup>(1)</sup>, Louise ORIOL<sup>(2)</sup>, Stéphane BLAIN<sup>(1)</sup>, Paul TREGUER<sup>(1)</sup>**

(1) UMR 1513 IUEM 6 avenue le gorgeu BP 809 F-29285 Brest cedex.  
(2) URA CNRS 2071 Laboratoire Arago, OOB, F-66650 Banyuls sur mer.

## **VARIABILITE SPATIALE**

Les teneurs en sels nutritifs mesurées le long du transect Antares de 49°S à 58°S (bord du pack) montrent un gradient nord-sud marqué. Si l'on compare les deux stations extrêmes du transect, les stocks dans la colonne d'eau 0-300m en silicates et nitrates sont respectivement sept fois et deux fois plus importants au sud qu'au nord. Les concentrations en surface augmentent de 13.9 à 44.5  $\mu\text{mol Si l}^{-1}$  et de 26.0 à 27.8  $\mu\text{mol N l}^{-1}$  (fig. 1). Un gradient semblable avait déjà été observé lors de la campagnes Antares II.

## **VARIABILITE TEMPORELLE**

Lors de la campagne, les teneurs en silicates et nitrates entre 0 et 300m ont été mesurées environ toutes les 8 heures à la station longue A16. L'objectif était d'étudier l'évolution de ces profils sur quelques jours dans une même masse d'eau. A ces échelles de temps et d'espace, la distribution des sels nutritifs dépend de phénomènes biologiques (assimilation et régénération) et physiques (ondes de surface, ondes internes, ondes de marée, forçage du vent). Les paramètres hydrologiques mesurés (température, salinité et densité) montrent une eau antarctique de surface d'hivers de 200m séparée de l'eau circumpolaire par une forte thermocline. Si l'on superpose tous les profils mesurés pour les silicates sur les 5 jours de

station, on observe une zone de grande variation entre 200 et 300m (fig. 2). L'évolution dans le temps de ces teneurs à 250 m de profondeur (zone de variation maximale), montre une périodicité d'environ 50 heures (fig. 3) très bien corrélée avec les données de windstress (fig. 4). Cette corrélation suggère le rôle important que peut avoir le vent sur les mélanges verticaux et la distribution des éléments nutritif de part et d'autres de la thermocline. Klein et al., ont proposé un model basé sur l'interaction entre le forçage du vent et les courants de surface. Cette interaction, couplée avec des phénomènes de diffusion et d'ondes internes décrit par Y.-H. Park et al., pourrait permettre le transfert d'une énergie mécanique turbulente suffisante pour déstabiliser la thermocline et favoriser les flux verticaux de sels nutritifs des couches profondes vers la couche de surface. L'évolution dans le temps des stocks de sels nutritif dans la couche 0-100m durant les 5 jours de station semble confirmer cet enrichissement (fig. 5), beaucoup plus marqué pour les silicates, ces flux étant proportionnels au gradient vertical de l'élément nutritif considéré. Ces "pulses" de sels nutritifs vers la couche de surface sont des phénomènes transitoires encore mal connus qui peuvent avoir un rôle important sur la croissance phytoplanctonique et les bilans de production primaire à l'échelle de l'année.

## **BIBLIOGRAPHIE**

Klein P. and B. Coste (1984). Effects of wind stress variability on nutrient transport into the mixed layer. *Deep-Sea Res.*, 31, 21-37

L. Goeyens. (1995) Rapport IFRTP campagne à la mer ANTARES 2/MD78, p89.

Park Y.-H. , E. Charriaud and L. Gambéroni (1996), Rapport ANTARES du workshop SO-JGOFS, p25.

### **II-1 CARBONE ET AZOTE ORGANIQUES PARTICULAIRES**

Toutes les données sont regroupées sur le tableau 2.

**Panache:** Dans le panache de Kerguelen, les stations Ker 3, Ker 2, Ker 7, Ker 10 et Ker 14 (KER = CTD) formant une radiale de la côte vers le large ont été échantillonnées (Carte).

Carbone comme azote organiques particuliers présentent de faibles teneurs près de la côte et vont en augmentant vers le large (double). Le rapport C/N varie entre 7 et 11 et les figures montrent très clairement la diminution de ce rapport avec l'éloignement à la côte. Des valeurs de 6 à 9 sont très indicatrices de carbone organique typiquement marin (Tableau 2).

**Radiale ANTARES 3:** Sur la radiale, les teneurs en carbone et azote sont généralement faibles: respectivement inférieures à 100µg/l et 20µg/l. Les stations près de la glace sont légèrement plus riches notamment la station A11-M4 (CTD 46). Dans l'ensemble, les rapports

C/N sont indicateurs de matériel organique marin et parfois plus en profondeur de matériel dégradé.

**Pièges à sédiments:** Deux pièges à sédiments ont été mouillés aux stations M2 et M4 (près de la glace) permettant d'obtenir respectivement 3 et 13 échantillons pour les analyses de carbone et azote organique.

Peu d'informations peuvent être extraites des échantillons de M2 vu le faible nombre de données. Entre 20h et 8h, le jour suivant, les flux exprimés en  $\mu\text{g}/\text{m}^2/4\text{h}$ , ont varié de 450 à 1200 pour le carbone et de 40 à 375 pour l'azote. Les rapports C/N varient entre 7 et 19. Les deux premiers échantillons indiquent probablement la présence de matériel fortement dégradé.

Les 13 échantillons de M4 représentent la tranche horaire finale soit les 2 derniers jours. Les flux de carbone et d'azote varient entre 250 et 1300  $\mu\text{g}/\text{m}^2/4\text{h}$  et entre 25 et 210  $\mu\text{g}/\text{m}^2/4\text{h}$  respectivement. Les rapports C/N sont en moyenne indicateurs de matériel organique de signature marine mais plusieurs échantillons reflètent de la dégradation.

## Metaux traces

**Stéphane BLAIN(1), Thierry BESSON (2) et Olivier DONNARD (2)**

(1) UMR 1513 IUEM 6 avenue le gorgeu BP 809 F-29285 Brest cedex.

(2) URA CNRS 348 LPPM Université de Bordeaux 1,  
351 cours de la libération, 33405 Talence cedex

## INTRODUCTION

L'océan antarctique constitue le plus vaste système HNLC (High Nutrient Low Chlorophyl) de la planète. Une des hypothèses visant à expliquer le paradoxe de ces systèmes, consiste à invoquer les trop faibles concentrations en fer dans leurs eaux (Martin et al. 1990, de Baar et al 1995, Tréguer et Jacques 1992). D'une manière générale la distribution du fer et des autres traces métalliques est mal connues en particulier dans le secteur indien de l'océan austral. Dans ce cadre une première série de mesures a été réalisée dans le panache des Kerguelen (cf chapitre correspondant de ce volume). La seconde série de mesure a été réalisée le long de la radiale afin d'établir une comparaison avec les données obtenues lors d'Antares2 (Sarhou et al 1994).

## PRELEVEMENT ET METHODES D'ANALYSES

Les prélèvements ont été réalisés selon les techniques ultra propres à l'aide de 5 bouteilles GOFLO préalablement lavées et montées sur un câble Kevlar (5 profondeurs entre 0 et 300m). Après prélèvement les bouteilles ont été transportées dans une pièce propre. Par pressurisation à l'azote, l'eau de mer a été filtrée à 0,45 µm à travers des filtres polycarbonate préalablement rincés à l'acide et montés dans des supports tout téflon. Les échantillons filtrés étaient recueillis dans des flacons de polyéthylène préalablement lavés, puis acidifiés à pH=2 par de l'acide nitrique ultrapur (MERCK) et stocké au réfrigérateur (4°C) jusqu'à analyse.

Les concentrations en fer des échantillons du panache ont été mesurées à bord par une technique d'injection de flux. (Blain et Tréguer 1995). La limite de détection étant de 0.2 nM. les résultats sont rapportés dans le chapitre concernant le panache.

Les autres métaux ainsi que les échantillons de la radiale sont en cours d'analyse.

Après ajustement du pH à une valeur proche de 6, les échantillons sont préconcentrés par passage sur une résine chélatante (hydroxy-8 quinoléine) puis élué par une solution acide (Landing et al. 1986). Les éluats sont analysés par ICP-MS (le cas particulier du fer étant traité par plasma froid).

## REFERENCES

- BLAIN S. ET TREGUER (1995) iron (II) and iron (III) determination in seawater at the nanomolar level with selective on-line preconcentration and spectrophotometric determination, *Anal. Chim. Acta.*308, 425-432.
- DE BAAR H.J.W., J.T.M. DE JONG, D.C.E. BAKKER, B. M. LÖSCHER, C. VETH, U. BATHMAN AND V. SMETACEK, (1995) Importance of iron for plankton blooms and carbon dioxide drawdown in the southern ocean. *Nature*, 373, 412-414.
- LANDING W.M., C. HARALDSSON AND N. PAXEUS, 1986, Vinyl polymer agglomerate based transition metal cation chelating ion-exchange resin containing 8-hydroxyquinoline functional group. *Anal. Chem.* 58, 3031-3035.
- MARTIN J.H. R. M. GORDON AND S. FITZWATER (1990) Iron in Antarctic waters. *Nature*, 345, 156-158.
- SARTHOU G., C. JEANDEL, L. BRISSET, D. AMOUROUX AND O. DONNARD. (1994) Distribution du fer et du peroxyde d'hydrogène dans la couche de surface le long d'une section nord-sud de l'Océan indien austral. *Pub. IFRTP rap. ANTARES 2/MD 78*, 143-146
- TREGUER P AND G. JACQUES (1992) Dynamics of nutrients and phytoplankton, and fluxes of carbon, nitrogen and silicon in the Antarctic ocean. *Polar Biol.* 12, 149-162.

# **Thorium-234 dans la couche de surface lors d'Antares 3**

**Sabine SCHMIDT et Pascal L'HENORET**

Centre des Faibles Radioactivités, 91198 Gif sur Yvette Cedex

## **ETAT DE L'ART**

Le principe est d'opposer un père radioactif soluble, U-238, à son fils, Th-234, réactif vis à vis des particules. Le Th-234 est produit continuellement, et à un taux quasi constant dans la colonne d'eau, à partir de U-238, avec une période de 24,1 jours. Aussi le Th-234 ne présente de déficit (à savoir  $\text{Th-234} / \text{U-238} \ll 1$ ) que si l'exportation via les grandes particules est suffisamment active, à des échelles de temps de l'ordre de la semaine.

## **ECHANTILLONNAGE, METHODOLOGIE**

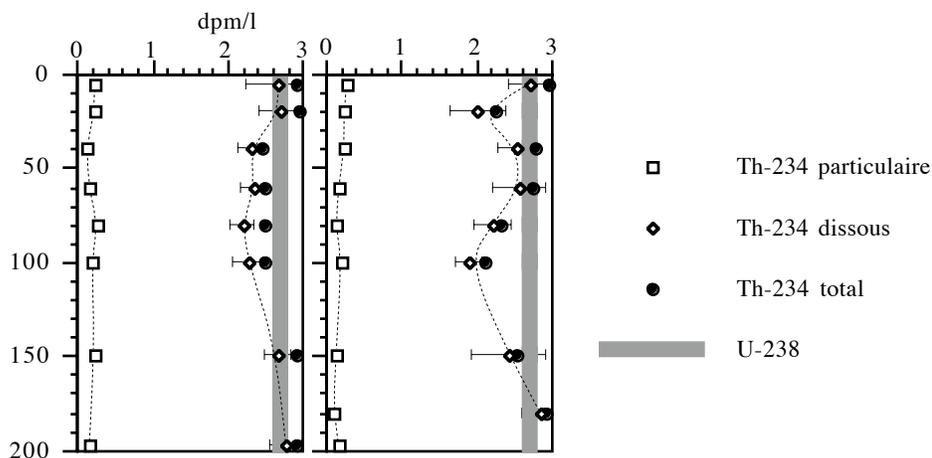
Lors d'Antares 3, un profil de Th-234 (8 points entre 0 et 200 mètres) a été prélevé à chacun des sites M2 et M4. Pour chaque niveau, 20 l. d'eau de mer ont été filtrés. Le Th-234 particulaire a été mesuré directement sur le filtre par spectrométrie gamma au Laboratoire Souterrain de Modane. A bord du bateau, le Th-234 dissous a été concentré à partir des 20 litres filtrés, puis séparé de son père radioactif par radiochimie. Les dernières étapes de la radiochimie et les comptages ont été réalisés au Centre des Faibles Radioactivités.

## **RESULTATS**

De façon générale, les profils montrent peu de déficit du Th-234 total par rapport à U-238, ce qui signifie que l'exportation est faible et donc pratiquement compensée par la production radioactive en particulier pour le site M2. Les activités de Th-234 sur la phase particulaire sont toujours faibles: entre 0.1 et 0.3 dpm /l (moins de 10% du thorium total).

Au site M4, le profil semble indiquer une exportation un peu plus forte vers 20 et 80-100 mètres.

A partir des déficits, on peut calculer la quantité exportée et de là le temps de résidence du Th-234 particulaire, qui peut être assimilé au temps de résidence des particules. Ces temps de résidence sont longs, supérieurs à 60 jours, en dehors de la couche 40-150 mètres du site M4 (inférieure à 30 jours).



## **General regularities of the Dissolved Organic Carbon distribution in the Indian Sector of the Southern Ocean during the early Spring Season (September - November, 1995)**

**Evgeny DAFNER**

Permanent address: Russian Federal Research Institute of Fisheries and Oceanography  
(VNIRO),

V. Krasnoselskaya 17A, 107140 Moscow, Russia

Temporary address: Vrije Universiteit Brussel, Laboratorium voor Analytische Chemie,  
Pleinlaan 2, B-1050 Brussel, Belgium

### **INTRODUCTION**

Previous investigations of DOC showed that the most productive areas during the spring-summer bloom in the Ecosystem of the Southern Ocean are located in areas of Frontal Zones,

in waters adjacent to islands and continental shelves and near the ice edge. High concentrations of DOC were observed during and after the spring bloom in the photic layer and in the layer of organic matter (OM) accumulation *i.e.* in the vertical boundary between different water bodies. Maximum concentrations of DOC were observed for example in the Atlantic Sector of the Southern Ocean in the Polar Frontal Zone (PFZ; Dafner , 1992), and in the boundary between Antarctic Surface Water (ASW) and Circumpolar Deep Water (CDW; Dafner and Selin, 1993). However, lower DOC concentrations were measured in the oligotrophic Permanent Open Ocean Zone in the Indian Sector of the Southern Ocean (Wiebinga and DeBaar, 1995). Little is known about the distribution of DOC in CDW and Antarctic Bottom Water (ABW) as well as on the boundary between them, and also of the fate of DOC in deep water in autumn-winter seasons.

The main objectives of this study were: 1) to relate contents of DOC in the East Kerguelen Shelf Island with the trend in environmental factors before and during the spring bloom; 2) to determine background concentrations of DOC in the Permanent Open Ocean Zone (POOZ) and in the Marginal Ice Zone (MIZ) before the spring bloom; 3) to compare the seasonal variability of DOC concentrations between early spring (ANTARES 3 cruise) and summer-autumn seasons (ANTARES 2 cruise); 4) to trace the mesoscale spatial and temporal variability of DOC content in POOZ and MIZ; 5) to determine the fate of DOC in CDW and ABW and on the boundary between these waters.

## MATERIALS AND METHODS

### Sampling

Water samples were withdrawn from 12 L Go-Flo plastic bottles mounted on a CTD-rosette at all stations on the Kerguelen Island's East Shelf area and along the longitudinal transect (62°00' E). Samples were collected from 7 to 16 depths in the upper 300 m layer and from 10 to 13 depths from 300 m to the bottom. Table 1 shows the numbers of the stations and the sampling depths, making use of Niskin bottles.

Samples were filtered immediately through pre-combusted GF/F glass-fiber filters and stored in the refrigerator at a temperature of 4°C without addition of a preservation reagent. Samples were analyzed in the laboratory of Marine Ecology VNIRO in Moscow.

*Table 1: Sampling stations using Niskin bottles*

Station n°	Depth, m	Station n°	Depth, m
------------	----------	------------	----------

---



---

10	10, 20, 40	14	5, 20
11	5, 10, 20, 40	15	5
12	5, 10	18	5, 10, 20
13	5, 20	21	5

---

### DOC analysis

DOC measurements were performed using the Technicon IIAC Flow AutoAnalyzer System (Technicon, 1978). Organic carbon was determined by oxydation of organic matter to CO<sub>2</sub> with UV irradiation and subsequent oxydation by potassium persulfate (Collins and Williams, 1977). After dialysis, CO<sub>2</sub> was determined through colorimetry, using a carbonate-bicarbonate buffer with phenolphthalein. The decrease in colour density at 540 nm is directly proportional to the amount of CO<sub>2</sub> formed. Easily oxydizable glucose was used as a standard for the calculation of DOC concentration.

The accuracy of this method is  $\pm 2 \mu\text{M}$  when values were less than  $100 \mu\text{M}$ , and  $\pm 3 \mu\text{M}$  for higher values.

### DOC study at the longitudinal transect along 62°00'E

Figures 2 and 3 display the DOC content of the water column in the southern periphery of the PFZ, POOZ and MIZ. The distribution of DOC at all A-stations as shown in these figures is the result of compiled data of several sampling points, located near each other. This is because the deep casts (300 m to bottom) and the shallow casts (surface to 300 m) were done at slightly different positions. Finally, all A-stations consisted of:

A18 - Sts.15, 17	A15 - Sts.35, 37	A11 - Sts.46, 47
A17 - Sts.18, 20	A14 - Sts.38, 40	
A16 - Sts.21, 23	A12 - Sts.41, 43	

### Analysis of DOC mesoscale variability at stations M2 and M4

The mesoscale variability of the DOC content was studied in the POOZ at st. M2 and in the MIZ at st. M4. Figure 6 shows the mesoscale vertical distribution of DOC in Time (hours) against Depth (m). Station M2 enclosed 13 stations (Sts. 21-35). Sampling began the 12th of October at 8h 31min and ended on the 17th of October at 14h 44min. Station M4 started on the 20<sup>th</sup> of October at 9h 52min and ended on the 25th of October at 22h 24min and it consisted of 20 stations (Sts. 44-68). This investigation of the spatial and temporal

variability like done at stations M2 and M4 is an investigation at mesoscale level (Kamenkovich *et al.*, 1982). A more detailed description of these stations with their locations are reported by expedition chief P.Mayzaud in this volume.

## PRELIMINARY RESULTS

### The East Kerguelen Shelf

The area of our investigation was located eastward from the Kerguelen Island and divided by the the Polar Front (PF) in two parts (see Fig. 4 to 7, Park *et al.*, this report). Figure 1 represents the distribution of DOC along two transects in this area. The DOC background content at the shallow station (<200 m) ranged from 50 to 60  $\mu\text{M}$ . Table 2 shows DOC and Chlorophyll **a** maximum concentrations at shallow stations and the associated depths. The highest DOC values, as integrated over the entire water column, were found at St.6. For this station, there was no significant correlation between DOC and Chl **a** ( $r^2=0.60$ ,  $n=6$ ).

In the area east to the PF, DOC background concentration was the same as on the East Kerguelen Shelf. Further east, it increased up to 60-70  $\mu\text{M}$  in the Antarctic water. Distinct DOC maxima were obtained in Antarctic waters only at Sts.11, 12, 14 (Table 3).

*Table 2: DOC and Chlorophyll a maximum concentrations in the shallow East Kerguelen Shelf water*

Station n°	DOC, $\mu\text{M}$	Depth, m	Chl <b>a</b> , $\mu\text{g m}^{-3}$	Depth, m
1	123	23	0.30***	23

2	93	41	0.41	41
3	-*	-	0.38	5-10
4	119	40	0.48	40
6**	300	158	0.36	79

\* - at this station no distinct DOC maxima were observed;

\*\* - for this station very high DOC concentrations from surface to bottom were obtained;

\*\*\* - all data on Chl **a** were kindly provided by M.Fiala, M.Panouse and C.Machado (this report).

*Table 3: DOC and Chlorophyll **a** maximum concentration in the Antarctic water east from the PF*

Station n°	DOC, $\mu\text{M}$	Depth, m	Chl <b>a</b> , $\mu\text{g m}^{-3}$	Depth, m
11	87	40	0.33	40
12	91	5	0.52-0.55	5 - 40
14	83(72*)	1923	0.56	61

\* - DOC concentration at the depth of the Chl **a** maximum.

Values of Chlorophyll **a** increased from shallow stations across the PF towards the Antarctic water. The DOC background concentration increased in the same direction. Tables 2 and 3 show that distinct DOC maxima, if present, coincided with the Chlorophyll **a** maxima for both shallow and Antarctic waters. This indicates a close interaction between DOC and biological production.

### **The longitudinal transect along 62°00' E**

The area along 62°00' E included waters adjacent to the PF on the northern side, POOZ in the middle and MIZ in the south of the transect. As shows Figure 2, the DOC distribution displayed a large vertical and horizontal DOC gradient. DOC concentrations in surface, deep and bottom waters were highly variable. The background concentration of DOC ranged from 50 to 60  $\mu\text{M}$  as well in surface waters as in deep waters and from 40 to 50  $\mu\text{M}$  in Antarctic Bottom Water (Fig.3).

Maximum DOC concentrations (93  $\mu\text{M}$ ) in the upper 300 m layer were observed in the water adjacent to the PF at St. A18, at a depth of 200 m. At this station, DOC concentrations were high with an average value of 86  $\mu\text{M}$  between 83 and 202 m depth. The DOC concentration increased also up to 97  $\mu\text{M}$  at St. A12 at 80 m depth.

Distinct DOC maxima were also observed at greater depths (>300 m). Maximum values of DOC in CDW were found in the middle of the transect at the St. A15 (84  $\mu\text{M}$ ) at two depths - 1011 and 1260 m. We also observed a DOC maximum (81  $\mu\text{M}$ ) at St. A12 at 1520 m depth. In the Antarctic Bottom Water, the highest DOC concentration observed was 90  $\mu\text{M}$  at St. A15 at a depth of 3560 m.

Unfortunately, I can't present a comparison between the distribution of DOC and Chlorophyll **a** along the longitudinal transect in my report, because I don't dispose of sufficient data on Chl **a** values at all stations. Coincidence of DOC maxima, if present, and Chl **a** maxima were observed at only 3 stations from 12 (Stns. 18, 55, 64). In all other cases, DOC maxima did not coincide with Chl **a** maxima.

### **Relationships of DOC against salinity along the longitudinal transect**

Figure 4 shows the relationship between salinity and DOC along a longitudinal transect. A first peculiarity on this figure is the relationship between salinity and DOC at stations where a big mixed layer was present, which was at some times almost as deep as the ASW. At St. A17 DOC values ranging from 36 to 85  $\mu\text{M}$  were obtained. Yet at the same time, only a minor variation in salinity (0.01‰) was measured between the surface layer and 200 m. Analogous situations were also obtained for Stns. A16 and A14.

The thickness of the mixed layer decreased towards the south and this is reflected in the relationship between salinity and DOC. The combined data vary in relation to the hydrographic parameters *i.e.* as the salinity increases, DOC decreases with the exception of Stns. A16 and A15. At stations A12 and A11, practically the same DOC concentration in both surface and deeper waters were observed. These stations were located not so far from the Antarctic Divergence.

### **Weighted-mean values of DOC distribution in ASW, CDW and ABW**

The weighted-mean DOC concentration of the different A-stations were calculated. These values were then subjected to an comparison between the values obtained for the ASW and those obtained for the CDW and ABW. Weighted-mean DOC distribution (represented on Fig.5) displayed synchronous distribution of DOC between ASW, CDW and ABW. The exception to this rule are the weighted-mean value obtained for the ASW at St. A18. The best correlation was obtained between CDW and ABW ( $r^2=0.887$ ,  $n=6$ ; Fig.5, right part). This assumes the existence of a clear relationship between DOC content in CDW and ABW. Perhaps DOC content in ABW determines the DOC content in CDW, *i.e.* there was a flux of DOC from CDW to ABW. Moreover, very low temperatures promote DOC accumulation in ABW. This may be one of the reasons why DOC concentrations in both waters are practically equal. Another factor which might contribute is that the ABW contains DOC from the area of its formation (Coastal and Continental Shelf Zone). This might be the explanation for the uniform DOC concentration observed in CDW and ABW as shown by the vertical distribution of DOC against salinity at stations A12 and A11 (Fig.4).

### **The mesoscale variability during “long” stations M2 and M4**

Station M2 was located in POOZ (52°00’S). Station M4 was located in MIZ and it was located next to the ice edge (58°41’S). DOC background concentration on both stations reached approximately 60  $\mu\text{M}$  (Fig.6). Concentrations of DOC ranged from 31 to 243  $\mu\text{M}$  at the St. M2 and from 33 to 94  $\mu\text{M}$  at the St. M4, *i.e.* DOC concentration was much more variable in POOZ than in MIZ.

At St. M2 DOC concentrations were variable for the upper 200 m at the beginning of our investigation. At St. 25, high DOC concentrations - ranging from 96 to 117  $\mu\text{M}$  - were measured. These values coincided with a very wide layer between 19 and 150 m depth. Halfway our research typical background concentrations of DOC were observed. At the end, a

more variable deeper layer (from 150 to 242 m) was observed, where DOC concentrations ranged from 95 to 243  $\mu\text{M}$ .

St. M4 was surveyed along the northern periphery of Antarctic Divergence. A more smoothed distribution of DOC was measured here. Distinct maxima DOC were observed both in surface layer and the deeper layer. Much more variability was obtained after 100 hrs in the layer between the surface and 300 m depth.

## DISCUSSION

Comparing the data of DOC and Chl *a* distribution, there is a clear coincidence in the location of their maxima in the area East of Kerguelen Island. Highest DOC concentrations demonstrated a close interaction between DOC and biological production at the beginning of spring. In this area of the Indian Sector of the Southern Ocean, the spring bloom obviously begins earlier at least partly because of the favourable hydrographical conditions, as we observed on the East Kerguelen Shelf. The DOC background concentration in these waters were several times higher than the TOC background concentration observed around the South Georgia Shelf water during March - April, 1990 (Dafner and Selin, 1995). This big difference in DOC and TOC concentrations around these two islands, which are located practically in the same zone, is explained in the first place by the difference in season and secondly by a much more intensive circulation of the water around South Georgia Island.

Preliminary results show very low DOC concentrations along the longitudinal transect during the ANTARES 3 cruise. Background DOC concentrations (approximately 100  $\mu\text{M}$ ) were less than in the Drake Passage (Martin and Fitzwater, 1992). However, they were practically in the same order (45-55  $\mu\text{M}$ ) of magnitude as in the transect from 53°S to 51°S along 140°E (Trull *et al.*, 1995).

After the ANTARES 3 cruise, higher DOC concentrations were measured for both background and distinct maximum concentrations than after the ANTARES 2 cruise, where DOC background concentrations ranged from 36 to 81  $\mu\text{M}$  in surface water and from 35 to 55  $\mu\text{M}$  below the euphotic zone (Wiebinga and de Baar, 1995). Perhaps this difference can be explained by methodological distinction. During the ANTARES 2 cruise samples were acidified before they were sealed (on the contrary, in my research I did not use acidified samples). In the former case, a large portion of the DOC can be precipitated by acid addition (Sharp *et al.*, 1993). As was written by Sharp *et al.*: "Therefore, when aliquots are taken from the acidified sample with a narrow-bore syringe needle and injected, it is possible that different instruments reflect different levels of inclusion of the precipitate. The persulfate oxidation method does not rely on syringe sampling and injection and therefore is less likely to be affected by precipitate formation".

My results revealed highly complicated DOC distributions in both space and time for POOZ and MIZ. For these areas we did not find very intensive phytoplankton blooms. It can be assumed that the temporal and spatial variation during the period of our investigations depended on oceanographic conditions. For the MIZ, in the area of Weddell-Scotia Confluence, it was reported that during the spring bloom (December 1988 - January 1989) the ice edge TOC content decreased from 150  $\mu\text{M}$  at the surface to 50  $\mu\text{M}$  at a depth of 10 m (Prego, 1991). A maximum surface DOC value (192  $\mu\text{M}$ ) was also observed in another location in the MIZ - in the near-shore surface waters of the Ross Sea (12th of January, 1990; Martin and Fitzwater, 1992).

Unfortunately, during the ANTARES 3 cruise I could not trace in more detail the DOC distribution at the location of its accumulation (on boundary between different water masses). Perhaps it is necessary to take samples from the layer between CDW and ABW and also to check in a future research the result of the existing influence of the DOC content of the CDW on the DOC content in the ABW. This is of profound importance for the estimation of the organic carbon balance in the Ecosystem of the Southern Ocean.

The ABW is analogous to the Antarctic Intermediate Water which transports organic matter produced in higher longitudes during the spring-summer season. But from our investigations we can assume that prior to the spring season there was no accumulation of OM between ASW and CDW. Perhaps this might be attributed to the autumn-winter bacterioplankton activity.

## ACKNOWLEDGMENTS

I would like very much to thank Prof. Paul Tréguer for the opportunity to participate in the ANTARES 3 cruise. I thank l'Institut Français pour la Recherche et la Technologie Polaires for accommodation during the cruise on board of the R.V. *Marion Dufresne*. I am grateful to Bernard Olivier for his help and co-operation during the cruise. I would also especially like to thank Leo Goeyens for his collaboration on board of the R.V. *Marion Dufresne* and in the treatment of my data in the Laboratorium voor Analytische Chemie, Vrije Universiteit Brussel. My special thanks go to Alina Agatova for her recommendations during the measurement of DOC concentrations in the Laboratory of Marine Ecology VNIRO, Moscow. Finally, I am grateful to the captain and the crew of the R.V. *Marion Dufresne* for their co-operation at sea.

## **BIBLIOGRAPHY**

Collins K.J. and P.J. le B. Williams, 1977. An automated photochemical method for the determination of dissolved organic carbon in sea and estuarine waters. *Marine Chemistry*, 5: 123-141.

Dafner E.V., 1992. Dissolved organic carbon in waters of the Polar Frontal Zone of the Atlantic Antarctic in the spring-summer of 1988-1989. *Marine Chemistry*, 35: 275-283.

Dafner E.V. and Selin P.Yu., 1993. Total organic carbon in waters of the South-Western Atlantic Antarctic during the summer-autumn season of 1990. *Russian Journal of Aquatic Ecology*, 2(2): 111-122.

Dafner E.V. and Selin P.Yu., 1995. Organic matter in waters of the SW Atlantic Sector of the Southern Ocean. *GeoJournal*, 35:71-77.

Kamenkovich V.M, Koshlyakov M.N. and Monin A.C., 1982. Synoptic eddies in the ocean. Leningrad, Gidrometeoizdat, p.263 (in Russian).

Martin J.H. and Fitzwater S.E., 1992. Dissolved organic carbon in the Atlantic, Southern and Pacific oceans. *Nature*, 356: 699-700.

Prego R., 1991. Total organic carbon in the sea-ice zone between Elephant Island and the South Orkney Island at the start of the austral Summer (1988-89). *Marine Chemistry*, 35: 189- 199.

Sharp J.H., Benner R. , Benner L., Carlson C.A. and Dow R., 1993. Re-evaluation of high temperature combustion and chemical oxidation measurements of dissolved organic carbon in sea water. *Limnol. Oceanogr.*, 38(8): 1774-1782.

Technicon : Industrial method no. NL-141-77w (1978). Dissolved organic carbon in water and sea water. Technicon Instruments Corporation, Tarrytown, NY.

Trull T., Griffiths F.B. and Parslow J., 1995. Dissolved organic carbon abundance in the Australian sector of the Southern Ocean: relations to biomass, primary productivity and water column structure. *Carbon Fluxes and Dynamic Processes in the Southern Ocean. Program and Abstract of the International Symposium, Brest, France, 28-31 August 1995*, p.137.

Wiebinga C.J. and de Baar H.J.W., 1995. Vertical distribution of Total and Dissolved Organic Carbon in the Indian sector of the Southern Ocean (ANTARES 2, austral summer 1994). *Carbon Fluxes and Dynamic Processes in the Southern Ocean. Program and Abstract of the International Symposium, Brest, France, 28-31<sup>st</sup> of August 1995*, p.59.

### **Marqueurs moléculaires lipidiques et rapports isotopiques du carbone organique le long de la radiale ANTARES 3**

**Ihlem BENTALEB<sup>1,2</sup> , Michel FONTUGNE<sup>1</sup> , Joan GRIMALT<sup>2</sup> ,**

**Christine HATTE<sup>1</sup>, Andrew JOHNSTON<sup>3</sup>.**

1 Centre des Faibles Radioactivités, Laboratoire mixte CNRS/CEA, Domaine du CNRS,  
91198-Gif sur Yvette cedex, France.

2 Department of Environmental Chemistry, CID-CSIC, 18-26, Jordi Girona,  
08034-Barcelona, Spain.

3 Department of Biological Sciences, University of Dundee. Dundee, Scotland.

## **INTRODUCTION**

En raison du rôle des gaz à effet de serre sur l'évolution climatique du globe, un des axes principaux des études concernant les Changements Globaux est de comprendre les effets de l'accroissement des teneurs en CO<sub>2</sub> atmosphérique sur les changements climatiques et la réponse des différents écosystèmes. Un des aspects fondamentaux est la connaissance des mécanismes par lesquels les teneurs en CO<sub>2</sub> atmosphérique ont varié dans le passé. Ceci constituerait un guide pour prévoir l'évolution future de notre atmosphère.

Ainsi, un des problèmes majeurs non résolu est de comprendre comment la concentration en CO<sub>2</sub> atmosphérique a évolué de 190  $\mu$ atm durant la dernière époque glaciaire à 280  $\mu$ atm pendant la période préindustrielle.

L'océan étant le principal réservoir de carbone (soixante fois plus de carbone que dans l'atmosphère), cette diminution de 30% du CO<sub>2</sub> de l'air durant la période glaciaire ne pouvait se justifier que par une absorption active par les eaux de surface. Cependant, la capacité de l'océan à absorber autant de gaz carbonique en période glaciaire est encore largement incomprise. Les modèles de circulation ou les résultats des reconstitutions des paléopCO<sub>2</sub> montrent que la simple thermodynamique ne permet pas d'expliquer à elle seule de tels changements. Par conséquent, il devient nécessaire de prendre en compte les variations de la production primaire phytoplanctonique, c'est à dire l'efficacité avec laquelle le plancton utilise les éléments nutritifs et contribue à la diminution du stock de CO<sub>2</sub> atmosphérique par les processus photosynthétiques, suivis de l'exportation du carbone organique sous forme particulaire vers les eaux profondes et le sédiment.

Le but est de quantifier les mécanismes de transferts de carbone entre l'atmosphère et l'océan en déterminant les zones océaniques puits et sources de CO<sub>2</sub>. C'est en raison du rôle majeur que joue l'Océan Austral dans les échanges de gaz carbonique entre l'Océan et l'atmosphère que notre étude s'inscrit dans le programme ANTARES. Cette étude aboutira à

une meilleure connaissance du cycle du carbone et de la circulation océanique qui constitue un des paramètres fondamentaux pour la modélisation de l'évolution du climat.

### Stratégie

De récents travaux suggèrent que le fractionnement des isotopes du carbone par le phytoplancton marin, lors des processus photosynthétiques, dépend directement de la concentration en CO<sub>2</sub> dissous dans l'eau de mer de surface. Ainsi, la composition isotopique du carbone ( $\delta^{13}\text{C}$ ) de la matière organique sédimentaire qui dérive du phytoplancton pourrait constituer un enregistreur des pressions partielles de CO<sub>2</sub> dans l'océan. Mais plusieurs phénomènes limitent l'utilisation d'une telle relation:

- 1- Le carbone organique sédimentaire a des origines diverses telles sources continentale ou sources planctoniques marines autotrophes et hétérotrophes.
- 2- L'influence des phénomènes de diagénèse précoce, susceptibles d'altérer le signal porté par la composition isotopique de la matière organique totale des sédiments, est mal documentée.
- 3- Les fortes productivités peuvent entraîner une limitation des concentrations en CO<sub>2</sub> dissous provoquant alors une rupture de l'équilibre chimique et isotopique du système des carbonates.

Il devient donc essentiel d'utiliser en plus de la composition isotopique de la matière organique totale, la composition isotopique de substances biochimiques spécifiques (biomarqueurs) d'espèces phytoplanctoniques strictement autotrophes et fixant uniquement du CO<sub>2</sub> dissous. Les biomarqueurs sélectionnés sont ceux présents dans le sédiment et provenant du phytoplancton: alcénones ( $\text{U}^{\text{k}}_{37}$ ) et stérols.

L'utilisation de ces biomarqueurs constituent une réponse aux limitations énoncées aux points 1 et 2 puisqu'il sont représentatifs des paramètres physico-chimiques des eaux de surface de l'océan enregistrés par le phytoplancton et que l'information enregistrée au niveau moléculaire est transférée aux sédiments sans altération.

Le but est d'établir les relations entre: les concentrations en CO<sub>2</sub> dissous dans l'eau (Equipe MINERVE - Dr Poisson) et la composition isotopique des biomarqueurs et les concentrations en CO<sub>2</sub> dissous dans l'eau et le C13 du carbone organique total. Grâce à cette approche, nous serions en mesure d'établir, pour le dernier cycle climatique où la pCO<sub>2</sub> dans l'air est connue, la répartition des zones puits ou sources de CO<sub>2</sub> pour l'atmosphère et de contribuer à la modélisation des échanges de CO<sub>2</sub> entre océan et atmosphère

## **MATERIEL ET METHODE**

Au cours de la campagne Antares 3 et dans le cadre du groupe APPA, nous avons effectué les prélèvements nécessaires à cette étude.

Les filtrations ont été effectuées au moyen:

- de pompes in situ pour les stations fixes d'ANTARES 3. Les pompes in situ Challenger Oceanic munies de deux têtes porte filtre (diamètre 142mm) ont été immergées à 5 et 30m ou plus profondément en fonction de la houle (pompage moyen de 100l d'eau de mer pendant environ 1 heure). Les cellules ont été recueillies sur des filtres TCLP Gelman de  $0,7\mu\text{m}$  de porosité préalablement traités à  $500^{\circ}\text{C}$ . Un filtre a servi à la détermination de la composition isotopique du carbone de biomarqueurs (stéroïdes et cétones). Le second filtre est partagé en 6 secteurs égaux permettant de mesurer simultanément sur le même échantillon 6 paramètres dont ceux qui nous intéressent dans cette étude: les rapports isotopiques C13/C12 (carbone organique) et N15/N14 (azote organique).

- ou au moyen des installations existantes à bord du Marion Dufresne à savoir l'eau provenant du puits BOBY. Cette arrivée d'eau de mer en continu a permis d'effectuer des prélèvements d'eau de mer pendant les transits du bateau

Ces prélèvements permettent de mesurer les rapports C13/C12 et N15/N14 de la matière organique totale et le rapport C13/C12 de la fraction du carbone minérale.

- et enfin au moyen d'une rosette CTD 24 bouteilles pour les mesures des concentrations en carbone et azote organiques (dans le cadre de JGOFS-Joint Global Ocean Flux Studies). L'eau est prélevée systématiquement à toutes les stations de la radiale ANTARES 3 et au panache de Kerguelen par la rosette 24 bouteilles et est préfiltrée au moyen d'une soie zooplanctonique de  $200\mu\text{m}$  de vide de maille. Les prélèvements couvrent généralement les profondeurs allant de la surface jusqu'à 200m. Pour chaque niveau échantillonné, 2 à 4 litres d'eau de mer étaient filtrés sur des filtres GFF de 0,24cm de diamètre (cf Tableau dans les paramètres JGOFS).

L'ensemble de ces échantillons sont séchés à l'étuve à  $50^{\circ}\text{C}$  puis conservés dans du papier aluminium jusqu'à leur arrivée au laboratoire à l'exception du rapport C13/C12 du carbone minéral. En effet, le prélèvement consiste à prendre 50ml d'eau de mer à laquelle nous ajoutons 2ml de chlorure mercurique pour arrêter instantanément toute activité biologique (qui relargue ou utilise le carbone minéral présent autour des cellules). Ces flacons empoisonnés sont conservés hermétiquement à l'obscurité jusqu'à leur analyse.

L'échantillonnage a été établi selon le programme du groupe APPA, avec une étude des variations temporelles à 10 et 50m de profondeur au cours d'un cycle de 36 heures avec un pas

de temps de 4h. Ces cycles ont été effectués aux stations longues M2 et M4 (cf. carte générale de la campagne ANTARES).

A chaque station dite courte ou station hydrologique des prélèvements de surface ont été effectués (pompe in situ à 10m).

En cours de transit du bateau, des filtrations ont été effectuées toutes les 4 heures environ (puits BOBY).

Les échantillons prélevés et décrits ci-dessus sont analysés dans différents laboratoires à savoir:

- au Centre des Faibles Radioactivités (Gif sur Yvette sous la responsabilité du Dr. Fontugne) pour les mesures des rapports C13/C12 et N15/N14 de la matière organique totale (spectrométrie de masse) et des teneurs en carbone et azote (Analyseur CHN).

