

ECOLE NATIONALE VETERINAIRE DE LYON

Année 2007- Thèse n°111



***Etude des relations trophiques d'un poisson
(Protomyctophum bolini)
à travers son profil d'acides gras.***

THESE

Présentée à l'UNIVERSITE CLAUDE-BERNARD - LYON I
(Médecine - Pharmacie)
et soutenue publiquement le 21 décembre 2007
pour obtenir le grade de Docteur Vétérinaire

par

AVE Aymeric
Né le 1 mars 1982
à TRAPPES

Ecole Nationale Vétérinaire de Lyon, membre de **UNIVERSITE DE LYON**



ECOLE NATIONALE VETERINAIRE DE LYON

Année 2007- Thèse n° 111



***Etude des relations trophiques d'un poisson
(*Protomyctophum bolini*)
à travers son profil d'acides gras.***

THESE

Présentée à l'UNIVERSITE CLAUDE-BERNARD - LYON I
(Médecine - Pharmacie)
et soutenue publiquement le 21 décembre 2007
pour obtenir le grade de Docteur Vétérinaire

par

AVE Aymeric
Né le 1 mars 1982
à TRAPPES



DEPARTEMENT ET CORPS ENSEIGNANT DE L'ENVL

Directeur : Stéphane MARTINOT

Mise à jour : 02/01/2007

	PREX	PR 1	PR 2	MC	Contractuel, Associé, JPAC et USPV	AERC	Charges de consultations et d'enseignement
DEPARTEMENT SANTE PUBLIQUE VETERINAIRE							
Microbiologie, Immunologie, Pathologie Générale	Y. RICHARD		A. KODJO	V. GUERIN-FAUBLEE D. GREZEL			
Pathologie infectieuse			A. LACHERETZ M. ARTOIS	J. VIALARD			
Parasitologie et Maladies Parasitaires	MC. CHAUVÉ	G. BOURDOISEAU		MP. CALLAIT CARDINAL L. ZENNER			
Qualité et Sécurité des Aliments			P. DEMONT C. VERNICZY	A. GONTHIER S. COLARDELLE			
Législation et Jurisprudence			A. LACHERETZ				
Bio-informatique - Bio-statistique				P. SABATIER ML. DELIGNETTE K. CHALVET-MONFRAY			
DEPARTEMENT ANIMAUX DE COMPAGNIE							
Anatomie			T. ROGER	S. SAWAYA	C. BOULOCHER ME. DUCLOS		
Chirurgie et Anesthésiologie		J.P. GENEVOIS	D. FAU E. VIGUIER D. REMY		S. JUNOT (MCC) K. PORTIER (MCC) C. DECOSNE-JUNOT (MCC)	C. CAROZZO	
Anatomie-pathologique/Dermatologie-Cancérologie			C. FLEURY	T. MARCHAL	P. BELLI D. PIN		
Hématologie		C. FOURNEL			D. WATRELOT-VIRIEUX (MCC)		
Médecine interne		J.L. CADORE		L. CRABANNE F. PONCE M. HUGONNARD C. ESCRIOLI			I. BUBLOT
Imagerie Médicale					J. SONET (MCC)		
DEPARTEMENT PRODUCTIONS ANIMALES							
Zootéchnie, Ethologie et Economie Rurale		M. FRANCK		L. MOUNIER			
Nutrition et Alimentation				D. GRANCHER L. ALVES DE OLIVEIRA G. EGRON			
Biologie et Pathologie de Reproduction		F. BADINAND	M. RACHAIL-BRETIN	S. BUFF P. GUERIN	A. C. LEFRANC		G. LESOBRE P. DEBARNOT D. LAURENT
Pathologie Animaux de Production		P. BEZILLE	T. ALOGNINOVA	R. FRIKHA M.A. ARCANGIOLI D. LE GRAND			
DEPARTEMENT SCIENCES BIOLOGIQUES							
Physiologie/Thérapeutique				J.J. THIEBAULT			
Biophysique/Biochimie		E. BENOIT F. GARNIER		J.M. BONNET-GARIN T. BURONFOSSE			
Génétique et Biologie moléculaire			F. GRAIN	V. LAMBERT			
Pharmacologie/Toxicologie Législation du Médicament		G. KECK	P. JAUSSAUD P. BERNY				C. FARMER T. AVISON
Langues							
DEPARTEMENT HIPPIQUE							
Pathologie équine		J.L. CADORE		A. BENAMOU-SMITH			
Clinique équine		O. LEPAGE		A. LEBLOND	M. GLANGL		

REMERCIEMENTS

A Madame le professeur TILIKETE

De la faculté de Médecine de Lyon,
Qui m'a fait l'honneur d'accepter la présidence de mon jury de thèse,
Hommages respectueux.