- au Département de chimie environnementale (CID-CSIC Barcelone, Espagne, sous la responsabilité du Dr. Grimalt) pour les analyses en chromatographie gazeuse des stérols et cétones (GC et GCMS).

- au Laboratoire de biogéochimie isotopique (Paris 6, sous la responsabilité du Pr. Mariotti) pour les mesures isotopiques des stérols et cétones (GC-IRMS).

- à l'Université de Dundee au département des Sciences Biologiques (Ecosse, sous la responsabilité du Dr. Johnston) pour les mesures des rapports C13/C12 du carbone minéral dissous dans l'eau (Spectrométrie de masse, VG ISOGAS SIRA II).

## **RESULTATS PRELIMINAIRES: ISOTOPES ET BIOMARQUEURS**

Dans cette partie les résultats sont encore peu nombreux. Nous proposons de décrire l'état d'avancement des travaux.

### **$\delta^{13}\text{C}$ du carbone minéral dissous: $\delta^{13}\text{CDIC}$**

Les valeurs de  $\delta^{13}\text{CDIC}$  dans notre étude ne seront utiles que lorsque les valeurs de  $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$  seront complètement disponibles. Certains auteurs utilisent ces valeurs comme marqueurs des masses d'eau mais dans notre thème de recherche il s'agit en fait de calculer le fractionnement isotopique entre le carbone organique et le carbone minérale (durant les processus de la photosynthèse). Pour évaluer ce facteur de fractionnement isotopique ( $\epsilon_p$ ) il nous faut cette valeur de  $\delta^{13}\text{CDIC}$  et bien sûr celle du  $\delta^{13}\text{C}$  du phytoplancton. Cependant, nous pouvons faire quelques commentaires sur la variabilité de ce  $\delta^{13}\text{CDIC}$ .

Tout d'abord sur les 45 échantillons prélevés au cours de la campagne ANTARES 3, 10 ont été perdus au cours de l'analyse isotopique. Sur les 35 restants, 30 ont été analysés. On

peut les classer en deux sections, chacun des groupes metant en valeur des aspects différents (variations spatiales et variations en fonction de la profondeur).

Sur le transect entre les stations A18 et A12, le  $\delta^{13}\text{CDIC}$  varie très peu malgré la traversée de la zone du front sub-polaire et le gradient de température ( $4^\circ\text{C}$ ) (Fig.1a).

Si nous prenons la totalité des valeurs entre le pack et la Réunion, nous pouvons noter que les plus fortes valeurs de  $\delta^{13}\text{CDIC}$  sont localisées dans la zone de la convergence subtropicale. Au nord comme au sud de la CST, les valeurs sont plus négatives (Fig.1b).

Le profil de  $\delta^{13}\text{CDIC}$  en fonction de la profondeur montre que en dessous des 60m, les valeurs deviennent plus négatives (pauvres en C13) (Fig.2).

### **$\delta^{13}\text{C}$ et $\delta^{15}\text{N}$ de la matière organique particulaire**

Du retard est enregistré sur les mesures de  $\delta^{15}\text{N}$ . En ce qui concerne les  $\delta^{13}\text{C}$  de la matière organique, les échantillons prélevés lors du cycle de 36h à 5 et 30m (réduit à 32h en raison de la mauvaise météo) ont été analysés (Fig.3). Les rapports C13/C12 sont globalement pauvres en C13 (très négatifs). A la surface, les variations temporelles semblent plus importantes que celles mesurées à 50m de profondeur. Cependant, les deux niveaux de profondeur présentent des valeurs très négatifs dans l'ensemble. Bien entendu, il manque l'essentiel des données qui sont en cours d'analyse à Gif sur Yvette.

### **$\delta^{13}\text{C}$ des marqueurs moléculaires**

Les lipides, en raison de leur abondance et de leur caractère plus refractaire à la diagénèse que les protéines ou les sucres, représentent généralement le meilleur outil de travail. Actuellement, nous avons étudié deux fractions: les stérols et les cétones. Les stérols sont bien représentés dans le microphytoplancton, abondants et bien conservés dans les sédiments. Les cétones, ou plus particulièrement les alcénones sont très intéressants car ils sont déjà bien documentés sur leur rôle de paléo-thermomètre et sont très spécifiques de la classe d'algue des Prymnesophycées.

Dans le but d'avoir une vue intégrée des variations des concentrations de ces deux fractions en fonction des variations latitudinales (puisque cette région est marquée par de forts gradients de température, entre 14 et  $-1.5^\circ\text{C}$ , de teneurs en  $\text{CO}_2$ , entre 13 et  $26\mu\text{M}$ ), nous avons choisi d'analyser une 15 aine d'échantillons entre 39 et  $58^\circ\text{S}$ .

Les analyses ont permis d'identifier 11 stérols. En revanche les alcénones sont totalement absentes en cette fin d'hiver austral.

Les teneurs les plus élevées en stérols sont localisées près de la convergence subtropicale (Fig. 4). En traversant la PFZ puis la POOZ en direction du pack, nous observons une diminution régulière des concentrations. Les valeurs dans la POOZ et celles de quelques échantillons de la SIZ enregistrent les plus basses teneurs. En revanche, un échantillon près de la glace voit ses concentrations brutalement augmenter. En effet, si on prend l'exemple du cholestérol, celui-ci varie de 15 à 2 ng/l de la CST à la SIZ et augmente jusqu'à 17ng/l pour cette échantillon près de la glace.

En ce qui concerne l'absence des alcénones, ceci montre que ces composés présentent un cycle de production saisonnière puisque l'on sait que leur présence a été démontrée par le passé dans les eaux Australes. Il faudra donc tenir compte de cet effet saisonnier.

Ces échantillons sont actuellement au laboratoire de géochimie isotopique pour une analyse en GC IRMS (Prof. Mariotti). Ces résultats seront détaillés dans le futur lorsque nous aurons analysé le reste des prélèvements.

## **CARBONE ET AZOTE ORGANIQUES PARTICULAIRES**

**Panache:** Dans le panache de Kerguelen, les stations Ker 3, Ker 2, Ker 7, Ker 10 et Ker 14 (KER = CTD) formant une radiale de la côte vers le large ont été échantillonnées (Carte).

Carbone comme azote organiques particulaires présentent de faibles teneurs près de la côte et vont en augmentant vers le large (double). Le rapport C/N varie entre 7 et 11 et les figures montrent très clairement la diminution de ce rapport avec l'éloignement à la côte. Des valeurs de 6 à 9 sont très indicatrices de carbone organique typiquement marin (Tableau général).

**Radiale ANTARES 3:** Sur la radiale, les teneurs en carbone et azote sont généralement faibles: respectivement inférieures à 100 $\mu$ g/l et 20 $\mu$ g/l. Les stations près de la glace sont légèrement plus riches notamment la station A11-M4 (CTD 46). Dans l'ensemble, les rapports C/N sont indicateurs de matériel organique marin et parfois plus en profondeur de matériel dégradé.

**Pièges à sédiments:** Deux pièges à sédiments ont été mouillés aux stations M2 et M4 (près de la glace) permettant d'obtenir respectivement 3 et 13 échantillons pour les analyses de carbone et azote organique.

Peu d'informations peuvent être extraites des échantillons de M2 vu le faible nombre de données. Entre 20h et 8h, le jour suivant, les flux exprimés en  $\mu$ g/m<sup>2</sup>/4h, ont varié de 450 à 1200 pour le carbone et de 40 à 375 pour l'azote. Les rapports C/N varient entre 7 et 19. Les deux premiers échantillons indiquent probablement la présence de matériel fortement dégradé.

Les 13 échantillons de M4 représentent la tranche horaire finale soit les 2 derniers jours. Les flux de carbone et d'azote varient entre 250 et 1300  $\mu\text{g}/\text{m}^2/4\text{h}$  et entre 25 et 210  $\mu\text{g}/\text{m}^2/4\text{h}$  respectivement. Les rapports C/N sont en moyenne indicateurs de matériel organique de signature marine mais plusieurs échantillons reflètent de la dégradation.

## **BIBLIOGRAPHIE**

Bentaleb, I., Fontugne, M., Descolas-Gros, C., Girardin, C., Mariotti, A., Pierre, C., Brunet, C., Poisson, A., (1996)- Carbon isotopic fractionation by plankton in the southern Indian Ocean: Relationship between  $\delta^{13}\text{C}$  of particulate organic carbon and dissolved carbon dioxide. *J. Marine Systems.*, (accepté Déc. 96).

Bentaleb I., Fontugne, M., Descolas-Gros, C., Girardin, C., Mariotti, A., Pierre, C., Brunet, C., and Poisson, A., (1996) - Phytoplankton carbon isotopic composition and sea surface  $\text{pCO}_2$  reconstructions in the Southern Indian Ocean. (*Organic Geochemistry*, V 24, N°4, 399-410).

Bentaleb I. (1994) - Les processus physiologiques dans la couche euphotique et la composition isotopique du carbone organique du phytoplancton: relation  $\delta^{13}\text{C}(\text{POC})$  -  $[\text{CO}_2(\text{aq})]$ . Applications à la paléoclimatologie. Thèse de doctorat de l'Université Paris VI, pp. 229.

## **Dégradation et recyclage de la matière organique associée aux particules en suspension et aux particules à grande vitesse de chute (Mission ANTARES 3)**

**Jeanne LAUREILLARD, Laurence PINTURIER et Joëlle FILLAUX**

LPCM, Université P. et M. Curie, tour 25-24, 5<sup>e</sup> étage, case 134  
4, Place Jussieu, 75 005 Paris

L'un des facteurs primordiaux qui contrôlent l'efficacité de la préservation ou du recyclage de la matière organique est le rôle potentiel des bactéries. Afin d'évaluer leur impact sur les petites particules en suspension dans la zone euphotique et les grosses particules à vitesses de chute élevées, nous avons comparé l'état de dégradation de la matière organique détritique contenue dans le piège dérivant M4, déployé au cours d'ANTARES 3 (profondeur : 200 m) à celui de particules de surface collectées à la station M2 (A16) et à la station M4, en bordure du pack. Un échantillon de glace a aussi été prélevé au même endroit. Compte tenu de la très faible teneur en détritiques du contenu des godets, nous avons regroupé certains d'entre eux afin d'obtenir des analyses plus précises. Ainsi, les 5 échantillons obtenus sont constitués comme suit : T1 (godets 1 à 5), T2 (godets 6 à 11), T3 (godets 12 à 16), T4 (godets 17 à 20), T5 (godets 21 à 24).

L'analyse des classes de lipides au Iatroscan permet d'obtenir la teneur en lipides totaux d'un échantillon et d'identifier et quantifier les différentes classes composantes. Certaines d'entre elles permettent d'évaluer l'état de fraîcheur du matériel organique. Ainsi les lipides de dégradation sont issus de la décomposition enzymatique des glycérides. Par contre, les lipides polaires qui sont des lipides membranaires sont représentatifs de la biomasse vivante ou en état de grande fraîcheur. La Fig. 1 indique la variabilité temporelle du flux vertical en termes de lipides. La biomasse lipidique décroît au cours du temps, avec toutefois une quasi absence de collecte pour T2. Cependant, les valeurs du COP (VESCOVALI et MARTY, 1996) ne suivent pas une tendance similaire et le rapport Lip/COP présente une décroissance constante au cours de la dérive du piège et sa prise dans les glaces. Le faible taux de lipides du matériel qui sédimente dans le piège à partir de la prise dans les glaces est en conformité avec les faibles teneurs rencontrées dans les sédiments superficiels prélevés dans la zone des fronts (55°-43° S) au cours de la mission ANTARES 1 (PINTURIER *et al.*, soumis). Les lipides sont donc un composant minoritaire du pool de carbone organique détritique. Au niveau des prélèvements de surface, on note une très forte concentration en

matière organique dans l'échantillon de glace, comparé aux particules en suspension prélevées en eaux libres : M4 et M2. Par ailleurs (Fig. 2), les valeurs du rapport Lipides de dégradation/Lipides totaux augmentent au cours du temps dans le piège, mais restent toujours inférieures à celles des particules de la couche euphotique. Le rapport Lipides polaires/Lipides totaux, représentatif de l'état de fraîcheur des particules, présente un comportement inverse, indiquant une sédimentation de matière de plus en plus dégradée. Cependant, ce rapport est encore plus faible pour les suspensions et l'échantillon de glace. Ainsi, les eaux superficielles témoignent d'une situation de type hivernal, avec un fort recyclage et l'absence d'une activité importante chez les autotrophes. En outre, les très grandes vitesses de sédimentation des grosses particules au sud du Front Polaire (Reyss *et al.*, 1995), dues à une forte silicification des diatomées, induisent une bonne préservation du matériel récolté dans les pièges.

L'usage de biomarqueurs lipidiques permet de déterminer quels organismes contribuent à la matière organique particulaire à travers des empreintes spécifiques essentiellement rencontrées dans les phospholipides. Cette classe de composés a donc été séparée des autres classes de lipides. Ne seront abordés ici que les résultats relatifs à la biomasse bactérienne. Le bilan des marqueurs bactériens dans les différents compartiments échantillonnés (Tableau) fait état d'une représentation plus grande de ces marqueurs au niveau des suspensions par rapport au matériel collecté dans le piège, corroborant les résultats précédemment acquis avec les classes de lipides. Sont reportées dans ce tableau les teneurs en composés considérés comme des marqueurs spécifiques des bactéries : l'acide 18:1w7, les acides ramifiés et les acides cyclopropyliques (PERRY *et al.*, 1979), l'acide 16:1w10, souvent associé aux bactéries (NICHOLS *et al.*, 1989), et les acides à très longues chaînes, identifiés comme marqueurs bactériens dans des sédiments Antarctiques collectés au cours de la campagne ANTARES 1 (LAUREILLARD *et al.*, sous presse). Ces composés sont toujours très faiblement représentés dans le piège, alors que leur contribution dans les lipides des particules en suspension et de l'échantillon de glace est nettement plus élevée. Cependant, la tendance inverse est observée dans le cas des acides à très longues chaînes. Les causes possibles de cette discrimination semblent être les suivantes :

- la présence probable dans le piège de matériel fécal zooplanctonique, à grande vitesse de chute, donc ne séjournant pas longtemps en surface. Il s'agirait alors de marqueurs de bactéries entériques.

- la filtration du contenu des pièges sur membrane 0,2 $\mu$ m au lieu de filtres GF/F (0,7 $\mu$ m), classiquement utilisés pour la filtration d'eau de mer. Seraient ainsi récupérées des bactéries libres qui auraient adhéré aux agrégats au cours de leur transit vertical (JACKSON, 1989), puis se seraient détachées postérieurement dans les godets.

En dépit d'un contraste important dans la composition de la biomasse chlorophyllienne entre la station M2 et la zone du pack (GOEYENS *et al.*, FIALA *et al.*, MARTY, workshop Montpellier, Mai 96), l'abondance et la diversité des différentes classes de lipides ainsi que celles des marqueurs bactériens sont semblables pour les deux sites échantillonnés en surface. Cependant, des variations dans les contributions relatives de ces marqueurs soulignent des différences dans la composition des assemblages bactériens.

## REFERENCES :

JACKSON G. A. (1989) Simulation of bacterial attraction and adhesion to falling particles in an aquatic environment. *Limnology and Oceanography*, **34**, 514-530.

LAUREILLARD J., L. PINTURIER, J. FILLAUX and A. SALIOT (sous presse) Organic geochemistry of marine sediments of the Subantarctic Indian Ocean sector : Lipid classes - sources and fate. *Deep-Sea Research*.

NICHOLS P. D., J. K. VOLKMAN and D. A. EVERITT (1989) Monounsaturated fatty acids in oceanic particules. *Oceanologica Acta*, **12**, 393-403.

PERRY G. W., J. K. VOLKMAN, R. B. JOHNS and H. J. BAVOR Jr (1979) Fatty acids of bacterial origin in contemporary marine sediments. *Geochemica et Cosmochimica Acta*, **43**, 1715-1725.

PINTURIER L., LAUREILLARD J., FILLAUX J. and A. SALIOT (soumis) Sedimentation in the Frontal Zone of the Southern Ocean (Indian sector) I Changes in the lipid sedimentary record. *Deep-Sea Research*.

REYSS J. L., C. ORGANO, N. LE BEC and S. SCHMIDT (1995) Sedimentation rate in South Ocean from  $^{230}\text{Th}_{\text{xs}}$  downcore distributions. *Symposium "Carbon Fluxes and Dynamic Processes in the Southern Ocean : Present and Past"*, Brest, 28-31 August 1995 (abstr.).

VESCOVALI I. et J.C. MARTY (1996) Flux de carbone et d'azote organiques particulières en Méditerranée et dans divers environnements océaniques. *Mémoire DESS*, Villefranche-sur-mer.

## LEGENDE DES FIGURES

Figure 1 : Abondance des lipides totaux pour le matériel recueilli dans les godets du piège dérivant M4 (en  $\mu\text{g}/\text{temps donné}$ ) et pour les échantillons de surface : glace et particules en suspension (en  $\mu\text{g}/\text{l}$ ). Rapport  $\Sigma\text{Lipides}/\text{COP}$  en pourcentages.

Figure 2 : Rapports  $\Sigma\text{Lipides polaires}/\Sigma\text{Lipides totaux}$  et  $\Sigma\text{Lipides de dégradation}/\Sigma\text{Lipides totaux}$  en pourcentages.

### **Antares 3: Panache Kerguelen**

**Stéphane BLAIN (1), Sauveur BELVISO (2), Christian BRUNET (3),  
Tanguy CAUBERT (1), Edwige CHARRIAUD (4), Julien FLOCH (1),  
Véronique MARTIN-JEZEQUEL (5), Michel PANOUSE (6),  
Phillipe PONDAVEN (1), Louise ORIOL (6), Young PARK (4)  
et Paul TREGUER (1)**

(1) UMR 1513, IUEM, 6 avenue le gorgeu, BP 809, F-29285 Brest cedex.

(2) UPR CNRS 2101, CFR Domaine du CNRS, F-91198 Gif sur Yvette.

(3) URA CNRS 2076, LPCM, Tour 24-25, Université Pierre et Marie Curie, 4  
place Jussieu,

F-75252 Paris cedex 05; (4) LOP du MNHN, 43 rue Cuvier F-75005.

(5) UPR CNRS 9041 Station biologique de Roscoff, place Georges Teissier F-29680  
Roscoff.

(6) URA CNRS 2071 Laboratoire Arago, OOB, F-66650 Banyuls sur mer.

## INTRODUCTION

L'étude du panache des Iles Kerguelen se situe dans le contexte général de la recherche des facteurs qui contrôlent la production phytoplanctonique dans le système HNLC qu'est l'Océan Antarctique (Tréguer et Jacques 1992). La perturbation introduite par la présence d'une île conduit à une augmentation locale de la biomasse visible sur les images

issues du satellite CZCS (figure 1) et confirmée par des données partielles acquises lors de campagne antérieures (Antiprod I, Antiprod II, Antiprod III, SUZIL).

Plusieurs hypothèses peuvent être avancées pour interpréter cette observation:

- dérive de la biomasse originaires des nombreuses baies de l'île.
- modification de l'environnement physique (diminution de la turbulence)
- ensemencement des eaux du large par un élément potentiellement limitant dans ces régions tel que le Fe comme cela a pu être observé par ailleurs ( Iles galapagos ,Martin et al., 1994).

## **MATERIEL ET METHODES**

La série de 13 stations réalisées au nord-est des Iles Kerguelen (figure 2) avait pour objectif d'obtenir une description spatiale la plus complète possible du panache, afin de tester chacune d'entre elles. L'étude a été menée sur une période de 96 h. Elle a permis d'obtenir une description spatiale de la région sur le plan physique (salinité, température), chimique (pCO<sub>2</sub>, nitrate, silicate, ammonium, fer, DMSP) et biologique (chlorophylle, silice biogène, comptage et identification de phytoplancton et zooplancton).

Les méthodes d'échantillonnage et d'analyse des différents paramètres sont rapportés dans les chapitres de ce même volume relatifs à chaque paramètre.

## **RESULTATS**

### **Une structure physique complexe**

Les distributions verticales et horizontales des paramètres hydrologiques et des concentrations en sels nutritifs (figure 3-4-5), en particulier l'acide silicique, mettent nettement en évidence trois zones distinctes à l'intérieur du panache.

#### ***Une zone cotière (zone 1)***

Dans cette zone la température de l'eau est supérieure à 1,8 °C et la salinité est inférieure à 33,75 psu. En se rapprochant de la côte, la déssalure augmente par des apports d'eau douce,

en provenance du des îles Kerguélen, conformément à une situation antérieurement décrite (Murail et al 1977).

***Une intrusion méridienne des eaux antarctiques superficielles. (AASW) (zone 2)***

Des eaux salées ( $33,9 < S < 34$ ), froides ( $1,5 < \theta < 2^{\circ}\text{C}$ ) et riches en acide silicique ( $> 22 \mu\text{M}$ ) s'écoulent du sud vers le nord parallèlement à la pente continentale à l'est des Kerguélen. Ces eaux antarctiques (AASW) forment une bande étroite (environ 100 km) s'amenuisant vers le nord et formant un front intense avec les eaux de la zone côtière.

***Une zone "large" (zone 3)***

La température, la salinité et la concentration en acide silicique sont voisines de celles observées dans la région côtière. Contrairement aux eaux côtières cette région n'est pas séparée de la bande d'AASW par un front marqué, autorisant un mélange des masses d'eau.

**Etude biogéochimique**

***Distribution de la biomasse.***

La bande d'eau antarctique superficielle identifiée précédemment est aisément repérable sur les distributions de paramètres biogéochimiques.

La figure 6 montre une faible biomasse chlorophyllienne dans cette région, de même pour la distribution de la silice biogène.

Les concentrations en chlorophylle-a sont les plus élevées dans la zone du large. Ceci est en accord avec les comptages des principales espèces phytoplanctoniques (diatomées et dinoflagellés) (figure 7). La distribution apparente de la silice biogène révèle une abondance d'organisme siliceux plus importante dans la région côtière. Ceci est en contradiction avec les

comptages des diatomées mais résulte probablement du fait de la non correction de la biomasse siliceuse de la fraction lithogène nécessairement abondante près de la côte.

### ***Distribution de marqueurs de l'activité biologique.***

D'autres indicateurs confirment une activité biologique plus importante dans la zone du large (figure 8). Ainsi la pression partielle de CO<sub>2</sub> en surface présente un déficit par rapport à l'atmosphère. De même la concentration en DMSP se trouve être maximale dans cette région, ainsi que les concentrations en ammonium.

### ***Influence terrigène***

Les concentrations en fer sont nettement différentes dans les trois régions identifiées (figure 9). A proximité de la côte et lorsque les fonds sont peu profonds les concentrations en fer sont élevées (5-30 nM).

Dans l'ASSW les concentrations en fer mesurées sont très faibles (< 1nM). Ceci est en accord avec d'autres mesures obtenu dans la POOZ (de Baar et al. 1995) et confirme l'origine océanique de cette masse d'eau.

Dans la zone 3 les concentrations sont intermédiaires entre celles mesurées près de la côte et celle de l'AASW, permettant de mettre en évidence une influence terrigène sur cette zone du large.

Ainsi les eaux de la zone 1 pourraient-elles contourner par le nord la bande d'eau AASW et venir enrichir en fer la zone 3. Cette hypoyhèse doit être confirmée par d'autres analyses en cours (métaux dissous Mn et Al notamment ou particulaire Al).

## **REFERENCES**

MURAIL J.F., P. DAVID ET M. PANOUSE, (1977) Hydrologie du plateau continental des îles Kerguelen. Résultats scientifiques de la campagne MD04/Benthos CNFRA, 42, 41-64.

DE BAAR H.J.W., J.T.M. DE JONG, D.C.E. BAKKER, B. M. LÖSCHER, C. VETH, U. BATHMAN AND V. SMETACEK, (1995) Importance of iron for plankton blooms and carbon dioxide drawdown in the southern ocean. *Nature* 373, 412-414.

TREGUER P AND G. JACQUES (1992) Dynamics of nutrients and phytoplankton, and fluxes of carbon, nitrogen and silicon in the Antarctic ocean. *Polar Biol.* 12, 149-162.

MARTIN J.H. AND OTHER (1994) Testing the iron hypothesis in ecosystem of the equatorial Pacific Ocean. *Nature* 371, 123-129.

### Légende des figures:

**Figure 1:** Visualisation du panache de chlorophylle au nord-est des Iles Kerguelen à partir d'une image CZCZ. En gris foncé les régions enrichies en chlorophylle. La pénétration de l'eau ASSW (voir texte & 3.1) pauvre en biomasse le long du plateau est nettement visible témoignant ainsi du caractère persistant de cette structure.

**Figure 2:** Stations et trajet lors de l'expérience panache de ANTARES 3

**Figure 3:** distributions horizontales de température et de salinité à 50m (haut) et à 200 m(bas) . A 50 m la zone ayant une température inférieure à 1.8 °C et une salinité supérieure à 33.9 est hachurée.

**Figure 4:** Distributions verticales des paramètres hydrologiques sur les deux radiales. Radiale nord avec les stations 6, 11, 13, 14 et radiale sud avec les stations 2, 7, 10, 12,14.

**Figure 5:** Distribution horizontale de la concentration en acide silicique.

**Figure 6:** Distribution horizontale de la chlorophylle a (en haut) et de la silice biogénique (en bas)

**Figure 7:** en haut comptage des espèces phytoplanctoniques (diatomées et dinoflagellés). des silicoflagellés sont présentes en faible nombre aux stations 8,10,11,13 et 14 alors qu'elles sont totalement absentes aux stations côtières. en bas pourcentage de microplancton.

**Figure 8:** en haut: pression partielle de CO<sub>2</sub> dans l'eau de surface  
au milieu concentration en ammonium  
en bas concentration en DMSP

**Figure 9:** distributions horizontales des concentrations en fer dissous (< 0.45 µm) à deux profondeurs: 30-50m en haut et 100-110 m en bas.

### **Distribution verticale de l'activité bactérienne, du carbone et de l'azote organique total dans le secteur Indien de l'Océan Austral durant la mission ANTARES III**

**Seri, C. YORO<sup>1</sup>, Richard SEMPERE<sup>1</sup>, Madeleine GOUTX<sup>1</sup>,  
France VAN WAMBEKE<sup>1</sup>, Micheline BIANCHI<sup>1</sup>, Gustave CAUWET<sup>2</sup>,  
Louise ORIOL<sup>2</sup>, Philippe PONDHAVEN<sup>3</sup>, et Julien FLOC'H<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>Laboratoire de Microbiologie Marine, CNRS UPR 223 , 13288 Marseille Cedex 9,

<sup>2</sup>GDR Interactions continent-océan (CNRS GDR 909), Laboratoire Arago, 66650 Banyuls sur Mer. <sup>3</sup>  
Laboratoire Flux de Matière, UA CNRS 1513, 29285 Brest Cedex.

## **INTRODUCTION**

La sels nutritifs (Jones et al., 1990) et le régime oligotrophe de la production primaire ne dépassant pas 20 g C m<sup>-2</sup> an<sup>-1</sup> (Tréguer et Jacques, 1992), fait de l'Océan Austral un système paradoxal (high nutrient- low chlorophyll) et un champ expérimental original. Lors de la campagne Antares III (27 sept.- 8 nov. 1995) réalisée à bord du navire "Marion Dufresne II", une partie de nos objectifs était d'étudier la répartition verticale dans la colonne d'eau de la biomasse et de la production bactériennes, ainsi que celles du carbone et de l'azote organique totaux afin de quantifier l'importance de ces différents paramètres dans les différents sous-systèmes de cet océan.

## **MATERIEL ET METHODES**

### **Prélèvements**

Les prélèvements ont été effectués à l'aide de bouteilles Niskin montées sur une Rosette équipée d'une bathysonde, au niveau de la zone côtière des îles Kerguelen durant l'opération "Panache", ainsi que le long de la radiale 62°E entre 49° et 59°S jusqu'à la limite du pack de glace.

Les prélèvements destinés aux analyses de carbone et d'azote organique sont réalisés directement en sortie des bouteilles Niskin sans utilisation de tuyau et avant les autres échantillonneurs afin d'éviter toute source de contamination. Ces échantillons sont recueillis dans des tubes en verre préalablement calcinés à 450°C pendant 6 heures et fermés avec des bouchons téflonés rincés à l'eau Milli-Q. Dans les 30 minutes suivant les prélèvements, les échantillons non filtrés sont ramenés dans un container " propre de chimie" et empoisonnés sous une hotte à flux laminaire avec du chlorure mercurique (HgCl<sub>2</sub>) à une concentration finale de 10 mg l<sup>-1</sup>. Les tubes sont ensuite entourés de ruban en téflon au niveau des bouchons et stockés à 4°C à l'obscurité. Ceux destinés à la mesure de la production et de l'abondance bactérienne ont été réalisés dans des flacons de 500 ml en polycarbonate noirs préalablement rincés avec de l'eau milli-Q puis avec l'eau des prélèvements avant échantillonnage.

### **Production bactérienne**

La production bactérienne a été déterminée par incorporation de leucine tritiée selon le protocole de Kirchman et al. (1985). Des duplicats d'échantillons (20 à 100 ml) sont incubés en présence d'un mélange L-(4,5-<sup>3</sup>H) leucine et L-leucine en concentrations finales de 0,97 nmol l<sup>-1</sup> et 30 nmol l<sup>-1</sup> respectivement. L'incubation est réalisée à température *in-situ* à l'obscurité pendant 1 à 4 heures suivant la profondeur du prélèvement. L'arrêt de l'incubation se fait par ajout d'acide trichloroacétique (TCA: 5% en concentration finale) aux duplicats. Le témoin est préparé suivant le même protocole mais en ajoutant le TCA immédiatement après la leucine. Ces échantillons sont ensuite filtrés sur une membrane Millipore (de type GS) de porosité 0,2 µm. Les filtres sont rincés 3 fois par du TCA 5% froid puis avec de l'éthanol froid à 80%. La radioactivité incorporée sur le filtre est mesurée par un compteur à scintillation de type Packard (précision: 2%) après addition de 5 ml d'un mélange scintillant Ready Safe, les filtres ayant été préalablement dissous dans 1 ml d'acétate d'éthyle. Les résultats obtenus en pmol de leucine incorporée par litre et par heure sont convertis en ng C l<sup>-1</sup> h<sup>-1</sup> en appliquant un facteur de conversion de 3 ng C par pmol de leucine incorporée (Bjornsen et Kuparinen, 1991; Talbot, 1995).

### **Dénombrement bactérien**

Le dénombrement des bactéries a été réalisé par microscopie à épifluorescence couplée à un analyseur d'images (Van Wambeke, 1995) après filtration de 15 ml d'échantillon sur une membrane Nuclepore noire de porosité 0,2 µm et coloration au DAPI (Porter et Feig, 1980). Les lames ont été préparées à bord, puis conservées congelées jusqu'au comptage. L'estimation du nombre de bactéries par ml est effectuée à partir de l'énumération de 30 à 40

champs pris au hasard sur le filtre (coefficient de variation < 15%). Un facteur de conversion de 20 fg C par bactérie (Lee et Fuhrman, 1987) a permis ensuite d'estimer la biomasse bactérienne.

### **Analyse du carbone et de l'azote organique totaux et dissous**

Un TOC 5000 SHIMADZU fonctionnant par oxydation catalytique à haute température (HTCO) (Sugimura et Suzuki, 1988) a été utilisé à terre pour la mesure du carbone et de l'azote organique total (COT et NOT). Le carbone organique dissous (COD) est déterminé par différence entre le COT et le carbone organique particulaire (COP) mesuré par CHN (Benthaleb, comm. pers.). Les modifications suivantes ont été réalisées sur l'instrument initial sans changer le principe d'oxydation:

- la principale amélioration concerne l'utilisation d'un catalyseur SiO<sub>2</sub> enrobé de platine (3%) augmentant le rendement d'oxydation et la durée de vie du catalyseur (Cauwet et al., 1990; Cauwet, 1994; Thomas et al., 1995).

- le branchement en série après le détecteur NDIR (Non-dispersive infrared) de CO<sub>2</sub>, d'un détecteur d'azote total (TN) fonctionnant par chimioluminescence. La concentration en NOT de l'échantillon est déterminée après avoir retiré les valeurs des formes inorganiques NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, NO<sub>2</sub><sup>-</sup> et NH<sub>4</sub><sup>+</sup>. La précision de l'instrument est inférieure à 2% pour un même échantillon et voisine de 5% entre 2 duplicats.

Le blanc en carbone est déterminé par utilisation de la fonction TC blank check de l'instrument et est égal à 9 μM. Cette valeur est ensuite retirée des concentrations en carbone des échantillons analysés. L'instrument utilisé pour les analyses a fait l'objet d'une calibration inter-laboratoires internationale dirigée par J. H. Sharp (Sharp et al., 1995).

### **RESULTATS PRÉLIMINAIRES**

Les valeurs de production bactérienne varient de 1,8 à 20,3 μg C m<sup>-3</sup> h<sup>-1</sup>, diminuant de façon générale avec la profondeur pour les stations du panache (kerguelen), A17, A15 et A11. Les dénombrements bactériens se situent entre 0,1 et 0,5 10<sup>6</sup> bactéries ml<sup>-1</sup> ( Fig. 1, 2 et 3). Ces valeurs sont du même ordre de grandeur (0,1 - 0,6 10<sup>6</sup> bactéries ml<sup>-1</sup>) que celles rapportées au cours de la campagne Antares II (Janv-Mars 1994) par Talbot (1995).

Les valeurs de COT s'échelonnent entre 48 et 81 μM, tandis qu'elles fluctuent entre 46 et 80 μM pour le COD (Fig. 1, 2 et 3), indiquant que le carbone organique se trouve à plus de 95% sous une forme dissoute (< 0,7 μm). D'une façon générale, les maxima de concentrations de COT sont faibles par rapport à d'autres zones situées en océan ouvert telles le Pacifique nord (Benner et al., 1992; Ogawa et Ogura, 1992; Fitzwater et al., 1992), l'Atlantique nord (Thomas et al., 1995) ou la zone du front polaire Antartique (42-52°S; 26-46°W, Dafner,

1992). Les valeurs présentées ici sont néanmoins supérieures dans les 100 premiers mètres à celles rapportées par Wiebinga et De Baar (1995) dans la même zone. Les mesures d'azote organique totale sont encore en cours de réalisation.

La distribution latitudinale de ces différents paramètres intégrés entre 0 et 200 m dans la colonne d'eau indiquent que les productions bactériennes varient de 1,2 à 3,1 mg C m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup> en allant du Nord au Sud le long de la radiale 62°E. La biomasse bactérienne est comprise entre 400 et 1200 mg C m<sup>-2</sup> (Fig. 4). Les valeurs maximales pour ces deux paramètres sont observées au niveau de la zone du front polaire (PFZ). Nos résultats sont proches de ceux rapportés par Talbot (1995) au cours de la campagne Antares II, bien que ses résultats ne concernent que la couche d'eau de 0 à 150 m. Le COT présente des valeurs situées entre 1,4 et 1,7 10<sup>5</sup> mg C m<sup>-2</sup> (Fig. 4).

Les analyses concernant les stations autres que celles précédemment mentionnées sont en cours de réalisation et permettront d'avoir un profil complet le long de la radiale 62°E pour tous les paramètres mesurés.

## REMERCIEMENTS

Nous remercions Patrick Mayzaud pour l'organisation de la mission ANTARES III ainsi que l'équipage du Marion Dufresne II pour son aide lors des manoeuvres de prélèvements.

## REFERENCES

- Benner R., Pakulski, J. D. McCarthy, M. Hedges, J. I. and Hatcher P. G. (1992) Bulks chemical characteristics of dissolved organic matter in the ocean. *Science*, 255, 1561-1564.
- Bjornsen ,P. K. and Kuparinen, J. (1991) Determination of bacterioplankton biomass, net production and growth efficiency in the southern Ocean. *Marine Ecology Progress Series*, 71, 185-194.
- Cauwet , G., Sempéré, R. and Saliot, A. (1990) Carbone organique dissous dans l'eau de mer: confirmation de la sous-estimation antérieure. *C. R. Acad. Sci. Paris*, 311: 1061-1066.
- Cauwet G. (1994) HTCO method for dissolved organic carbon analysis in seawater: influence of catalyst on blank estimation. *Marine chemistry*, 47, 55-64.
- Copin-Montégut, G. and Avril, B. (1993) Vertical distribution and temporal variation of dissolved organic carbon in the North-western Mediterranean Sea. *Deep-Sea Research* 40, N° 10, 1963-1972.

- Dafner, E. V (1992) Dissolved organic carbon in waters of the Polar Frontal Zone of the Atlantic Antarctic in the spring-summer season of 1988-1989. *Marine Chemistry*, 37, 275-283.
- Jones, E. P. J., Nelson, D. M. and Tréguer, P. (1990) Chemical oceanography. In: *Polar oceanography*, W. O. Smith Jr, Academic Press, San Diego, New York, pp. 407-476.
- Kirchman, D. L., Kness, E. and Hodson, R. (1985) Leucine incorporation and its potential as a measure of protein synthesis by bacteria in natural aquatic systems. *Applied and Environmental Microbiology*, 49, 599-607.
- Lee, S. and Fuhrman, J. A. (1987) Relationships between biovolume and biomass of naturally derived marine bacterioplankton. *Applied and Environmental Microbiology*, 53, 1298-1303.
- Martin, J. H. and Fitzwater, S. E. (1992) Dissolved organic carbon in the Atlantic, Southern and Pacific oceans. *Nature*, 356, 699-700.
- Ogawa, H. and Ogura, N. (1992) Comparison of two methods for measuring dissolved organic carbon in sea water. *Nature*, 356, 696-698.
- Porter, K. G. and Feig, Y. C. (1980) The use of DAPI for identifying and counting aquatic microflora. *Limnology and Oceanography*, 25, 943-948.
- Sharp, J. H., Benner, R., Bennett, L., Carlson, C. A., Fitzwater, S. E., Peltzer, E. T. and Tupas, L. M. (1995) Analyses of dissolved organic carbon in seawater: the JGOFS EqPac methods comparison. *Marine Chemistry*, 48, 91-108.
- Sugimura, Y. and Suzuki, Y. (1988) A high-temperature catalytic oxidation method for the determination of non-volatile dissolved organic carbon in seawater by direct injection of a liquid sample. *Marine Chemistry*, 24, 105-131.
- Talbot V. (1995) Activité protéolytique et dynamique bactérienne en Océan Austral. *Thèse de Doctorat. Université d'Aix-Marseille II*, 194 pp.
- Tanoue E. (1992) Vertical distribution of dissolved organic carbon in the North Pacific as determined by the high-temperature catalytic oxidation method. *Earth and Planetary Science Letters*, 111, 201-216.
- Thomas, C., Cauwet, G. and Minster, J. F. (1995) Dissolved organic carbon in the equatorial Atlantic Ocean. *Marine Chemistry*, 49, 155-169.
- Tréguer, P. and Jacques, G. (1992) Dynamics of nutrients anurés de ruban en téflon au niveau des bouchons et stockés à 4°C à l'obscurité. Ceux destinés à la mesure de la production et de l'abondance bactérienne ont été réalisés dans des flacons de 500 ml en polycarbonate noirs préalablement rincés avec de l'eau milli-Q puis avec l'eau des prélèvements avant échantillonnage.

Production bactérienne

La production bactérienne a été déterminée par incorporation de leucine tritiée selon le protocole de Kirchman et al. (1985). Des duplicats d'échantillons (20 à 100 ml) sont incubés

en

p

r

é

s

e

n

c

e

d

'

u

n

m

é

l

a

n

g

e

L

-

(

4

,

5

-

3

H)

leu

c  
i  
ne et L-leucine en concentrations finales de 0,97 nmol l<sup>-1</sup> et 30 nmol l<sup>-1</sup> respectivement. L'incubation est réalisée à température in-situ à l'obscurité pendant 1 à 4 heures suivant la profondeur du prélèvement

e  
n  
t  
.

L'  
arrê  
t  
d

e l'incubation se fait par ajout d'acide trichloroacétique (TCA: 5% en concentration finale) aux duplicats. Le témoin est préparé suivant le même protocole mais en ajoutant le TCA immédiatement après la leucine. Ces échantils

l  
o  
n  
s

s  
on  
t en  
s  
u  
i

te filtrés sur une membrane Millipore (de type GS) de porosité 0,2  $\mu$ m. Les filtres sont rincés 3 fois par du TCA 5% froid puis avec de l'éthanol froid à 80%. La radioactivité incorporée sur le filtre est mesurée par un comp

t  
e  
u  
r

à

n

tillation de type Packard (précision: 2%) après addition de 5 ml d'un mélange scintillant Ready Safe, les filtres ayant été préalablement dissous dans 1 ml d'acétate d'éthyle. Les résultats obtenus en pmol de leucine incorp

**Transformations et minéralisation bactériennes de la matière organique dans le secteur indien de l'Océan Austral durant la campagne ANTARES III (7 septembre 1995-8 novembre 1995)**

**Richard SEMPERE<sup>1</sup>, Madeleine GOUTX<sup>1</sup>, Clément YORO<sup>1</sup>,  
France VAN WAMBEKE<sup>1</sup>,  
Micheline BIANCHI<sup>1</sup>, Philippe KERHERVE<sup>2</sup> et Bruno CHARRIERE<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> Laboratoire de Microbiologie Marine, CNRS UPR 223, Case 907, Campus de Luminy, 13 288 Marseille Cedex 9, France.

<sup>2</sup> Laboratoire de Sédimentologie et Géochimie Marine, CNRS UA 715, 52 Avenue de Villeneuve, 66 025 Cedex, France.

## **INTRODUCTION**

Durant le transport vertical une variété de processus comme la fragmentation microbienne (Cho et Azam; 1988; Karl et Knauer, 1988; Smith et al., 1992) ainsi que les phénomènes d'agrégation-désagrégation (Moran et Buesseler, 1992) produisent des petites particules, des colloïdes ainsi que des composés organiques de faibles poids moléculaires (Sempéré et al., 1994) à temps de turnover variables (Kirchman et al., 1992; Amon et Benner, 1994; 1996; Ferrière, 1995; Yoro, 1995). Les objectifs de nos recherches entreprises durant la campagne ANTARES III (7 septembre 1995-8 novembre 1995) en Océan indien Austral (longitude 62° E; latitude *ca.* 49-59 °S ) étaient de récolter dans la colonne d'eau du matériel organique naturel (eau de mer et particules: Fig. 1) et de constituer des microcosmes en laboratoire en condition in situ afin :

- (1) d'observer et de mieux comprendre les transferts de carbone organique du compartiment particulaire ( $> 0.7$  et/ou  $> 60 \mu\text{m}$ ) vers le compartiment dissous ( $< 0.7 \mu\text{m}$ ) via la phase colloïdale ( $0.02$  ou  $0.003 \mu\text{m} < \text{colloïdes} < 0.7 \mu\text{m}$ ).
- (2) de déterminer les constantes de dégradation et de minéralisation bactérienne de ces différents compartiments
- (3) d'estimer les rendements de croissance des bactéries et de définir ainsi les taux de production de  $\text{CO}_2$  des bactéries à partir de la matière organique de taille variable.

## **MATÉRIEL ET MÉTHODES**

## **Échantillonnage**

Les particules ont été récoltées à l'aide (1) de pompes in situ (Challenger Oceanic) équipées pour l'opération soit de filtres Nuclepore (porosité: 0.6  $\mu\text{m}$ ) soit de filtres en polyéthylène (porosité: 60  $\mu\text{m}$ , rincés au préalable en séquence par de l'HCl 2% et de l'eau milliQ) ainsi que (2) de pièges (Technicap, PPS5) dérivants (*ca.* 48 heures). Les particules récupérées sur les filtres 0.6  $\mu\text{m}$  seront considérées dans ce travail comme des petites particules en suspension (PP: Fig.1), celles récupérées sur les filtres 60  $\mu\text{m}$  ou par les pièges seront considérées comme des particules à vitesses de sédimentation élevées (GP: Fig. 1). Les prélèvements effectués en zone côtière des îles Kerguelen ont été réalisés en utilisant simultanément les deux types de filtres montés en cascades sur chacune des trois pompes bipostes utilisées en palanquée autour d'une profondeur choisie. Néanmoins, cette méthodologie impliquant une limitation du volume total filtré par le filtre 0.6  $\mu\text{m}$  a été abandonnée, ainsi aux stations M2 et M4 nous avons effectué les deux types de pompage par des palanquées consécutives. Le temps de pompage in situ pour ces deux dernières expérimentations a été fixé à 60 minutes et a permis d'obtenir des volumes totaux de filtration variant de 398 l à 592 l pour les petites particules et de 4534 à 6723 l pour les grosses particules. L'eau de mer nécessaire à la constitution des microcosmes de particules (particules + eau stérile de profondeur identique) ainsi que celle utilisée pour les expériences de biodégradation des composés dissous/colloïdaux (eau de mer filtrée sur 0.2  $\mu\text{m}$  et ultrafiltrée tangentiellement sur une membrane de seuil de coupure de 1000 daltons a été récupérée à l'aide de bouteilles Niskin montées sur une Rosette.

## **Constitution des microcosmes**

### ***Dégradation des particules***

Après extraction des filtres, les particules comprenant leur assemblage bactérien sont diluées dans de l'eau de mer du même niveau rendue stérile par filtration sur 0.2  $\mu\text{m}$ . Environ 150 ml sont répartis dans des flacons en verre de 500 ml et sont stockés à l'obscurité à température in situ. Chaque série d'incubations comprend un échantillon empoisonné (contrôle) au  $\text{HgCl}_2$  (concentration finale 10  $\text{mg l}^{-1}$ ) et un duplicat. La reproductibilité entre deux duplicats est inférieure à 7 % et est essentiellement due à une répartition aléatoire des particules dans les flacons. La constitution des microcosmes ainsi que les prélèvements nécessaires s'effectuent sous une hotte à flux laminaire en utilisant du matériel en verre calcinés à 450°C (6 heures). Les incubations de particules ont été suivies pendant une période de 12 jours en moyenne et ont donné lieu à des prélèvements effectués à bord destinés à des analyses chimiques et microbiologiques déjà effectuées à ce jour ou en cours de réalisation (Tableau 1). Brièvement, exceptés ceux destinés à l'étude des

activités bactériennes, ces prélèvements nécessitent de nouvelles filtrations frontales effectuées sur filtre GF/F (COP, lipides, sucres, acides aminés, pigments) et sur filtre Anopore (0.02  $\mu\text{m}$ : COC et LMWOC). Les filtres sont congelés à -20 et -80° C et analysés à terre.

***Dégradation de la matière organique dissoute et colloïdale***

L'eau de mer récoltée par bouteille Niskin est récupérée dans des bouteilles en verre et ensuite filtrée sous hotte à flux laminaire sur filtre Nuclepore de 0.2  $\mu\text{m}$  pour en éliminer les particules ainsi que les bactéries et autres organismes planctoniques. Le filtrat (*ca.* 4 l) est ensuite ultrafiltré tangentiellement sur une membrane polysulfone d'un seuil de coupure de 1000 daltons afin d'obtenir une solution d'eau de mer concentrée en colloïdes ainsi qu'une autre ne comprenant que des composés à faible poids moléculaire (LMWOC). Une proportion équivalente d'une solution d'eau de mer filtrée sur 1  $\mu\text{m}$  et comprenant un assemblage bactérien naturel du milieu est ensuite ajouté aux deux types de solution. Les incubations effectuées dans des bouteille en verre de 500 ml préalablement calcinées à 450 °C (6h) sont stockées à l'obscurité à température *in situ* pendant *ca.* 12 jours et prélevées régulièrement pour des analyses ultérieures de COD ainsi que des mesures d'abondances et de productions bactériennes. Le détail des prélèvements est donné Tableau 1.

Station Depht	Panache		M2			M4			M2 T 200 m	M4 T 200 m
	200 m		50 m	200 m		50 m	200 m			
UF 1000 Da	x		x	x		x	x			
Particules	PP	GP		PP	GP	GP	PP	GP		
BCP	x	x		x	x	x	x	x	x	x
BB	x	x		x	x	x	x	x	x	x
LMWOC					x	x	x	x		
DOC	x	x		x	x	x	x	x	x	x
COC					x	x	x	x		
POC	x	x		x	x	x	x	x	x	x
Lip.	x	x		x	x	x	x	x	x	
Carb.						x				x
pigments	x	x		x	x	x				
Amino acids						x				

Tableau 1: *Summary of sampling and parameters measured during incubation experiments during ANTARES III. UF: Ultrafiltration (1000 Da); low molecular weight organic carbon; carb.: carbohydrates; lip.: lipids; POC, COC and LMWOC mean particulate, colloidal and low molecular weight organic carbon. BB: bacterial biomass; BCP: bacterial production; MiT means floating sediment trap. POC >0.7  $\mu\text{m}$  > COC > 0.02 or 0.003  $\mu\text{m}$  > LMWOC; COC + LMWOC = DOC.*

## **Analyses**

### ***COD, COT, COP, production et biomasse bactériennes***

Les concentrations en carbone organique dissous et particulaire ont été déterminées respectivement par oxydation catalytique haute température (HTCO: instrument Shimadzu TOC 5000 classique, LMM-Marseille) (Sugimura et Suzuki, 1988; Cauwet et al., 1990) et un analyseur CNS LECO. La production et la biomasse bactériennes ont été mesurées respectivement par la méthode d'incorporation de leucine tritiée (Kirchman et al., 1985) et par microscopie à épifluorescence couplée à un analyseur d'images après coloration au DAPI (Van-Wambeke, 1995) . Ces techniques sont décrites plus en détail dans un autre rapport (Yoro et al., ce volume).

### ***Carbohydrates***

Les filtres congelés sont lyophilisés en laboratoire et extraits à l'H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 1 M à 90°C pendant 4 h et neutralisés au CaCO<sub>3</sub>. La séparation au niveau moléculaire est effectuée par chromatographie haute performance d'échange anionique couplée à une détection à ampérométrie pulsée (HPAEC-PAD; Mopper et al., 1992), avec deux injections isocratiques à 15 et 2.5 mM qui améliore la différenciation de certains composés comme le xylose et le mannose (Kerhervé et al., 1996).

### ***Lipides***

Les lipides sont extraits du matériel particulaire par solvants organiques suivant la méthode de Bligh et Dyer (1959). Leur séparation en classes de composés s'effectue par chromatographie sur couche mince sur chromarods suivant une adaptation des méthodes décrites par Delmas et al. (1984), Parrish (1987) et Goutx et al. (1990). Leur quantification s'effectue par détection à ionisation de flamme à l'aide d'un analyseur Iatroscan TH-10 modèle MKIV.

### ***Analyses en cours de traitement***

Les concentrations des acides aminés libres sont déterminées par une dérivation précolonne et une séparation en phase inverse HPLC et détectés par spectrofluorimétrie.

Les concentrations en pigments sont déterminés par HPLC (J. C. Marty, LPCM, Villefranche/mer).

## **RÉSULTATS PRÉLIMINAIRES**

Une expérience typique est présentée dans ce rapport et correspond à une incubation de particules ("fraîches") récoltées à une profondeur de 50 m à la station M4 le 25/10/95 à l'aide de pompes in situ équipées de filtres 60 µm. Les résultats (Fig. 2) montrent

logiquement que la dégradation de ce type de particules implique une production de carbone organique dissous et colloïdal (ca. 50% du carbone organique particulaire passe rapidement sous une forme de taille  $< 0.7 \mu\text{m}$ ). Ces phénomènes déjà observés en Méditerranée (Yoro, 1995) peuvent s'expliquer par des processus de diffusion (Jumars et al., 1989) de désagrégation (Moran et Buesseler, 1992) ainsi que par l'activité enzymatique bactérienne (Smith et al., 1992) qui au vu de nos expériences en cours semble essentielle. Dans les conditions étudiées, et sur la durée de l'expérience (11 jours) 33% du carbone organique issu de ce type de particules sont minéralisés par la respiration bactérienne en  $\text{CO}_2$  avec un rendement de croissance de 5% indiquant que ca. 95 % du matériel assimilé par les bactéries est minéralisé. En appliquant une cinétique du premier ordre ( $r^2=0.79$ ) pour la durée d'incubation ( $d\text{COP}/dt = k \times \text{COP}$ ; Berner, 1980) ces résultats indiquent une constante de dégradation ( $k_{\text{COP}}$ ) du COP labile à 50 m de  $0,029 \text{ j}^{-1}$  soit un temps de résidence du COP labile ( $1/k_{\text{COP}}$ ) de 28.4 jours. Peu de travaux ont été réalisés sur la biodégradation, néanmoins ces résultats sont proches de ceux rapportés par Harvey et al. (1995) pour l'espèce de diatomée *T. Weissflogii* ( $k_{\text{COP}} = 0.035 \text{ j}^{-1}$ ).

Sur la durée de l'expérience, ca. 50% des carbohydrates et lipides totaux sont dégradés (dissous et/ou reminéralisés). Ces deux types de composés sont significativement dégradés, représentant à  $t_0$  et  $t = 11$  jours respectivement 12-14 % et 7 % du COP (Fig. 3 et 4). La description par une cinétique du premier ordre du taux de dégradation de composés labiles décrits paraît raisonnable ( $r^2$  (lipides totaux) = 0.94;  $r^2$  (carbohydrates) = 0.80) et nous amène à considérer un modèle à plusieurs compartiments (Berner, 1980). Les résultats préliminaires indiquent des constantes de dégradation des lipides totaux labiles et de carbohydrates de  $0.070$  et de  $0.078 \text{ j}^{-1}$  respectivement se situant dans le même ordre de grandeur ( $0.023$  et  $0.092 \text{ j}^{-1}$ ) que celui rapporté par Harvey et al. (1995).

Les autres types d'incubations rapportées dans le tableau 1 sont en cours de traitement.

**Remerciements:** Nous remercions Pierre Sangiardi pour ses conseils et son aide précieuse pour l'utilisation des pompes in situ, Sauveur Belviso pour l'utilisation des pièges dérivants, l'équipage du Marion Dufresnes II ainsi que Andrew Johnston, Patrick Mayzaud et Bernard Olivier pour leur aide sur l'organisation et l'utilisation des différents moyens de prélèvements durant la mission.

## BIBLIOGRAPHIE

Amon, R. M. W. et R. B. Benner 1994. Rapid cycling of high molecular weight dissolved organic matter in the ocean. *Nature*, 369: 549-552.

- Berner, R.A. 1980. Burial of organic matter decomposition during bacterial sulfate reduction in marine sediments, in: *Biogéochimie de la matière organique à l'interface eau-sédiment marin* (R. Daumas, ed.). Editions du CNRS, marseille, France, pp 35-44.
- Bligh, E.G. et Dyer, W.J. 1959. A rapid method of total lipid extraction and purification. *Canadian Journal of biochemical Physiology*, 37: 911-917.
- Cauwet, G, Sempéré, R. et Saliot, A. 1990. Carbone organique dissous dans l'eau de mer: confirmation de la sous-estimation antérieure. *C. R. Acad. Sci. Paris*, 311: 1061-1066.
- Cho, B. C. et Azam, F. 1988. Major role of bacteria in biogeochemical fluxes in the ocean's interior. *Nature*, 332: 438-441.
- Delmas, R.P., Parrish, C.C. et Ackman, R.G. 1984. Determination of lipid class concentration in sea water by thin-layer chromatography with flame ionization detection. *Analytical Chemistry*, 56: 1272-1277.
- Ferrière, L. 1995. Etude de la biodégradabilité du carbone organique dissous et colloïdal en milieu côtier. Étude d'un pilote d'ultrafiltration tangentielle à flux turbulent. Rapport de DEA d'Océanologie. Université Aix-Marseille II. 40 pp.
- Goutx, M., Acquaviva, M., et Bertrand, J. C. 1990. Cellular and extracellular carbohydrates and lipids from marine bacteria during growth on soluble substrates and hydrocarbons. *Marine Ecology Progress Series*, 61: 291-296.
- Harvey, H. R., Tuttle, J. H. et Bell, J. T. 1995. Kinetics of phytoplankton decay during simulated sedimentation: changes in biochemical composition and microbial activity under oxic and anoxic conditions. *Geochimica Cosmochimica Acta*, 59: 3367-3377.
- Jumars, P. A., Penry, D. L., Baross, J. A., Perry, M. J. et Frost, B. W. 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.
- Karl, D. M., Knauer, G. A. et Martin, J. H. 1988. Downward flux of particulate organic matter in the ocean: a particle decomposition paradox. *Nature*, 332: 438-441.
- Kerhervé, P., Charrière, B. et Gadel, F. 1996. Determination of marine monosaccharides by high-pH anion exchange chromatography with pulsed amperometric detection. *Journal of Chromatography*, 718: 283-289.
- Kirchman D. L., Kness, E. et Hodson R. 1985. Leucine incorporation and its potential as a mesure of protein synthesis by bacteria in natural aquatic systems. *Applied and environmental Microbiology*, 49, 599-607.
- Kirchman, D. L., Suzuki, Y., Garside, C. et Ducklow, H. W. 1991. High turnover rates of dissolved organic carbon during a spring phytoplankton bloom. *Nature*, 352: 612-614.
- Mopper, K., Shultz, C. A., Chevolut, L., Germain, C., Revuelta, R. et Dawson, R. 1992. Determinations of sugars in unconcentrated seawater and other natural waters by liquid

chromatography and pulsed amperometric detection. *Environmental Science and Technology*, 356: 133-138.

Moran, S. B. et Buesseler, K. O. 1992. Short residence time of colloids in the upper ocean estimated from <sup>238</sup>U-<sup>234</sup>Th disequilibria. *Nature*, 356: 221-223.

Parrish, C.C. 1987. Separation of Aquatic lipid classes by chromarod thin-layer chromatography with measurement by Iatroscan flame ionization detection. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 44: 722-731.

Sempéré, R., Cauwet, G. et Randon, J. 1994. Ultrafiltration of seawater with a zirconium and aluminum oxide tubular membrane: application to the study of colloidal organic carbon distribution in an estuarine bottom nepheloid layer. *Marine Chemistry*, 46: 49-60.

Smith, D. C., Simon, M., Allredge, A.L. et Azam, F. 1992. Intense hydrolytic enzyme activity on marine aggregates and implications for rapid particle dissolution. *Nature*, 359: 139-142.

Sugimura, Y. et Suzuki, Y. 1988. A high-temperature catalytic oxidation method for the determination of non-volatile dissolved organic carbon in seawater by direct injection of a liquid sample. *Marine Chemistry*, 24, 105-131.

Van Wambeke, F. 1995. Numération et taille des bactéries planctoniques au moyen de l'analyse d'images couplée à l'épifluorescence. *Océanis*, 21, 113-124.

Yoro, S. C. 1995. Étude de la biodégradabilité du carbone organique particulaire en milieu océanique côtier. Rapport de DEA de Microbiologie. Université Aix-Marseille II. 40pp.

Yoro, C., Sempéré, R., Goutx, M., Van Wambeke, F., Bianchi, M., Kerhervé, P., Charrière, B. 1996. Distribution verticale de l'activité bactérienne, du carbone et de l'azote organique total dans le secteur indien de l'Océan Austral durant la mission ANTARES III. *Ce volume*.

### **Distribution latitudinale des pigments au cours de la campagne ANTARES 3 et flux de carbone particulaire.**

**Jean-Claude MARTY et Isabelle VESCOVALI**

Laboratoire de Physique et Chimie Marine  
BP 08  
F-06238 Villefranche-sur mer Cedex

## **INTRODUCTION**

Au cours de la campagne ANTARES III, les pigments phytoplanctoniques (chlorophylles et caroténoïdes) ont été analysés par HPLC à chaque station du transect Nord Sud, et aux deux stations longues (M2 et M4) dans la colonne d'eau et dans les pièges dérivants avec les objectifs suivants :

- Déterminer la structure des populations phytoplanctoniques en utilisant les pigments comme indicateurs des grands groupes phytoplanctoniques
  - Comparer cette structure de Novembre avec celle observée pendant ANTARES II (Février Mars 94).
  - Déterminer les flux exportés vers les couches profondes à la fois sur le plan quantitatif (mesures de carbone) et sur le plan qualitatif (mesure des pigments dégradés)
- D'autre part, nous avons participé à l'opération Panache de Kerguelen et réalisé des études sur les processus à court terme au cours des cycles de 36 heures, et participé aux expériences de dégradation du matériel particulaire en relation avec les autres équipes.

## **MATERIEL ET METHODES**

### **Structure du compartiment phytoplanctonique ;**

Les prélèvements de deux litres ont été réalisés sur les CTD 0-300 m. L'eau de mer a été filtrée sur filtres en fibre de verre GF/F de 25 mm. Les échantillons ont été conservés dans l'azote liquide.

L'analyse est réalisée de retour au laboratoire. Les concentrations pigmentaires ont été mesurées par la techniques de HPLC (Vidussi et al. Sous presse).

2 pièges dérivants

Pour les échantillons en provenance des pièges dérivants, le protocole analytique est identique. Les échantillons sont constitués par une aliquote du matériel recueilli (contenu du godet) qui est filtrée sur GF/F.

L'analyse du carbone est réalisée sur une autre aliquote à l'aide d'un appareil LECO CHN 90. Le filtre est préalablement traité avec 30 $\mu$ l d'HCl 1N pour l'élimination des carbonates.

## **RESULTATS DISCUSSION**

Les concentrations de chlorophylle a ont été intégrées sur la colonne d'eau à-300 m. Ces concentrations intégrées varient de 7 à 15 mg Chla m<sup>-3</sup>. Ces valeurs sont très faibles, en général plus faibles que celles mesurées aux mêmes stations en février-mars 94 pendant la campagne ANTARES II (Cailliau et al. Sous presse). On peut noter une augmentation de la biomasse du nord vers le sud, depuis la station A17 jusqu'à la station A12.

Les profils verticaux de pigments sélectionnés sont présentés sur la figure 1 (Chlorophylle a) et la figure 2 (fucoxanthine et 19'hexanoyloxyfucoxanthine (19'HF) + 19'butanoyloxyfucoxantine (19'BF)) pour les 7 stations de la radiale Antares. Pour

les stations A18 , A17 A15 on note une distribution régulière de la chla avec la profondeur (la profondeur de la couche homogène atteint près de 130m). Dans la partie sud (A12 et A11) la couche homogène est plus faible (90-100 m). Le profil de la station A14 est très particulier puisque la couche homogène s'étend jusqu'à 250m ; on peut imaginer qu'on observe, à cette station, une plongée des eaux de surface.

L'examen des distributions de la fucoxanthine (caractéristique des diatomées) et de la somme 19'HF+19'BF (caractéristique des flagellés) indique qu'il existe un changement des population dominantes du Nord au Sud. Dans la partie nord (stations A18 à A15) les pigments des flagellés dominent sur ceux des diatomées. La situation s'inverse à partir de la station A14 et très nettement aux stations A12 et A11. Dans l'état actuel de dépouillement des données il s'agit de valeurs de pigments qui n'ont pas été transformées en valeurs de biomasse.

Une autre manière d'exprimer ces variations consiste à utiliser le rapport fp (Claustre 1994), proxy du f ratio de Eppley et qui exprime la part de la biomasse issue de production « nouvelle » (par rapport à la biomasse totale issue de production nouvelle et régénérée). Ce rapport fp dont les variations sont reportées sur la figure 3 indique une augmentation régulière du nord au sud, ce qui indique que la biomasse issue de la production nouvelle (diatomées essentiellement) représente une part de plus en plus importante vers le sud.

Dans l'état de dépouillement actuel des données, il ne semble pas y avoir de distribution particulière des pigments près du pack.

Le contenu des trappes dérivantes déployées au stations longues (M2 et M4) n'a pas encore été analysé au niveau des pigments. Actuellement les seules analyses disponibles concernent le C et N organiques. Les flux de COP sont très faibles environ 0.1 mg/m\_/heure aussi bien en M2 qu'en M4. La variabilité à l'échelle de 4 heures est importante comme on peut le voir en figure 4. Pour l'expérience M2 on note que les flux les plus intenses sont observés la nuit (résultat du broutage ?). Pour M4, on note un flux très élevé en début d'expérience (le 20 Octobre) avant que le piège soit pris dans les glaces, et moins variable après.

Evidemment les informations tirées de l'analyse des pigments seront beaucoup plus expressives sur la nature des processus engagés.

## **BIBLIOGRAPHIE**

Cailliau C., H. Claustre and S. Giannino. Chemotaxonomic analysis of phytoplankton distribution and fate in the Indian sector of the Southern Ocean during late austral summer : implications for local variations in recycling and export carbon. *Oceanol. Acta.* (sous presse)

Claustre H. 1994. The trophic status of various oceanic provinces as revealed by phytoplankton pigments signature. *Limnol. Oceanogr.*, 39 : 1207-1211.

Vidussi F., H. Claustre, J. Bustillos-Guzman, C. Cailliau, J.C. Marty. Determination of chlorophyll and carotenoids of marine phytoplankton : separation of chlorophyll a from divinyl-chlorophyll a and zeaxanthin from lutein. *J. Plank. Res.*, 12, (sous presse).

**Figure 1:** Profils verticaux de Chlorophylle a en ng/l pour les 7 stations de la radiale Antares 3

**Figure 2:** Profils verticaux de fucoxanthine(carrés noirs) et de 19' hexanoyloxyfucoxanthine (19'HF) + 19' butanoyloxyfucoxanthine (19'BF) (carrés clairs) en ng/l pour les 7 stations de la radiale Antares 3.

**Figure 3:** Variations du rapport fp, des rapports Fucoxanthine sur Chlorophylle a (Fuco/Chla) et 19' hexanoyloxyfucoxanthine + 19' butanoyloxyfucoxanthine) sur Chlorophylle a (19'HF+19'BF/ Chla) en fonction de la latitude

### **Production Primaire, production de silice biogénique (Bsi), dissolution de BSi, stock de Bsi**

**Tanguy CAUBERT**

Institut Universitaire Européen de la Mer, UMR 1513  
6 Av. Le Gorgeu, B.P. 809, 29285 Brest cedex

## **ECHANTILLONNAGE ET METHODOLOGIE**

### **Production primaire :**

Les profondeurs des prélèvements sont respectivement 100, 25, 10, 3, 1 et 0,1 % de la lumière incidente. Les incubations débutent à l'aube et durent 24 h (in situ simulées) après inoculation de  $\text{Na}_2^{14}\text{CO}_3$ . L'eau de mer incubée est filtrée sur filtre P.C. 0,6  $\mu\text{m}$  ou successivement sur filtre P.C. 10  $\mu\text{m}$  puis 0,6  $\mu\text{m}$ . Les filtres sont stockés à - 20°C dans les fioles de comptage. Au laboratoire, après décarbonatation par HCl et addition de liquide scintillant, les filtres sont comptés en scintillation liquide.

*panache Kerguelen,* station K12, 1 échantillon de surface  
*transect,* station A18, 1 profil entre 100 et 0,1 % de lumière  
 station A15, 1 échantillon de surface  
*stations longues M2 et M4,* 9 profils + 1 dandonette entre 100 et 0,1 % de  
 lumière

### **Production de silice biogénique :**

Les profondeurs des prélèvements sont respectivement 100, 25, 10, 3, 1 et 0,1 % de la lumière incidente. Les incubations débutent à l'aube et durent 24 h (in situ simulées) après inoculation de  $^{32}\text{Si}(\text{OH})_4$ . L'eau de mer incubée est filtré sur filtre P.C. 0,6  $\mu\text{m}$  ou successivement sur filtre P.C. 10  $\mu\text{m}$  puis 0,6  $\mu\text{m}$ . Les filtres sont stockés dans les fioles de comptage. Au laboratoire, après addition de HF diluée, les filtres sont comptés par effet cerenkov.

*panache Kerguelen,* station K8 et K12, 2 échantillons de surface  
*transect,* station A18, 1 profil entre 100 et 0,1 % de lumière  
 station A15, 1 échantillon de surface  
*stations longues M2 et M4,* 9 profils totalisant 69 échantillons entre 100 et 0,1  
 % de lumière

### **Stock de silice biogénique :**

1,2 litre d'eau de mer prélevée à la CTD de référence est filtrée sur filtre P.C. 0,6  $\mu\text{m}$  ou successivement sur filtre P.C. 10  $\mu\text{m}$  puis 0,6  $\mu\text{m}$ . Les filtres sont ensuite séchés une nuit à 60°C et stockés dans des boîtes de pétri en plastique. Au laboratoire la concentration en BSi est déterminée par digestion alcaline.

*panache Kerguelen,* 12 stations avec prélèvements à toutes les profondeurs  
 jusqu'à 200 m.  
*transect,* 5 stations avec prélèvements à toutes les profondeurs  
 jusqu'à 200 m.  
 1 profil profond de 4 profondeurs en A18.  
*stations longues M2 et M4,* 11 profils avec prélèvements à toutes les  
 profondeurs disponibles jusqu'à 200 m.  
*pièges dérivants en M2 et M4,* 27 prélèvements correspondants chacun à 4  
 heures de sédimentation à 200 m.

### Dissolution de silice biogénique :

Les profondeurs des prélèvements sont respectivement 100, 25, 10, 3, 1 et 0,1 % de la lumière incidente. Les incubations débutent à l'aube et durent 24 h (in situ simulées) après inoculation de  $^{30}\text{Si}(\text{OH})_4$ . L'eau de mer inoculée (To) ainsi que l'eau de mer incubée (Tf) sont filtrées sur filtre P.C. 0,6  $\mu\text{m}$ . Les silicates du filtrat sont précipités en complexe silicomolybdique par ajout d'une solution de triéthylaminemolybdate. Au laboratoire, après calcination au four à 900 °C, la silice obtenue est analysée par spectrométrie de masse, pour calculer les vitesses de dissolution.

*panache Kerguelen,* aucun échantillon  
*transect,* station A18, 1 échantillon de surface  
*stations longues M2 et M4,* 8 profils entre 100 et 0,1 % de lumière

### RESULTATS

Production intégrée sur 150 m en  $\text{mmole}/\text{m}^2/\text{J}$  de carbone et de silice biogénique.

	A18	A16 / M2	A10 / M4
Prod. int. de carbone	10,7 le 11/10/95	07,5 le 13/10/95	12,9 le 21/10/95
		09,8 le 14/10/95	22,1 le 22/10/95
		13,3 le 15/10/95	21,3 le 23/10/95
		10,6 le 17/10/95	17,6 le 24/10/95
			26,6 le 25/10/95
Prod. int. de BSi	2,19 le 11/10/95	2,28 le 13/10/95	6,55 le 21/10/95
		3,78 le 14/10/95	6,69 le 22/10/95
		2,85 le 15/10/95	4,93 le 23/10/95
		3,87 le 17/10/95	5,20 le 24/10/95
			7,18 le 25/10/95

### Rapport $\rho$ Si / $\rho$ C en surface

	A18	A16 / M2	A15	A10 / M4
$\rho$ Si / $\rho$ C en surface	0,12 le 11/10/95	0,19 le 13/10/95	0,34 le 17/10/95	0,30 le 21/10/95
		0,20 le 14/10/95		0,40 le 22/10/95
		0,12 le 15/10/95		0,17 le 23/10/95
		0,31 le 17/10/95		0,27 le 24/10/95
				0,21 le 25/10/95

Les échantillons de stock et de dissolution de silice biogénique n'ont pas encore été traités.

Page suivante, figurent les graphes de productions intégrées de carbone et de silice biogénique des campagnes Antares 2 et Antares 3. Pour information, les données d'Antares 2 n'étaient pas encore complètes au workshop de Montpellier.

### **Activité photosynthétique du phytoplancton par classes de taille et par cellule dans le secteur indien de l'océan antarctique au printemps austral 1995**

**Eric FOUILLAND , Chantal DESCOLAS-GROS,  
Claude COURTIES ,Virginie PONS**

Laboratoire d'Hydrobiologie marine et continentale - Université Montpellier II - UMR 5556- CC093  
Place E. Bataillon - 34095 Montpellier Cedex 5

### **INTRODUCTION**

Les objectifs du travail présenté, issu de la campagne ANTARES 3, sont 1- la caractérisation des mécanismes qui sont à la base de la variabilité de la production primaire 2- l'étude du transfert CO<sub>2</sub>- Carbone organique en fonction des classes de taille des communautés et à l'échelle cellulaire.

Les échantillons sont fractionnés en 2 classes de taille par filtration différentielle (coupure à 2 $\mu$ m). Ceci afin d'évaluer la part du flux de carbone associé aux petites cellules

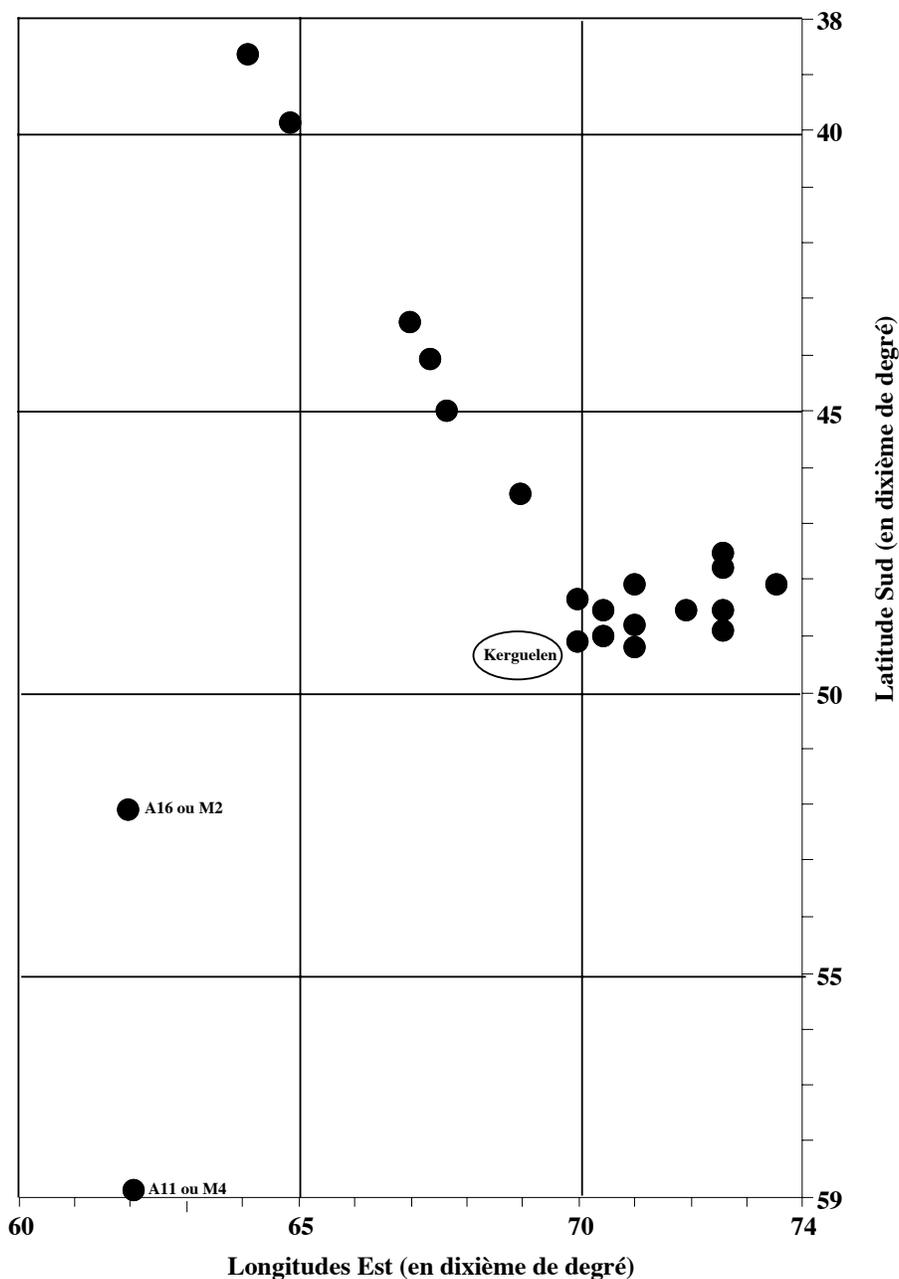
picophytoplanctoniques par rapport à l'ensemble de la communauté phytoplanctonique prélevée. Elles représentent un stock de carbone non sédimentable se recyclant par le biais de la chaîne trophique microbienne. Les relations entre l'incorporation du carbone et les facteurs environnementaux ne sont pas évidentes, du fait des propriétés intrinsèques de chaque espèce et de l'état physiologique des cellules d'un assemblage phytoplanctonique. Parmi ces propriétés, la taille des cellules est un facteur qui semble important pour de nombreux processus métaboliques (De Madariaga et Joint, 1994, Fogg, 1995).

La fixation du CO<sub>2</sub> est abordée sous un angle physiologique et biochimique par mesure de l'activité *in vitro* des carboxylases ces activités permettent de mieux comprendre les mécanismes adaptatifs mis en jeu dans le phytoplancton. L'activité des carboxylases est mesurée sur chacune des classes de taille obtenues. Les mesures concernent l'enzyme **Rubisco**, caractéristique de la fixation de CO<sub>2</sub> par photoautotrophie et les **βcarboxylases** (Glover et Morris, 1979; Fontugne *et al*, 1991; Descolas-Gros et Oriol, 1992). A ces mesures sont associées les dénombrements cellulaires par cytométrie en flux sur la même fraction. Ceci nous permet d'obtenir une mesure de l'**activité autotrophe par biovolume des cellules picophytoplanctoniques**.

## **ZONE ECHANTILLONNEE**

L'échantillonnage, présenté dans la figure 1, s'est effectué dans trois zones distinctes:

- d'une part, en surface le long d'un transect traversant la convergence subtropicale située entre 43°Sud et 46°Sud,
- d'autre part, en surface dans une zone quadrillant le panache Nord-Est des îles Kerguelen,
- et enfin, en surface et à 50-60m de profondeur le long d'un transect situé sur la longitude 62°Est et allant jusqu'aux glaces (58°Sud). Au cours de ce transect, un cycle de 36 heures avec des prélèvements toutes les 4 heures a été effectué à la station A16 (52°Sud) et à la station la plus proche des glaces A11 (58°Sud).



*Figure 1: Stations d'échantillonnage des filtrations différentielles (2 $\mu$ m) des résultats présentés*

## PARAMETRES MESURES

Pour chaque prélèvement d'eau, une filtration différentielle (filtre nuclépore 2 $\mu$ m suivi d'un filtre GF/F) a été effectuée afin de séparer les populations phytoplanctoniques supérieures et inférieures à 2 $\mu$ m. Au cours de cette filtration, des échantillons pour des dénombrements cellulaires sont prélevés dans les filtrats.

Les paramètres mesurés à partir des filtrations et des filtrats sont les suivants:

- un **dénombrement cellulaire** par cytométrie en flux: nombre de cellules.ml<sup>-1</sup> > et < 2μm
- la **chlorophylle a, b et c** mesurées par spectrofluorimétrie (Neveux et Lantoiné, 1993): biomasse chlorophyllienne en μg.l<sup>-1</sup> > et < 2μm
- l'**activité des** carboxylases selon le protocole décrit par Descolas-Gros et Oriol (1992): activité de la Rubisco et des βcarboxylases en nmolCO<sub>2</sub>.h<sup>-1</sup>.l<sup>-1</sup> du phytoplancton > et < 2μm

A partir de ces différentes mesures un certain nombre d'indices sont calculés:

- le rapport **βC/R (%)**: il exprime l'activité des βcarboxylases en pourcentage de l'activité de la Rubisco. Il varie en fonction des espèces présentes, de l'état physiologique des cellules et des conditions environnementales (Mortain-Bertand *et al*, 1988; Descolas-Gros et Fontugne, 1990; Descolas-Gros et Oriol, 1992). Une population dont le rapport **βC/R (%)** est inférieur à 20% présente un métabolisme fixateur de CO<sub>2</sub> de type autotrophe.
- le rapport **R/Chla**: qui exprime l'activité de la Rubisco par unité de chlorophylle a. Ce rapport dépend lui aussi des espèces et des conditions de milieu. Il permet de ramener l'activité autotrophe par une unité de biomasse photosynthétique.
- l'**activité autotrophe par unité de biovolume** des cellules phytoplanctoniques inférieures à 2μm. Elle est calculée en associant la mesure de l'activité de la Rubisco du phytoplancton inférieur à 2μm avec le nombre de cellules.ml<sup>-1</sup> inférieures à 2μm ramené à un biovolume (avec l'hypothèse qu'une cellule d'un diamètre compris entre 0.7 et 2μm est considérée comme sphérique avec un diamètre moyen de 1.35 μm et un volume moyen de 1.3 μm<sup>3</sup>). Cette mesure permet d'appréhender la variabilité de l'activité autotrophe à l'échelle cellulaire.
- la **biomasse chlorophyllienne par unité de biovolume** des cellules phytoplanctoniques inférieures à 2μm. Elle est calculée de la même manière que l'indice précédent en utilisant la mesure de la chlorophylle inférieure à 2μm.