A Madame le Docteur EGRON

De l'Ecole Nationale Vétérinaire de Lyon,
Qui m'a fait l'honneur de diriger ce travail,
Pour sa disponibilité et son investissement.
En 5 années d'ENVL, cela a toujours été un plaisir de travailler avec vous.
Très sincères remerciements.

A Madame le Maître de Conférence DELIGNETTE MULLER

Qui a accepté de m'aider dans ce travail,
Pour ces conseils judicieux.
En témoignage de ma reconnaissance.

A toute l'Equipe de la veille Forge au Laboratoire de Villefranche sur Mer.

Pour leurs concessions de paille, leur aide et pour la sympathique ambiance qui régnait dans ce laboratoire.
Merci.

A Monsieur Pansieri et Madame Jeanjean,

Pour leurs compétences et leur engagement dans ces deux années de préparation au concours.
Sans vous, mon cursus vétérinaire ce serait arrêté aux portes des ENV.
En témoignage de mon profond respect, de mon immense reconnaissance mais aussi de ma réelle sympathie à votre égard.

REMERCIEMENTS

A ma mère et mon père :

A ceux qui m'ont conçu, élevé, conseillé et aimé. Ceux qui ont su associer la présence et la gentillesse d'une mère avec la force de vie et l'exigence d'un père.

J'espère faire de ma vie quelque chose dont vous êtes fiers. J'espère surtout vous rendre autant que vous m'avez donné.

Merci pour tout.

A mon frangin :

Difficile de dire à quel point je te remercie pour cette vingtaine d'années.

Tu as toujours été là. Tu es certainement la personne à qui je tiens le plus, pour qui ma solidarité est illimitée et tout simplement quelqu'un avec qui je passe toujours de bons moments.

Où que tu sois pour ton boulot, achète toi vite un chalet dans les Alpes qu'on se fasse des hiver ski-raclette... je m'occupe de la période estivale.

A Amélie :

A celle qui m'a le plus soutenu dans mes études, celle qui a supporté ce parcours difficile.

Merci pour ces 7 années passées avec toi, pour tout ce que tu m'as donné, pour tout ce que tu m'as fait découvrir et comprendre.

C'est avec toi que je me suis construit, tu fais parti intégrante de ma vie, j'espère que tu n'en sortiras jamais.

A Mélanie, colocataire récidiviste :

Merci pour ta présence ces dernières années, pour nos trips et nos discussions, pour être toujours motivée et surtout motivante.

J'espère que l'on ne se perdra jamais de vue car il nous reste encore plein de choses à faire loin de l'école : un tour du monde, un Paris-Dakar, des via ferrata, des apéros au soleil du Sud...

Tu sais où me trouver, comme d'habitude, je t'attends en bas de la piste !

A ce groupe de sudiste que je traîne depuis le lycée

A Tristan, Simon, Elodie, Mélanie, Géraldine, Camille, Eric et Nico.

Je vous connais depuis plus de 10 ans pour certains, ce qui fait beaucoup fiesta chez Nico et Simon, la totalité des pauses dans la pelouse de Zola, beaucoup de vacances ensemble, tous les 1^{er} janvier ... pour ne citer que les plus symboliques.

Merci de votre amitié, merci de cet esprit de groupe, toujours là dans les grandes occasions, que l'on a su préserver.

Nos vies sont en train de changer, j'espère que l'on gardera intacts ce qui nous regroupe.

A vous toutes : Marion, Toufri, Aurore, Miko, Fan...

A vous tous : Nouye, Pi7, Jam, Bat, Mathieu, Piwi, ...

Pour la prépa puis l'école : le concours, les collocs, les boums, les apéros, le karting, les coinchs, le trophée Virbac, les vacances dans des baraques de luxe ...bref tous ces bons souvenirs qui vous sont associés.

Vous êtes tous des caractères que je suis heureux de connaître et que j'espère revoir souvent et longtemps.

SOMMAIRE

Listes des abréviations utilisées	5
Lexique d'océanographie	6
Liste des figures	7
Liste des tableaux	8
INTRODUCTION	9
CONTEXTE DE L'ETUDE	13
1. Cadre géographique et scientifique	13
1.1. Le site de l'étude	13
1.2. Le programme IOZ	16
1.3. Le laboratoire Océanologique de Villefranche sur Mer	17
2. Protomyctophum bolini	20
2.1. Données morphologiques et biologiques	20
2.2. Un poisson mésopélagique	21
3. Les relations proies-prédateurs	23
3.1. Les différentes méthodes d'exploration	23
3.1.1. Méthodes d'analyses des contenus stomacaux	23
3.1.2. Méthodes des traceurs alimentaires	25
3.2. Utilisation des acides gras en tant que marqueurs trophiques	26
3.3. Les acides gras chez les organismes marins	28
3.3.1. Rappels biochimiques sur les lipides	28
3.3.2. Eléments de métabolisme des acides gras	30
3.3.3. Physiologie des lipides chez les poissons	32

MATERIEL ET METHODES	35
1. Matériel	35
2. Analyse du contenu lipidique	35
2.1. Extraction des lipides	35
2.2. Composition en classe de lipides	36
2.3. Composition en acides gras de chacune des classes	36
2.3.1. Séparation des classes	36
2.3.2. Méthylation	38
2.3.3. Séparation des acides gras méthylés	38
2.3.4. Acétylation	38
2.3.5. Etude de la composition en acides et alcools par chromatographie en phase gazeuse	39
2.4. Composition en acides gras des lipides totaux	40
3. Analyse des données	41
3.1. Régression par l'axe majeur réduit	41
3.2. Analyse factorielle des correspondances	41
3.3. Classification hiérarchique	43
3.4. Analyse discriminante et modèle descriptif	43
RESULTATS	45
1. Teneur en lipides de <i>P. bolini</i>	45
2. Composition lipidique des individus entiers et comparaison avec des individus sans estomac	47
2.1. Composition en classes	47
2.2. Composition en acides gras	48

3. Comparaison des différents organes	51
3.1. Composition en classes	51
3.2. Composition en acides gras	52
3.3. Composition des cires des contenus stomacaux	57
4. Comparaison avec d'autres espèces de myctophidés	58
5. Comparaison des profils d'acides gras entre <i>P. bolini</i> et ses proies potentielles	60
5.1. Au niveau des acides des triglycérides	61
5.2. Au niveau des acides des cires de l'estomac	61
5.3. Au niveau des alcools des cires de l'estomac	63
6. Identification d'un contenu stomacal	63
DISCUSSION	65
1. Caractérisation de <i>P. bolini</i> et de ses différents organes	65
1.1. Composition lipidique de l'espèce	65
1.2. Comparaison avec et sans estomac	66
1.3. Comparaison entre organes	67
2. Utilisation des lipides dans l'analyse du régime alimentaire	68
2.1. Utilisation des lipides tissulaires de réserves	69
2.2. Utilisation des cires des contenus stomacaux	70
LIMITES ET PERSPECTIVES	73
CONCLUSIONS	77
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	79
Annexes	87

Abréviations et correspondances utilisées dans cet ouvrage

Lipides :

Chol	=	Cholestérol
CI	=	Cires
DG	=	Diglycérides
FFA	=	Acides gras libres
HC	=	Hydrocarbures
LP ou Plip	=	Lipides polaires (Plip)
Tot	=	lipides totaux
TG	=	Triglycérides
FAME	=	Méthylester d'acide gras

Acide myristique	=	14 : 0
palmitique	=	16 : 0

Acide palmitoléique	=	16 : 1 (n-7)
oléique	=	18 : 1 (n-9)

Acide écosapentaénoïque	(EPA)	=	20 : 5 (n-3)
docosahexaénoïque	(DHA)	=	22 : 6 (n-3)