## RESULTATS - DISCUSSION

L'ensemble des paramètres mesurés et des indices calculés sont présentés dans le tableau récapitulatif ci-dessous:

Tableau des moyennes observées des différents paramètres mesurés au cours de la campagne ANTARES 3

	moyennes observées à la convergence en surface	moyennes observées au panache de Kerguelen en surface	moyennes observées sur le cycle 1 en surface	moyennes observées sur le cycle 1 à 50m de profondeur	moyennes observées sur le cycle 2 en surface	moyennes observées sur le cycle 2 à 50m de profondeur
Rubisco Pompe <i>in situ</i> (PIS) en nmolCO <sub>2</sub> .h. <sup>-1</sup> .l. <sup>-1</sup>			8.4	8.4	3.0	4.6
Rubisco fraction sup 2µm	4.9	12.3	2.8	2.2	5.0	6.3
Rubisco fraction inf 2µm	0.8	2.5	4.7	5.7	1.9	2.5
% Rubisco inf 2µm	25	19	63	71	28	27
βcarboxylases PIS en nmolCO <sub>2</sub> .h. <sup>-1</sup> .l. <sup>-1</sup>			0.6	0.7	0.3	0.4
βcarboxylases sup 2µm	0.3	1.6	0.4	0.3	0.4	0.5
βcarboxylases inf 2µm	0.3	1.5	1.2	0.6	0.9	0.9
% βcarboxylases inf 2µm	45	47	73	64	63	64
Chlorophylle sup 2µm	0.22	0.28	0.15	0.14	0.19	0.18
Chlorophylle inf 2µm	0.07	0.06	0.09	0.10	0.08	0.07
% Chlorophylle inf 2µm	24	20	36	42	30	27
chl b/a sup : inf	0.13 : 0.28	0.11 : 0.24	0.08 : 0.28	0.09 : 0.28	0.07 : 0.17	0.07 : 0.20
chl c/a sup : inf	0.10 :	0.09 :	0.14 : 0.15	0.14 : 0.14	0.14 : 0.17	0.14 : 0.22
Concentration cellules sup 2µm	6235	455	213	120	464	190
Concentration cellules inf 2µm	15664	3493	2754	3307	1532	1579
% Concentration cellules inf 2µm	66	88	93	99	86	91
BC/R (%) fraction sup 2µm	8.89	14	16	13	9	9
BC/R (%) fraction inf 2µm	40.27	62	29	11	46	43
R/Chla sup 2µm	23.1	58.0	23.3	18.4	32.4	41.0
R/Chla inf 2µm	18.6	52.9	75.5	69.9	32.9	49.2
βCarboxylase/Chla sup 2µm	1.7	7.8	3.6	2.1	2.9	3.5
βCarboxylase/Chla inf 2µm	10.6	32.1	19.7	7.6	14.7	18.6
R.fmolCO <sub>2</sub> .h. <sup>-1</sup> .µm <sup>-3</sup> fraction inf 2µm	0.1	0.6	1.4	1.3	0.9	1.1
pgC.µm <sup>-3</sup> inf 2µm	0.2	0.5	0.7	0.7	1.3	1.0
fgChl.µm <sup>-3</sup> inf 2µm	6	15	25	24	42	34
fgChla.µm <sup>-3</sup> inf 2µm	5	12	18	17	32	25

## Résultats généraux

Une diminution rapide des stations Nord jusqu'aux îles Kerguelen du nombre de cellules totales (inférieures et supérieures à 2µm) est observée, suivie d'une décroissance moins rapide de la concentration des cellules les plus petites jusqu'aux glaces et une relative stabilisation du nombre des grosses cellules.

La variation de la chlorophylle totale est principalement liée à celle de la biomasse supérieure à 2µm généralement majoritaire, exceptée à la station A16. Ning *et al* (1996) ont rapporté pour la classe de taille inférieure à 2µm un pourcentage moyen de 47% de la chlorophylle totale dans le secteur indien de l'Océan Antarctique. Au cours de la campagne ANTARES 3, la biomasse inférieure à 2µm reste relativement stable autour d'une valeur comprise entre 0,04 et 0,1 µg.l<sup>-1</sup>. D'après des travaux sur différentes classes de taille effectués par Raimbault *et al* (1988) en Méditerranée, la biomasse picophytoplanctonique étaient stationnaire, les variations de la biomasse totale dépendaient des grandes cellules. Ce

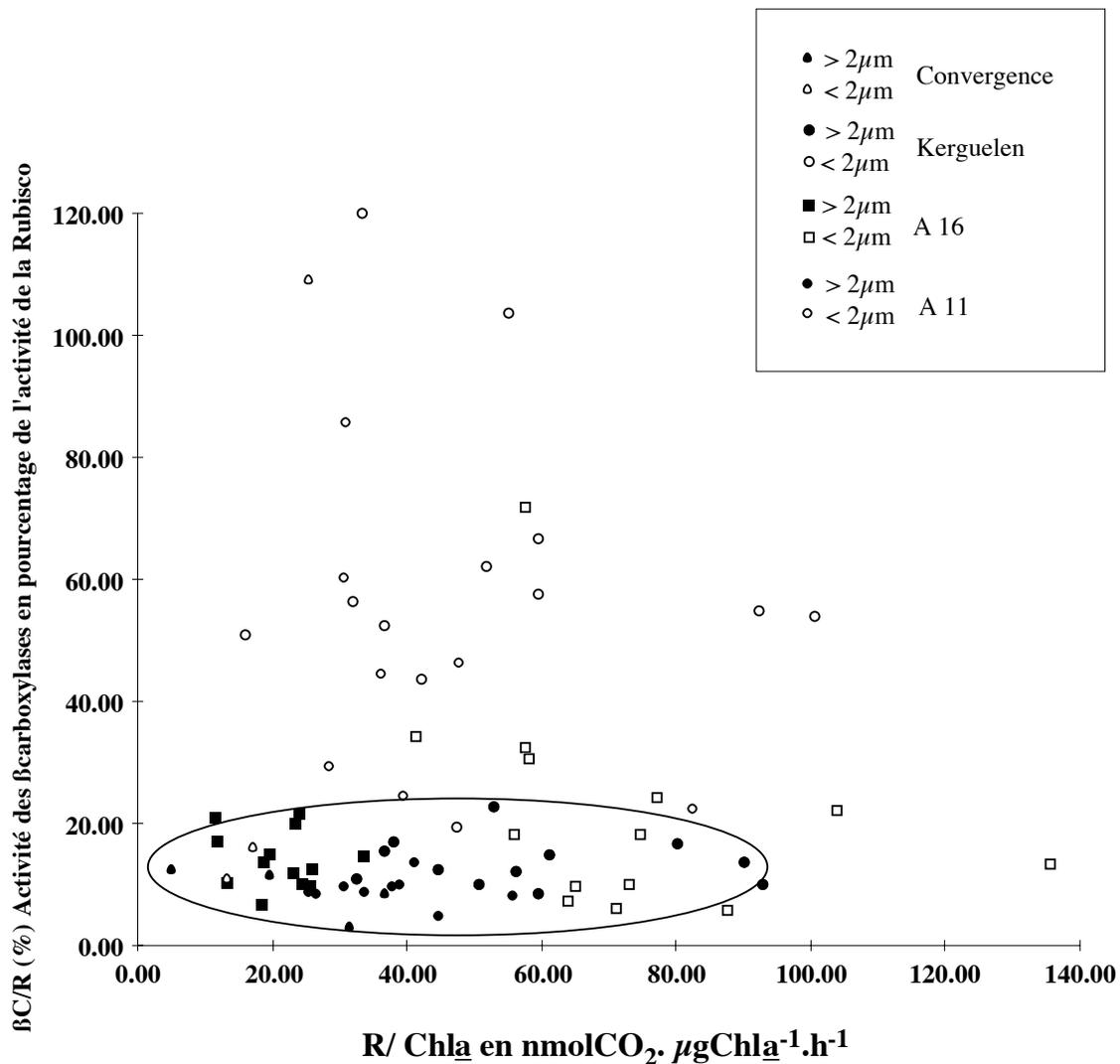
qui est confirmé par Chisholm (1992) qui a repris un certain nombre de fractionnements issus de différents milieux océaniques.

La concentration des cellules  $< 2\mu\text{m}$  diminue du Nord au Sud alors que la biomasse picophytoplanctonique reste constante. Ainsi, la teneur en chlorophylle/cellule  $< 2\mu\text{m}$  augmente jusqu'aux glaces, ce qui montre une adaptation des teneurs en pigments/cellule picophytoplanctonique à un changement de température, de lumière.

Une prédominance de l'activité autotrophe (Rubisco) de la fraction inférieure à  $2\mu\text{m}$  est observée avant la convergence subtropicale (station située la plus au nord) et à la station A16. L'activité autotrophe ramenée à l'unité de chlorophylle  $a$  ( $R/Chl_a$ ) est généralement plus forte dans les eaux Antarctique pour la classe de taille inférieure à  $2\mu\text{m}$ . Une telle prédominance de l'assimilation photosynthétique des petites cellules a été également observée dans le secteur Atlantique de l'Océan Antarctique par Ning *et al*, 1996.

### **Autotrophie par classes de taille et par cellule**

D'après la figure 2, les deux classes de taille se distinguent clairement à partir des valeurs des deux indices ( $BC/R\%$  et  $R/Chl_a$ ).



*Figure 2: Rapport  $\beta C/R$  (%) en fonction de l'activité autotrophe par unité de chlorophylle  $a$  pour les deux classes de taille*

La fixation de C inorganique s'effectue principalement par photoautotrophie pour la classes de taille supérieure à  $2\mu m$ . La voie des  $\beta$ carboxylases est importante (voire prédominante) chez le picophytoplancton ( $<2\mu m$ ). Les voies de fixation du  $CO_2$  ne sont donc pas les mêmes pour les deux classes de taille.

Si l'on compare l'activité autotrophe par classes de taille en fonction de l'activité autotrophe totale (figure 3), on remarque que l'activité autotrophe totale dépend de la fraction supérieure à  $2\mu m$  exceptée à la station A16 où la variation de l'activité totale est principalement liée à celle du picophytoplancton.

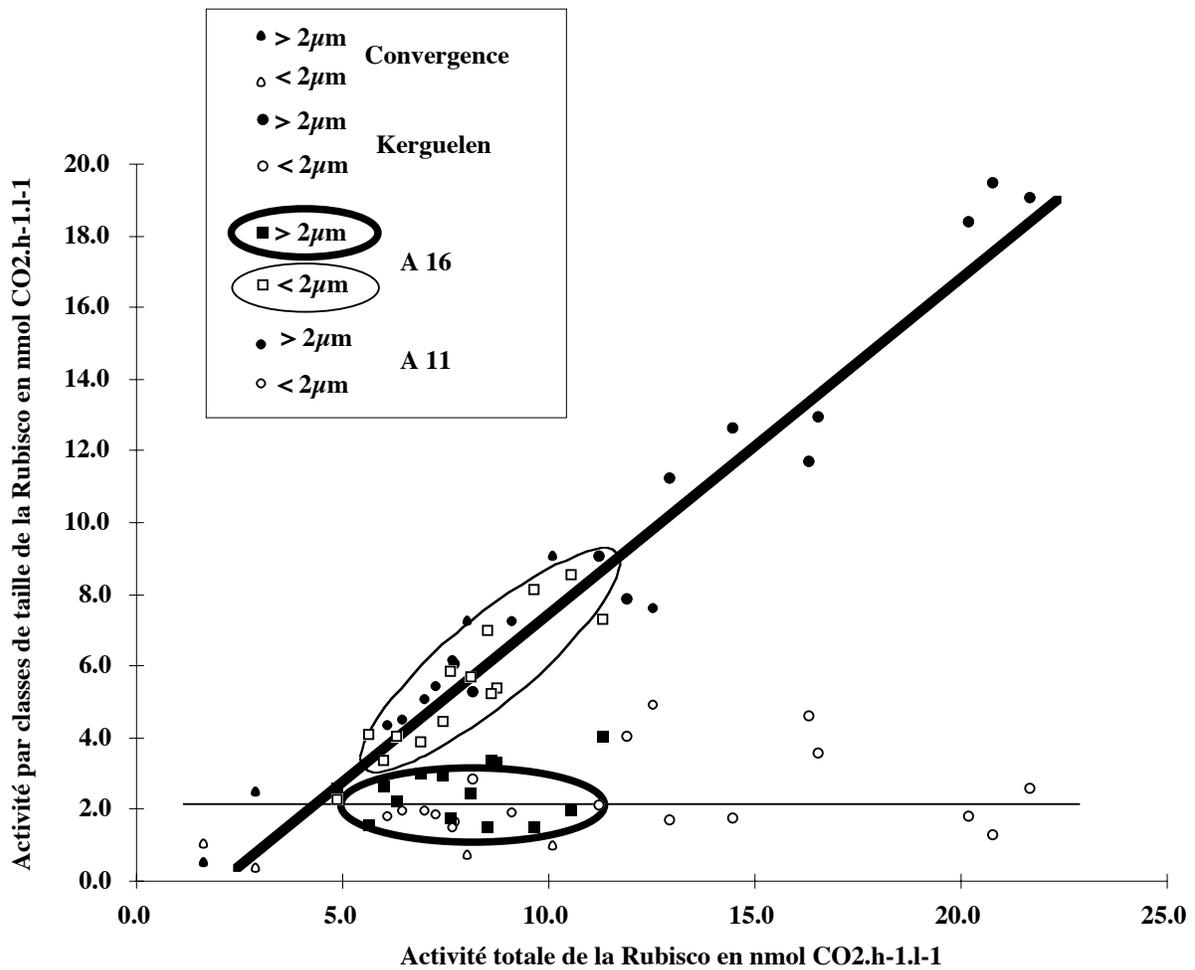
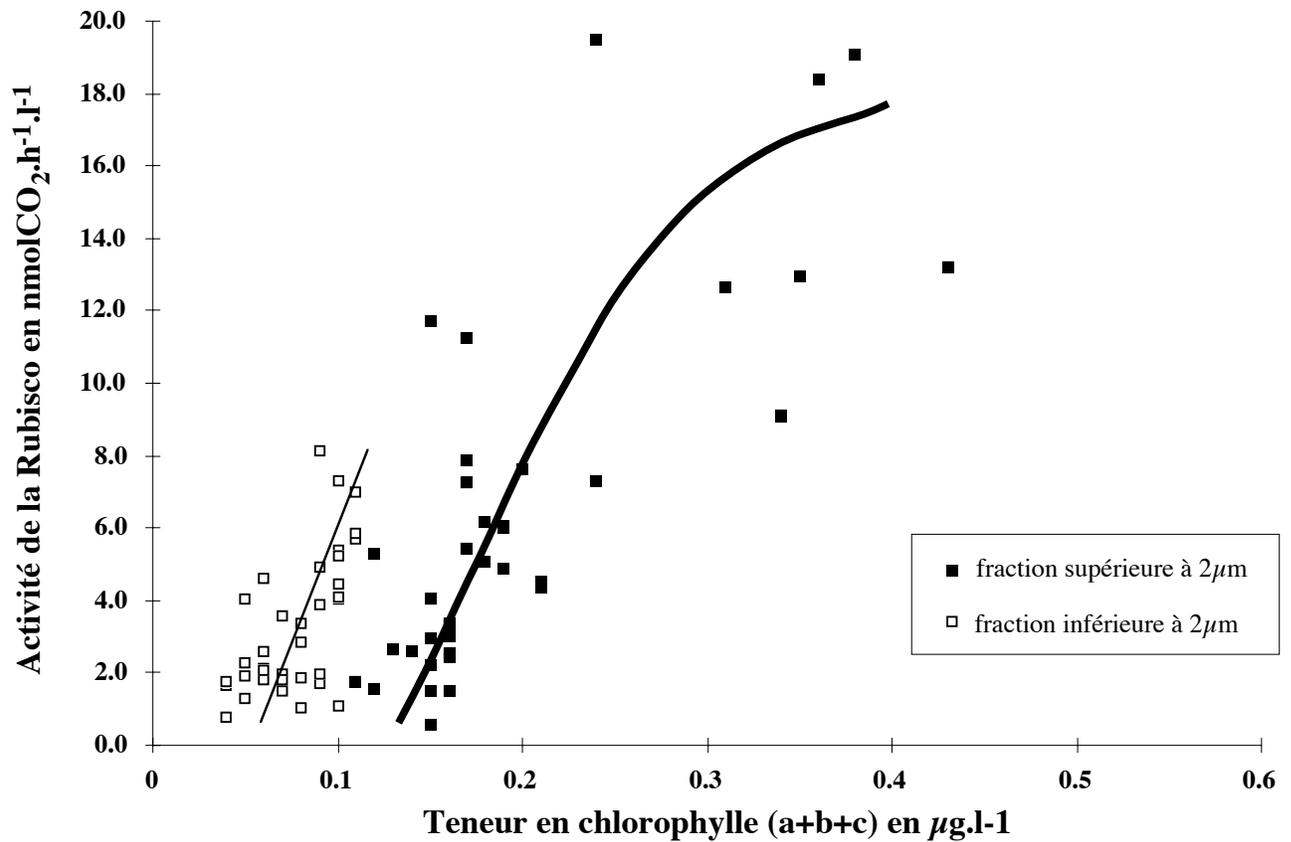


Figure 3: Activité de la Rubisco par classes de taille en fonction de l'activité totale de la Rubisco

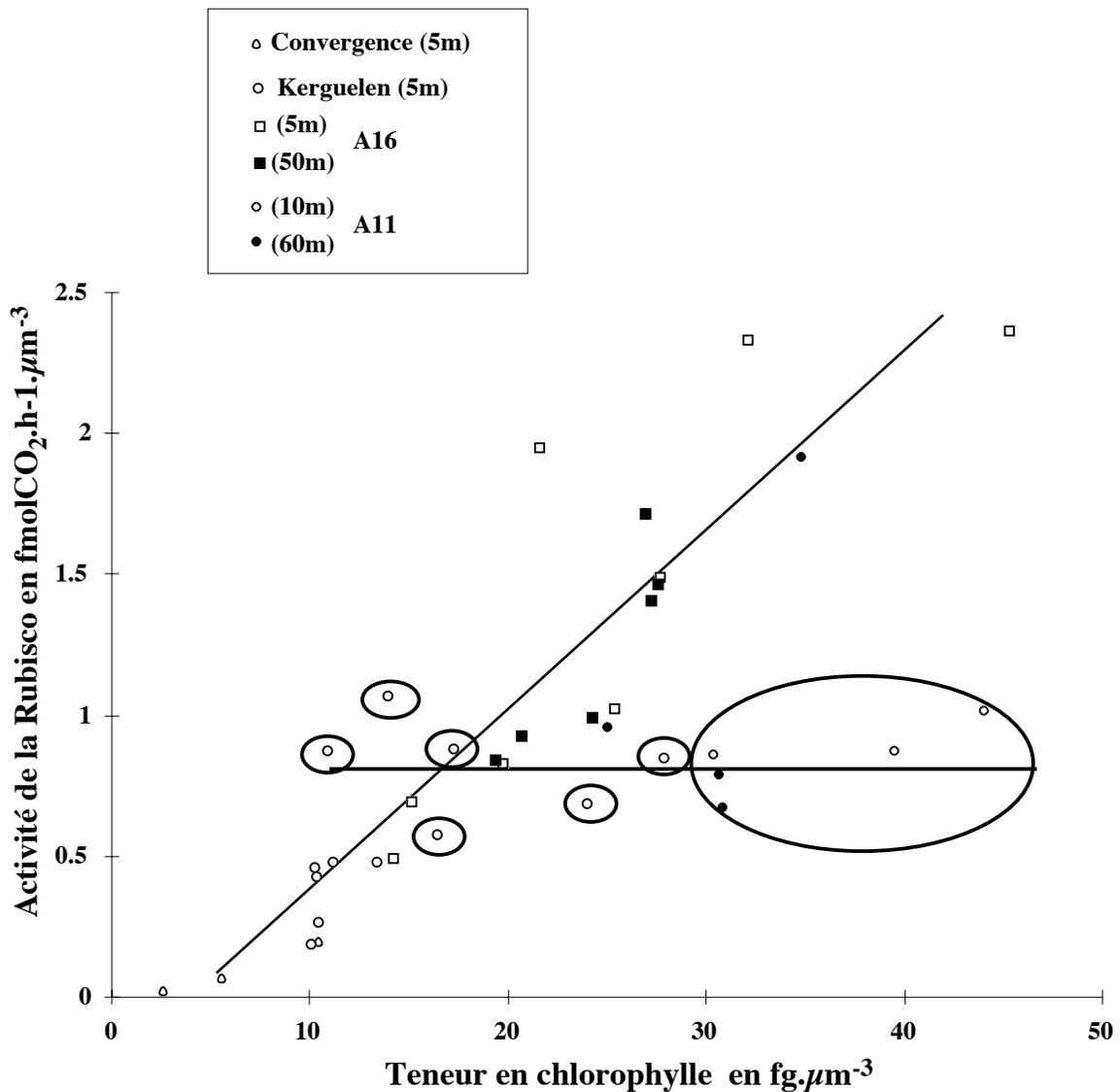
D'après la figure 4, une corrélation positive entre l'activité autotrophe et la chlorophylle est observée dans les deux classes de taille.



*Figure 4: Activité autotrophe en fonction de la biomasse chlorophyllienne par classes de taille*

On observe une limitation du taux de chlorophylle pour la classe de taille  $< 2\mu\text{m}$ , qui atteint un maximum à  $0,1\mu\text{g.l}^{-1}$ . Cette limitation de la concentration en chlorophylle est associée à une activité de la Rubisco maximale plus faible que pour la classe de taille supérieure.

La figure 5 permet de comparer l'autotrophie/ $\mu\text{m}^3$  en fonction de la biomasse/ $\mu\text{m}^3$  de la fraction picophytoplanctonique.



*Figure 5: Activité autotrophe/µm<sup>3</sup> en fonction de la biomasse/µm<sup>3</sup> des cellules phytoplanctoniques inférieures à 2µm. Discrimination de zones à activité autotrophe limitée*

La fixation du CO<sub>2</sub> pour la fraction picoplanctonique met en évidence la relation qui existe entre l'activité autotrophe et la chlorophylle à l'échelle de la cellule picophytoplanctonique. Toutefois un découplage entre ces deux paramètres est observée dans le panache de Kerguelen et à la station la plus proche des glaces (A11). En effet, dans ces stations l'activité autotrophe est stationnaire alors que la teneur en chlorophylle varie de façon importante.

## **BIBLIOGRAPHIE**

- Chisholm S.W., 1992. Phytoplankton size. *in* Primary Productivity and Biogeochemical Cycles in the Sea, Falkowski and Woodhead (eds), New York. Environmental Science Research V.43: 213-237.
- De Madariaga I. et Joint I., 1994. Photosynthesis and carbon metabolism by size-fractionned phytoplankton in the southern North Sea in early summer. *Continental Shelf Research*, 14(2/3): 295-311.
- Descolas-Gros C. et Oriol L., 1992. Variations in carboxylase activity in marine phytoplankton cultures.  $\beta$ carboxylation in carbon flux studies. *Mar. Ecol. Progr.*, 85: 163-169.
- Fogg G.E., 1995. Some comments on picoplankton and its importance in the pelagic ecosystem. *Aquat. microb. Ecol.*, 9: 33-39.
- Fontugne M. R., Descolas-Gros C., De Billy G., 1991. The dynamics of CO<sub>2</sub> fixation in the Southern Ocean as indicated by carboxylase activities and organic carbon isotopic ratios. *Mar. Chem.*, 35 (1-4): 371-380.
- Glover H.E. et Moris I., 1979. Photosynthetic carboxylating enzymes in marine phytoplankton. *Limnol. Oceanogr.*, 24(3): 510-519.
- Neveux J., Lantoin F., 1993. Spectrofluorometric assay of chlorophylls and phaeopigments using the least squares approximation technique. *Deep-Sea Research I*. 40: 1747-1765.
- Ning X., Liu Z., Zhu G., Shi J., 1996. Size-fractionated biomass and productivity of phytoplankton and particule organic carbon in the Southern Ocean. *Polar Biol*. 16: 1-11.
- Raimbault P., Taupier-Letage I., Rodier M., 1988. Vertical distribution of phytoplankton in the western Mediterranean Sea during early summer. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, 45: 153-158.

## **Production, decomposition et flux verticaux des composés soufrés DMSP et DMS dans le secteur est de l'océan antarctique au début du printemps**

**Sauveur BELVISO,**

Centre des Faibles Radioactivités, Gif/Yvette.

## **OBJECTIFS**

Ils étaient les suivants:

- Caractérisation de la richesse en composés soufrés du type DMS et DMSP des eaux superficielles (0-200m),
- Détermination de l'origine du DMSP particulaire: distribution du DMSP en fonction de la taille des particules ( $>10 \mu\text{m}$ ,  $10-0.7\mu\text{m}$ ),
- Mesure des taux de croissance du DMSP particulaire (programme APPA),
- Mesure du temps de résidence biochimique des composés soufrés en solution,
- Quantification des flux verticaux de DMSP particulaire à 200 m de profondeur à courte échelle de temps (quelques heures à quelques jours) et caractérisation des processus à l'origine de ces flux.

## **METHODES ANALYTIQUES**

### **Mesure des composés soufrés DMSP et DMS dans l'eau de mer**

#### **- DMS :**

Préconcentration cryogénique du contenu en DMS de 250ml d'eau suivie par une analyse par chromatographie en phase gazeuse avec détection par photométrie de flamme.

#### **- DMSP dans les filtrats $<10\mu\text{m}$ et $<GF/F$ et dans les échantillons non filtrés :**

Préconcentration cryogénique du contenu en DMS de 60ml d'eau après ajout d'1 ml de NaOH 10M et stockage à la température ambiante pendant au moins 12h. Puis analyse par chromatographie en phase gazeuse avec détection par photométrie de flamme.

Le DMSP particulaire (DMSPp) fractionné est obtenu par différence de concentration entre 2 filtrats indépendants.

Le DMSP en solution (DMSP sol) est obtenu par différence de concentration entre un filtrat  $<GFF$  et le DMS.

### **Teneurs dans les godets des pièges dérivants**

Mesure du pool total DMSP = DMSPp+DMSPsol+DMS:

Après élimination des swimmers à la pince et homogénéisation du contenu du godet

(280 ml de volume total) par rotations successives, prélèvement de quelques ml de la suspension + ajout d'1 ml de NaOH 10M et stockage à la température ambiante pendant au moins 12h + analyse par chromatographie en phase gazeuse détection par photométrie de flamme.

Des échantillons ont également été prélevés pour les mesures de pigments, lipides et acides gras, COP, silice biogénique, baryum.

Un exercice d'intercalibration entre le CFR et l'Université d'East Anglia a été réalisé à bord.

## **RESULTATS ET PREMIERES CONCLUSIONS**

L'exercice d'intercalibration a établi que les étalons utilisés par l'UEA sont à 5% près semblables aux nôtres.

La production et la décomposition des composés soufrés DMSP et DMS ont été étudiées dans le cadre des opérations ANTARESIII-APPA. Des incubations de 24h dites multiparamétriques ont été réalisées aux stations A18, A16(A01), A14 et M4. Elles ont permis de calculer des taux nets de production de DMSP particulaire (DMSPp) et de composés dissous (DMSPsol+DMS). Des taux de production de DMSPp égaux à  $0,4 \text{ j}^{-1}$  ont été observés en A16 et A14 alors qu'en A18 et M4 aucune croissance n'a été observée. Le temps de résidence biochimique des composés dissous a été mesuré à 7 reprises. Il est obtenu en incubant sur le pont pendant 24h des échantillons d'eau de surface enrichis en DMSP de synthèse. Les enrichissements ont été au plus d'un facteur 8 par rapport au bruit de fond naturel des eaux de surface. Un modèle exponentiel est appliqué aux variations temporelles des concentrations à 24h d'intervalle permettant ainsi le calcul d'un taux de production ou de décomposition en  $\text{j}^{-1}$ , dont l'inverse est le temps de résidence. Les échanges eau-air de DMS ont été minimisés en incubant l'eau de mer dans des bouteilles en polycarbonate pratiquement exemptes d'air. La disparition du DMSPsol et du DMS est donc seulement liée à la biologie (décomposition par les bactéries, incorporation aux particules) et à la

photochimie du DMS (incubation sur le pont à 100% de l'éclairement incident). Les taux varient en fonction de la disponibilité du substrat (Figure 1).

Ils sont généralement positifs en l'absence d'enrichissement (6 cas sur 7). L'enrichissement en DMSP conduit à des taux négatifs qui ne varient pas de façon linéaire en fonction de la concentration initiale. En effet, lorsque les enrichissements sont supérieurs à un facteur 2 les taux passent par un maximum de l'ordre de  $-0,3 \text{ j}^{-1}$  en A01 et  $-0,4 \text{ j}^{-1}$  en M4. En début de printemps le temps de résidence minimum des composés dissous est donc de 3 jours en A01 et de 2,5 jours en M4. Comme en A01 le réservoir de DMSPp croît au rythme de  $0,4 \text{ j}^{-1}$  et que celui des composés soufrés dissous peut décroître au rythme de  $-0,3 \text{ j}^{-1}$ , l'écosystème est en conséquence en phase de production de DMSP. Ce n'est probablement pas le cas en M4 les 20 et 21 octobre dans la mesure où la production y est inexistante alors que la décomposition est potentiellement plus importante qu'en A01. Cependant au cours du déplacement du navire vers le nord-est, alors que les taux de décomposition sont toujours restés élevés, les concentrations de DMSPp ont elles augmenté très significativement de l'ordre d'un facteur 2,5 en bordure de la glace de mer. Malheureusement en cette occasion le taux de production du DMSPp n'a pas été mesuré. Le temps de résidence des composés dissous est sensiblement plus long dans les eaux antarctiques qu'en mer Méditerranée (Christaki et al. 1996).

Sept déploiements d'un piège à sédiment PPS5/2 ont été réalisés au cours des campagnes ANTARES II et III, dont deux pendant ANTARES III. Seul le site A01 a été étudié à deux reprises, l'une au début du printemps et l'autre à la fin de l'été. Les flux printaniers de DMSP à 200 m de profondeur correspondent aux valeurs minimales des flux estivaux. A la station M4 où le piège est venu au contact du pack, l'exportation verticale du DMSP ne croît pas sensiblement. Les taux d'exportation à proximité du pack sont égaux à  $0,006 \text{ \%j}^{-1}$  comme dans la POOZ. Ce dernier était 2 à 6 fois plus faible au début du printemps qu'en fin d'été. La POOZ exporte donc plus de

DMSP en été qu'au printemps. La confrontation de ces données aux résultats des campagnes EUMELI et DYNAPROC montre que l'exportation verticale du DMSP dans l'Océan Antarctique est inférieure ou égale à celle des régions sub-tropicales et tempérées de l'hémisphère nord (Corn et al., 1994).

## **BIBLIOGRAPHIE**

Christaki U., S. Belviso, J.R. Dolan & M. Corn. 1996. Assessment of the role of copepods and ciliates in the release to solution of particulate DMSP. Mar. Ecol. Prog. Ser., sous presse.

Corn M., S. Belviso, P. Nival, A. Vigot & P. Buat-Ménard. 1994. Downward flux of particulate dimethylsulfoniopropionate DMSP in areas of the tropical open ocean. Oceanol. Acta 17: 233-236.

## **Distribution du phytoplancton et métabolisme du carbone et de l'azote. Utilisation de marqueurs physiologiques : acides amines libres dissous.**

**Véronique MARTIN-JEZEQUEL, Luis LAMPERT, Anne-Charlotte FASQUEL,  
Olivier RAGUIN**

CNRS UPR 9042, Station Biologique, place Teissier, BP 74, 29680, Roscoff

## **INTRODUCTION**

Le couplage des différents métabolismes du phytoplancton peut être abordé, à l'échelle cellulaire, par l'analyse simultanée d'un certain nombre de paramètres qui définissent :

- 1- L'activité photosynthétique et l'assimilation du carbone inorganique dissous (enzymes tels que Rubisco et bcarboxylases), l'activité photorespiratoire ( glycolate). [cf. Fouilland et al.]
- 2- L'assimilation de l'azote (incorporation d'éléments marqués :  $^{15}\text{N}$ ) [cf. L. Goeyens]

Les acides aminés libres intracellulaires, qui résultent de ces deux métabolismes, peuvent être utilisés comme marqueurs physiologiques des différents statuts carbonés ou azotés des cellules. Ainsi, le rapport GLN/GLU est un indicateur très fiable de l'état azoté (Flynn et al, 1989) et du bon état physiologique des algues (Martin-Jézéquel et al, 1992). L'évolution des pools de SER et GLY est étroitement corrélée à l'activité photorespiratoire des cellules (Martin-Jézéquel et al, 1988 ; Leboulanger et al, soumis), et celles des pools d'ASP et GLU aux activités de la Rubisco et des bcarboxylases (Sciandra et al, soumis ; Martin-Jézéquel et al, in prep.)

De plus, chez les diatomées, les acides aminés libres présentent des rapports spécifiques, liés au métabolisme du silicium. Certaines molécules, comme ASP, ALA et VAL, répondent particulièrement à une déficience de cet élément (Martin-Jézéquel, 1992)

Dans le cadre des campagnes Antares, nous nous sommes donc intéressés à l'étude du couplage de ces métabolismes, en utilisant les acides aminés libres comme marqueurs de différents états physiologiques liés aux éléments concernés (carbone, azote, silicium), en relation avec les paramètres qui définissent la biomasse carbonée et azotée du phytoplancton (protéines), ou sa biomasse siliceuse (silice intraparticulaire). Pour toutes ces études, une collaboration étroite a été menée avec C. Descolas-Gros et E. Fouilland, et L. Goeyens.

## **MATERIEL ET METHODES**

### **Prélèvements in-situ**

- **L'étude de la relation entre les métabolismes du carbone et de la silice**

a été réalisée par l'échantillonnage simultané de : Protéines, Silice intracellulaire et Acides aminés libres intraparticulaires. Un échantillon de 100 ml fixé au lugol acide a été pris pour chaque prélèvement d'eau de mer afin de déterminer les populations phytoplanctoniques dominantes..

#### ***Points :***

Stations hydrologiques échantillonnées : A18, A17, A16 (M2), A15, A14, A12, A11(M4)

Stations Panache : P1 à P14, sauf P5

Stations longues : M2 et M4

#### ***Niveaux :***

Stations hydrologiques : profil à 3 niveaux , surface, maximum de Chl a et 150/200 m de profondeur.

Stations longues : un profil de trois niveaux par station.

Station Panache : Profil à 2 niveaux : surface et 60 m

- **L'étude de la physiologie d'incorporation du carbone**

a été réalisée par l'échantillonnage simultané de : Acides aminés libres intraparticulaires , activité Rubisco et Bcarboxylases [cf. Fouilland et al.]

***Points :***

Stations hydrologiques échantillonnées : A18, A17, A16 (M2), A15, A14, A12, A11(M4)

***Niveaux :***

Stations hydrologiques : profil à 4 niveaux : 20, 40, 60, 80m de profondeur.

- **Procédure d'échantillonnage :**

Les prélèvements d'eau de mer ont été réalisés à l'aide de bouteilles Niskin de 30 l montées sur une rosette à déclenchement électrique pour les stations hydrologiques et de bouteilles de 12 l pour les stations Panache.

Les protocoles de filtration ont été les suivants :

*Protéines et Acides aminés libres intraparticulaires* : Filtration de 4 L d'eau de mer sur filtre GF/F, conservation à -80°C

*Si intracellulaire* : Filtration de 4 L d'eau de mer sur filtre en polycarbonate de 0.45  $\mu$ m de porosité, conservation à -80°C

### **Incubations aux stations longue durée**

Dans les stations longue durée, M2 et M4, ont été réalisées des incubations de 24 hs avec de l'eau de surface. Pour chacune des ces incubations, ont été réalisés des prélèvements aux temps T0, T3, T6, T16 et T22 selon le protocole suivant :

*Protéines et Acides aminés libres intraparticulaires* : Filtration de 2 à 4 litres d'eau de mer sur filtre GF/F, conservation à -80°C

*Si intracellulaire* : Filtration de 2 à 2.8 litres d'eau de mer sur filtre en polycarbonate de 0.45  $\mu\text{m}$  de porosité, conservation à -80°C

Deux séries d'expérimentation ont été réalisées :

- **Etude de l'assimilation de l'azote**

Les incubations ont été conduites sur une population naturelle ou enrichi en  $\text{NH}_4$ , afin d'étudier l'impact de cet élément sur la croissance et le métabolisme des acides aminés libres :

Phytoplancton total

Phytoplancton total +  $\text{NH}_4$  (1 mmol)

Phyto < 10  $\mu\text{m}$

Phyto < 10  $\mu\text{m}$  +  $\text{NH}_4$  (1 mmol)

Ces mesures ont été faites en parallèles avec des mesures d'assimilation de  $^{15}\text{N}$  ( cf. L. Goyens ]

- **Etude de l'assimilation du carbone**

Les incubations ont été conduites sur une population naturelle afin la croissance et le métabolisme des acides aminés libres , en relation avec la mesure des activités des enzymes de l'assimilation du carbone inorganique[cf. Fouilland et al]

### **Premiers Résultats**

Les résultats présentés dans ce rapport concernent deux périodes de la campagne. Un grand nombre d'échantillons ne sont pas encore analysés ou dépouillés, soit pour la floristique, soit pour la physiologie. Les deux paragraphes ci-dessous ne traitent donc que d'une partie des résultats et de leur interprétation.

## **Distribution du phytoplancton dans la zone Est des îles Kerguelen. Relation avec les paramètres du milieu.**

Des échantillons de surface ( 5 ou 10m) et de profondeur (40 ou 60m), provenant de douze stations, ont été prélevés. Les résultats obtenus sur trois radiales, situées à l' Est des Kerguelen sont présentés dans ce rapport [cf. S. Blain : Panache Kerguelen, pour la position des stations].

La méthode d'Utermöhl (1958) a été utilisée pour le dénombrement, avec une erreur de comptage de 10% à 20% (Lund et al, 1958). Toutes les cellules de taille inférieure à 10mm ont été placées dans la catégorie nanoplancton.. Le dénombrement est exprimé en nombre de cellules par litre. La reconnaissance spécifique s'est effectuée directement sous le microscope à lumière inversée pour les genres et les espèces facilement identifiables tels que certaines diatomées: *Nitzschia kerguelensis*, *Nitzschia closterium*, *Navicula*, *Thalassiosira*, *Corethron*, *Biddulphia*; ou certains dinoflagellés: *Oxytosum*, *Prorocentrum*, *Gymnodinium*, *Peridinium*. Beaucoup d' espèces, notamment des *Gymnodinium*, restent indéterminées.

Les données de biomasse et sels nutritifs ont été fournies par S. Blain, T. Caubert, J. Floch, L. Oriol et M. Panouse.

La comparaison des stations , en fonction de leur composition taxonomique, de leur caractéristiques physico-chimiques( NO<sub>3</sub>; SiOH), et de la biomasse (Chl<sub>a</sub>, BSi ) a été suivie en utilisant une analyse factorielle des correspondances (Benzecri, 1970; Teil 1975). En surface ( Fig.1), la chlorophylle et les sels nutritifs ne sont pas les éléments les plus importants dans la répartition des espèces. Les stations sont plutôt caractérisées par leur constitution spécifique: -Les stations plus ou moins côtières, PS01;PS04;PS07;PS02;PS03, sont caractérisées par le nanoplancton.

-PS08 est caractérisée par un nombre important de diatomées, notamment pennées, de ciliés, ainsi que d'une quantité importante de BSi.

-alors que PS13, à l'extrême Nord-Est des îles Kerguelen, est caractérisée par les silicoflagellés, les dinoflagellés, les diatomées centriques ainsi que par les frustules vides de diatomées. Les flagellés peuvent en effet abonder en dehors des zones voisines des terres.

L'analyse de similarité (Clifford et Stephenson, 1975), (Fig. 2), effectuée à partir des paramètres physico-chimiques et des biomasses chlorophylliennes et spécifiques, permet de regrouper essentiellement deux ensembles de données:

-les diatomées pennées avec la silice biogénique. Ceci est du à l'abondance des diatomées pennées, telle que *Nitzschia kerguelensis*, par rapport aux diatomées centriques. La

part de silice liée au vivant est beaucoup plus importante que celle liée aux frustules vides de diatomées.

-La présence des dinoflagellés est fortement liée, avec 89% de similarité, à la présence de frustules vides de diatomées. De plus les silicoflagellés sont assez proches, avec 84% de similitude, des dinoflagellés.

-La chlorophylle *a* est davantage corrélée aux diatomées et aux dinoflagellés, plutôt qu'au nanoplancton. Le développement du nanoplancton et la biomasse de celui-ci, dans les couches superficielles, sont beaucoup moins importants que ceux des diatomées et dinoflagellés. Le poids de ces cellules microplanctoniques est donc évidemment plus fort sur la chlorophylle totale.

-Les ciliés sont liés, avec 50% de similarité, aux silicates. L'aire de répartition des ciliés correspondrait à des zones plus ou moins dépourvues de diatomées où les silicates sont moins utilisés pour la formation de frustules siliceux. L'autotrophie est, semble-t-il, relayée par un système hétérotrophe pour ces eaux.

-La concentration en nitrates est peu corrélée à la répartition des organismes.

Dans l'analyse de correspondance en profondeur (Fig 3.) le poids de l'axe 1 est plus faible (44,8%) qu'en surface (70,8%), indiquant donc une moindre variabilité des stations de profondeur.

Le premier ensemble de stations (PP01, PP10 et PP04), qui se dégage de cette analyse, est caractérisé par le nanoplancton et, par rapport à la surface, la chlorophylle *a* semble intervenir davantage.

PP06 est, en profondeur, caractérisée par les diatomées pennées contrairement à la station PS08, en surface, qui possédait cette caractéristique. On remarque que ces deux stations sont géographiquement opposées : la première située au Nord des Iles Kerguelen, la deuxième au Sud. D'un point de vue général les caractéristiques des stations sont peu différentes en surface et en profondeur.

Le dendrogramme, comparant les valeurs de biomasse et les paramètres chimiques (Fig 4), nous donne plus de renseignements quant à l'importance du nanoplancton, en comparaison avec la surface. La chlorophylle *a* est davantage corrélée au nanoplancton. Le poids cellulaire de celui-ci est donc plus important que le poids des cellules microplanctoniques en profondeur. Les correspondances entre les ciliés et les silicates sont les mêmes qu'en surface.

## **Etude du métabolisme azoté des populations aux stations A18, M2 et M4**

La détermination qualitative des acides aminés a été effectuée pour 24 molécules, composé de :

- 19 acides a-aminés protéiques, b-alanine , taurine, acide g-amino-butyrique, ornithine
- un étalon interne : acide a-amino-butyrique

### **• Assimilation azotée au point M2**

Ces échantillons de phytoplancton ont été prélevés lors du mouillage permanent M2. Il s'agit d'acides aminés intraparticulaires libres dissous, utilisés comme marqueurs de l'état physiologique des cellules. Deux séries d'échantillons ont été analysées :

- 1<sup>ère</sup> série : échantillons P27 à P31.

Incubation du phytoplancton total, sans enrichissement de l'eau de mer.

- 2<sup>ème</sup> série : échantillons P32 à P36.

Incubation du phytoplancton total, l'eau de mer étant enrichie en azote

L'évolution des concentrations des acides aminés libres intraparticulaires est présentée sur les histogrammes des figures 5 & 6.(les acides aminés sont représentés par leur symbole à une lettre).

Si l'on compare les 2 séries d'échantillons, on peut remarquer que les acides aminés prédominants, du point de vue des concentrations, restent les mêmes (alors que les conditions d'incubation ne sont pas tout à fait identiques) : acide aspartique, acide glutamique, sérine, glutamine, glycine et thréonine, b-alanine, taurine, alanine, Gaba (acide g-amino-butyrique), ornithine et lysine.

De même, les grosses molécules apolaires (méthionine, valine, phénylalanine, leucine et isoleucine) et les acides aminés à faible polarité (tryptophane, histidine et tyrosine) sont toujours présents en quantités plus faibles que les autres acides aminés.

Lorsque l'incubation du phytoplancton total a lieu avec un enrichissement en azote (sous forme  $\text{NH}_4^+$ ), les concentrations des acides aminés sont plus élevées. On peut donc en conclure que le phytoplancton total est déficient en azote. De plus, les concentrations

maximales sont enregistrées pour l'échantillon P34 (correspondant à un prélèvement effectué à 12h), et ce pour tous les acides aminés, exceptés la valine et la cystéine. Ce phénomène peut s'expliquer par les conditions d'éclairement, plus favorables en milieu de journée. Les processus photosynthétiques permettent alors une accélération du métabolisme du carbone et du métabolisme de l'azote, ce qui se traduit par une synthèse d'acides aminés, dont le pool augmente rapidement. Cependant, pour la sérine, il est impossible de dire si la concentration élevée observée est réelle ou due à une contamination.

Toujours pour les échantillons P32 à P36 (enrichis en  $\text{NH}_4$ ), on observe que pour certains acides aminés, les concentrations en fin d'incubation (à 22h et à 4h) sont inférieures à celles du début de l'expérience (à 6h et à 9h). Il s'agit notamment de : l'acide aspartique, l'acide glutamique, la sérine, l'histidine, la b-alanine, la taurine, l'alanine, la méthionine et le tryptophane, et la lysine. Ces acides aminés sont toujours incorporés préférentiellement dans les protéines alors que le métabolisme du carbone et celui de l'azote sont ralentis durant la phase d'obscurité de l'incubation.

En ce qui concerne la cystéine, pour le phytoplancton total, on remarque que l'évolution est différente selon que l'incubation a lieu avec enrichissement ou non en ammonium :

- en absence d'enrichissement, la concentration en cystéine intraparticulaire est plus élevée en début qu'en fin de journée,

- en présence de  $\text{NH}_4^+$ , la situation est inversée, la concentration étant plus élevée en fin de journée qu'en début.

Il semble donc que la présence d'azote dans le milieu favorise la synthèse de cystéine et que cette synthèse soit indépendante des conditions d'éclairement.

Il est impossible de comparer cette évolution avec celle de la méthionine (un autre acide aminé soufré), puisque lors des analyses, il y a eu co-élution de la méthionine et du tryptophane.

- **Acides aminés libres dissous libérés ou assimilés (A18, M2, M4)**

Ces échantillons de phytoplancton ont été prélevés sur trois stations différentes : A16, A18 et M4. Le but de ces manipulations est de déterminer qualitativement et quantitativement les acides aminés libres dissous présents dans l'eau de mer au T0 et après 24 heures d'incubation [cf. L. Goyens]. Le bilan correspond donc à l'excrétion et/ou l'assimilation des molécules. Dans tous les échantillons, la méthionine et le tryptophane ont donné lieu à une co-élution. De plus, il n'a pas été possible de déterminer les concentrations du Gaba et de la cystéine. Pour ce

dernier acide aminé, il est impossible de dire si : la concentration est trop faible pour être détectée ou s'il est effectivement absent dans l'eau de mer.

En ce qui concerne la **station A18**, tous les acides aminés sont présents à des concentrations plus élevées après incubation, exceptées l'ornithine et la lysine.

Pour la **station A16**, deux expériences d'incubation ont été réalisées et deux jours de suite. Lors de la première, on observe une consommation de tous les acides aminés au cours de l'incubation. Seules la lysine et l'ornithine voient leurs concentrations augmenter. Pour la seconde expérience, les résultats sont inversés. En effet, on observe une augmentation de la concentration de tous les acides aminés. Seule la lysine semble consommée au cours de l'incubation.

A la **station M4**, quatre expériences d'incubation ont été menées. Les échantillons correspondant ont été injectés en injection manuelle, et il est possible que les concentrations mesurées pour la sérine ou la glycine soient surévaluées. En comparant les résultats, on remarque que l'évolution de la concentration d'un acide aminé est variable selon l'expérience, sauf l'ornithine qui semble toujours présente à une concentration plus élevée en fin d'incubation qu'en début. De plus, les niveaux atteints par les concentrations diffèrent d'un échantillon à l'autre. Un exemple de résultats d'une incubation est donné en Figure 7 (échantillon de population du 22/10 : LG11=TO, LG12=T24h). Au sein d'une même station, les différences observées peuvent s'expliquer par des différences dans les conditions d'incubation ou des échantillons de nature différente.

## **BIBLIOGRAPHIE**

Benzecri, J.P. (1970) La pratique de l'Analyse des Correspondances. Cahier no.2 du laboratoire des statistiques Mathématiques, Faculté des Sciences, Paris.

Clifford, H.T. and Stephenson, W. (1975) *An Introduction to Numerical Classification*

Flynn KJ, Dickson DMJ, Al-Amoudi OA, 1989. The ratio of glutamine : glutamate in microalgae : a biomarker for N-status suitable for use at natural densities. *J. Plankton Research*, 11, 165-170.

Leboulanger C, Martin-Jézéquel V, Descolas-Gros C, Jupin H, Sciandra A. Photorespiration in *Dunaliella tertiolecta*. Relationship between serine, glycine, and extracellular glycolic acid in continuous culture of *Dunaliella tertiolecta*. *J. Phycol.*, (soumis)

- Lund, J.W.G., Kipling, C. et Le Cren, E.D., The Inverted Microscope Method of Estimating Algal Numbers and the Statistical Basis of Estimations by Counting. *Hydrobiologica*, 11 : 143-170.
- Martin-Jézéquel V, Poulet SA, Harris RP, Moal J, Samain JF, 1988. Interspecific and intraspecific composition and variation of free amino acids in marine phytoplankton. *Mar. Ecol. PS*, 44, 303-313.
- Martin-Jézéquel V ; Sournia A, Birrien JL, 1992. A daily study of the diatom spring bloom at Roscoff (France) in 1985. III Free amino acids composition studied by HPLC analysis. *J. Plankton Research*, 14, 409-421
- Martin-Jézéquel V, 1992. Effect of Si-status on diel variation of intracellular free amino acids in *Thalassiosira weissflogii* under low-light intensity. *Hydrobiologia*, 238, 159-167.
- Martin-Jézéquel V, Descolas-Gros C, Colomines JC. Intracellular amino acids in microalgae of 3 taxonomic groups (Baccillariophyceae, Dinophyceae, Prymnesiophyceae). Effects of the growth, light/dark cycle and nitrogen source. (in prep).
- Sciandra A, Gostan J, Collos Y, Descolas-Gros C, Leboulanger C, Martin-Jézéquel V, Denis M, Lefevre D, Copin C, Avril B, 1996. Growth compensating phenomena in continuous culture of *Dunaliella tertiolecta* limited simultaneously by light and nitrate. *Limnol. Oceanogr.* (in press).
- Teil, M. (1975) Correspondence factor analysis : an outline of its method. *Math. Geol.*, 7, 3-12.
- Utermöhl, H., 1958. Zur Vervollkommung der quantitativen Phytoplankton Methodik. *Mitt.int. Verin. Limnol.*, 9: 1-38.

## **Variation spatiale et temporelle de l'activité respiratoire des assemblages microbiens au cours de la campagne ANTARES 3 (printemps austral).**

**Javier ARISTEGUI<sup>1</sup>, Javier ALMUNIA<sup>1</sup> Michel DENIS<sup>2</sup>**

1- Departamento de Biología, Facultad de Ciencias del Mar, Universidad de Las Palmas de Gran Canaria, Ap. 550, 34017 Las Palmas, Gran Canaria

2- Centre d'Océanologie de Marseille, Parc Scientifique et Technologique de Luminy, Case 901, 13288 Marseille cedex 09

### **INTRODUCTION**

Dans le cadre des objectifs de la campagne relatifs aux processus biologiques associés au flux de matière biogène (C, N, Si, S), nous nous sommes attachés à déterminer les vitesses de respiration des assemblages microbiens dans la colonne d'eau aux différentes

stations du transect échantillonné au cours de la campagne ANTARES 3. L'intérêt de cette grandeur est qu'elle est représentative de la vitesse de production métabolique de CO<sub>2</sub>, autrement dit, de la vitesse de reminéralisation de la matière organique. L'océan Austral étant supposé constituer un puits potentiel important pour le CO<sub>2</sub> atmosphérique, cet objectif revêtait donc un intérêt majeur. Il s'agissait également de savoir si l'activité respiratoire décroissait exponentiellement avec la profondeur comme cela a été rapporté pour l'océan Pacifique et l'océan Atlantique (Packard *et al.* 1988). Il y a en effet très peu d'informations disponibles sur ce sujet dans l'océan austral. Outre cette répartition spatiale il était également important de connaître la variabilité temporelle de ces activités. Cette étude a été réalisée dans le cadre du Groupe APPA (Amélioration de la Paramétrisation de la Production Autotrophe) par une approche multiparamétrique des métabolismes cellulaires de base : photosynthèse, photorespiration, respiration. La détermination de l'activité respiratoire *in situ* se fait à l'aide du test enzymatique de Packard (1971), pratiqué généralement à 18 °C. Compte tenu des basses températures rencontrées dans les eaux antarctiques, il était important de déterminer parallèlement l'énergie d'activation des réactions concernées de façon à pouvoir appliquer sans ambiguïté la loi d'Arrhénius pour les nécessaires corrections de température. Enfin, pour mieux caractériser les variations d'activité respiratoire, des échantillons supplémentaires ont été systématiquement prélevés en parallèle pour être analysés par cytométrie en flux et obtenir la distribution du phytoplancton associée à chaque mesure.

## **MATERIELS ET METHODES**

### **Activité ETS**

La vitesse de respiration cellulaire a été déterminée à l'aide du test enzymatique ETS (electron transport system), de Packard (1971). Ce test fournit la vitesse maximale de respiration des microorganismes. Des facteurs de conversion établis au laboratoire avec des cultures monospécifiques permettent d'en déduire une estimation de la vitesse de respiration physiologique qui a son tour est exprimée en termes de production métabolique de CO<sub>2</sub> à partir des coefficients de Takahashi (1985).

L'eau de mer est préfiltrée sur une soie de 200  $\mu$ m de porosité. Pour les couches euphotique et aphotique, les volumes filtrés sont respectivement de 5 et 23 l. Les cellules sont recueillies sur des filtres en fibre de verre GF/F de 47 mm de diamètre sous une pression de 0,3 at. Pour préserver l'activité enzymatique, les filtres sont immédiatement congelés dans l'azote liquide (Ahmed *et al.*, 1976).

Le test ETS a été pratiqué conformément au protocole de Packard et Williams (1981). La réaction de réduction de l'INT (chlorure de 2-(4-iodophenyl)-3-(4-nitrophenyl)-5-phenyltetrazolium) était suivie à 490 nm à l'aide d'un spectromètre embarqué. Les résultats sont exprimés en termes de consommation d'oxygène ( $\mu\text{l O}_2 \text{ l}^{-1} \text{ h}^{-1}$ ), compte tenu du caractère aérobie du milieu échantillonné, établi par les mesures de concentration d'oxygène dissous. Cette expression tient compte du fait qu'il faut 2 électrons pour réduire une molécule d'INT en formazan alors qu'il faut 4 électrons pour la réduction de l'oxygène moléculaire en eau (Capaldi, 1990).

#### **Cytométrie en flux**

Les échantillons prélevés pour être analysés par cytométrie en flux, ont été préfiltrés sur une soie de porosité 100 mm et fixés avec du paraformaldéhyde à une concentration finale de 2% (Trousselier *et al.*, 1995). Ces échantillons ont été congelés dans de l'azote liquide et sont encore actuellement conservés à 77 K en attendant d'être analysés avec un cytomètre CYTORON (ORTHO DIAGNOSTIC SYSTEM).

## **PREMIERS RESULTATS**

### **Activité respiratoire**

La distribution verticale de l'activité ETS (Electron Transport System) des assemblages microbiens (taille  $\leq 200 \mu\text{m}$ ) a été déterminée entre 0 et 1000 m de profondeur à toutes les stations de la radiale ANTARES occupées au cours de la campagne ANTARES 3, et entre 0 et 4600 m à la station A12. Les valeurs actuellement disponibles correspondent à la température d'incubation (10 °C) et doivent être converties en valeurs *in situ* (loi d'Arrhénius), ce qui ne devrait entraîner que de très faibles changements. Contrairement à ce qui a été observé dans les régions oligotrophes du Pacifique ou de l'Atlantique (Packard *et al.*, 1988), les profils d'activité ETS ne présentent pas une décroissance exponentielle entre 0 et 1000 m à partir d'un maximum de surface. Le pic principal d'activité peut se situer à des profondeurs très variables (entre 0 et même 200 m comme à la station A14). Plusieurs pics secondaires, présents jusqu'à 900 et 1000 m de profondeur sont à rapprocher des observations faites en Méditerranée où ces pics d'activité correspondent à des couches d'accumulation d'organismes gélatineux (Savenkoff *et al.*, 1993). La station A18 est la plus proche du front subantarctique légèrement plus au nord et associé au courant géostrophique circumpolaire. Un des résultats des travaux du groupe FRONTAL sur les fronts associés à des courants géostrophiques est la mise en évidence d'un transfert oblique et en profondeur de matière organique sur le bord droit du courant (Sournia *et al.*, 1990; Sournia, 1993). La transposition de ce résultat au front subantarctique pourrait expliquer le pic profond (900 m) observé aux stations A18 et A17 et dont l'amplitude décroît avec l'éloignement du front (Fig. 1). Si tel était le cas, ce transfert oblique et en profondeur de matière organique devrait avoir une

importance considérable puisque ses effets se font ressentir à plusieurs degrés de latitude de son origine.

A titre de comparaison, des incubations ont été réalisées à toutes les stations pour mesurer la respiration à l'obscurité à partir de la variation de concentration d'oxygène dissous. Ces incubations ont été réalisées à partir de prélèvements dans la couche mélangée.

La variabilité temporelle de l'activité ETS *in situ* a été étudiée aux stations M2 (Fig. 2) et M4 (Fig. 3), en surface (20 et 10 m respectivement) et au maximum de fluorescence (60 m), au cours de deux cycles de 36 h avec un pas d'échantillonnage de 4 h. La variabilité est beaucoup plus grande à 60 m qu'en surface. L'analyse conjointe des autres paramètres mesurés simultanément permettra une interprétation plus étayée de cette variabilité.

Cette variabilité temporelle a également été étudiée au cours d'incubations de 24 h, l'eau de mer étant prélevée en surface. Le pas d'échantillonnage était de 6 h. Ces incubations ont été réalisées aux stations A18, A16, A14 et A11. Là aussi, c'est une approche multiparamétrique qui a été mise en œuvre.

L'application de la loi d'Arrhénius pour convertir l'activité ETS déterminée par le test enzymatique de Packard à une température d'incubation donnée en activité ETS *in situ* implique la connaissance de l'énergie d'activation des déshydrogénases concernées. Compte tenu des températures relativement basses rencontrées dans les eaux antarctiques, une hypothèse de travail était que l'énergie d'activation pouvait varier avec la température *in situ*, conséquence éventuelle de phénomènes adaptatifs. Les résultats (Fig. 4) obtenus dans une gamme de températures *in situ* de - 1,6 à 18,4 °C montrent qu'il n'y a pas de corrélation entre l'énergie d'activation et la température *in situ*. Les variations observées, de 3,4 à 13,5 kcal mole<sup>-1</sup> (Tableau 1) pourraient être liées à la composition en espèces des assemblages microbiens concernés. Cette hypothèse de dépendance vis à vis des espèces reste toutefois à vérifier. Il ne semble pas qu'elle ait été observée par les autres auteurs ayant abordé cette question, dans des régions différentes il est vrai (Tableau 2).

### **Cytométrie en flux**

L'ensemble des 620 échantillons prélevés pour analyse par cytométrie en flux est encore stocké dans l'azote liquide. Tous les échantillons soumis au test ETS de Packard ont été doublés par des prélèvements destinés à la détermination de la distribution des populations phytoplanctoniques par cytométrie en flux. La comparaison de l'activité ETS avec cette distribution devrait s'avérer très riche d'informations.

Les échantillons restant à analyser concernent également les profils verticaux des stations de la zone "panache" et les variations temporelles (cycles de 36 h, incubations de 24 h).

### **REFERENCES**

- Ahmed, S. I., Kenner R. A. and King F. D., (1976) Preservation of enzymic activity in marine plankton by low-temperature freezing. *Mar. Chem.* **4** : 133-139.
- Aristegui J. And Montero M.F. (1995) The relationship between community respiration and ETS activity in the ocean. *J. Plankton Res.* **17**, 1563-1571.
- Capaldi R. A., (1990) Structure and function of cytochrome *c* oxidase. *Ann. Rev. Biochem.* **59**, 569-596.
- Martinez R. (1991) Biomass and respiratory ETS activity of microplankton in the Barents Sea. *Polar Res.* **10**, 193-200.
- Martinez R. And Estrada M. (1992) Respiratory electron transport activity of microplankton in the Weddell Sea during early spring : influence of the ice cover and the ice edge. *Polar Biol.* **12**, 275-282.
- Packard T.T. (1971) The measurement of respiratory electron-transport activity in marine phytoplankton. *J. Mar. Res.*, **29**, 235-244.
- Packard T.T. and Williams P.J. Leb. (1981) Rates of respiratory oxygen consumption and electron transport in surface seawater from the Northwest Atlantic. *Oceanol. Acta* **4**, 351-358.
- Packard T.T., Devol A.H. and King F.D. (1975) The effect of temperature on the respiratory electron transport system in marine plankton. *Deep-Sea Res.* **22**, 237-249.
- Packard T.T., Denis M., Rodier M. And Garfield P. (1988) Deep ocean metabolic CO<sub>2</sub> production : calculation sfrom ETS activity. *Deep Sea Res.* **35**, 371-382.
- Savenkoff C., Prieur L., Reys J. P., Lefèvre D., Dallot S. and Denis M. (1993) Deep microbial communities evidenced in the Liguro-Provençal front by their ETS activity. *Deep-Sea Res.* **40**, 709-725.
- Sournia A. (1993) Frontal studies in JGOFS-France : A four year summary. *Ann. Inst. océanogr.*, Paris 69, 47-55.
- Sournia A., Brylinski J.M., Dallot S., Le Corre P., Leveau M., Prieur L. and Froget C. (1990) Fronts hydrologiques au large des côtes françaises : les sites ateliers du programme Frontal, *Oceanol. Acta*, **13**, 413-438.
- Takahashi T., Broecker W.S. and Langer S. (1985) Redfield ratio based on chemical data from isopycnal surfaces. *J. Geophys. Res.*, **90**, 6907-6924.
- Trousselier M. , Courties C. and Zettlemailer S. (1995) Flow cytometric analysis of coastal lagoon bacterioplankton and picoplankton : fixation and storage effects. *Est. Coast. Shelf Res.*, **40**, 621-623.
- Vosjan J.H. and Olanczuk-Neyman K.M. (1991) Influence of temperature on respiratory ets-activity of micro-organisms from Admiralty Bay, King George Island, Antarctica. *Neth. J. Sea Res.* **28**, 221-225.

**Tableau 1.** Détermination de l'énergie d'activation à différentes stations occupées lors de la campagne ANTARES 3.

Référence	Lieu	Température <i>in situ</i> (°C)	Pente de la droite de régression	Energie d'activation kcal mole <sup>-1</sup>
K1	Panache (S3)	3,0	-5,9	11,7
K2	Panache (S10)	2,5	-1,7	3,4
K3	Station-M1	1,8	-2,8	5,6
K4	Station-M2		-6,4	12,7
K5	Station-M4 (bord des glaces)	-1,6	-5,1	10,1
K6	Station-M4		-6,8	13,5
K7	Kerguelen (base)	4,0	-6,3	12,5
K8	43°38'S-67°09'E	13,0	-4,7	9,3
K9	32°36'S-60°54'E	18,4	-5,9	11,7

**Tableau 2.** Résultats disponibles dans la littérature concernant la valeur d'énergie d'activation associée au test ETS.

Zone étudiée	Energie d'activation kcal mole <sup>-1</sup>	Référence
Mer de Barentz (Arctique)	11,5 ÷ 0,6	Martinez (1991)
Mer de Weddell (Antarctique)	12,0 ÷ 0,5	Martinez and Estrada (1992)
Détroit de Bransfield (Antarctique)	18,0	Vosjan and Olanczuk-Neyman (1991)
Détroit de Bransfield (Antarctique)	11,9 ÷ 0,7	Aristegui and Montero (1995)
Autres régions	16,2 ÷ 2	Aristegui and Montero (1995)
Pacifique est	15,8 ÷ 2,8	Packard <i>et al.</i> , (1975)

**Figure 1.** Profils verticaux de l'activité ETS aux stations A18 (cercles pleins) et A17 (cercles vides). Le pic d'activité à 900 m de profondeur, très marqué à la station A18, pourrait être lié au

phénomène de front associé au courant géostrophique  
légèrement plus au nord.

**Figure 2.** Variation de l'activité ETS à deux profondeurs de la station M2 au cours d'un cycle de 36 h. On notera la plus grande variabilité à 60 m.

**Figure 3.** Variation de l'activité ETS à deux profondeurs de la station M4 au cours d'un cycle de 36 h. On notera la plus grande variabilité à 60 m.

**Figure 4.** Représentation groupée des droites de régression obtenues dans l'application de la loi d'Arrhénius aux différentes expériences relatives à la dépendance de l'activité ETS vis à vis de la température. Il est formulé l'hypothèse que la variabilité

observée pourrait être due à une dépendance vis à vis des espèces.

## **Variations spatiales et temporelles de la concentration en glycolate dissous dans l'eau de mer lors de la campagne ANTARES 3.**

**Christophe LÉBOULANGER<sup>1</sup> et Javier ALMUNIA<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Laboratoire d'Hydrobiologie Marine, UMR 5556 case courrier 93 Université de Montpellier II 34095 MONTPELLIER cedex 5

<sup>2</sup>Facultad de Ciencias del Mar, Universidad de Las Palmas de Gran Canaria  
35017 LAS PALMAS G.C.

### **INTRODUCTION**

Au cours de la campagne Antares 3 à bord du Marion-Dufresne II, des prélèvements ont été effectués à diverses stations (figure 1) afin de mesurer la concentration du glycolate dissous dans l'eau de mer, indice de la photorespiration du phytoplancton. Cette fonction physiologique particulière aux producteurs primaires a pour effet une réduction de l'efficacité de la fixation du CO<sub>2</sub> et un rejet de carbone organique dissous dans le milieu environnant. Au cours de la fixation du carbone inorganique par la Rubisco, une partie du substrat est oxydée, donnant naissance à une molécule de phosphoglycolate, qui peut alors soit être métabolisée à l'intérieur de la cellule soit être rejetée à l'extérieur. La rapidité du rejet, ainsi que la durée de vie apparemment faible de la molécule rendent ce phénomène inobservable par les méthodes de mesure de la production primaire, et la faible concentration atteinte par le glycolate dans l'eau de mer fait que celui-ci est peu susceptible d'être mis en évidence par la mesure du COD total.

Les prélèvements ont été répartis en profils verticaux d'une part, et en suivis temporels, soit *in situ* à une ou deux profondeurs pendant 36 heures, soit en incubations pendant 24 heures.

### **Matériel et méthodes**

L'eau a été prélevée aux heures et profondeurs voulues, puis immédiatement filtrée sur filtre en fibre de verre Whatman GF/F. Le filtrat a été fractionné en volumes de 250 ml, puis acidifié avec HCl 6N jusqu'à pH < 2, et enfin les composés organiques ont été extraits par l'acétate d'éthyle selon une méthode précédemment décrite (Leboulanger *et al.* 1994). Les échantillons concentrés ont été conservés dans l'azote liquide jusqu'à leur analyse au Laboratoire de Biologie Végétale de l'Université de Perpignan. Cette étape finale a nécessité l'emploi de la chromatographie en phase vapeur (Leboulanger *et al.* soumis), sur colonne capillaire de type Dowex DB-5, et une détection des composés par ionisation d'une flamme

d'hydrogène (FID). La réalisation de duplicats au moment du prélèvement, puis la répétition de la mesure au moins 3 fois sur chaque sous échantillon permettent d'obtenir la meilleure précision dans l'expression des résultats. Au total, 8 profils verticaux ont été réalisés, dont trois de nuit, quatre suivis *in situ* pendant 36 heures et trois incubations d'une durée de 24 heures.

## RESULTATS

Tous les résultats sont présentés dans les figures 2 à 9. Les valeurs maximales pour la concentration en acide glycolique dissous relevées lors d'Antares 3 sont de l'ordre de  $20 \mu\text{g.l}^{-1}$ , aux sites A12, A14 et Ker14. Hormis ces stations, les concentrations relevées sont faibles, puisque plus de 50 % des valeurs obtenues sont inférieures à  $5 \mu\text{g.l}^{-1}$ . Les profils effectués de jour (A11, A12, A14, A16 et A17) montrent tous un maximum profond, sauf A17 où les concentrations sont à peu près constantes de 5 à 60 m de profondeur. Aux stations A15 et A18, seuls les profils de nuit sont disponibles.

Que ce soit lors de cycles *in situ* ou d'incubations, la concentration en glycolate montre un cycle avec un pic de jour et un minima de nuit. Ces alternances jour-nuit ont déjà été montrées lors d'autres campagnes (Eumeli 4, Dynaproc). Enfin, la mesure effectuée dans la glace du pack a donné un résultat positif, avec  $7,1 \pm 2,8 \mu\text{g.l}^{-1}$ .

## DISCUSSION

Les résultats présentés ici montrent que l'acide glycolique est présent en quantités non négligeables dans au moins une partie de l'Océan Austral, comme cela a été auparavant observé dans la région des Falklands par Fogg *et al.* (1975). Le fait que les concentrations soient faibles rend leur mesure plus imprécise, et se traduit par une barre d'erreur plus importante. On travaille donc ici pratiquement en limite de sensibilité de la méthode. Le composé, surtout plus abondant dans la couche superficielle de l'océan, est susceptible de se retrouver emprisonné dans l'eau de mer gelée du pack ou être formé *in situ* par les communautés algales vivant dans les glaces. Contrairement à ce qui peut se passer dans les zones boréales (Legrand et De Angelis 1996), aucun apport d'origine terrestre par voie atmosphérique n'est susceptible de modifier fortement les concentrations en glycolate dissous dans la glace et *a fortiori* dans l'eau de mer, du fait de l'éloignement des plus proches continents.

Le glycolate dissous produit par les communautés phytoplanctoniques est une composante du COD qui peut être utilisée comme substrat de croissance par les organismes hétérotrophes présents dans les mêmes masses d'eau (Billen et Servais 1989, Edenborn et Litchfield 1985). Mais l'hypothèse d'une réassimilation par les microalgues elles-même ne peut être écartée, puisque nous avons montré en culture que

la chlorophycée *Dunaliella tertiolecta* était capable de réabsorber le glycolate dissous. Cette propriété explique l'allure cyclique de la concentration au cours du temps, qui peut être rapprochée des modèles les plus simples de consommation hétérotrophe d'un composé produit à la lumière (Williams 1990). Cette consommation implique forcément une production plus forte que celle effectivement mesurée; il est nécessaire de connaître la durée de vie ou le turn-over de la molécule, dépendants de l'affinité des organismes hétérotrophes pour le glycolate.

Comparativement aux mesures que nous avons effectuées dans d'autres zones océaniques (Méditerranée, Atlantique tropical est), les concentrations en glycolate dissous notées ici sont plus faibles; elles variaient dans l'Atlantique Tropical de 0 à 76  $\mu\text{g.l}^{-1}$ , et en Méditerranée Occidentale de 3 à 35  $\mu\text{g.l}^{-1}$ . Toutefois, la production primaire moyenne dans l'océan Austral étant plus faible que dans les écosystèmes ci-dessus, la part représentée par le rejet de glycolate doit être réévaluée. Un phénomène comme la photorespiration, provoquant un rejet de carbone organique dissous dans l'environnement, doit être pris en compte lors de l'estimation de la production primaire océanique et des flux de carbone qui y sont associés.

## REFERENCES

- Billen, G. et Servais, P. (1989) Modélisation des processus de dégradation bactérienne de la matière organique en milieu aquatique. In: *Micro-organismes dans les écosystèmes océaniques*. Masson, Paris. pp 219-245
- Edenborn, H. M. et Litchfield, C. D. (1985) Glycolate metabolism by *Pseudomonas* sp. strain S227, isolated from a coastal marine sediment. *Mar. Biol.* **88**, 199-205
- Fogg, G. E., Burton, N. F. et Coughlan, S. J. (1975) The occurrence of glycolic acid in Antarctic waters. *Br. Antarct. Surv. Bull.*, **41&42**, 193-197
- Leboulanger, C., Descolas-Gros, C. et Jupin, H. (1994) HPLC determination of glycolic acid in seawater. *J. Plankton Res.*, **16**, 897-903
- Leboulanger, C., Serve, L., Comellas, L. & Jupin, H. Determination of dissolved glycolic acid in sea water using post-derivatization gas-chromatography mass-spectrometry. (Soumis à *Phytochem. Anal.*)
- Legrand, M. et De Angelis, M. (1996) Light carboxylic acids in Greenland Ice : a record of past forest fires and vegetation emissions from the boreal zone. *J. Geophys. Res.*, **101**, 4129-4145
- Williams, P. J. leB. (1990) The importance of losses during microbial growth: commentary on the physiology, measurement and ecology of the release of dissolved organic material. *Marine Microbial Food Webs*. **4**, 175-206

# **The removal of nitrogenous nutrients by phytoplankton during ANTARES 3, effects of nutrient distributions and phytoplankton compositions.**

**Marc ELSKENS<sup>1</sup>, Mengesha SEMENEH<sup>1</sup>, Evgeny DAFNER<sup>1</sup> &<sup>2</sup>,**

**Frank DEHAIRS<sup>1</sup> and Leo GOEYENS<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> Vrije Universiteit Brussel, Laboratory of Analytical Chemistry,  
Pleinlaan 2, B-1050 Brussel, Belgium

<sup>2</sup> Russian Federal Institute of Fisheries and Oceanography (VNIRO),  
Krasnoselskaya, Moscow 107140, Russia

## **INTRODUCTION**

Earlier investigations of the regional and temporal variability in intensity of primary production and concomitant nutrient consumption revealed a clear difference in the relative importance of nitrate uptake between oligotrophic systems such as the permanently open ocean zone (POOZ) and fertile regions such as the marginal ice zone (MIZ) and coastal and continental shelf zone (CCSZ). The former one exhibits a relatively constant evolution throughout the season, with nitrate and ammonium uptake contributing similarly to primary production. On the other hand, typical MIZ and CCSZ environments are characterised by a shift from new to regenerated production, with nitrate being the most important nitrogen source for primary production during the early phase of spring only (Goeyens *et al.* 1991, 1996). Enhanced ammonium availability is presumably one of the factors governing the observed shift in nitrate uptake (Goeyens *et al.* 1995).

Recent studies provided evidence for a significant direct and/or indirect contribution of dissolved organic nitrogen (DON) to primary production too (Bronk *et al.* 1994). The role of DON in nitrogen uptake studies was not often investigated though. Its importance is illustrated by the significant deviation of the traditionally obtained f-ratios or new to total production ratios, introduced by Eppley and Peterson (1979). Antarctic phytoplankton can meet their nitrogen requirements by utilising urea and its contribution is similar or slightly higher than the one of ammonium (Probyn and Painting 1985). Neglecting the fraction of primary production sustained by urea or DON uptake can, therefore, induce severe overestimation of new production sensu Dugdale and Goering (1967).

Additionally, it was observed that the phytoplankton patterns and related nutrient uptake regimes show significant variability. Two distinct scenarios of bloom development in

fertile Antarctic waters were observed (Semeneh *et al.* 1996). In the MIZ of the Scotia-Weddell Confluence area, a transition from predominantly nitrate based production to ammonium based production was paralleled by the disappearance of diatom dominance and the concomitant development of a dense flagellate dominated phytoplankton community. The termination of the bloom was not at all induced by exhaustion of the nitrate pool. On the other hand, in the CCSZ of Prydz Bay, a shift in the nitrogen uptake regime occurred without significant change in the phytoplankton community structure. Diatoms dominated the assemblage throughout and about 80 % of the phytoplankton biomass was in the >10  $\mu\text{m}$  size fraction. Unlike the first scenario, the diatoms predominantly consumed ammonium.

The objectives of the ANTARES 3 study were to determine spatial and temporal variations of nitrate, ammonium and urea uptake rates in relation to the nutrient status of the water and the composition of the phytoplankton assemblage. Special emphasis was on the relative role of the different nitrogenous nutrients.

## **METHODS AND MATERIALS**

Most nutrient concentrations were determined on board immediately after sampling. Nitrate and silicate were determined according to the traditional autoanalyzer techniques. Ammonium was determined manually. These results were kindly provided by L. Oriol, J. Floch and P. Pondaven. Urea concentrations were determined for surface water samples only; an adapted spectrophotometric method was applied (Goeyens *et al.* 1996).

Phosphate, dissolved organic nitrogen (DON) and dissolved organic phosphorus (DOP) concentrations were determined at VNIRO (Moscow) using a Technicon II AC Flow AutoAnalyzer (Technicon 1973, 1977). All samples were filtered through GF/F membranes and stored in a refrigerator at 4 °C. As a preservative we added 1 ml of mercury chloride (1 %) in 20 ml sample. The DON and DOP measurements were made according to the Valderrama (1981) method. This method allows simultaneous analyses of both the dissolved total nitrogen (DTN) and dissolved total phosphorus (DTP) concentrations with one single sample. The utilised oxidation reagent is a mixture of potassium persulfate and boric acid. The oxidation of nitrogenous compounds is carried out in alkaline medium, whereas the oxidation of phosphorus compounds is performed in acidic conditions. Therefore, the oxidation step started at a pH of 9.7 and ended at a pH of 5 to 6, the digestion time was 40 minutes and the maximal temperature attained in the pressure cooker was about 120 °C. Blank determinations were repeated after preparation of new oxidation reagent. Finally, total nitrate and phosphate concentrations were measured with autoanalyzer systems.

Nutrient uptake experiments were carried out in an on-deck incubator, thermostated with running sea water. Incubation containers were either polycarbonate bottles (Nalgene) or quartz bottles, used for a comparison with UV-B irradiated samples. The results of the latter experiments are not fully elaborated yet. The determination of uptake rates relies on the measurement of N-15 incorporation in phytoplanktonic particulate matter. Isotope detection for N-15 abundance were done with emission spectroscopy in the home lab in Brussels.

The results are expressed in terms of absolute uptake rates ( $\mu\text{M h}^{-1}$ ), specific uptake rates ( $\text{h}^{-1}$ ), f-ratios and RPI and a values (Dugdale and Goering 1967, McCarthy *et al.* 1977, Eppley and Peterson 1979, Dugdale and Wilkerson 1986, Collos 1987, Stolte and Riegman 1996).

Samples for phytoplankton counts were collected at three stations: station A16 (15 m), station M4 (15 m) and station A18 (45 m). The samples were fixed with a hexamine buffered formalin solution and stored in the dark till analysis in the home lab. Cells in a 50 ml subsample were settled for 24 h and counted under inverted microscope according to the Utermöhl method (Utermöhl, 1958). Cell volumes ( $V$ ,  $\mu\text{m}^3$ ) were calculated from cell dimensions and cell carbon ( $C$ , pg) was estimated from the cell volumes using the conversion factor of Eppley *et al.* (1970):

$$\log C = 0.76 (\log V) - 0.352, \text{ for diatoms and}$$

$$\log C = 0.94 (\log V) - 0.6 \text{ for non-diatoms.}$$

## RESULTS AND DISCUSSION

The surface distributions of dissolved and particulate matter are summarised in Tables 1 and 2 respectively; the characterisation of the nitrogen uptake regime is shown in Table 3.

### Qualitative description of the study area

*Distributions of inorganic and organic nutrients in the area east of Kerguelen* — During the Panache study we faced different conditions as described by two eastward transects across the East Kerguelen Shelf - Polar Front - Antarctic waters. The hydrological structure of the surface waters and particularly the northward extension of the Polar Front (PF) in the area east of Kerguelen were described by Park *et al.* (1996) during the SO-JGOFS workshop (Montpellier). The PF followed upon the island slope and its expression was very sharp along transect 1 (Stations 3 - 14), where the island slope is very steep (Figure 1). On the other hand, it was weakened along transect 2 (Stations 4 - 13), where the island slope is less pronounced (Figure 2). Whereas the PF generally borders

the Antarctic Water (AW), it constituted a remarkable separation between East Kerguelen Shelf Water (EKSW) and AW in the Panache area. Similar conditions were already observed for the PF in an area adjacent to the Antarctic Peninsula and for the Secondary Frontal Zone nearby South Georgia (Maslennikov 1979, Bogdanov *et al.* 1980).

Strong gradients of all hydrochemical parameters were observed between EKSW and AW along transect 1 (Figure 1). All water masses were insignificantly oversaturated with dissolved oxygen (up to 2.34%), what might be linked to both very low temperature in remnant winter water and the onset of a spring bloom development. Vertical distributions of silicate and nitrate clearly indicated the location of the PF with steep gradients reaching 22  $\mu\text{M}$  and 28  $\mu\text{M}$  for surface silicate and nitrate respectively. It can not be excluded that an upwelling occurred also in the area of frontal interface, which distributed water from the PF to opposite sides. This is suggested by the distribution profiles of silicate, phosphate and nitrate as well as by salinity and temperature distributions shown earlier (Park *et al.* 1996). The nutrient concentrations decreased south-westward and north-eastward from the PF with concentration ranges being from 22  $\mu\text{M}$  to 18  $\mu\text{M}$  for silicate, from 28  $\mu\text{M}$  to 26  $\mu\text{M}$  for nitrate and from 2.05  $\mu\text{M}$  to 1.85  $\mu\text{M}$  for phosphate, respectively. These decreases at both sides of the front can eventually be linked with the beginning of a phytoplankton spring bloom. Chlorophyll *a* (these data were kindly provided by M. Panouse) increased from shallow stations across the PF towards the AW with maximal concentrations of 0.58  $\text{mg m}^{-3}$  at Station 12 and 0.56  $\text{mg m}^{-3}$  at Station 14. There is no clear relation between removal of nutrients and increased chlorophyll *a* concentrations, however.

As shown in Figure 1 the PF is most clearly evidenced by the patterns of DON and DOP. The Shelf waters are characterised by highest concentrations of dissolved organic matter (DOM, up to 45  $\mu\text{M}$  of DON and up 2.41  $\mu\text{M}$  of DOP respectively). Strongly decreased values occurred at the rear side of the frontal interface (to <5 and <0.1  $\mu\text{M}$  respectively) in AW. The distinction between EKSW and AW is also evidenced by the relative amounts. The EKSW contains more organic nitrogen and phosphorus (up to 65% and 52% respectively), whereas mineral forms of nitrogen and phosphorus were predominant (more than 90% and 95% respectively) in AW. Additionally, they indicated an intensive spring bloom in EKSW, although the highest chlorophyll *a* concentrations were observed at the opposite side of the PF.

A comparison of the DOC : DON : DOP ratio with the Redfield ratio (Redfield *et al.* 1963) indicates considerable excess of DON in EKSW, with DOC : DON (<5) and DOC : DOP (<20) being several times less than the Redfield ratio. On the contrary, these ratios increase rapidly across the PF and exceed the Redfield ratio in AW. The latter values for DOC : DON, DOC : DOP and DON : DOP amounted to >40, >700 and >100

respectively. In terms of DOC : DOP there is a deficit of DOP in both the EKS<sub>W</sub> and the AW.