Composantes corporelles :

Estomac	=	est. ou -stom
Viscères	=	v
Filets musculaires	=	m
Tête et squelette	=	sq ou sn

Analyses de données :

AFC	=	Analyse factorielle des correspondances
CAH	=	Classification ascendante hiérarchique
ADL	=	Analyse discriminante linéaire

Lexique d'Océanographie

Amphipode : Un des Ordre de la Classe des crustacés, se distinguant par un corps latéralement aplati

Benthos : ensemble des organismes qui vivent en relation étroite avec les fonds océaniques

Broutage : consommation du phytoplancton par le zooplancton

Copépode : Un des Ordre de la Classe des crustacés possédant pour la plupart des espèces une forme de corps ovoïde caractéristique et représentant rarement moins de 60% de la biomasse du zooplancton

Ecosystème : Système d'interaction entre les ensembles d'espèces associées et leur milieu physique

Euphausiacée : Un des Ordre de la Classe des crustacés composant le krill dans l'Océan Austral

Mésopelagique : se dit d'espèces marines vivant dans la zone des 100 à 1000 mètres de profondeur

Mésoplancton : organisme planctonique de 200 μm à 20 mm de long

Necton : ensemble d'organismes qui possèdent un potentiel de déplacement qui leur permet de s'affranchir de l'entraînement par les courants

Néritique : se dit d'une zone située au dessus du plateau continental (cf annexe 1)

Pelagos : ensemble des êtres vivants évoluant librement dans la colonne d'eau

Plancton : organismes animaux ou végétaux caractérisés par leur passivité vis à vis des mouvements des masses d'eau

Production secondaire : production des hétérotrophes, c'est-à-dire production de matière organique à partir de matière organique

Liste des figures

Figure 1 :	Localisation du site de l'étude par rapport aux frontières hydrologiques	13
Figure 2 :	Représentation schématique de la circulation des principales masses d'eaux dans le secteur indien de l'Océan Austral pendant la période estivale	15
Figure 3 :	Programmes et zones d'études principaux de l'équipe 5 du LOV	18
Figure 4 :	Unique représentation de <i>P. bolini</i>	20
Figure 5 :	Groupement en deux dimensions des échantillonnages de jour et de nuit obtenu par la Curieuse en Mars 1995	21
Figure 6 :	Structure des classes de lipides intervenant dans le manuscrit	29
Figure 7 :	Nomenclature des principaux acides gras de cette étude	30
Figure 8 :	Position des désaturations effectuées par les enzymes communes de différents taxons	31
Figure 9 :	Principales voies de synthèse des acides gras chez les espèces marines	32
Figure 10 :	Schématisation du protocole suivi pour l'analyse des classes de lipides	37
Figure 11 :	Schématisation du protocole suivi pour l'analyse des lipides totaux	40
Figure 12 :	Relation taille-poids frais(a) et taille-poids de lipides secs totaux extraits (b) pour les individus récoltés lors des campagnes de 1999 (Conan et al., 2007) et 2005	46
Figure 13 :	Proportion de chaque classe de lipides des 3 individus avec estomac et des 4 individus privés d'estomac	47
Figure 14 :	Classification ascendante hiérarchique des individus avec et sans estomac	51
Figure 15 :	Proportion de chaque classe de lipides dans les différents organes	52
Figure 16 :	Classification ascendante hiérarchique des lipides totaux (totaux), des lipides polaires (Plip) et des triglycérides (TG) des différents organes	54
Figure 17 :	Résultat de l'analyse factorielle des correspondances réalisée sur les profils d'acides gras composants les lipides polaires de chaque organe.	56
Figure 18 :	Résultat de l'analyse factorielle des correspondances réalisée sur les profils d'acides gras totaux de différents myctophidés.	59
Figure 19 :	Résultat de l'analyse discriminante linéaire et de la prédiction réalisées sur les triglycérides	60
Figure 20 :	Résultat de l'analyse discriminante linéaire et de la prédiction réalisées sur les acides des cires.	62