Along the second transect the PF is located in the vicinity of Station 6 (Figure 2) as clearly evidenced by thermohaline and hydrochemical parameters. In the upper 300 m layer oxygen was oversaturated (up to 2.2 %) and the depth of 100 % saturation was at <300 m. Concentrations of silicate, nitrate and phosphate showed strong discontinuities as observed along transect 1, with upwelling from a depth of approximately 150 m in the vicinity of Station 11. Maximal nutrient concentrations occurred in the upper 30 m of the AW adjacent to the PF. In the latter area the nitrate and phosphate but mainly the silicate concentrations were higher than the ones observed in transect 1. Along the first transect the values amounted to 26.4, 1.82 and 16.2  $\mu\text{M}$  for nitrate, phosphate and silicate, whereas the corresponding values along transect 2 were 27.2, 1.85 and 16.2  $\mu\text{M}$ , respectively. On the contrary, EKS<sub>W</sub> displayed similar nutrient concentrations in both transects.

The DON : DOP patterns were very typical for both transects: minimal values were observed in the EKS<sub>W</sub> and drastic increases in the AW. The highest values for DOC : DON (100, Station 13 at 202 m) and for DON : DOP (1050) correspond to transect 2, exceeding the ones observed at the same depth along transect 1. Generally, the DOC : DON were closest to the Redfield ratio in the PFZ. It must be stressed here that no data are available for the shallow Stations 6 and 4, however.

*Distributions of inorganic and organic nutrients along the north to south transect* — Surface waters along the north to south transect exhibited very low temperatures and very deep mixed layer depths, which decreased from approximately 200 m at Station A18 to 100 m at Station A11. Temperature in the mixed layer amounted to >2 °C in the northernmost study area (Stations A18 and A17), with the Polar Front (PF) presumably being located between both stations. Furthermore, the temperature decreased from approximately 1.7 °C at Station A16 to negative temperatures at Stations A12 (-1.3 °C) and A11 (-1.6 °C). The latter one coincided with the northernmost extension of the Antarctic Divergence (AD), as evidenced by the other hydrochemical parameters also. Very deep mixed layer depths determined the location of the pycnocline and hindered heating of the upper layer. Processes of upper layer heating were observed at the northernmost stations (A14, A16 and A18 eg.) only.

During early spring low temperature in the Antarctic Surface Water (ASW) south of the PF induced insignificant oxygen oversaturation (up to 2.4 %). The lower boundary of oxygen oversaturation layer varied from a depth of >400 m at Station A18 to <150 m at Station A11.

Thermohaline and hydrochemical parameters provided clear evidence for the presence of the AD in the vicinity of 59 °S (Figure 3). Corresponding silicate, nitrate and phosphate

concentrations were 40  $\mu\text{M}$ , 30  $\mu\text{M}$  and 2.15  $\mu\text{M}$  respectively. Moreover, higher concentrations of DON (up to 19.4  $\mu\text{M}$  at Station A12) were observed in this area, representing approximately 30 % of DTN. The AD frontal zone characteristically separates Antarctic Surface Water (ASW) from Circumpolar Deep Water (CDW). In both the ASW and the CDW a predominance of inorganic nitrogen compounds was observed. The concentrations of DON in the upper 50 m were highest in areas adjacent to the PF (8  $\mu\text{M}$ ) and at the AD between ASW and CDW. Maximal DON : DTN ratios were observed in the former area, with values ranging respectively from 9.3 (10 m) to 1.0 (200 m) at Station A18 and from 6.5 (20 m) to 1.7 (183 m) at Station A17. These values contrast with gradients from 8.5 (12 m) to 0.1 (151 m) at Station A11 and from 11.4 (10 m) to 2.7 (302 m) at Station A12.

DOC : DON ratios were lower than the Redfield ratio and changed insignificantly in the upper 180 m layer (with values between 5 to 10). These low values indicate the presence of low molecular organic compounds (such as e.g. amino acid and small proteins) or might be attributed to some bacterial species as well (Parsons *et al.* 1982). Sharp increases of the DOC : DON ratio concurred with the lower border of the mixed layer, where the values exceeded the Redfield ratio several times. The highest DOC : DON ratios (up to 692) were observed in the northernmost extension of the AD, indicating considerable predominance of dissolved organic carbon contents in the dissolved phase.

*Biomass, taxonomic composition and size structure of the phytoplankton community* — Biomasses of major taxonomic groups are shown in Table 3. In general phytoplankton biomass was low (<13  $\mu\text{g C l}^{-1}$ ) and interstation variability was small. However, the compositions of the community were significantly different (Figure 4). At the ice edge (station M4) the phytoplankton community was dominated by diatoms (60.4 %). On the other hand, in the PF (station A18) flagellates were dominant (64.8 %). Flagellate biomass exhibited a north to south negative gradient. Dinoflagellates were mainly abundant at station A16.

Among diatoms pennate species were dominant, representing over 68 % of the diatom biomass and, in particular, they were very abundant close to the ice edge where they contributed about 41.3 % of total phytoplankton biomass and 92.4 % of diatom biomass. Centric species, on the other hand, were less abundant and represented 2.3 to 19.1% of total phytoplankton biomass. Their relative contribution showed a north to south positive gradient.

Size fractionation indicated that the biomass of the <10  $\mu\text{m}$  size fraction increased northwards and was maximal at station A18 (72.1 %; Figure 5 and Table 3). On the contrary, the >10  $\mu\text{m}$  size fraction showed an opposite trend and its relative importance was highest at station M4 (81.5 %) in the ice edge, where diatoms are dominant.

## The nitrogen uptake regime

*Nitrogen uptake and nutrient availability* — The described surface nutrient distributions (Figures 1, 2 and 3; Table 1) clearly illustrate the early spring conditions observed during ANTARES 3. Surface nitrate varied roughly from 26  $\mu\text{M}$  in the northernmost region of the north to south transect to 28  $\mu\text{M}$  nearby the ice edge. Ammonium was very low throughout with a slight enhancement (approximately 0.2  $\mu\text{M}$ ) in the vicinity of the ice and urea concentrations consistently bordered to the detection limit with concentrations <0.15  $\mu\text{M}$ . The corresponding nitrogen uptake was very typical for the onset of the growth season too (Table 2), with slightly enhanced nitrate uptake (specific uptake rates >0.003 h<sup>-1</sup>) and poor ammonium as well as urea uptake (specific uptake rates <0.002 h<sup>-1</sup>). On average, the total nitrogen uptake was low with nitrate being the main nitrogen source (f-ratios >0.5), a traditional picture of an oligotrophic Southern Ocean ecosystem.

*The effect of different nitrogenous nutrients on the nitrogen uptake regime: preference and inhibition patterns* — It is a basic tenet of nitrogen utilisation by phytoplankton that ammonium is the preferred substrate for most of the phytoplankton in the World Ocean and that ammonium inhibits the uptake of nitrate. Initially it was believed that little or no nitrate was taken up at high ammonium concentrations (>1  $\mu\text{M}$ ). A thorough review by Dortch (1990) showed that there is quite some variability in the degree to which ammonium affects the nitrate uptake, and that the reduction of nitrate uptake in presence of ammonium is rarely complete. Separate quantifications of preference and inhibition are only possible when uptake rates of both nutrients alone are investigated without any kind of interference from the other. This is difficult if not impossible with field samples.

In first instance we focused on the combined effect of both, preference and inhibition, on the nitrogen uptake regime. Commonly interactions between different nitrogen sources are assessed by RPI indices (McCarthy *et al.* 1977):

$$RPI_{N_1} = \frac{\rho - N_1 \cdot \frac{\sum_{i=1}^n [N_i]}{N_1}}{\sum_{i=1}^n \rho - N_i} \quad (1)$$

where  $\rho - N_i$  is the absolute uptake rate and  $[N_i]$  the concentration of the  $i^{\text{th}}$  nutrient.

During ANTARES 3,  $RPI_{\text{NO}_3}$  was significantly less than 1 (95% CI : 0.60 - 0.73), while  $RPI_{\text{Urea}}$  (95% CI : 11 - 27) and  $RPI_{\text{NH}_4}$  (95% CI : 28 - 49) were consistently above 1 (Table 2). These values suggest that for the studied region the ammonium uptake activity (the absolute uptake rate normalised to the ammonium concentration) usually exceeds the corresponding urea and nitrate uptake activities :

$$\rho - \frac{NH_4}{[NH_4]} > \rho - \frac{Urea}{[Urea]} > \rho - \frac{NO_3}{[NO_3]} \quad (2)$$

Equation (2) is supported by earlier observations for the World Ocean (McCarthy *et al.* 1977, Dortch 1990, Smith and Harrison 1991). Moreover, our  $RPI_{NH_4}$  values agree well with those reported for the MIZ by Goeyens *et al.* (1995). However, we draw attention to some discrepancies. The RPI concept can easily be misused when it is applied as a physiological preference indicator. As discussed recently by Stolte and Riegman (1996),  $RPI_{NH_4}$  may be more dependent on nutrient concentrations than on the algal preference for ammonium. Assuming Michaelis-Menten kinetics for ammonium and nitrate uptake,  $RPI_{NH_4}$  may be expressed as:

$$RPI_{NH_4} = \frac{\alpha \cdot (NO_3 + NH_4)}{\alpha \cdot NH_4 + NO_3 \cdot \left( K_{NH_4} + \frac{NH_4}{K_{NO_3} + NO_3} \right)} \quad (3)$$

where  $K_{NO_3}$  and  $K_{NH_4}$  are the half-saturation constants for uptake of nitrate and ammonium,  $a = V_{NH_4}/V_{NO_3}$ , the ratio of the maximal uptake rates, representing the actual physiological preference of phytoplankton for ammonium relative to nitrate (Stolte and Riegman 1996).

For Southern Ocean waters with high nitrate concentrations largely exceeding the ammonium and  $K_{NO_3}$  values, equation (3) may be rewritten:

$$RPI_{NH_4} = \frac{\alpha \cdot NO_3}{(\alpha + 1) \cdot NH_4 + K_{NH_4}} \quad (4)$$

Equation (4) illustrates that  $RPI_{NH_4}$  is a function of  $a$  (the actual preference for ammonium), and that it is positively correlated with ambient nitrate when ammonium and  $K_{NH_4}$  are constant. Parameter values  $K_{NH_4}$  and  $V_{NH_4}$  for the concentration dependent uptake of ammonium were assessed at station M4 (Figure 6). Assuming that a  $K_{NH_4}$  value of 0.51  $\mu M$  is representative for the pooled incubation experiments,  $a$  can be estimated from equation (4). Interestingly, the  $a$  values (95% CI: 0.96 - 1.8) indicate that the degree of ammonium preference during ANTARES 3 is significantly lower than expected from the RPI values (Table 2). Moreover, the preference for ammonium is more pronounced during ANTARES 2 (95% CI: 3.7 - 5.8) despite remarkably similar RPI values obtained for both cruises (see Table 4). Hence, dependence of RPI values on nitrate concentrations is far more important than dependence on any uptake characteristic and the use of RPI values as preference indicators is subject to conceptual assumptions.

We carried out several experiments to investigate the influence of ammonium concentrations on the nitrate uptake. The inhibition of nitrate uptake by ammonium addition was fitted by means of a variation of the Michaelis-Menten equation in which

nitrate uptake was normalised to the maximum observed rate at zero addition of ammonium ( $r\text{-NO}_3(\text{rel})$ , Harrison *et al.* 1996):

$$\rho - \text{NO}_3(\text{rel}) = 1 - \left( \frac{I_m \cdot \Delta\text{NH}_4}{K_i + \Delta\text{NH}_4} \right) \quad (5)$$

where  $\Delta\text{NH}_4$  is the added ammonium concentration,  $K_i$  the half saturation constant for inhibition and  $I_m$  the maximum realised inhibition (values from 0 to 1).

The best fit for equation (5) is shown by the solid lines in Figure 7. The quantity  $[1 - I_m]$  is the residual nitrate uptake, expressed as a fraction of the original uptake rate, which is unaffected by further ammonium addition. It should be noted that whenever this empirical procedure addresses parameters for inhibition due to ammonium addition, it can not evaluate the influence of the ammonium originally present in the sample. Hence, the true parameter values may be smaller for  $K_i$  and larger in the case of  $I_m$  (Harrison *et al.* 1996). For  $I_m = 1$ , equation (5) is comparable to the mathematical expression of inhibition (Parker, 1993), suggesting that at infinite ammonium addition, nitrate uptake rates are reduced to zero. With respect to the ecological significance of these results, it should be remembered that inhibition is a highly variable process. It largely depends on interspecies differences and changing environmental conditions and it includes both short-term as well as long-term regulation. Therefore, the approach used here has to be considered as a best compromise between data acquisition and resulting predictive power, since it uses environmental variables only. With  $K_i = 0.5 \mu\text{M}$  and ambient ammonium concentrations up to  $0.17 \mu\text{M}$ , the degree of inhibition during ANTARES 3 is maximally 25 % (Table 2)

*The relation between uptake regime and phytoplankton distribution* — Taxonomic and size structure analysis of the phytoplankton communities during early spring (ANTARES 3) suggests that the phytoplankton community in the ice edge (at station M4) is dominated by large diatoms (mainly pennate species) and in the PF (station A18) by small flagellates (Figures 4 and 5). Phytoplankton carbon represented 7 to 39 % of the particulate carbon indicating a large contribution of non-phytoplankton material (probably detritus, Table 2). Although the absolute POC value was low, the relative contribution of phytoplankton (PPC : POC) was highest at station A16 (mean = 30.3 %). High phytoplankton activity at this station is also corroborated by an elevated total specific nitrogen uptake rate ( $S_{N_t}$ ), which reflects the growth rate of the phytoplankton (Table 3). Moreover, our results suggest that high specific nitrate uptake rate occurs when the relative contribution of phytoplankton is high (Figure 8).

During this cruise the production regime of phytoplankton was characterised by a predominance of new (nitrate based) production ( $f$ -ratio  $>0.5$ , Table 3). Thus, during early spring both diatom and flagellate dominated assemblages were predominantly based on new production. The dependence on nitrate of a flagellate dominated assemblage at station

A18 is not surprising given the very low ambient ammonium concentration (Table 1). However, the inverse relationship between ambient ammonium concentration and flagellate biomass (Figure 9) and the strong positive linear relationship between the relative abundance of flagellates and  $\alpha$  (Figure 10) suggest the greater potential importance of ammonium as a nitrogen source for the flagellate dominated community.

*Seasonal variability* — In this paragraph we present a comparison between ANTARES 2 and 3 (Stations A18, A16 and A8/M4) with respect to factors known to affect the nitrogen uptake regime such as the taxonomic composition and size structure of the phytoplankton community as well as the preference and inhibition patterns. The results are summarised in Table 4.

During the earliest stage of the growth season (ANTARES 3), specific uptake rates of nitrate were high and new production (Dugdale and Goering 1967) was predominant with f-ratios  $>0.5$ . During summer the situation was completely opposite, however, with low f-ratios ( $<0.4$ ) and considerably higher relative contributions of ammonium uptake. Rather amazingly, the seasonal shift in the nitrogen uptake regime did not coincide with changes in the structure of the phytoplankton community. Only a slight decrease in the relative abundance of diatoms at station A18 and an increase in the  $<10 \mu\text{m}$  size fraction at station A16 were noticed during ANTARES 2 (Figure 4). As already stated, preference for ammonium ( $\alpha$ ) during ANTARES 3 is less than expected from RPI values and coincides with the following sequence: flagellate  $>$  dinoflagellate  $>$  diatom. Such a trend was not observed during ANTARES 2, although  $\alpha$  values were significantly higher. This concurs with the greater potential for inhibition of nitrate uptake by ammonium and enhanced values of the specific ammonium uptake rates (Table 4). Therefore, it is suggested that the appearance of regenerated nitrogenous nutrients triggered a switch-over from predominantly new production to regenerated production. Apparently, these changes were mainly driven by a combination of preference and inhibition, with the phytoplankton community structure affecting the uptake regime to a minor degree. These observations agree well with results from other regions of the Southern Ocean (Goeyens *et al.* 1991, Jacques and Panouse 1991, Semeneh *et al.* 1996).

## **Acknowledgements**

We are grateful to L. Oriol, J. Floch, P. Pondaven and M. Panouse for measurements of nutrient and Chlorophyll *a* concentrations. The present study was funded by the Belgian Scientific Research Programme on the Antarctic (contract Nr: A3/03/001). Frank Dehairs is research associated at the National Fund for Scientific Research, Belgium. Evgeny Dafner holds a postdoc position at the Laboratory for Analytical Chemistry, VUB.

The authors very gratefully acknowledge the magnificent treatment on board R.V. Marion Dufresne.

## **BIBLIOGRAPHIE**

Bogdanov M.A., Solyankin E.V., Maslennikov V.V., Popkov B.B. and Rodionov S.N. (1980). Variability of oceanological conditions and some regularities in the distribution of krill in the area of West Antarctic Peninsula Coast, in: *Biological resources of antarctic krill*, Moscow, p.55 - 72 (in Russian).

Bronk D.A., Glibert P.M. and Ward B.B. (1994). Nitrogen uptake, dissolved organic nitrogen release, and new production, *Science* 265: 1843-1846.

Collos Y. (1987). Calculations of <sup>15</sup>N uptake rates by phytoplankton assimilating one or several nitrogen sources, *Applied Radiation and Isotopes* 38, 275 - 282.

Dortch Q. (1990). The interaction between ammonium and nitrate uptake in phytoplankton, *Marine Ecology Progress Series* 61, 183 - 201.

Dugdale R. C. and Goering J. J. (1967). Uptake of new and regenerated forms of nitrogen in primary productivity, *Limnology and Oceanography* 23, 196 - 206.

Dugdale R. C. and Wilkerson F. P. (1986). The use of <sup>15</sup>N to measure nitrogen uptake in eutrophic oceans; experimental considerations, *Limnology and Oceanography* 31, 673 - 680.

Eppley R. W., Reid F. M. H. and Strickland J. D. H. (1970). The ecology of the plankton of La Jolla, California, in the period April through September 1967, in : *Estimates of Phytoplankton Crop Size, Growth Rate and Primary Production Part III* , J. D. H. Strickland (ed.), Scripps. Inst. Oceanogr., pp 33 - 42.

Eppley R.W. and Peterson B.J. (1979). Particulate organic matter flux and planktonic new production in the deep ocean, *Nature* 282: 677-680.

Goeyens L., Kindermans N., Abu Yusuf                      Elskens (1996). A room temperature procedure for the manual determination of urea in sea water, *Marine Chemistry* submitted.

Goeyens L., Semeneh M., Elskens M., Shopova D., Baumann M. E. M. and Dehairs F. (1996). Phytoplanktonic nutrient utilization and nutrient signature in the Southern Ocean, *Journal of Marine Systems* accepted for publication.

Goeyens L., Sörensson F., Tréguer P., Morvan J., Panouse M. and Dehairs, F. (1991). Spatiotemporal variability of inorganic nitrogen stocks and assimilatory fluxes in the Scotia-Weddell Confluence area, *Marine Ecology Progress Series* 77, 7 - 18.

Goeyens L., Sørresen F., Tréguer P., Morvan J., Panouse M. and Dehairs F. (1991). Spatiotemporal variability of inorganic nitrogenic nitrogen stocks and uptake fluxes in the

Scotia-Weddell Confluence area during November and December 1988. *Marine Ecology Progress Series* 77: 7 - 19.

Goeyens L., Tréguer P., Baumann M. E. M., Baeyens W. and Dehairs F. (1995). The leading role of ammonium in the nitrogen uptake regime of Southern Ocean marginal ice zones, *Journal of Marine Systems* 6, 345 - 361.

Harrison W.G., Harris L.R. and Irwin B.D. (1996). The kinetic of nitrogen utilization in the oceanic mixed layer: nitrate and ammonium interactions at nanomolar concentrations, *Limnology and Oceanography* 41, 16 - 32.

Jacques G. and Panouse M. (1991). Biomass and composition of size fractionated phytoplankton in the Weddell-Scotia Confluence area, *Polar Biology* 11, 315 - 328.

Maslennikov V.V. (1979). Peculiarity of horizontal circulation in area of South Georgia Island, *Antarctica*, Moscow, p.140 - 143 (in Russian).

McCarthy J. J., Taylor W. R. and Taft J. L. (1977). Nitrogenous nutrition of the plankton in the Chesapeake Bay. 1. Nutrient availability and phytoplankton preferences, *Limnology and Oceanography* 22, 996 - 1011.

Park Y. H., Charriaud E. and Gambéroni L. (1996). Physique de la campagne Antares III, in : *ANTARES, SO-JGOFS Workshop*, Descolas-Gros C, Mayzaud P and Tréguer P. (eds.), Montpellier, 25 - 34.

Parker R.A. (1993). Dynamic models for ammonium inhibition of nitrate uptake by phytoplankton, *Ecological Modelling* 66, 113 - 120.

Parsons T.P., Takahashi M. and Hargreiw B. (1982). *Biological oceanography*. Moscow, 431p.

Probyn T. A. and Painting S. J. (1985). Nitrogen uptake by size-fractionated phytoplankton populations in Antarctic surface waters, *Limnology and Oceanography* 30, 1327 - 1332.

Redfield A. C., Ketchum B. H. and Richards F. A. (1963). The influence of organisms on the composition of sea water, in : *The Sea, Volume 2*, Hill M. N. (ed.), Wiley, New York, 26 - 77.

Semeneh M., Dehairs F., Lancelot C., Baumann M. E. M., Kopczynska E., Elskens M. and Goeyens L. (1996). Nitrogen Uptake Regime and Phytoplankton Community Structure In The Southern Ocean, *Journal of Marine Systems* accepted for publication.

Smith W. O. Jr. and Harrison W. G. (1991). New production in polar regions: the role of environmental controls, *Deep-Sea Research* 38, 1463 - 1479.

Stolte W. and Riegman R. (1996). The relative preference index for phytoplankton nitrogen use is only weakly related to physiological preference, *Journal of Plankton Research* 18, 1041 - 1045.

Technicon, 1973. Industrial Method 186-72/B. Tarrytown, NY.

Technicon, 1977. Industrial Method 158-71/A. Tarrytown, NY.

Utermöhl H. (1958). Zur Vervollkommnung der quantitativen Phytoplankton-Methodik. *Mitt. Int. Verein. theor. angew. Limnol.* 9, 1 - 38.

Valderrama J.C. (1981). The simultaneous analysis of total nitrogen and total phosphorus in natural waters, *Marine Chemistry* 10, 109 - 122.



- Figure 1. First Panache transect, Stations ..., Contour plots of ... (ED)
- Figure 2. Second Panache transect, Stations ..., Contour plots of ... (ED)
- Figure 3. North to South transect, Stations ..., Contour plots of ... (ED)
- Figure 4. Interstation variability in phytoplankton assemblage during ANTARES 3 (MS)
- Figure 5. Interstation variability in size fractionated phytoplankton biomass along the north to south transect during ANTARES 3 (MS)
- Figure 6. Determination of parameter values  $K_{NH4}$  and  $V_{NH4}$  (ME)
- Figure 7. Relative absolute nitrate uptake rate (ME)
- Figure 8. Relation between specific nitrate uptake rate and relative contribution of phytoplankton (PPC) during ANTARES 3 (SM)
- Figure 9. Ammonium concentrations versus flagellate biomass (SM)
- Figure 10. Relative abundance of flagellate versus a values (SM)
- Figure 11. Differences in phytoplankton assemblage composition and size fractionation for ANTARES 2 and 3 (**SM, is this figure different from Figure 4? if not then there is no Figure 11**)
  
- Table 1. Surface dissolved matter distribution during ANTARES 3
- Table 2. Surface particulate matter distribution during ANTARES 3
- Table 3. characteristics of the nitrogen uptake regime during ANTARES 3
- Table 4. Comparison between ANTARES 2 and 3

Table 1: the distribution of dissolved matter in the surface layer during ANTARES 3

Station	Nitrate <sup>1</sup> $\mu\text{M}$	Ammonium $\mu\text{M}$	Urea $\mu\text{M}$	DON $\mu\text{M}$	Phosphate $\mu\text{M}$	DOP $\mu\text{M}$	Silicate <sup>1</sup> $\mu\text{M}$
P 9							
A 18							
A 16							
M 4							

<sup>1</sup> Courtesy of L. Oriol, J. Floch and P. Pondaven

Table 2: the distribution of particulate matter in the surface layer during ANTARES 3

Station	PN $\mu\text{M}$	Chlor a <sup>1</sup> $\mu\text{g l}^{-1}$	PPOC	Diatom	Dino	Flagellate	<10
P 9							
A 18							
A 16							
M 4							

<sup>1</sup> Courtesy of M. Panouse

Table 3: the nitrogen uptake regime in the surface layer during ANTARES 3

Station	$\rho_{\text{NO}_3}$	$\rho_{\text{NH}_4}$	$\rho_{\text{UR}}$	$\nu_{\text{NO}_3}$	$\nu_{\text{NH}_4}$	$\nu_{\text{UR}}$
	$\mu\text{M d}^{-1}$	$\mu\text{M d}^{-1}$	$\mu\text{M d}^{-1}$	$\text{h}^{-1}$	$\text{h}^{-1}$	$\text{h}^{-1}$
P 9						
A 18						
A 16						
M 4						

Station	f-ratio	$\text{RPI}_{\text{NO}_3}$	$\text{RPI}_{\text{NH}_4}$	$\text{RPI}_{\text{UR}}$	$\alpha$	I
P 9						
A 18						
A 16						
M 4						

**Distribution des acides nucléiques particuliers (ADN et ARN) dans l'Océan Indien Austral en début de printemps**

**Maria Cordélia MACHADO<sup>(1)</sup>, Michel FIALA<sup>(2)</sup>, Louise ORIOL<sup>(2)</sup>,  
Michel PANOUSE<sup>(2)</sup>**

<sup>1</sup>Instituto de Ciências Biológicas e Ambientais, Universidade Santa Úrsula, 22 231-010  
R. Jorn. Orlando Dantas, 59 Rio de Janeiro, Brésil

<sup>2</sup>Observatoire Océanologique de Banyuls, Université P & M Curie, CNRS URA 2071  
66650 Banyuls-sur-mer

**INTRODUCTION**

Parmi les nombreux marqueurs biochimiques proposés comme indicateurs du taux de croissance cellulaire, l'ADN et l'ARN ont retenu l'attention du fait de leur relation spécifique avec la division cellulaire et les processus de croissance. En général, la concentration d'ADN cellulaire, molécule contenant l'information génétique, varie très peu et est très peu sensible aux variations du milieu. Par contre, les teneurs en ARN, molécule responsable de la synthèse protéique, sont sujettes aux variations des facteurs environnementaux. Ceci a amené à considérer la concentration en ADN comme un bon

indice d'estimation de la biomasse phytoplanctonique vivante (Holm-Hansen et al. 1968, Dortch et al, 1983). D'autre part, le rapport ARN/ADN a été proposé comme un indice du taux de croissance chez les micro-organismes auto- et hétérotrophes du milieu marin (Karl, 1981; Dortch et al., 1983, 1985). Parmi les travaux effectués dans le milieu marin (Takahashi et al., 1974; Dortch et al., 1985; Paul et al., 1985; Berdalet & Estrada, 1993) aucun ne concerne l'Océan Austral. Seule, une première approche a été effectuée dans le Secteur Indien en fin d'été austral, lors de la campagne Antares 2 (Machado et Oriol, 1995).

## **MATERIEL ET METHODES**

### **Echantillonnage**

Lors de la campagne Antares 3, sept stations ont été échantillonnées entre 0 et 200 m, le long de la radiale 62° E, entre 49° et 58° S. Deux de ces stations ont été suivies pendant 5 jours (station A16) et 6 jours (station A11). D'autre part, dans le cadre de l'étude du panache Est des Iles Kerguelen, 5 stations ont été étudiées dans cette zone. Les échantillons d'eau de mer ont été prélevés à l'aide de bouteilles Niskin montées sur rosette associée à une bathysonde. 1,5 à 3 l d'eau de mer ont été filtrés, sous faible vide, sur filtres GF/F en fibres de verre, préalablement calcinés au four à 450 °C. Les filtres ont été conservés dans l'azote liquide jusqu'au moment de l'analyse.

### **Détermination de l'ADN et l'ARN**

Les concentrations en ADN et en ARN ont été déterminées par spectrofluorimétrie selon la méthode du double fluorochrome, en utilisant les colorants, Hoechst 33258 et le thiazole orange (Berdalet & Dortch 1991). Le protocole expérimental utilisé est celui décrit par Machado (1994).

## **RESULTATS PRELIMINAIRES**

### **Distribution de l'ADN et de l'ARN le long de la radiale 62 °E**

La concentration des eaux antarctiques en acides nucléiques particulières sont peu élevées. Sur l'ensemble des données, les teneurs en ADN varient de 0,1 à 4,5 mg m<sup>-3</sup>, et celles de l'ARN de 0,1 à 7,5 mg m<sup>-3</sup>. Les régions les plus riches se situent en bordure du pack et au sud de la Zone des fronts. En bordure du pack, les valeurs intégrées sur les 200 premiers mètres sont comprises entre 450 à 500 mg m<sup>-2</sup> pour l'ADN et entre 630 et 690 mg m<sup>-2</sup> pour l'ARN (Fig. 1). Vers le nord, les concentrations en acides nucléiques diminuent. Dans les eaux libres de glace (POOZ), les teneurs en acides nucléiques varient

entre 300 et 400 mg ADN m<sup>-2</sup> et entre 200 et 370 mg ARN m<sup>-2</sup>. Au voisinage de la Zone des fronts, les valeurs augmentent sensiblement pour atteindre 420 mg ADN m<sup>-2</sup> et près de 600 mg ARN m<sup>-2</sup>.

La distribution verticale des acides nucléiques est homogène sur toute la colonne d'eau dans la zone du large (POOZ), alors que dans les régions situées de part et d'autre, la couche sub-superficielle est plus riche (Fig. 2). Aussi bien dans la région du pack que dans la zone voisine des fronts, la couche de surface est plus riche en ARN qu'en ADN avec un maximum marqué entre 40 m et 60 m (7,5 mg ARN m<sup>-3</sup> à la st. A12).

Les concentrations en ADN reflètent assez bien la biomasse des micro-organismes autotrophes comme en témoigne la corrélation entre les concentrations de chlorophylle et d'ADN sur l'ensemble des stations de la radiale (Fig. 4).

### **Stations de longue durée**

La station A11 (site M4), située en bordure immédiate du pack (58°20 S), présente une grande variabilité temporelle (Fig. 3). Durant les 3 premiers jours, les valeurs moyennes d'ADN et d'ARN varient entre 1,3 et 1,8 mg m<sup>-3</sup>. Les 3 jours suivants, les concentrations sont nettement plus élevées, avec des valeurs moyennes comprises entre 2,2 et 2,5 mg ADN m<sup>-3</sup> et entre 2,7 et 3,8 mg ARN m<sup>-3</sup>. Le même phénomène a été observé pour la biomasse chlorophyllienne (Panouse et al., ce volume). Du fait des conditions particulières de navigation en limite du pack dérivant, il est probable que l'on soit en présence de 2 masses d'eau différentes. Ceci devra être précisé à la lumière des caractéristiques hydrologiques.

La station A16 (site M2), située dans la POOZ (52°00 S), présente une distribution verticale en acides nucléiques particulière homogène dans toute la colonne d'eau. La variabilité temporelle y est très faible, avec des concentrations moyennes comprises entre 1,2 et 1,9 mg ADN m<sup>-3</sup> et entre 2,0 et 2,4 mg ARN m<sup>-3</sup>.

### **Radiale "Panache" (Stations K03 à K13)**

Les eaux subantarctiques situées au NE des Iles Kerguelen sont pauvres. Les valeurs moyennes varient entre 2,0 et 2,7 mg ADN m<sup>-3</sup> et entre 1,0 et 3,3 mg ARN m<sup>-3</sup>. Les eaux superficielles entre 0 et 100 m renferment des quantités d'acides nucléiques plus importantes que les eaux sous-jacentes: dans la couche superficielle, les concentrations en ADN sont supérieures à 2 mg m<sup>-3</sup>, alors qu'en deçà, elles sont de l'ordre de 1,5 mg m<sup>-3</sup>.

Le long de la radiale on distingue deux zones plus riches en acides nucléiques. A proximité des Iles Kerguelen, dans le Golfe des Baleiniers (St K03), les eaux de surface présentent des valeurs moyennes de 3 mg ADN m<sup>-3</sup> et 4 mg ARN m<sup>-3</sup>. Des valeurs similaires sont également rencontrées au delà d'une centaine de milles de Kerguelen

(Stations K10- K13). Entre ces 2 zones (Stations K02 - K07), les valeurs sont moindres, ne dépassant pas 2,5 mg ADN m<sup>-3</sup> et 3 mg ADN m<sup>-3</sup>.

## **REMERCIEMENTS**

Ce travail n'aurait pu être réalisé sans le soutien de J. Maron Ramos, Chancelier de l'Université Santa Ursula de Rio de Janeiro.

## **BIBLIOGRAPHIE**

- Berdalet, Q. (1991). New double-staining technique for RNA and DNA measurement in marine phytoplankton. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, 73: 293-305.
- Berdalet, (1993). Relationships between nucleic acid concentrations and primary production in the Catalan Sea (Northwestern Mediterranean). *Mar. Biol.*, 117: 163-170.
- Dortch, Q., Roberts, T.L., Clayton, Jr, J.R., Ahmed, S.I. (1983). RNA/DNA ratios and DNA concentrations as indicators of growth rate and biomass in planktonic marine organisms. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, 13: 61-71.
- Dortch, Q., Clayton, Jr., J.R., Thoresen, S.S., Clevelen, J.S., Bressler, S.L., Ahmed, S.I. (1985). Nitrogen storage and use of biochemical indices to assess nitrogen deficiency and growth rate in natural plankton populations. *J. Mar. Res.*, 43: 437-464.
- Holm-Hansen, O., Sutcliffe, W.H., Jr, Sharp, J. (1968). Measurement of deoxyribonucleic acid in the ocean and its ecological significance. *Limnol. Oceanogr.*, 13: 507-514.
- Karl, D.M. (1981). Simultaneous rates of ribonucleic acid and deoxyribonucleic acid synthesis for estimating growth rate and cell division in aquatic microbial communities. *Appl. Environ. Microbiol.*, 42: 802-810.
- Machado, M.C. (1994). Analyse des acides nucléiques sur les cultures d'algues et en milieu océanique. Thèse Doctorat, Université Pierre et Marie Curie, Paris VI, 137 p.
- Machado, M.C., Oriol, L. (1995). Variations des concentrations en ADN et ARN dans l'Océan Austral, entre 49° et 67° Sud. *Rapp. Camp. Mer, IFRTP.*, 95-01: 118-121.
- Paul, J.H., Jeffrey, W.H., DeFlaun, M. (1985). Particulate DNA in subtropical oceanic and estuarine planktonic environments. *Mar. Biol.*, 90: 95-101.
- Takahashi, M., Nagai, H., Yamaguchi, Y., Ichimura, S. (1974). The distribution of chlorophyll *a*, protein, RNA and DNA in the North Pacific Ocean. *J. Oceanog. Soc. Japan*, 30: 137-150.

## **ETUDE DU RESEAU PROTOZOOPLANCTONIQUE DANS LE SECTEUR INDIEN DE L'OCEAN AUSTRAL**

**Patricia MENON\***

URA CNRS 1513, Institut Universitaire Européen de la Mer, Université de Brest,  
6 avenue le Gorgeu, BP 809, F-29285 Brest Cedex

\* Adresse actuelle Groupe de Microbiologie des Milieux Aquatiques, GMMA,  
Université Libre de Bruxelles, Campus de la Plaine, CP 221, Bd du Triomphe, B-1050  
Bruxelles.

## INTRODUCTION

La dynamique du protozooplancton a été étudiée durant la fin de l'hiver austral 1995 dans le secteur Indien de l'Océan Austral: radiale 62°E entre les latitudes 49°S et 58°S. Les estimations d'abondance et de biomasse du nanoplancton ( $2\mu\text{m} < \text{Equivalent Diamètre Sphérique} < 20\mu\text{m}$ ) et du microplancton ( $20\mu\text{m} < \text{Equivalent Diamètre Sphérique} < 200\mu\text{m}$ ) auto et hétérotrophes ont été effectuées par comptage au microscope à épifluorescence. Les taxons composant le phytoplancton non siliceux, sont des dinoflagellés, des flagellés et des ciliés. La biomasse totale des organismes nano-phytoplanctoniques, varie de 3,9 à 7,4  $\text{mgC}/\text{m}^3$ , dans la zone de mélange. Au niveau du front de glace nous observons une diversification des taxons et en particulier des ciliés et des dinoflagellés microphytoplanctoniques.

## RESULTATS

Parmi les organismes hétérotrophes dénombrés nous notons la présence de nanoprotozooplancton et de microprotozooplancton. La communauté de nanoprotozooplancton hétérotrophe est composée de flagellés, de dinoflagellés et de ciliés. La biomasse en nanoprotozooplancton (dinoflagellés, autres flagellés, ciliés) hétérotrophe représente de 46 à 78% de la biomasse protozooplanctonique hétérotrophe totale. Le microprotozooplancton est essentiellement composé de ciliés et de dinoflagellés, nous observons une biomasse élevée de ces organismes au niveau du front de glace (2,7 à 5,4  $\text{mgC}/\text{m}^3$ ).

L'ingestion des bactéries et des cellules nano-phytoplanctoniques par les protozoaires nano et microplanctoniques a été déterminée expérimentalement par application du protocole développé par Becquevort (1996) et Menon *et al.*, (1995). Le principe de la procédure expérimentale repose sur l'utilisation de bactéries fluorescentes (FLB, fluorescently labelled bacteria, Sherr *et al.*, 1987, 1989) et d'algues fluorescentes (FLA, fluorescently labelled algae, Rublee & Gallegos, 1989) dont l'ingestion par les protozoaires est estimée par observation microscopique.

L'activité bactéricivore du nanoprotozooplancton varie de 0,23 à 1,15  $\text{mgC}/\text{m}^3/\text{jour}$  et celle du microprotozooplancton varie de 0,006 à 0,05  $\text{mgC}/\text{m}^3/\text{jour}$ . Les ciliés autotrophes peuvent être considérés comme des protozoaires mixotrophes car ils ont une activité bactéricivore. Nous notons une activité des ciliés mixotrophes, notamment au niveau du front de glace, de 0,01 à 0,02  $\text{mgC}/\text{m}^3.\text{jour}$ , ceci représente 8% (au front de glace) de l'activité bactéricivore totale.

Les activités herbivores du protozooplancton hétérotrophe et mixotrophe sont calculés uniquement sur base des concentrations en nanophytoplancton non siliceux. L'activité herbivore due aux nanoprotzooplancton varie de 0 à 9,6 mgC/m<sup>3</sup>.jour. Les activités les plus importantes étant situées à la latitude 55°S et 58°S. L'activité herbivore du microprotozooplancton varie de 0,012 à 1,11 mgC/m<sup>3</sup>.jour, avec une activité plus importante au niveau du front de glace. La consommation des nanoflagellés autotrophes par les mixotrophes est la plus importante au sud et peut représenter jusqu'à 32% de la consommation globale.

## **BIBLIOGRAPHIE**

Becquevort, 1996, Nanoprotzooplancton of the Atlantic sector of the Southern Ocean in early spring: biomass and feeding activities, in press.

Menon, Becquevort & Lancelot, 1994, Dynamique du nano et du micro protozooplancton: abondances, biomasses et activités, In: *Rapport des Campagnes à la Mer*, IFRTP ed, n°95-01:154-163.

Rubblee & Gallegos, 1989, Use of Fluorescently labelled algae (FLA) to estimated microprotozooplancton grazing, *Marine Ecology Progress Series*, 51:221-227.

Sherr, Sherr & Fallon, 1987, Use of monodispersed fluorescently bacteria to estimate in situ protozoan bacterivory, *Applied Environmental Microbiology*, 53:958-965.

Sherr, Sherr & Pedros-Alio, 1989, Simultaneous measurement of bacterioplankton production and protozoan bacterivory in estuarine water, *Marine Ecology Progress Series*, 54:209-219.

## **Rapport de la campagne ANTARES. Résultats préliminaires obtenus à l'aide du Profileur Vidéo Marin**

**Gabriel GORSKY et Marc PICHERAL**

URA 2077, LOBEPM, Observatoire Océanologique, 06230 Villefranche sur mer

Le Profileur Vidéo Marin (PVM) fonctionne en deux modes. Le premier est composé d'un éclairage structuré, fournissant un faisceau parallèle, d'un épaisseur de 15 mm. La taille d'image enregistré est de 140 x 190 mm. Le volume filmé est de 422 ml. Une image est enregistrée toutes les 4 cm durant l'immersion verticale de l'appareil. La gamme de tailles des particules en suspension visualisées ainsi, se situe entre 150  $\mu$ m et 3000  $\mu$ m. Ce mode a été utilisé pour étudier la distribution verticale et l'évolution de tailles des particules en suspension dans la colonne d'eau.

Les stations suivantes ont été étudiées :

Panache Fer : stations - Pan 6, Pan 8, Pan 9, Pan 11 et Pan 12 (Fig. 1).

Radiale : stations - A 18, A 15 et A 12 (Fig. 2).

Station longue durée M2 : immersions M2-3, M2-4, M2-5, M2-8 (Fig. 3)

Station longue durée M4 : immersions M4-1, M4-2, M4-3, M4-12, M4-13, M4-14, M4-15, M4-16, M4-17, M4-18, M4-19, M4-20 (Fig. 4).

Le deuxième mode de fonctionnement est basé sur l'illumination d'un grand volume (70 l). Les objets de taille > 5 mm sont enregistrés et les bandes vidéo sont dépouillés manuellement.

Les stations suivantes ont été étudiées par cette méthode :

Radiale : stations - A 17, M2 (Fig.5).

Station longue durée M2 : immersions M2-1, M2-2, M2-6, M2-7 (Fig. 7).

Station longue durée M4 : immersions M4-4, M4-5, M4-6, M4-7, M4-8, M4-9, M4-10, M4-11, M4-21, m4-22 (Fig. 8).

## **RESULTATS**

Panache Fer : Une couche nepheloïde riche peut être observée aux stations peu profondes près du fond. En surface, la station 6, la plus côtière, ainsi que la station 12, la station la plus au large sont les plus riches en particules. Les stations intermédiaires sont moins riches et notamment les stations 8 et 11.

Radiale : Si l'on compare les stations de nuit, on constate que la couche ayant une concentration en particules plus élevée est plus profonde au nord (stations M2-3, A15) qu'au sud (stations A12, M4-13), par contre les concentrations maximales sont plus élevées et plus superficielles au sud.

Station M2 : La couche superficielle riche en particules est située entre 0 et 200 m. Les concentrations maximales ne dépassent pas 35 particules par litre. Sous cette couche le nombre de particules par litre ne dépasse pas 10, comme dans les eaux à caractère oligotrophe.

Station M4 : La couche superficielle riche en particules est située entre 0 et 150 m. Les concentrations maximales peuvent dépasser 100 particules par litre près de la surface. Sous cette couche riche en matière organique en suspension, la situation redevient oligotrophe.

Éclairage grand volume : Dans la couche superficielle, à toutes les stations, les grandes chaînes de diatomées sont visibles à l'oeil nu. Cette couche atteint la profondeur de 280 m à la station A14. Les salpes ont été détecté à la station M4 près du pack. Parmi les prédateurs les chaetognathes ont dominé la colonne d'eau. Sur toutes les station nous avons identifié des appendiculaires à partir de la profondeur de 850 m. Les crustacés de petites tailles 5-10 mm ont été présents dans toute le colonne d'eau, par contre les maximums de grandes crustacés ont été situés sous la couche superficielle, riche en particules.

La migration verticale a été visible surtout en ce qui concerne les grandes crustacés, les chaetognathes, mais aussi chez les prédateurs gélatineux comme chez les méduses, les siphonophores ou les ctenophores. A la station M4 le jour la profondeur des groupes migrateurs a été moins élevée qu'à la station M2.

## **Composition et abondance du mésozooplancton et du micronecton dans le côté indien de l'océan Antarctique au début du printemps**

**Ahmed Errhif , Jean-Philippe Labat et Patrick Mayzaud**

Groupe d'Océanographie Biochimique et Ecologie - LOBEPM

URA-CNRS 2077, Observatoire Océanologique BP 28

06 230 Villefranche -sur-mer

### **INTRODUCTION**

L'examen détaillé du zooplancton du coté indien de l'océan Antarctique est réalisé pour la première fois au début du printemps austral. Durant cette saison le retrait de la glace expose le zooplancton, pour une courte période, à une variation importante des conditions hydrologiques. La réponse du zooplancton à cette variation apparaît très intéressante à étudier.

Le présent travail concerne plus particulièrement l'abondance, la composition faunistique et la répartition du zooplancton, ainsi que la structure des populations des principales espèces.

### **MATERIEL ET METHODES :**

Les prélèvements ont été effectués dans le secteur indien de l'océan antarctique, au cours de la mission Antares 3 (1<sup>er</sup> octobre - 8 novembre 1995). Au total 5 stations ont été

échantillonnées le long de la radiale du 62°E, entre 49°S jusqu'à la limite nord du pack diffus (58°30'S), et 5 autres dans la zone N-E des îles Kerguelen (Fig. 1).

Le mésozooplancton a été récolté par des pêches verticales à l'aide d'un dispositif comportant trois filets WP2 de 0,25 m<sup>2</sup> de surface d'ouverture et de 200µm de vide de maille. Les prélèvements pour le macroplankton et le necton ont été réalisés avec un filet de type ORI (1.6 m de diamètre et 1 mm de vide de maille), les traits étaient des doubles obliques avec 400 m de câble filé soit une profondeur approximative de 200 m. Le volume filtré était estimé avec un volucompteur General-Oceanic. Les échantillons ont été divisés en deux fractions l'une pour l'estimation de la biomasse et la seconde pour l'étude de la composition faunistique.

Les variations quantitatives du zooplancton ont été appréhendées de deux façons : par le moyen de comptages d'organismes et par la détermination du poids sec. Pour le comptage, deux formes d'évaluations ont été retenues : une évaluation précise, par espèce et éventuellement par stade de développement pour les copépodes, et une évaluation plus globale pour les autres catégories du zooplancton.

## RESULTATS

### Composition et abondance du mésozooplancton:

- Le long de la radiale du 62°E:

Outre copépodes, 10 autres taxons de zooplancton sont rencontrés dans la zone étudiée. Malgré les faibles abondances de la plupart de ces groupes, nous préférons présenter l'information qualitative qu'ils apportent (Fig. 2).

#### *Les copépodes:*

Numériquement les copépodes constituent en moyenne et de façon régulière 91% du zooplancton échantillonné. Les densités les plus élevées s'observent dans la zone marginale des glaces (900 ind/m<sup>3</sup>) et à un niveau moindre à la station A18 (450 ind/m<sup>3</sup>). Dans la partie centrale de la radiale l'abondance de ces animaux est nettement plus faible (environ 200 ind/m<sup>3</sup>), et sans fluctuations majeures.

#### *Les Amphipodes:*

C'est un groupe peu abondant, les plus faibles densités (< 2 individus par 10 m<sup>3</sup>) sont rencontrées dans de la zone marginale des glaces. En dehors de cette zone, bien que relativement plus élevée, leur densité ne dépasse pas 5 individus/m<sup>3</sup>. A la station 16 les prélèvements de nuit sont 6 fois plus riches en amphipodes que ceux du jour.

#### *Les Chaetognathes:*

Ce groupe est moyennement abondant dans l'ensemble de la zone étudiée. Sa densité est relativement plus élevée dans la zone marginale des glaces et dans la partie centrale de la radiale, avec un maximum d'environ 16 ind/m<sup>3</sup> à la station A15.

### *Les Euphausiacés:*

Représentées essentiellement par des juvéniles, les euphausiacés sont plus importants dans les prélèvements de nuit. Leur densité est relativement plus élevée dans la partie sud de la radiale (zone marginale des glaces) avec un maximum de 22 ind/m<sup>3</sup> à la station A12. Au nord de cette station leur densité ne dépasse pas 6 ind/m<sup>3</sup>. La plus faible concentration (2 ind/m<sup>3</sup>) est rencontrée à l'extrême nord de la radiale.

### *Les Gasteropodes:*

A part les deux stations A16 et A18 où leurs concentrations dépassent 1 ind/m<sup>3</sup>, les gastéropodes sont à peine présents dans l'ensemble des autres stations.

### *Les ostracodes:*

Les ostracodes constituent l'un des groupes les moins abondants du zooplancton avec des concentrations généralement inférieures à 1 ind/m<sup>3</sup>, et ne montrent pas de variations majeures le long de radiale.

D'autres groupes n'apparaissent qu'occasionnellement et en petits nombre, ce qui ne permet pas de décrire les particularités de leur répartition latitudinale: les méduses, les salpes, les siphonophores et les larves de poissons.

La comparaison de ces résultats avec ceux obtenus dans la même zone pendant l'été austral au cours de la mission Antares II montre, à l'exception des salpes et des ostracodes, un enrichissement considérable de l'ensemble du mésozooplancton. Cet accroissement est surtout visible dans la zone saisonnière des glaces (A12-M4, SIZ), et un peu moins dans la zone front polaire (A17-A18, PFZ). Dans la zone de l'océan libre de glaces en permanence (A16-A13, POOZ) la différence d'abondance de la plupart des taxons n'est pas significative. En ce qui concerne les copépodes, le groupe dominant pendant les deux périodes, leur abondance au début du printemps est 5 fois plus importante dans la SIZ que celle observée en été, et 1.5 fois dans la PFZ.

- Dans la zone N-E de Kerguelen (Fig. 3).

Les résultats obtenus permettent une description du zooplancton suivant un gradient côte-large. Les copépodes représentent au minimum 94% du zooplancton échantillonné à la station la plus au large, et plus de 99% dans les autres stations. En ce qui concerne leur répartition, on note un gradient côte-large très marqué: La plus forte densité (2700 individus/m<sup>3</sup>) s'observe à la station 3, puis décroissent en direction du large pour atteindre un minimum d'environ 400 individus/m<sup>3</sup> dans les deux stations les plus éloignées de la côte. En ce qui concerne le reste du zooplancton, à part les gastéropodes et les ostracodes qui se montrent plus océaniques, les autres taxons (amphipodes, chaetognathes, polychètes et salpes) ne montrent aucune tendance régulière nette dans leur répartition.

### **Distribution et abondance des espèces de copépodes**

- Le long de la radiale du 62°E:

L'examen des prélèvements le long de la radiale a permis d'identifier 26 espèces de copépodes :

---

<i>Aetideus armatus</i>	<i>Microcalanus pygmaeus</i>
<i>Calanoides acutus</i>	<i>Oithona frigida</i>
<i>Calanus propinquus</i>	<i>Oithona similis</i>
<i>Calanus simillimus</i>	<i>Oncaea antarctica</i>
<i>Candacia maxima</i>	<i>Oncaea curvata</i>
<i>Clausocalanus laticeps</i>	<i>Paraeuchaeta (copepodites)</i>
<i>Ctenocalanus citer</i>	<i>Paraeuchaeta antarctica</i>
<i>Eucalanus longiceps</i>	<i>Pleuromamma robusta</i>
<i>Euchirella rostromagna</i>	<i>Racovitzanus antarcticus</i>
<i>Haloptilus oxycephalus</i>	<i>Rhincalanus gigas</i>
<i>Heterorhabdus austrinus</i>	<i>Scaphocalanus farrani</i>
<i>Metridia lucens</i>	<i>Scaphocalanus verwoorti</i>
<i>Microsetella norvegica</i>	<i>Scolecithricella minor</i>

---

Nous ne présentons à la figure 2 que les espèces capturées en nombre suffisant pour permettre une description de leur répartition latitudinale.

L'abondance des espèces de copépodes contraste avec celle observée en été austral durant Antares II. A l'exception de *Calanus simillimus* qui décroît d'environ 50% dans la PFZ, les densités de la plupart des espèces sont plus élevées au début du printemps avec un maximum d'accroissement dans la SIZ.

Aussi bien durant le printemps que durant l'été, l'essentiel du peuplement de copépodes est constitué par les trois petites espèces: *Ctenocalanus citer*, *Oithona frigida* et

*Oithona similis*. *Ctenocalanus citer* s'étend sur toute la radiale avec des densités très variables, et domine approximativement dans l'ensemble des échantillons de la radiale (45% dans la PFZ; 37.4% dans la POOZ et 40.5% dans la SIZ). *Oithona frigida* et *Oithona similis* montrent des distributions spatiales similaires, leur maximum d'abondance sont observés dans la SIZ où elle représentent respectivement 14 et 40% de l'effectif total des copépodes. Malgré la forte dominance de ces trois espèces, leur contribution à la biomasse des copépodes reste très faible (Tableau 1). L'essentiel de la biomasse est constitué par les quatre espèces suivantes: *Calanoides acutus*, *Calanus propinquus*, *Calanus simillimus* et *Rhincalanus gigas*. *Calanoides acutus* montre son maximum d'abondance (27 ind/m<sup>3</sup>) dans la SIZ contribuant à 26.93% de la biomasse des copépodes, sa densité décroît progressivement vers le nord pour disparaître complètement dans la PFZ. *Calanus propinquus* dont l'extension vers le nord est limitée à la POOZ montre un optimum d'abondance dans la SIZ (en moyenne 5 ind/m<sup>3</sup>) où il représente 10.87% de la biomasse des copépodes. *Calanus simillimus*, généralement considéré comme espèce subantarctique, s'étend sur toute la radiale avec un maximum de 51 ind/m<sup>3</sup> à son extrême nord. Il est fortement dominant dans la PFZ et la POOZ où il représente respectivement 88,7 et 35,35% de la biomasse des copépodes. *Rhincalanus gigas* est relativement abondante dans la SIZ et la POOZ en y représentant respectivement 52,93 et 56,77% de la biomasse des copépodes.

- Dans la zone N-E de Kerguelen.

Au total 13 espèces de copépodes ont été identifiées dans cette zone: *Calanus simillimus*, *Clausocalanus breviceps*, *Clausocalanus laticeps*, *Ctenocalanus citer*, *Drepanopus pectinatus*, *Halloptilus oxycephalus*, *Metridia lucens*, *Oithona frigida*, *Oithona similis*, *Oncaea sp.*, *Paraeuchaeta sp.* (copépodites), *Rhincalanus gigas* et *Scolecithricella minor*. Parmi ces espèces, seul *Drepanopus pectinatus* est typiquement néritique, sa contribution au nombre total de copépodes dépasse 95 % à la station 4 et 65 % à la station 3, puis chute vers le large (20 et 12 % respectivement pour les stations 2 et 10). Au niveau de la station 14, typiquement océanique, sa contribution est inférieure à 0.1 %. A l'exception de la station 4 les densités de *Ctenocalanus citer*, *Oithona frigida* et *Oithona similis* présentent des abondances relativement élevées par rapport à celles rencontrées dans la partie nord de la radiale du 62°E. Les densités de *Ctenocalanus citer* croissent vers le large en passant de 50 à 170 ind/m<sup>3</sup>, alors que celles de *Oithona frigida* et *Oithona similis* décroissent respectivement de 400 et 500 à 76 et 100 ind/m<sup>3</sup>. *Clausocalanus breviceps*, *Halloptillus oxycephalus* et *Metridia lucens* sont exclusivement présentes, et en très faibles nombres, dans les deux stations les plus au large. Les autres espèces sont rencontrées sur l'ensemble de la radiale mais avec des densités croissantes de la côte vers le large.

### **Structure des populations des principales espèces de copépodes:**

Nous avons limité cette étude aux espèces de copépodes qui déterminent l'essentiel de la biomasse du mésozooplancton: *Calanoides acutus*, *Calanus propinquus*, *Calanus simillimus* et *Rhincalanus gigas*.

La distribution des stades de développement varie suivant les espèces et la zone considérée (Fig. 5).

*Calanoides acutus* est représenté exclusivement par les deux stades copépodites les plus âgés (CIV et CV) et par les adultes femelles. Dans la SIZ 74% de la population est formée par le stade CV, leur proportion décroît ensuite à 15% dans la POOZ où la population est formée à 84% par les adultes.

Dans la SIZ la population de *Calanus propinquus* est dominée par une jeune génération formée des stades CI et CII dont ils représentent respectivement 43 et 29%, les adultes constituent 16%. Les rares représentants de cette espèce dans la POOZ sont des femelles adultes (80% de la population) et, dans une moindre proportion (20%), des stades CV.

L'essentiel de la population de *Calanus simillimus* est formé par le stade CV et les adultes, la proportion de ces derniers décroît de 51,7 dans la PFZ à 16.11% dans la SIZ, alors que celle de CV passe de 30.6 à 74.1%. Les autres stades (CI à CIV) sont par contre faiblement représentés.

La majeure partie de la population de *Rhincalanus gigas* est formée par les stades CIII et CIV. Dans la PFZ cette population est exclusivement formée par le stade CIII, qui représente 85.7% de celle-ci, et par le stade CIV. L'abondance relative de CIII décroît progressivement vers le sud où celle du stade CIV croit. Les adultes qui sont absents dans la PFZ et à peine présents dans la POOZ représentent 12.6% de la population dans la SIZ. Les stades les plus jeunes (CI et CII) sont par contre très faiblement représentés dans l'ensemble de la zone étudiée.

Si l'on compare ces résultats avec ceux observés en été, lors de la mission Antares II (Janvier - Février), on remarque que les populations des ces quatre espèces sont plus jeunes en été. La population de *Calanus propinquus* est composée essentiellement des stades CIII-CV dans la POOZ et de CII-CIII dans la SIZ, celles de *Calanoides acutus* et *Calanus simillimus* sont composées en grande partie par les stades CIV-CV dans la PFZ et la POOZ et par les stades CII et CIII dans la SIZ et celle de *Rhincalanus gigas* dominée par les stades CII-CIV dans la POOZ et par CII-CIII dans la SIZ.

### **Composition et abondance du necton.**

Une part importante de la fraction supérieure à 1 mm, échantillonnée par le filet ORI, est représentée par les euphausiacés. Le tableau 2 présente les densités pour les cinq espèces aux différentes stations. Elles ont une densité moyenne de 0.4 par m<sup>3</sup>.

Les euphausiacés *Euphausia frigida*, *Thysanoessa spp* sont présentes dans toutes les stations A18, A16, A15, A14, M4.

*Euphausia frigida* est l'espèce dominante avec 0.28 animaux par m<sup>3</sup> en moyenne. Elle est particulièrement abondante à la station A12 où elle atteint une densité de 0.82 individus par m<sup>3</sup> contre un maximum de 0.22 par m<sup>3</sup> à la station A14 pour Antares 2. En comparaison avec Antares 2, cette espèce présente des densités plus élevées au nord que pendant la période estivale. On note que *E. frigida* est en période de reproduction par la présence de très nombreux animaux avec des spermatophores.

Le complexe *Thysanoessa spp* est composé des deux espèces *T. macrura* et *T. vicina* difficilement discriminables. Elles ont une densité moyenne de 0.1 par m<sup>3</sup>. Elles présentent au sud du front polaire une répartition stable contrairement à la période estivale où elles montraient un très net gradient positif vers le sud.

*Euphausia vallentini* est seulement présente à la station A18, et n'a pas été trouvée à cette période printanière aux stations A14 et A16, comme observé à Antares 2.

*Euphausia triacantha* est une espèce peu abondante 0.005 par m<sup>3</sup> en moyenne mais avec une présence très constante. Ses densités sont très proches de celles observées en période estivale.

Des larves de *Euphausia superba* ont été trouvées en petit nombre aux stations de la zone M4.

## CONCLUSIONS

Sur le plan quantitatif, le contraste entre la zone marginale des glaces et le reste de la radiale est très bien visible. Il est clair que les conditions créées par le retrait des glaces sont très favorables au développement du mésozooplancton. Ce dernier est largement dominé par les petites espèces de copépodes (*Oithona spp.* et *Ctenocalanus citer*), mais en termes de biomasse l'essentiel est déterminé par les grands calanoides.

La comparaison entre les distributions des euphausiacés des campagnes Antares 2 et Antares 3, c'est à dire entre la période estivale et printanière, montre une répartition décalée vers le nord pour la période la plus froide avec des densités plus élevées pour les espèces australes. Les densités au sud du front polaire sont élevées.

En ce qui concerne la structure des populations des principales espèces de copépodes, elle est dépendante de l'espèce et de la zone considérée. Ces populations se montrent plus

jeunes dans la zone saisonnière des glaces que dans le reste de la radiale, ce qui montre que ces espèces se reproduisent plus tard dans cette zone.

## Legende des figures

Figure 1: cartes des stations de prélèvement avec l'enveloppe de dérive aux deux stations longues M2 et M4.

Figure 2: Evolution des abondances des principaux groupes de zooplancton le long de la radiale du 62°S

Figure 3: Répartition des densités de copépodes dans la zone N-E de Kerguelen.

Figure 4: Evolution des abondances des principales espèces de copépodes le long de la radiale du 62°S

Figure 5: abondances absolues et relatives des différents stades de développement des quatre principales espèces de copépodes antarctique dans les trois zones (PFZ: zone du front polaire, POOZ: zone de l'océan libre de glaces en permanence, SIZ: zone saisonnière des glaces)

ANTARES 3	PFZ		POOZ	
	% du nombre de copépodes	% du poids sec des copépodes	% du nombre de copépodes	% du poids sec des copépodes
Espèces				
<i>Calanoides acutus</i>	-	-	1.2	5.1
<i>Calanus propinquus</i>	-	-	< 0.1	0.3
<i>Calanus simillimus</i>	11.3	88.7	13.3	35.3
<i>Ctenocalanus citer</i>	45.0	5.1	37.4	1.4
<i>Oithona frigida</i>	15.7	1.3	12.5	0.4
<i>Oithona similis</i>	16.8	1.4	21.0	0.6
<i>Paraeuchaeta copepodite</i>	0.2	1.0	0.5	< 0.1
<i>Rhincalanus gigas</i>	0.1	2.3	7.3	56.8

Tableau 1. Contribution des principales espèces de copépodes en nombre et en biomasse au peuplement de copépodes du secteur Indien de l'Océan Antarctique au début du printemps (Antares 3)

Espèces	<i>E. superba</i>	<i>E. frigida</i>	<i>E. triacantha</i>	<i>E. vallentini</i>	<i>Th</i>
Stations					
A18	-	0.058	-	0.011	
A16/M2	-	0.295	0.009	-	
A15	-	0.189	0.012	-	
A14	-	0.089	0.004	-	
A12	-	0.823	0.003	-	
M4	0.007	0.242	0.003	-	

Tableau 2. Densité des euphausiacés par m<sup>3</sup> pour les stations chantillonnées.

## ZOOPLANCTON : BIOMASSES, TENEURS EN CARBONE ET AZOTE.

Suzanne RAZOULS <sup>1</sup>, Jean-Philippe LABAT <sup>2</sup>, Jacques LE FEVRE <sup>3</sup>

Jérôme MAISON<sup>1</sup> et Patrick MAYZAUD<sup>2</sup>

<sup>1</sup>UMR-CNRS 2071, O.O.B., Laboratoire Arago, 66 650 Banyuls-sur-mer

<sup>2</sup> Equipe d'Océanographie Biochimique Marine, LOBEPM-URA2077,

O.O.V, BP 28, 06230 Villefranche-sur-mer

<sup>3</sup> I.U.E.M. UMR-CNRS 15 13, UBO, BP 809, 29 285 Brest

### INTRODUCTION

Les mesures de biomasse du zooplancton font partie des paramètres caractéristiques du programme JGOFS. Les communautés planctoniques participent en effet activement aux transformations de la matière organique et au flux de carbone dans la colonne d'eau où elles occupent une place importante dans le réseau trophique ( Hopkins, 1985). La biomasse représente un état global, " statique " et instantané des communautés zooplanctoniques résultant de la " dynamique " de production des différentes espèces et/ou d'apports advectifs. Elle reflète l'état d'évolution d'un écosystème dans les conditions hydrobiologiques antérieures et est impliquée dans les cycles biogéochimiques globaux ( Longhurst, 1991).). Les processus biologiques de broutage, de respiration et de reproduction jouant un rôle dans le fonctionnement du cycle du carbone ( Fortier et al. 1994 ), des études complémentaires de ces paramètres ont été faites sur quelques espèces antarctiques représentatives au cours de la campagne. Les variations quantitatives des communautés zooplanctoniques sont traitées ici globalement selon une mésoéchelle spatio-temporelle le long de la radiale Nord-Sud à 62 °E et à petite échelle aux stations fixes

A16 et M4. La prospection aux stations situées dans la zone Nord Est de Kerguelen n'a été suivie que pour les prélèvements de mesozooplancton.

## **MATERIEL ET METHODES**

Trois fractions du zooplancton ont été étudiées : le mésozooplancton (200  $\mu\text{m}$  à 10 mm), le macroplancton et le micronecton (10 mm à 10 cm), l'hyponeuston (zooplancton superficiel) constitué d'éléments variés du gros mesozooplancton, du macroplancton et du micronecton. Dans l'ensemble de la campagne la majorité des prélèvements ont été effectués de nuit.

### **Mesozooplancton.**

Les pêches étaient faites à l'aide d'un filet - triple WP2 (vide de maille de 200  $\mu\text{m}$ ).

Les traits verticaux étaient réalisés en général entre - 200 mètres et la surface, à l'exception des stations à bathymétrie moins profonde au NE de Kerguelen (St 2 : 80-0m ; St 3 et 4 : 110 - 0m).

Une pêche était conservée (formol 5 %) pour identification ultérieure; une était recueillie par filtration sur une soie pré-pesée, rincée au formiate d'ammonium et congelée à -20°C immédiatement pour détermination de la biomasse; une était utilisée vivante pour des études de processus. Ultérieurement, les échantillons de biomasses sont desséchés à l'étuve à 60°C pendant 24 h puis pesés. Les poids de biomasses sont exprimés en mg de poids secs . Les teneurs en Carbone et Azote sont analysées à l'aide d'un Analyzer CHN-2400 Perkin-Elmer. Les teneurs en Carbone et Azote sont données en pourcentages de poids de biomasse sèche. L'expression de l'ensemble des analyses quantitatives est standardisée par  $\text{m}^3$

### **Macroplancton et micronecton**

On a utilisé un filet OMORI (diamètre : 1,6 m ; vide de maille : 1 mm) équipé d'un volucompteur et tiré obliquement dans la couche des 200 premiers mètres. Les volumes filtrés étaient de l'ordre 2 000 à 4 000  $\text{m}^3$

### **Hyponeuston**

Pour des pêches de zooplancton superficiel, on a utilisé un filet " Hyponeuston " à ouverture rectangulaire d'une surface de 0,75  $\text{m}^2$  et vide de maille 300  $\mu\text{m}$ , tracté horizontalement à 2 noeuds dans les 50 premiers centimètres. Les volumes filtrés étaient calculés à partir de la distance parcourue , de la profondeur de pêche et de la surface de la section du filet, soit en moyenne 600  $\text{m}^3$ .

Dans les deux types de prélèvements Omori et Hyponeuston, le contenu des collecteurs était partagé en parties aliquotes à l'aide d'une boîte de Motoda : une moitié était conservée dans une solution de formol à 5% ; l'autre moitié était congelée après filtration, selon les mêmes techniques que pour le mesozooplancton pour estimation des biomasses et analyses biochimiques ultérieures.

Le zooplancton destiné aux études de processus ou à des analyses de biochimie spécifique était dilué dans de l'eau de mer naturelle immédiatement après la pêche, maintenu en chambre froide (2°C), et trié vivant.

## **RESULTATS**

Le Tableau I résume pour l'ensemble de la campagne Antarès 3, les valeurs moyennes des biomasses, des teneurs en Carbone et Azote et les rapports C / N. Les valeurs de biomasses montrent qu'en moyenne la fraction mesozooplanctonique représente quantitativement la fraction majoritaire du zooplancton de la couche des 200 premiers mètres du front polaire aux glaces et particulièrement dans la zone NE de Kerguelen. Les Copépodes représentent la communauté numériquement dominante ( $\geq 90\%$ ) du mesozooplancton (Errhif et al., cette publication). Les coefficients de variations des biomasses, 80% à 134%, traduisent l'hétérogénéité spatio-temporelle des communautés de zooplancton pour l'ensemble de la radiale à 62° E. L'hétérogénéité est plus réduite dans la zone NE de Kerguelen (Cv = 40%). La composante temporelle de ces variations inclut les variations nyctémérales.

Tableau I- *Biomasses sèches, teneurs en Carbone (C) et Azote (N) des différentes fractions du zooplancton. Ec : Ecart type ; C et N en p. cent du poids ; Cv % = coefficient de variation*

	Pds sec mg.m <sup>3</sup> ± Ec	% C ± Ec	% N ± Ec	C / N ± Ec
<b>Mesozooplancton</b>				
NE Kerguelen	50, 46 ± 40, 52	38, 75 ± 4, 69	8, 30 ± 1, 47	4, 72 ± 0, 53
	Cv % = 80,3	Cv % = 12, 1	Cv % = 17, 7	Cv % = 11, 2
Radiale 62° E	19, 24 ± 7, 94	33, 70 ± 1, 01	8, 27 ± 0, 37	4, 08 ± 0, 16
	Cv % = 41,3	Cv % = 3, 0	Cv % = 4, 4	Cv % = 3,9
<b>Macroplancton +</b>				
Micronecton	4, 90 ± 6, 59	33, 33 ± 4, 16	8, 51 ± 0, 97	3, 92 ± 0, 23
	Cv % = 1, 34	Cv % = 12, 5	Cv % = 11, 4	Cv % = 5, 9
Hyponeuston	10, 29 ± 8, 97	32, 26 ± 7, 21	8, 36 ± 1, 99	3, 92 ± 0, 48
	Cv % = 87, 2	Cv % = 22, 3	Cv % = 23, 8	Cv % = 12,2

### **Répartition à mésoéchelle spatio-temporelle : radiale N-S**

° Biomasse

#### **Mesozooplancton**

##### **a) Zone NE de Kerguelen (Fig. 1)**

C'est la zone la plus riche en mesozooplancton (en moyenne 50, 5 mg Pds sec. m<sup>-3</sup>). Les variations spatio-temporelles sont marquées par un gradient entre les stations 2 et 3, cotières ( 93,6 mg Pds sec.m<sup>-3</sup>) et les stations 4, 10 et 14, océaniques ( 14,4 mg Pds sec. m<sup>-3</sup> ). La distribution des biomasses semble soumise à l'influence d'un effet d'île et peut-être du courant nord du front polaire ( Park ; Blain , cette publication).

### **b) Radiale ( Fig.2)**

La biomasse moyenne pour toute la zone étudiée oscille autour de 19, 2 mg. m<sup>-3</sup> (± 7,9). Les valeurs minimum de 4 à 3 mg. m<sup>-3</sup> sont observées dans la zone du front polaire ( A18 et A17). Vers le sud les valeurs de biomasse augmentent et oscillent entre 10 et 83 mg.m<sup>-3</sup> . La valeur maximale est observée à la station A 12 et correspond à la présence dans le plancton de larves d'Euphausiacés, de Chaetognathes et d'Ostracodes Ces valeurs de biomasses sont cohérentes avec celles mesurées antérieurement dans le même secteur (Razouls et Razouls, 1982 ; Bedo et al. 1995).

#### *Macroplancton, Micronecton ( Fig.2)*

La moyenne des biomasses récoltées par l'Omori est moindre mais beaucoup plus hétérogène : 4, 9 mg.m<sup>-3</sup> ± 6, 6 que celle du mesozooplancton. Les valeurs minimales, autour de 0, 5 mg. m<sup>-3</sup> , se trouvent également au niveau du front polaire A 18 et à la station A 12 alors que la biomasse est maximale à la station M 4 ( 9,34 mg. m<sup>-3</sup>± 8,4).

#### *Hyponeuston*

La fraction epipelagique du plancton , en moyenne 10, 3 mg. m<sup>-3</sup> ± 8,9 présente un contraste moins accentué entre la zone du front polaire ( 8 mg. m<sup>-3</sup> ) et la zone sud St A14, A12, M4 ( 13 mg. m<sup>-3</sup> ). La seule composition faunistique actuellement connue pour la station M4, montre la dominance des grands copépodes, et la présence de larves d'Euphausiacés , de Salpes, de Pteropodes et Chaetognathes ( Delaval, 1996)

Le rapport des biomasses moyennes entre stations consécutives donne une idée de l'ampleur des variations spatio-temporelles le long de la radiale entre les latitudes 49° S à 58 °Sud. Les facteurs multiplicatifs d'une station à l'autre s'échelonnent de 0, 25 à 8 pour le mesozooplancton, de 0,4 à 27 pour le micronecton et de 0, 6 à 3, 8 pour l'hyponeuston .

#### ° Teneurs en carbone et azote ( Fig. 3 )

Les valeurs moyennes de teneur en C pour la totalité de la radiale ( Tableau I ) apparaissent stables entre 33, 7 et 32, 3 % avec des coefficients de variations de 3 à 22%, ainsi que les contenus azotés , entre 8, 5 et 8, 3 % avec des Cv % entre 4 et 24. Globalement les de C/N sont voisins de 4.

#### *Mesozooplancton*

Les teneurs minimum de 32, 6 % de carbone et de 7, 6 % azote ( C/N = 4,3 ) sont trouvées pour la station du front polaire (A 17). Ces valeurs reflètent une composition taxonomique où les copépodes sont peu nombreux ( 155 . m<sup>3</sup> ) et de petite taille (Errhif et al. cette publication).

Dans la zone océanique proprement dite (A 16 à A 12) les valeurs de carbone se situent entre 35,4 % et 37,4 % et celle d'azote entre 8,8 et 9,6 % (C / N de 3,9 à 4,2). Des valeurs légèrement inférieures, C = 32,5 % et N = 8,3 % (C / N = 3,9) à la station du bord des glaces M4, témoignent d'une composition faunistique mixte du plancton riche en copépodes (665 individus . m<sup>3</sup>) en Chaetognathes et Salpes. Les valeurs maximum et minimum étant respectivement de 38,6 % 26,8 % pour C et 7,7 et 9,5 % pour N. Les teneurs en C et N apparaissent légèrement inférieures à celles obtenues pour le zooplancton en fin d'été (mars) (Comm. perso. C. Razouls, Antiprod I non publiées) Elles sont par contre légèrement supérieures à celles du zooplancton d'été (février-mars) (Antares 2 : en moyenne C = 26,2% ± 6,6 ; N = 5,9 % ± 1,7 ; C / N = 4,8. Données non publiées). Les valeurs de Carbone sont maximum (38,7 %) dans la zone N.E de Kerguelen, probablement en raison de la dominance absolue d'un copépode, *Drepanopus pectinatus* (2 000. m<sup>-3</sup>) aux stations 2 et 3 les plus côtières (Errhif et al.cette publication)

#### *Macroplancton, Micronecton*

La même disparité des teneurs en C et N sont observées entre la station du front A18 C= 29,6 %, N = 7,7 % et celles de la POOZ (A 16 à A 12) - C = 34,5 %, N = 9 % avec des valeurs extrêmes observées de 42 % et 26 % pour C et de 9,98 % et 7,11 % pour N-

#### *Hyponeuston*

L'hyponeuston montre les variations plus fortes des teneurs en C et N (Cv = 23 %) que le reste du zooplancton (Cv autour de 12 %). Les valeurs de C et N apparaissent légèrement différentes de celles du meso- et macro-plancton et du micronecton, oscillant respectivement entre les valeurs de maximum et minimum de 41,1% et 18,3 % pour le Carbone et de 10,7% à 3,3 % pour l'azote

### **Variations nycthémerales journalières**

Au station " longues " de 6 et 7 jours (A 16 et M 4) les prélèvements de plancton ont deux stations été réalisés de jour et de nuit . Le tableau II résume l'ensemble des résultats pour ces deux stations

En moyenne, les variations de biomasse sont positives entre jour et nuit indiquant un accroissement du nombre d'individus dans la couche des 200 premiers mètres et la couche superficielle. Les contenus carbonés et azotés sont moins variables, un accroissement pour les échantillons de nuit s'observe à la station A 16 pour le mesozooplancton, le micronecton et l'hyponeuston, mais ne se vérifie pas à la station M4.

Les changements observés en A16 témoignent d'une modification des communautés due à la composition spécifique liée aux migrations nycthémerales des organismes et à leur métabolisme.

Tableau II - *Variations nycthémerales des biomasses, teneurs en Carbone, Azote et rapport C/N aux stations longues A 16 et M 4.*

Pds sec ± Ec mg / m <sup>3</sup>	%C ± Ec	% N ± Ec	C/N ± Ec
-------------------------------------	---------	----------	----------

Mesozooplancton					
A1 6	Jour	15, 73 ± 8, 3	35, 5 ± 3, 9	8, 25 ± 0, 53	4, 3 ± 0, 14
	Nuit	29, 79 ± 9, 0	38, 05 ± 0, 76	9, 45 ± 0, 1	4, 03 ± 0, 02
M 4	Jour	18, 65 ± 10, 8	32, 78 ± 14, 74	8, 65 ± 4, 3	3, 80 ± 0, 25
	Nuit	21, 37 ± 9, 0	32, 24 ± 2, 96	8, 15 ± 0, 4	3, 96 ± 0, 31
Macropl. / Micron.					
A1 6	Jour	0, 22 -	25, 97 -	7, 11 -	3, 65 -
	Nuit	1, 47 ± 0, 66	36, 15 ± 0, 41	9, 1 ± 0, 08	3, 99 ± 0, 02
M 4	Jour	1, 98 ± 2, 69	33, 24 ± 2, 78	8, 7 ± 0, 16	3, 82 ± 0, 39
	Nuit	12, 29 ± 7, 58	33, 04 ± 5, 68	5, 68 ± 1, 41	4, 07 ± 0, 24
Hyponeuston					
A1 6	Jour	1, 42 ± 0, 67	22, 1 ± 5, 24	5, 2 ± 2, 6	4, 59 ± 0, 92
	Nuit	4, 65 ± 8, 19	39, 1 ± 0, 69	10, 2 ± 0, 58	3, 84 ± 0, 11
M 4	Jour	6, 54 ± 4, 77	36, 8 ± 5, 44	9, 4 ± 1, 9	3, 94 ± 0, 25
	Nuit	15, 96 ± 12, 6	27, 61 ± 5, 94	7, 5 ± 1, 62	3, 69 ± 0, 39

Le facteur d'accroissement des biomasses est en moyenne de 1,5 pour le mesozooplancton, 6,4 pour le macroplancton -micronecton et 2, 9 pour l'hyponeuston. Ces variations sont indicatrices des instabilités des communautés zooplanctoniques à courte échelle de temps autour des stations (Fig. 4). Cependant l'amplitude des variations Jour / Nuit à la station M4 est probablement aussi la résultante de la localisation des pêches vis à vis de la zone marginale des glaces (proches des glaces le jour, éloignées la nuit).

En conclusion les traits caractéristiques qui apparaissent sont les suivants:

- la dominance quantitative des biomasses du mesozooplancton et ses faibles variations nyctémérales pour l'ensemble de la zone d'étude,
- pour le mesozooplancton, la différence très marquée entre la zone au NE de Kerguelen et la radiale,
- la faible représentation quantitative des fractions macroplancton-micronecton et hyponeuston et leur forte variabilité jour - nuit,
- l'opposition latitudinale de l'abondance du zooplancton entre zone du front polaire, zone océanique (POOZ) et zone du bord des glaces (SIZ)
- les teneurs en carbone et azote comparables pour l'ensemble des trois fractions zooplanctoniques et aux valeurs publiées antérieurement avec une gamme de rapport C/N entre 3, 9 et 4, 7.

## **BIBLIOGRAPHIE**

Bedo A., Labat J-P., Mayzaud P., 1995. Grazing par la communauté zooplanctonique : vers une approche globale. Rapport de campagnes à la mer ANTARES 2. IFRTP 95-01, 164-168.

Delaval M., 1996. Observations préliminaires sur le zooplancton superficiel en zone marginale des glaces antarctiques au printemps austral. Mémoire de Maîtrise, UBO, 19pp

Fortier L., Le Fèvre J., Legendre L., 1994. Export of biogenic carbon to fish and to deep ocean : the role of large planktonic microphages. J. Plankton Res. 16 (7) : 809-839.

Hopkins T.L., 1985. Food web of an Antarctic midwater ecosystem. Mar. Biol., 89 : 197-212.

Longhurst A.R., 1991. Role of the marine biosphere in the global carbon cycle. Limnol. Oceanogr., 36 (8) : 1507-1526.

Razouls C., Razouls S., 1982. Elements du bilan énergétique du mesozooplancton antarctique. Campagne océanographique MD 21 / Antipro II ( mars 1980). CNFRA, 53 : 131-141.

## **EVALUATION DES PROCESSUS METABOLIQUES DES PRINCIPALES ESPECES DE COPEPODES**

**Valentina TIRELLI<sup>1</sup>, Ahmed ERRHIF<sup>1</sup>, Jérôme MAISON<sup>2</sup>,  
Suzanne RAZOULS<sup>2</sup> et Patrick MAYZAUD<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> Equipe d'Océanographie Biochimique et d'Ecologie, LOBEPM, URA 2077,  
Observatoire Océanologique, BP 28, 06230 Villefranche-sur-mer

<sup>2</sup> UMR 2071, Laboratoire Arago, Observatoire Océanologique, 66650 Banyuls-sur-mer

### **INTRODUCTION**

L'appréciation de l'impact du zooplancton sur la production primaire en zone antarctique a été au centre des intérêts du programme JGOFS (Morales, 1991, 1993).

La plupart des études effectuées jusqu'à présent ont été réalisées au cours de campagnes estivales. Au cours d'Antares 3, le métabolisme des principales espèces de copépodes antarctiques a été évalué (broutage, respiration et pontes) pendant la période printanière.