Liste des tableaux

Tableau 1 :	Matrice type utilisée pour les analyses de données.	41
Tableau 2 :	Taille, poids, masse de lipides extraits et pourcentage de lipides extraits sur le poids frais (%) dans les individus et organes utilisés dans cette étude	45
Tableau 3 :	Composition en classes de lipides des individus ou organes de <i>Protomyctophum bolini</i>	48
Tableau 4 :	Composition en acides gras des lipides totaux pour les individus avec et sans estomac. En pourcentage des acides totaux	49
Tableau 5 :	Composition en acides gras des triglycérides (A) et des lipides polaires (B) pour les individus avec et sans estomac. En pourcentage des acides totaux.	50
Tableau 6 :	Composition des lipides totaux, des triglycérides et des lipides polaires contenus dans l'estomac, les viscères, les filets et la tête et les arêtes.	53
Tableau 7 :	Composition en acides gras des cires pour les estomacs (est.) et les viscères (V). En pourcentage des acides totaux	57
Tableau 8 :	Composition en alcools gras des cires pour les estomacs (est.) et les viscères (V). En pourcentage des alcools totaux	58

INTRODUCTION

« Unie à l'Océan, la goutte d'eau demeure », si l'objectif de l'océanographie est d'analyser les écosystèmes marins dans leur globalité, ce proverbe indien illustre bien qu'il est difficile de s'affranchir de l'étude des plus petites composantes de ces écosystèmes. L'étude présentée ici en est un exemple.

Les océans sont essentiels aux processus écologiques mondiaux. Leur importance écologique vient en grande partie de leur taille et de leur profondeur considérables. En effet, les océans couvrent près de 71 % de la surface de la Terre, atteignent une profondeur moyenne de 3 700 m et contiennent 1,4 milliard de kilomètres cubes d'eau. Ces immenses masses d'eau renferment une biomasse animale et végétale estimée à 30 milliards de tonnes. En raison d'un très court cycle de vie pour la majeure partie des espèces marines, la production annuelle en mer est estimée à 430 milliards de tonnes par an (Geistdoerfer, 2002). La taille, la profondeur ainsi que la présence même du milieu liquidien rendent les océans difficilement explorables, ceci explique que peu d'espèces sont recensées (274 000, en sachant que les invertébrés à eux seuls comprendraient plus de 10 millions d'espèces (Geistdoerfer, 2002)), et que les processus écologiques des océans sont méconnus.

Comprendre les écosystèmes marins signifie connaître les flux d'énergie et les transferts de matière qui les animent (Frontier et al., 2004) ; pour cela il est nécessaire d'identifier les structures qui les composent et de déterminer leurs interactions et leurs dynamiques. Les chaînes alimentaires sont des voies majeures dans les transferts de matière et d'énergie. Ces chaînes trophiques sont complexes, elles sont plus organisées en réseaux qu'en chaînes linéaires, de ce fait il faut connaître le régime alimentaire de chaque maillon pour être capable de reconstruire le réseau trophique.

Dans les écosystèmes pélagiques antarctiques, les myctophidés représentent la famille de poisson la plus importante en terme de diversité, d'abondance et de biomasse (70 à 130 millions de tonnes sur les 100 à 200 millions de tonnes de poissons, Sabourenkov, 1991). Cette famille assure le lien trophique entre le mésozooplancton et les prédateurs supérieurs (Sabourenkov, 1991). Sur la base des estimations faites par Naumov (1985) citées dans Pakhomov (1996), les myctophidés consomment 1085 millions de tonnes de plancton par an, soit 40% de la production secondaire annuelle. Aux îles Kerguelen, les oiseaux et les otaries

mangent 462000 tonnes de myctophidés par an soit 26 % de leur ration (Léa et al., 2002). Les myctophidés apparaissent donc comme des espèces clés de l'écosystème pour lesquelles il est important de connaître les relations trophiques. Dans plusieurs régions d'antarctique, *Protomyctophum bolini* (Nom donné par Fraser-Brunner en 1949) est une des espèces de myctophidés les plus communes (Pusch et al., 2004), pourtant peu d'études décrivent le régime alimentaire de cette espèce (Pakhomov et al., 1996 ; Gaskett et al., 2001 ; Pusch et al., 2004).

Il existe plusieurs méthodes pour analyser les relations proies-prédateurs. La technique la plus intéressante pour un poisson mésopélagique en Antarctique est la méthode des marqueurs trophiques lipidiques. Le principe est que les acides gras des lipides de réserves d'un prédateur reflètent la signature des proies ingérées (Lee et al., 1971). La signature lipidique changeant en fonction de la nourriture ingérée, St John et Lund (1996) puis Kirsch et ses collaborateurs (1998) ont pu valider ce principe chez les poissons. Cette méthode est d'autant plus appropriée que les poissons utilisent les lipides plus que les glucides comme source d'énergie (Cowey et Sargent, 1977, cité dans Dalsgaard et al., 2003).

La plupart des études sont menées sur l'animal entier, en effet seul Reinhardt et Van Vleet (1986) ont analysé le contenu de différentes parties du corps de *P. bolini*. Pourtant, chaque organe donne une information spécifique à sa fonction (Lund et Sidell, 1992), ce qui permet de comprendre le métabolisme des lipides du prédateur. Alors que dans certaines études on enlève le contenu de l'estomac pour que l'alimentation récente ne perturbe pas le profil de l'espèce, dans d'autres on néglige l'influence du contenu stomacal. Seuls Saito et Murata (1996) ont comparé séparément la signature lipidique des individus et de leur estomac.

Cette étude consiste en l'analyse de la composition lipidique de *Protomyctophum bolini* entier et de différentes parties de son corps. L'étude s'est faite en utilisant chaque classe de lipides mais aussi en se servant plus généralement des lipides totaux. Par la suite, les profils en acides gras de *P. bolini* ont été comparés à ceux de ses proies potentielles afin de retrouver son régime alimentaire.

Les objectifs sont donc de :

- **définir la signature lipidique de *P. bolini***
- **déterminer si le contenu de l'estomac influence cette signature** et, de manière plus générale, **comparer les profils lipidiques des organes entre eux**
- **caractériser le régime alimentaire de *P. bolini* en utilisant les acides gras comme marqueurs trophiques.**

L'étude s'est faite dans le cadre d'un Master 2 recherche de l'Université Pierre et Marie Curie (Paris VI). L'équipe Réponses biologiques et physiologiques aux contraintes du milieu marin dirigée par Patrick Mayzaud du Laboratoire Océanologique de Villefranche sur Mer a été la structure dans laquelle les travaux ont été réalisés.

Après avoir remis l'étude dans son contexte géographique et scientifique, ce document présentera les méthodes utilisées pour déterminer les profils lipidiques. Puis, il développera les résultats obtenus et les interprétations conséquentes.

CONTEXTE DE L'ETUDE

La présente étude s'est faite dans le cadre d'un vaste programme dirigé par l'Institut Paul Emile Victor visant à étudier les interactions entre les oiseaux et le zooplancton dans un écosystème pélagique à l'Est des îles Kerguelen. L'analyse des acides gras a été confiée au Laboratoire Océanologique de Villefranche sur Mer.

1. Cadre géographique et scientifique

1.1. Le site de l'étude

Les îles Kerguelen appartiennent à l'océan Austral qui se définit comme un anneau large de 1000 à 4000 km encerclant le continent Antarctique et correspondant au prolongement vers le sud des océans Indien, Pacifique et Atlantique (Park, 1989) (figure 1, annexe 1).