### **MATERIEL ET METHODES**

Les animaux utilisés pendant les expériences ont été collectés avec les filets WP2 triple de 200 $\mu$ m de vide de maille (UNESCO, 1968) et ORI (OMORI, 1965).

#### *- Broutage*

L'ingestion est exprimée par la formule :  $I = G * K$ , où G est la valeur du contenu stomacal en ng de pigment par copépode et K le taux d'évacuation en h<sup>-1</sup>. La valeur des contenus stomacaux ont été déterminés sur des échantillons de 10 à 20 individus des principales espèces présentes. Les animaux ont été rapidement triés et filtrés sur papier

Sharkskin et immédiatement congelés à -80°C. Les échantillons ont été analysés à bord. Les animaux ont été broyés dans 4 ml d'acétone 90% et l'extraction est ensuite complétée pendant au moins une heure à 2°C. La fluorescence a été mesurée sur un fluorimètre Turner Designs 10 avant et après acidification, et la valeur du contenu stomacal en pigments chlorophylliens a été calculée selon les équations de Strickland & Parsons (1968) modifiées par Dagg (1983).

Le temps du transit intestinal (1/K) a été déterminé en plaçant des animaux qui venaient de se nourrir dans de l'eau de mer filtrée et en suivant dans le temps la décroissance de leur contenu stomacal. Un ajustement exponentiel de la décroissance observée nous a ensuite permis de calculer le temps de transit intestinal par l'équation suivante:

$$G = G_0 * e^{-kt}$$

G est le contenu stomacal après un temps t (minutes) et G<sub>0</sub> le contenu stomacal initial.

#### - Pontes

Les femelles ont été triées immédiatement après la pêche et maintenues individuellement à 2°C dans 10 à 20 ml d'eau de mer naturelle non filtrée. Chaque jour les récipients expérimentaux étaient examinés sous la loupe, les oeufs comptés et les femelles transférées dans de l'eau de mer naturelle fraîche. Les élevages étaient maintenus entre un jour à une semaine selon la durée des stations de prélèvements.

#### - Métabolisme respiratoire

Les animaux sont été triés et isolés dans des bécchers de grande taille remplis d'eau de mer filtrée. On a évité de faire les mesures pendant la période du choc due à la pêche. Après un temps de repos de 1 à 2 h, les animaux ont été introduits avec précaution dans les récipients d'expérience remplis d'eau de mer filtrée saturée en oxygène dans les conditions de température et de pression de l'expérience. Suivant qu'on réalise des mesures sur des animaux pris isolément ou par petits groupes, ils ont été placés soit dans des seringues (5 ou 10ml) soit dans des flacons (60 et 130ml) à bouchons en verre rodé. Le temps d'incubation des animaux à l'obscurité a été de 5 à 10 heures.

L'oxygène dissous dans l'eau de mer a été dosé à l'aide d'un oxymètre Strathkelvin. La quantité d'oxygène consommée a été calculée par différence entre les mesures de fin et de début d'incubation, en tenant compte d'une éventuelle variation des témoins.

## RESULTATS ET DISCUSSION

Cinq espèces ont été étudiées au cours de la campagne: *Calanus simillimus*, *Calanoides acutus*, *Calanus propinquus*, *Rhincalanus gigas* et *Pleuromamma robusta*. A l'exception de *Calanus simillimus* qui a été observé surtout dans la zone de l'océan libre de

glace en permanant (POOZ), les mesures sur les autres espèces ont été faites dans la zone saisonnière des glaces (SIZ).

Huit expériences nous ont permis de mesurer le temps de transit intestinal de *Calanoides acutus*, *Calanus propinquus*, *Rhincalanus gigas* et *Pleuromamma robusta*. tandis que pour *Calanus simillimus* nous avons utilisé un temps de transit moyen de 53,1 minutes obtenu par Atkinson *et al.* (1992). Les taux d'ingestion et de respiration ainsi que la ponte maximale sont présentes dans le tableau 1.

Espèce	Ingestion ng pig/cop/jour		Ponte n oeufsmax/fem/ jour de ponte	Respiration $\mu\text{O}_2$ /cop/jour	
	moy	ect		moy	ect
C. propinquus	64,36	16,48	114	19,51	8,76
C. acutus	11,91	5,08	38	13,20	4,99
Pleuromamma	39,11	2,55	0	10,25	2,18
Rhincalanus	19,04	5,90	45	17,83	6,22
g.					
C. simillimus	13,43	7,95	25	6,55	2,83

Tableau 1. Taux d'ingestion (ng pig/cop/jour) , taux de respiration ( $\mu\text{l O}_2$ /cop/jour) et ponte maximale (n oeufs/fem/jour de ponte); moy = moyenne, ect = ecartype.

L'ingestion a été transformée en consommation de carbone grâce au rapport  $C_{\text{Org}}/\text{pig}$  ( $C_{\text{Org}}/\text{pig M4} = 312$ ;  $A16-A15 = 106$ ) obtenu d'après les données de distribution des pigments (chlorophylle *a* et pheopigments) et carbone organique (Panouse; Bentaïem, ce volume) tandis que la consommation d'oxygène a été exprimée en production de carbone avec un coefficient respiratoire de 0,8 (tableau 2).

Espèce	Ingestion $\mu\text{g C}/\text{cop}/\text{jour}$		Respiration $\mu\text{gC}/\text{cop}/\text{jour}$	
	moy	ect	moy	ect
C. propinquus	20,08*	5,14	8,36	3,75
C. acutus	3,72*	1,58	5,66	2,14
Pleuromamma	12,20*	0,80	4,39	0,94
Rhincalanus g.	5,94*	1,84	7,64	2,66
C. simillimus	1,42**	0,84	2,81	1,21

Tableau 2. Taux d'ingestion et de respiration exprimés en  $\mu\text{g C}/\text{cop}/\text{jour}$ ; moy = moyenne, ect = ecartype. Rapport  $C_{\text{Org}}/\text{pig}$  utilisé: \*  $C_{\text{Org}}/\text{pig}=312$  ; \*\*  $C_{\text{Org}}/\text{pig}=106$ .

Les taux d'ingestion que nous avons mesurés sont en général faibles. Dans les cas de *Calanus simillimus*, *Calanoides acutus* et *Rhincalanus gigas* ils ne permettent même pas de rendre compte des besoins respiratoires de l'animal. L'observation de l'activité de ponte

indique que ces animaux ne se trouvaient pas en situation de diapause. Notre calcul d'ingestion semble donc sous-estimer la valeur exacte du broutage des copépodes. Cela peut être dû soit à un problème de dégradation de pigments chlorophylliens dans l'estomac des animaux, soit au fait que dans des eaux si pauvre en chlorophylle le phytoplancton ne représente pas la source principale d'aliment pour ces espèces.

Pour mieux comprendre l'importance de l'erreur d'estimation, nous avons recalculer le taux d'ingestion à partir des besoins énergétiques des animaux (tableau 3a et 3b) en considérant un contenu moyen de carbone par oeuf de 0,3  $\mu\text{g}$  (Conover et Huntley, 1991) et une assimilation théorique de 75%. Pour faciliter notre calcul nous n'avons considéré en première approximation que les animaux au stade adulte.

<i>Espèce</i>	<i>Ponte nombr e oeufs</i>	$\mu\text{g}$ <i>C/ponte</i>	<i>Respiration <math>\mu\text{gC}/\text{cop}/\text{jour}</math></i>	<i>Assimilation <math>\mu\text{gC}/\text{cop}/\text{jour}</math></i>	<i>Ingestion <math>\mu\text{gC}/\text{cop}/\text{jour}</math></i>
C. propinquus	48	14,4	8,36	8,37	11,16
C. acutus	20	6	5,66	5,8	7,73
Pleuromamma	0	0	4,39	4,39	5,86
Rhincalanus	20	6	7,64	7,66	10,21
g.					
C. simillimus	14	4,2	2,81	3,18	4,24

Tableau 3 a. **POOZ**. *Ponte exprimée en nombre moyen d'oeufs produits par animal par jour et en  $\mu\text{g}$  C par ponte. Assimilation ( $\mu\text{gC}/\text{cop}/\text{j}$ ) obtenue par la somme de l'activité de ponte correspondante aux pourcentage d'individus de sex féminin et dutaux de respiration ( $\mu\text{gC} / \text{cop}/\text{j}$ ). Taux d'ingestion ( $\mu\text{g} \text{C}/\text{cop}/\text{jour}$ ) calculé sur la base des besoins énergétiques de l'animal (assimilation=75% ingestion).*

<i>Espèce</i>	<i>Ponte nombr e oeufs</i>	$\mu\text{g}$ <i>C/ponte</i>	<i>Respiration <math>\mu\text{gC}/\text{cop}/\text{jour}</math></i>	<i>Assimilation <math>\mu\text{gC}/\text{cop}/\text{jour}</math></i>	<i>Ingestion <math>\mu\text{gC}/\text{cop}/\text{jour}</math></i>
C. propinquus	48	14,4	8,36	10,3	13,73
C. acutus	20	6	5,66	7,17	9,56
Pleuromamma	0	0	4,39	4,39	5,86
Rhincalanus	20	6	7,64	8,4	11,19
g.					
C. simillimus	14	4,2	2,81	3,27	4,37

Tableau 3b. **SIZ.** Ponte exprimée en nombre moyen d'oeufs produits par animal par jour et en  $\mu\text{g C}$  par ponte. Assimilation ( $\mu\text{gC}/\text{cop}/\text{j}$ ) obtenue par la somme de l'activité de ponte correspondante aux pourcentage d'individus de sex féminin et dutaux de respiration ( $\mu\text{gC}/\text{cop}/\text{j}$ ). Taux d'ingestion ( $\mu\text{g C}/\text{cop}/\text{jour}$ ) calculé sur la base des besoins énergétiques de l'animal (assimilation=75% ingestion).

La comparaison des mesures d'ingestion obtenues par fluorescence stomacale avec les valeurs théoriques calculés en considérant les besoins énergétiques des animaux et ces dérivés de la correction pour la dégradation des pigments dans leurs estomacs est présenté dans les tableaux 4a et 4b.

Espèce	Ingestion A $\mu\text{gC}/\text{cop}/\text{jour}$	Ingestion B $\mu\text{gC}/\text{cop}/\text{jour}$	Ingestion C $\mu\text{gC}/\text{cop}/\text{jour}$
C. propinquus	6.82	10.23	11.16
C. acutus	1.26	1.89	7.73
Pleuromamma	4.15	6.22	5.86
Rhincalanus g.	2.02	3.03	10.21
C. simillimus	1.42	2.14	4.24

Tableau 4.a. POOZ. Ingestion mesurée par fluorescence stomacal (ingestion A), ingestion obtenue en appliquant un coefficient de 1,5 pour la dégradation des pigments chlorophylliens dans l'estomacs des copépodes (ingestion B) et ingestion calculée sur la base de besoins énergétiques des animaux (ingestion C). Tous les taux d'ingestion sont exprimés en  $\mu\text{gC}/\text{cop}/\text{j}$ .

Espèce	Ingestion A $\mu\text{gC}/\text{cop}/\text{jour}$	Ingestion B $\mu\text{gC}/\text{cop}/\text{jour}$	Ingestion C $\mu\text{gC}/\text{cop}/\text{jour}$
C. propinquus	20,08	30,12	13,73
C. acutus	3,72	5,57	9,56
Pleuromamma	12,20	18,30	5,86
Rhincalanus g.	5,94	8,91	11,19
C. simillimus	4,19	6,29	4,37

Tableau 4b. **SIZ.** Ingestion mesurée par fluorescence stomacal (ingestion A), ingestion obtenue en appliquant un coefficient de 1,5 pour la dégradation des pigments chlorophylliens dans l'estomacs des copépodes (ingestion B) et

*ingestion calculée sur la base de besoins énergétiques des animaux (ingestion C). Tous les taux d'ingestion sont exprimés en  $\mu\text{gC}/\text{cop}/\text{j}$ .*

Les taux d'ingestion que nous avons mesurés pour toutes les espèces étudiées dans la zone POOZ, et pour *Calanoides acutus* et *Rhincalanus gigas* dans la SIZ, sont largement inférieurs aux valeurs estimés sur les besoins énergétiques des animaux.

Bien que très peu d'études sur la dégradation de pigments par les copépodes antarctiques et subantarctiques ont été conduites (Mayzaud et Razouls, 1992), si nous utilisons un coefficient moyen de correction pour la dégradation de la chlorophylle dans l'estomac des animaux de 1,5 (Kiorboe et Tiselius, 1987; Dam et Peterson, 1988), les taux d'ingestion augmentent et, pour certaines espèces, arrivent à être en équilibre avec les taux respiratoires mais ils restent toujours trop faibles pour rendre compte des besoins métaboliques de la plus part des animaux.

Les copépodes de grande taille ont représenté l'essentiel de la biomasse mesurée pendant la campagne (Errhif *et al.*, cette publication). Nous avons essayé d'évaluer leur impact sur la production primaire et de le comparer à celui des copépodes de petite taille (figure 1). Numériquement *Oithona* spp. constituent l'essentiel des copépodes antarctique (Errhif *et al.*, cette publication), nous les avons donc choisies pour représenter la fraction des copépodes de petite taille. Nous avons recalculer l'ingestion de *Oithona* spp. à partir des données déjà présentes dans la littérature (Atkinson, 1996), en considérant un temps de transit moyen de 1 heure .

Les résultats ainsi obtenus nous montrent que les grands copépodes, considérés tous ensemble consomment 15,02% de la production primaire dans la POOZ et 25,14% au bord de la glace (SIZ) tandis que dans les mêmes zones, *Oithona* spp. utilise respectivement 9,22 et 41,4%. Si nous considérons l'ingestion calculée sur les besoins énergétiques des animaux les pourcentages de consommation des grands copépodes arrive au 56,7% dans la POOZ et 38,8% dans la SIZ. A partir des considérations faites précédemment nous avons utilisé cette dernière donnée pour l'évaluation de l'impact global des copépodes sur la production primaire qui représente alors 81% dans la POOZ et 80% dans la SIZ. Probablement cette valeur, bien que très élevée, est conservative. Si l'ingestion des copépodes de petite taille est calculée sur la base de leurs dépenses énergétiques, et si le calcul prend en compte les besoins métaboliques des différents stades de croissances des animaux, une valeur plus élevée est à envisager.

La figure 2 représente l'utilisation du standing stock par les copépodes. Nous avons considéré que les grands copépodes broutent surtout les cellules phytoplanktoniques de diamètre  $>10\mu\text{m}$  et *Oithona* spp. celles de diamètre  $<10\mu\text{m}$ . La consommation totale du standing stock est de 2,6% dans la zone POOZ et de 5,3% au bord de la glace (SIZ).

## CONCLUSIONS

Pendant le printemps austral l'utilisation de la chlorophylle comme traceur de l'ingestion amène à une importante sous-estimation de l'activité alimentaire réelle des animaux. Sûrement d'autres sources alimentaires que le phytoplancton permettent aux animaux d'assurer leurs demandes énergétiques.

L'estimation du taux d'ingestion des animaux sur la base de leurs besoins métaboliques nous a permis de mettre en évidence le rôle important que les copépodes jouent dans le réseaux trophique antarctique. En effet pendant notre campagne ils ont consommé environ 80% de la production primaire soit dans la zone POOZ que dans la SIZ. En particulier nous avons constaté que les copépodes de petite taille participe pour une large fraction à cette consommation.

Le bilan nécessiterait d'être amélioré en particulier par une estimation plus exacte des besoins énergétiques des animaux dans leurs différents stades de croissance, et aussi par une meilleure définition des zones d'étude grâce à une utilisation plus ponctuelle des données de distribution des pigments et du carbone organique.

## REMERCIEMENTS

N                                    pour les données de production primaire et M. Fiala et M. Panouse pour les données de chlorophylle par classe de taille.

## BIBLIOGRAPHIE

Atkinson A., 1996. Subantarctic copepods in an oceanic, low chlorophyll environment: ciliate predation, food selectivity and impact on prey populations. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, **130**:85-96 p.

Atkinson A., Ward P., Williams R.S., Poulet S.A., 1992. Feeding rates and diel vertical migration of copepods near South Georgia: comparison of shelf and oceanic sites. *Mar. Biol.*, **114**: 49-56.

Conover R.J. & Huntley M., 1991. Copepods in ice-covered seas. Distribution, adaptations to seasonally limited food, metabolism, growth patterns and life cycle strategies in polar seas. *J. Mar. Systems*, **2**: 1-41.

- Dagg M.J., 1983. A method for determination of copepod feeding rates during short times intervals. *Mar. Biol.*, **75**: 63-67.
- Dam H.G. & Peterson W.T., 1988. The effect of temperature on the gut clearance rate constant of planktonic copepods. *J. exp. mar. Biol. Ecol.*, **123**: 1-14.
- Kjørboe T., Tiselius P.T., 1987. Gut clearance and pigment destruction in an herbivorous copepod, *Acartia calausi*, and the determination of in situ grazing rates. *J. Plankton Res.*, **9**: 525-534.
- Mayzaud P. & Razouls S., 1992. Degradation of gut pigment during feeding by a subantarctic copepod: Importance of feeding history and digestive acclimation. *Limnol. Oceanogr.*, **37**: 393-404.
- Morales, C.E., Bedo, A., Harris, R.P., Tranter, P.R.G., 1991. Grazing of copepod assemblages in the north-east Atlantic : the importance of small size fraction. *J. Plankton Res.*, **13**: 455-472 p.
- Omori, M., 1965. A 160-cm opening-closing plankton net. *J. Oceanogr. Soc. Jpn.*, 21: 20-26 p.
- Morales, Harris, R.P., head, R.N., Tranter, P.R.G., 1993. Copepod grazing in the oceanic northeast Atlantic during a 6 weeks drifting station: the contribution of size classes and vertical migrants. *J. Plankton Res.*, **15**: 185-211 p.
- Strickland J.D. & Parsons T.R., 1972. A practical handbook of seawater analysis. 2nd ed. *Bull. Fish. Res. Bd. Can.* 167 p.
- UNESCO, 1968. Zooplankton sampling. Monographs on oceanographic methodology. UNESCO, Paris, 174p.

Légende:

Figure 1. Impact des copépodes sur la production primaire dans la POOZ et au bord des glaces (SIZ). *Grands cop.1* = consommation des grands copépodes calculée sur les données d'ingestion mesurés. *Grands cop.2* = consommation des grands copépodes calculée sur les données d'ingestion établies sur les besoin énergétique des animaux. *Oithona spp.* = consommation d'*Oithona spp.* obtenue des données de la littérature. *Grands cop.2* + *Oithona spp.* = consommation de la production primaire de la part de l'ensemble des copépodes

Figure 2. Consommation du standing stock de chlorophylle dans la POOZ et au bord des glaces (SIZ). *Grands cop.1*; *Grands cop.2*; *Grands cop.2* + *Oithona spp.* : voir légende de la figure 1. L'impact des grands copépodes a été calculé sur la fraction de chlorophylle >10 µm, celui des *Oithona spp.* sur la fraction de chlorophylle <10 µm tandis que la consommation de la chlorophylle totale a été obtenue par somme pondérée des consommations des *grands cop.2* et des *Oithona spp.*

Figure 2. Consommation du standing stock de chlorophylle dans la POOZ et au bord des glaces (SIZ). *Grands cop.1* = consommation des grands copépodes calculée sur les

données d'ingestion mesurés par rapport à la fraction de chlorophylle  $>10 \mu\text{m}$ . *Grands cop.2* = consommation des grands copépodes calculée sur les données d'ingestion établies sur les besoin énergétiques des animaux, mesurée par rapport à la fraction de chlorophylle  $>10 \mu\text{m}$ . *Oithona spp.* = consommation d'*Oithona spp.* sur la fraction de chlorophylle  $<10 \mu\text{m}$ . *Grands cop.2* + *Oithona spp.* = utilisation du standing stock total de la part de l'ensemble des copépodes

# Observations préliminaires de l'hyponeuston en zone marginales de glaces

Jacques LEFEVRE et Marine DELAVAL

UMR 1513, IUEM, 6 avenue le gorgeu, BP 809, F-29285 Brest cedex.

## INTRODUCTION

Ce travail présente les premiers résultats concernant les échantillons dits de neuston (plancton vivant au voisinage immédiat de la surface ; voir Zaitsev, 1970) recueillis lors de la campagne ANTARES 3. Cette dernière s'est déroulée à bord du *Marion Dufresne*, dans le secteur indien de l'Océan Austral, du 27 septembre au 8 novembre 1995.

En dehors d'une opération particulière au NE de Îles Kerguelen (étude de l'influence des apports terrigènes de ces îles sur la fertilité du milieu), la campagne ANTARES 3 couvrait une radiale nord-sud à 62°E, d'environ 48°S (zone du front polaire) à la limite des glaces antarctiques. Des mesures et prélèvements concernant diverses spécialités d'océanographie chimique, physique et biologique étaient réalisés à un certain nombre de stations réparties à intervalles réguliers. Deux de ces stations ont fait l'objet d'une étude plus longue, dite "étude de processus". La dernière étude de processus a été réalisée à la bordure de la banquise antarctique en cours de débâcle (station M4), rencontrée fin octobre entre 58 et 59°S. C'est de cette opération que sont issus les échantillons utilisés pour le présent travail (Fig. 1).

## MATERIEL ET METHODES

Les prélèvements de zooplancton réalisés aux stations d'ANTARES 3 incluent trois composantes dont une concerne la récolte du neuston, en fait le microneuston et le plus gros mésozooplancton des 50 cm superficiels, à l'aide d'un filet spécialisé de 300 µm de vide de maille (J. Le Fèvre, Brest). Les pêches de neuston ont été réalisées dans la mesure du possible en alternant récoltes de jour et récoltes de nuit, de façon à mettre en évidence un éventuel signal nycthéral.

### *Récolte et traitement à bord des échantillons*

Le neuston était récolté par traits horizontaux de 10 minutes à 2 nœuds d'un filet à ouverture rectangulaire de 1 m de haut sur 1.50 m de large, filé à vue à distance suffisante du sillage. La partie inférieure du cadre était lestée, et les montants verticaux équipés de bouées, de telle sorte qu'en position de travail le cadre soit à demi-immergé. La section efficace de pêche est donc égale à la moitié de la surface délimitée par le cadre, soit 0.75 m<sup>2</sup>. Le volume filtré s'obtient, en l'absence de débit-mètre, en multipliant cette section par la distance parcourue. Celle-ci a pu dans certains cas être mesurée en notant la position indiquée par le système de navigation GPS en début de trait et en fin de virage (2 minutes en moyenne de virage en plus des 10 minutes de trait proprement dit). Dans les cas où, pour des raisons notamment techniques, les données de position ne sont pas disponibles aux instants précis nécessaires au calcul, le volume filtré a été uniformément estimé à 600 m<sup>3</sup>, médiane approximative des valeurs mesurées.

Les échantillons ont, immédiatement après la récolte, été divisés à la boîte de Motoda, qui les partage en principe en deux fractions égales. L'une de ces fractions était à son tour divisée en deux, de façon à obtenir au total 3 sous-échantillons. Une fraction a été conservée au formol dilué à 4-5% dans l'eau de mer.

### *Traitement des échantillons au laboratoire*

Les taxons les plus abondants sont dénombrés à l'aide de compteurs électromécaniques, les autres par comptage manuel. L'identification taxonomique est ici basée, pour les copépodes, sur l'ouvrage de Razouls (1994), et pour les euphausiacés sur celui de Kirkwood (1982). Pour les autres groupes, généralement identifiés avec moins de précision, c'est l'expérience de J. Le Fèvre qui a été utilisée. Un nom spécifique donné entre parenthèses dans les tableaux de comptage (en annexe) indique que l'identification, bien que probable, n'est pas absolument garantie.

Le comptage peut être allégé en ne procédant, pour les taxons les plus abondants, qu'au dénombrement d'une fraction aliquote du matériel. L'équipement nécessaire étant indisponible au moment de ce travail, cette possibilité n'a pas été utilisée. L'abondance d'un taxon donné se calcule, à partir de l'effectif dénombré, par la formule :

$$N = (n f) / V$$

où :

**N** est le nombre d'individus rapporté *in situ* à l'unité de volume ( $m^3$ ).

**n** est le nombre d'individus comptés, pour le taxon considéré, dans l'échantillon ou le sous-échantillon examiné.

**f** est le facteur de fractionnement reliant le sous-échantillon examiné à l'échantillon initialement prélevé. C'est le produit du facteur de division volumétrique effectuée à bord et du facteur de sous-échantillonnage avant comptage au laboratoire. Dans le cas présent, le seul fractionnement est celui opéré à bord. Le facteur de fractionnement est ainsi, selon les cas, égal à 2 ou à 4 (Tableau 1).

**V** est le volume d'eau de mer ( $m^3$ ) filtré *in situ* par le filet (Tableau 1).

Échantillon	Date	Heure locale (début)	Position (début)	Conditions météorologiques	Volume filtré (m <sup>3</sup> )	Fractionnement
NEU 10	20/10/95	00:56 (N)	58°43S 62°11E	Proximité du pack Neige intermittente	600	2
NEU 12	21/10/95	21:14 (N)	58°29S 62°41E	Non notées	600	4
NEU 14	22/10/95	03:06 (N)	58°20S 63°22E	Mer calme, beau temps	574	2
NEU 15	23/10/95	16:53 (J)	58°19S 63°42E	Mer calme, vent nul, ciel couvert, 0.5 milles du pack	765	2
NEU 16	24/10/95	00:55 (N)	58°18S 63°48E	Mer calme, vent nul, proche du pack	709	2
NEU 17	24/10/95	17:11 (J)	58°15S 64°05E	Mer calme, ciel couvert, 2 milles ? du pack	600	2
NEU 19	25/10/95	00:58 (N)	58°10S 64°17E	Mer calme, légère houle, vent faible	555	2
NEU 20	25/10/95	16:25 (J)	58°14S 64°31E	Mer calme à belle, temps couvert, vent faible	600	2
NEU 22	26/10/95	01:21 (N)	58°16S 64°38E	Mer calme, brume	600	2

Tableau 1 : *Prélèvements de neuston réalisés au point M4 lors de la campagne ANTARES 3.*

## RESULTATS

La liste faunistique recensant les taxons rencontrés est donnée en annexe, de même que les tableaux donnant leur abondance *in situ*. Le milieu est le plus souvent dominé par les crustacés (copépodes et euphausiacés), occasionnellement par les salpes. Les copépodes sont en règle générale numériquement dominants, mais, compte tenu de leur grande taille, les euphausiacés dominent vraisemblablement la biomasse dans les échantillons où ils sont le plus abondants. Le krill antarctique proprement dit (*Euphausia superba*), pourtant fréquemment associé aux glaces de mer ou à leur proximité (voir Smetacek *et al.*, 1990), n'est représenté que par quelques individus juvéniles. Lorsque les euphausiacés sont abondants, ils sont très largement dominés par une espèce plus petite, *E. frigida*, dont tous les stades de développement sont représentés. La seule autre espèce présente de manière non entièrement négligeable est *Thysanoessa macrura*. La maille de 300 µm échantillonne mal les petits copépodes cyclopoïdes (*Oithona* sp.) souvent signalés comme numériquement dominants dans les eaux australes (Hopkins & Torres, 1989). Les copépodes les plus abondants sont des calanoides de grande taille (*Calanus propinquus*, *Calanoides acutus*, *Rhincalanus gigas*, 8-10 mm), signalés par de nombreux auteurs (dont Hopkins & Torres, 1989, et Smetacek *et al.*, 1990) comme dominant la biomasse du plancton antarctique. *Metridia gerlachei*, qui appartient plus ou moins à la même catégorie, est assez rare, mais *M. lucens* est extrêmement abondante dans certains échantillons. *Paralabidocera antarctica* présente la particularité d'être présent uniquement dans les échantillons de jour, avec un maximum dans l'échantillon NEU 15, qui, d'après les notes prises à bord, semble être la récolte la plus proche du bord des glaces.

Six espèces, un euphausiacé, 4 copépodes et la seule salpe identifiée, ont été sélectionnées pour représentation graphique de leurs variations d'abondance au cours de l'étude de processus (Fig. 2)\*. Pour *Euphausia frigida* (Fig. 2a), une alternance apparaît très clairement entre l'abondance nocturne et la quasi-absence diurne. La seule exception est la deuxième récolte,

---

\* Le tracé a été réalisé automatiquement par un tableur, ce qui nécessitait une expression simple de l'échelle des temps en abscisse. La formulation choisie est le temps écoulé, en minutes, depuis un instant origine fixé au début du premier trait de la série.

nocturne, où l'espèce est à peine présente. Cet échantillon est par ailleurs caractérisé par une assez grande abondance des salpes (Fig. 2f), lesquelles sont connues pour exclure fréquemment, des eaux qu'elles dominent, les autres organismes planctoniques, et en particulier dans l'Antarctique les euphausiacés (Huntley *et al.*, 1989 ; Nishikawa *et al.*, 1995, par exemple). Parmi les copépodes, *Calanoides acutus* (Fig. 2b) montre apparemment un rythme nycthéméral d'abondance, moins prononcé cependant que chez *Euphausia frigida*. Ces rythmes correspondent vraisemblablement à des migrations verticales classiques : montée nocturne vers les eaux de surface, où les organismes se nourrissent de phytoplancton, et retour diurne vers des eaux plus profondes. En dehors de trois valeurs extrêmes (deux très faibles et une très forte), *Calanus propinquus* (Fig. 2c) présente une abondance assez constante de l'ordre de  $2 \text{ ind. m}^{-3}$ , sans aucune rythmicité nycthémérale. Sans présenter non plus de variations nycthémérales apparentes, *Rhincalanus gigas* (Fig. 3d) et *Metridia lucens* (Fig. 2e) paraissent se succéder, du début à la fin de l'étude, en tant que constituants importants du peuplement. Il semble donc que les premières et les dernières récoltes ne concernent pas tout à fait la même communauté. Les salpes (Fig. 2f) sont rares ou absentes dans les échantillons de jour. Ces organismes sont fragiles et peuvent, dans les échantillons fixés, être suffisamment endommagés pour échapper en partie au comptage. Ils sont en revanche facilement repérés lors de la récolte. Les notes prises à bord confirment la quasi-absence des salpes dans les échantillons diurnes. Les salpes sont mieux représentées dans les échantillons de nuit, mais avec des effectifs très variables. Une simple migration verticale ne peut sans doute pas l'expliquer, et cette question est traitée ci-dessous dans la discussion.

## **DISCUSSION, CONCLUSION**

La fonte des glaces produit une eau dessalée, plus légère que le reste de la colonne d'eau. Il se développe ainsi en bordure de la banquise une certaine stratification. Le mélange vertical est atténué, et les conditions sont remplies pour le démarrage d'une poussée phytoplanctoniques selon le modèle de Sverdrup (1953). De plus, les eaux de surfaces sontensemencées par des algues emprisonnées dans les glaces. La poussée du phytoplancton en bordure des glaces antarctiques lors du printemps austral est maintenant un phénomène bien connu, décrit initialement en Mer de

Ross, par Smith & Nelson (1985) et Nelson & Smith (1986). Il n'avait toutefois pas été observé jusqu'ici en plein océan. Bien que tous les résultats ne soient pas encore disponibles, il est clair qu'une telle poussée était en cours à la station M4 d'ANTARES 3. Les notes prises en mer mentionnent la présence de phytoplancton lors de toutes les récoltes diurnes, les plus proches de la banquise. Certains des échantillons (NEU 17 notamment) ont même dû être débarrassés à bord d'un feutrage de diatomées pour pouvoir être traités.

L'interprétation de la répartition du phytoplancton est rendue complexe par le fait que les échantillons de jour ont été récoltés à proximité de la banquise et les échantillons de nuit à plus grande distance. Le facteur spatial (distance du bord des glaces) et le facteur temporel (rythme nycthéral) sont ainsi confondus. Mais le phytoplancton ne migre pas. Dans les notes de bord, sa présence observable n'est mentionnée que pour un seul échantillon de nuit (NEU 16), enregistré comme le plus proche du bord des glaces. Il est donc clair que les eaux situées en bordure de la banquise étaient les plus riches en phytoplancton, dont l'abondance diminuait très vite avec l'éloignement des glaces. De même, il n'est peu vraisemblable que la présence de *Paralabidocera antarctica* dans les seuls échantillons de jour s'explique par des migrations verticales au rythme inversé. Cette espèce caractérise donc manifestement la zone marginale des glaces. Il est probable en revanche que les variations d'abondance d'*Euphausia frigida* s'expliquent essentiellement par des migrations nycthérales, bien connues dans la littérature (voir Kirkwood, 1982).

Les grands copépodes antarctiques (*Calanus propinquus*, *Calanoides acutus*, *Rhincalanus gigas*) sont tous capables d'exploiter une gamme de taille de particules exceptionnellement large, du du ndes diatomées, mais ils se nourrissent plus ou moins préférentiellement sur ces dernières quand elles sont abondantes (Schnack, 1985). La disparition des migrations verticales chez *Calanus propinquus* peut s'interpréter comme une réponse alimentaire à la poussée phytoplanctonique. C'est de manière permanente que l'espèce était présente en surface et consommait du phytoplancton: les tris et examens *in vivo* réalisés à bord montraient que le tube digestif était plein chez tous les spécimens examinés, de jour comme de nuit. Ces migrations sont pourtant apparemment maintenues chez *Calanoides acutus*.

L'interprétation des données sur les salpes est plus problématique. Leur présence dans les seuls échantillons de nuit, ou presque, peut éventuellement être expliquée par des migrations nycthémérales. Mais la distance au bord des glaces est vraisemblablement un facteur important. Dans l'Océan Austral, beaucoup d'auteurs (voir Siegel *et al.*, 1992) considèrent que les salpes, parfois dominantes dans les eaux oligotrophes du large, disparaissent à l'approche de la banquise, mais certaines observations (Boysen-Ennen *et al.*, 1991) montrent qu'elles peuvent être présentes en zone marginale des glaces, et même dans la colonne d'eau sous la glace. D'après de nombreux travaux cités par Fortier *et al.* (1994), cependant, les salpes sont incapables de survivre dans des eaux trop riches en phytoplancton, où leur appareil filtreur subit un colmatage fatal. Leur niche serait plutôt d'exploiter les faibles concentrations des zones et des périodes oligotrophes (Harbison *et al.*, 1986), ce que favorise leur capacité à capturer des particules de taille extrêmement variée, y compris du picoplancton. En période de poussée phytoplanctonique, les salpes peuvent, grâce à leur capacité de multiplication asexuée, réagir par une augmentation d'effectifs presque aussi rapide que celle du phytoplancton. Leur survie dépendrait de leur capacité à empêcher, en filtrant ainsi d'importants volumes d'eau, le développement de trop fortes concentrations phytoplanctoniques (Fortier *et al.*, 1994). La présence, dans certains échantillons étudiés ici, de nombreux jeunes blastozoïdes tend à indiquer qu'un tel processus était, au moins ponctuellement, en cours.

Du point de vue des objectifs du programme JGOFS, on peut, par référence aux synthèses de Fortier *et al.* (1994) et Le Fèvre *et al.* (sous presse), reconnaître ici trois processus affectant les flux de carbone. Le développement d'une poussée de diatomées, dont les cellules sont susceptibles de sédimenter directement, tend à favoriser l'exportation de carbone vers les eaux profondes. Les salpes peuvent aussi, en produisant des pelotes fécales très résistantes et qui sédimenter extrêmement vite (jusqu'à plus de 2000 m par jour), jouer un rôle comparable. Les grands copépodes produisent au contraire des pelotes fécales qui ne quittent guère la couche de surface. Une espèce comme *Calanus propinquus*, qui se maintient ici constamment en surface et y consomme en permanence le phytoplancton, tend donc à retenir dans la couche euphotique le

carbone organique produit par la photosynthèse, favorisant ainsi un flux vers les échelons trophiques supérieurs plutôt que vers les eaux profondes.

## REFERENCES

- Boysen-Ennen E., Hagen W., Hubold G. & Piatkowski, U. (1991) Zooplankton biomass in the ice-covered Weddell Sea, Antarctica. *Marine Biology*, **111**: 227-235.
- Fortier L., Le Fèvre J. & Legendre L. (1994) Export of biogenic carbon to fish and to the deep ocean: the role of large planktonic microphages. *Journal of Plankton Research*, **16**: 809-839.
- Harbison G.R., McAlister V.L. & Gilmer R.W. (1986) The response of the salp, *Pegea confoederata*, to high levels of particulate material: Starvation in the midst of plenty. *Limnology and Oceanography*, **31**: 372-382.
- Hopkins T.L. & Torres J.J. (1989) Midwater food web in the vicinity of marginal ice zone in the western Weddell Sea. *Deep-Sea Research*, **36**: 543-560.
- Huntley M.E., Sykes P.F. & Marin V. (1989) Biometry and trophodynamics of *Salpa thompsoni* Foxton (Tunicata: Thaliacea) near the Antarctic Peninsula in austral summer, 1983-1984. *Polar Biology*, **10**: 59-70.
- Kirkwood J.M. (1982) A guide to the Euphausiacea of the Southern Ocean. ANARE Research Notes. Australian National Antarctic Research Expeditions, Hobart.
- Le Fèvre J., Legendre L. & Rivkin R.B. Alternative trophic pathways in the Southern Ocean: effects on fluxes of biogenic carbon. *Journal of Marine Systems*, sous presse.
- Nelson D.M. & Smith W.O. Jr. (1986) Phytoplankton bloom dynamics of the western Ross Sea ice edge. II. Mesoscale cycling of nitrogen and silicon. *Deep-Sea Research*, **33**: 1389-1412.
- Nishikawa J., Naganobu M., Ichii T., Ishii H., Terazaki M. & Kawaguchi K. (1995) Distribution of salps near the South Shetland Islands during austral summer, 1990-1991 with special reference to krill distribution. *Polar Biology*, **15**: 31-39.
- Razouls C. (1994) Manuel d'identification des principales espèces de copépodes pélagiques antarctiques et subantarctiques. *Annales de l'Institut Océanographique*, **70**: 3-204.
- Schnack S.B. (1985) Feeding by *Euphausia superba* and copepod species in response to varying concentrations of phytoplankton. In: Siegfried W.R., Condy P.R. & Laws R.M. (eds.) *Antarctic Nutrient Cycles and Food Webs*. Springer-Verlag, Berlin: 311-323.
- Siegel V., Skibowski A. & Harm U. (1992) Community structure of the epipelagic zooplankton community under the sea-ice of the northern Weddell Sea. *Polar Biology*, **12**: 15-24.
- Smetacek V., Scharek R. & Nöthig E.M. (1990) Seasonal and regional variation in the pelagial and its relationship to the life history cycle of krill. In: Kerry K.R. & Hempel G. (eds.) *Antarctic Ecosystems. Ecological Change and Conservation*. Springer-Verlag, Berlin: 103-114.
- Smith W.O. & Nelson D.M. (1985) Phytoplankton bloom produced by a receding ice edge in the Ross Sea: Spatial coherence with the density field. *Science*, **227**: 163-166.
- Sverdrup H.U. (1953) On conditions for the vernal blooming of phytoplankton. *Journal du Conseil Permanent International pour l'Exploration de la Mer*, **18**: 287-295.
- Tréguer P. & Jacques G. (1992) Dynamics of nutrient and phytoplankton and cycles of carbon, nitrogen and silicon in the Southern Ocean: a review. *Polar Biology*, **12**: 149-162.

Zaitsev Yu.P. (1970) *Marine Neustonology*. Naukova Dumka, Kiev (translated by A. Mercado, Israel Program for Scientific Translation, Jerusalem, 1971).

**Annexe 1**  
**Liste Faunistique**

Chaetognatha

*Sagitta (gazellae)*

Pteropoda, thecosomata

*Limacina helicina*

*Cavolinia* sp.

Pteropoda, gymnosomata

*Clione limacina*

Polychaeta

*Tomopteris* sp.

Espèce non identifiée

Ostracoda

*Conchoecia* sp.

Espèce non identifiée

Copepoda

*Calanus propinquus*

*Calanoides acutus*

*Rhincalanus gigas*

*Ctenocalanus citer*

*Scolecithrella minor*

*Metridia lucens*

*Metridia gerlachei*

*Pleuromamma robusta antarctica*

*Haloptilus oxycephalus*

*Paralabidocera antarctica*

*Oithona* sp.

Amphipoda (Hyperida)

*Hyperia* sp.

*Vibilia* sp.

Euphausiacea

*Euphausia frigida*

*Euphausia superba*

*Thysanossea macrura*

*Stylocheiron* sp.

Thaliacea

*Salpa thompsoni*



**Figure 1. Position de la station d'étude de processus M4 d'ANTARES 3, repérée par rapport aux principales zones et structures de l'Océan Austral.** PFZ : zone du front polaire ; POOZ : zone océanique libre de glaces en permanence ; SIZ : zone saisonnière des glaces ; CCSZ : zone côtière et du plateau continental. 1 : Convergence subtropicale ; 2 : Front sub-antarctique ; 3 : Front polaire ; 4 : limite nord de la banquise ; 5 : divergence antarctique. *Carte empruntée à Tréguer & Jacques (1992).*