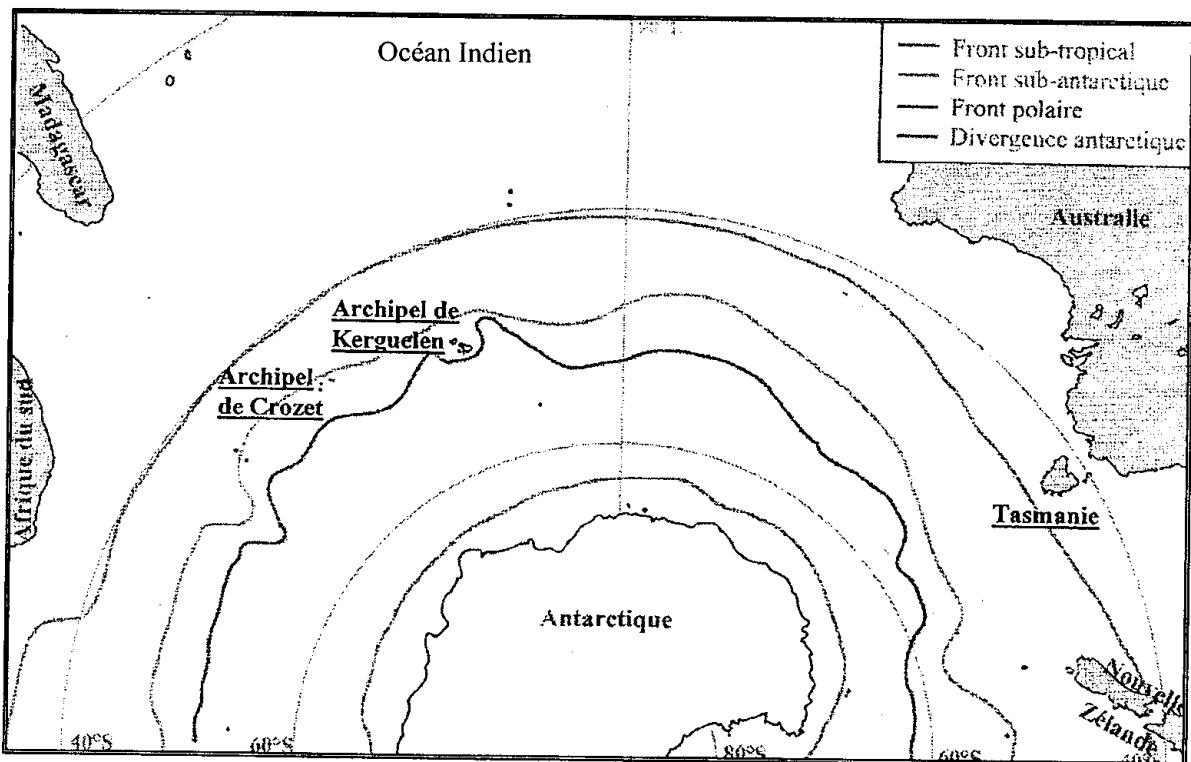


Figure 1 : Localisation du site de l'étude par rapport aux frontières hydrologiques.

Cet océan est ainsi limité au sud par les terres de l'Antarctique et au nord par le front subtropical situé entre 38° et 42° de latitude sud. Les fronts sont des frontières hydrologiques qui délimitent latitudinalement des masses d'eaux individualisées (Lutjerharms et al., 1985 ; figure 2).

- Le front subtropical (ou convergence sub-tropicale) est une frontière qui sépare les eaux de surface sub-tropicale (entraînées vers le sud-est par les vents tropicaux) des eaux superficielles sub-antarctiques (dérivant vers l'est nord-est sous l'action des vents d'ouest). Cette limite est détectable en surface par une brusque chute de la température qui passe d'environ 18°C à 11°C (Lutjerharms et Valentine, 1984).
- Les eaux superficielles sub-antarctiques sont ensuite divisées en deux zones par le front sub-antarctique : la zone sub-antarctique (entre le front sub-tropical et le front sub-antarctique) au nord et la zone polaire frontale (entre le front sub-antarctique et le front polaire) au sud. Les eaux sub-antarctiques sont définies comme une zone quasi homogène de salinité. Le front sub-antarctique correspond à une chute de température d'environ 4°C. En revanche la zone polaire frontale se caractérise par de multiples inversions de température et de salinité conséquences d'interactions complexes entre plongées et remontées d'eaux.
- Les eaux antarctiques, entre le front polaire et la divergence antarctique, sont sous l'influence du courant circumpolaire antarctique (se déplaçant d'ouest en est) et leur température est inférieure à 2°C (Blain et al., 2001)
- Enfin, a proximité du continent, la remontée d'eau profonde circumpolaire donne naissance à la divergence antarctique. Cette remontée d'eau possède une double origine : d'une part la proximité du continent et d'autre part le régime des vents (d'est près des côtes et d'ouest au-delà de la divergence antarctique engendrant des courants opposés).

Ces zones frontales ne sont pas des phénomènes géographiquement stables et présentent de fortes variations saisonnières et annuelles (Moore, 1999).

Cette structure discontinue de l'Océan Austral a une forte influence sur la répartition de la production primaire à l'origine des chaînes trophiques : le phytoplancton, plus abondant au niveau des fronts, est consommé par le zooplancton, lui-même consommé par des niveaux trophiques supérieurs (céphalopodes, poissons, oiseaux, mammifères marins). Les différentes structures repérées dans l'océan vont ainsi correspondre à autant d'habitats potentiels d'alimentation pour les poissons. Ainsi les caractéristiques des masses d'eaux (profondeur,

température, éclaircissement, salinité, turbulence...) vont influencer sur la composition et la biomasse du phytoplancton, du zooplancton, et donc, des poissons, de leurs concurrents et de leurs prédateurs.

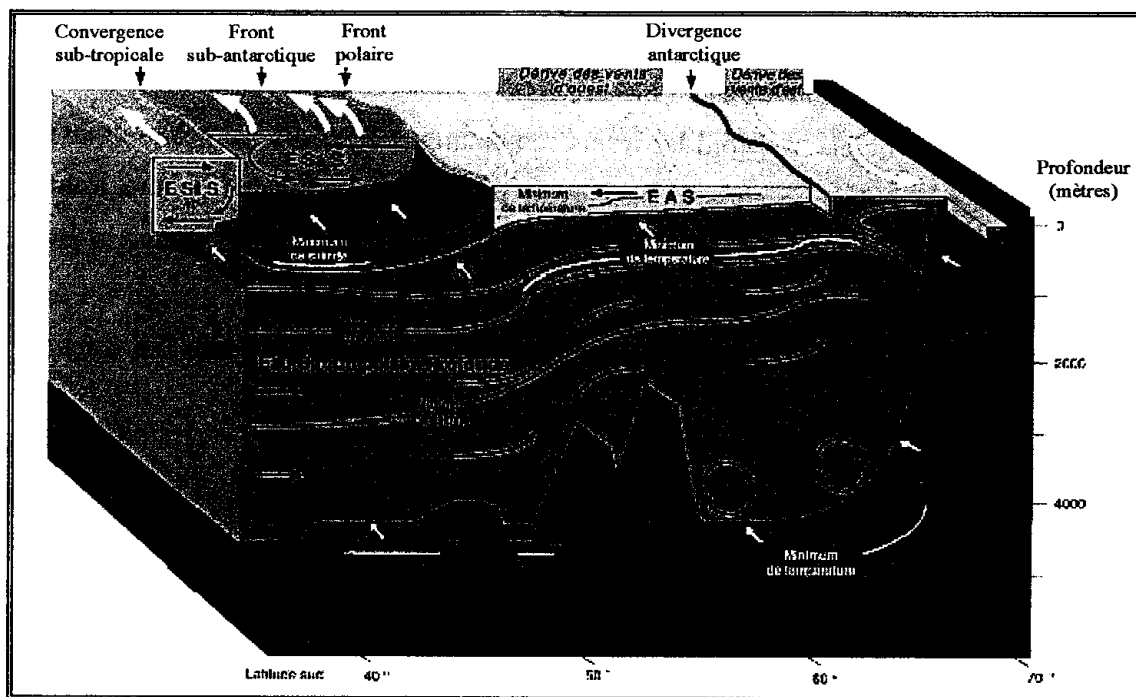


Figure 2: Représentation schématique de la circulation des principales masses d’eau dans le secteur indien de l’Océan Austral pendant la période estivale (d’après Lutjerharms et al., 1985)

Il faut également signaler que les poissons mésopélagiques, dont fait partie *Protomyctophum bolini*, effectuent des migrations verticales pouvant atteindre les 800 mètres d’amplitude. Ainsi les poissons mésopélagiques sont susceptibles de traverser différentes masses d’eau ceci influençant considérablement leur comportement alimentaire.

L’archipel de Kerguelen a été découvert par le navigateur finistérien Yves-Joseph de Kerguelen de Trémarec en 1772, ce groupe d’îles se situe dans le sud-ouest de l’Océan Indien (49°21’S-70°13’E) (figure 1, annexe 1). D’origine volcanique cet archipel est composé d’une île principale, Grande Terre, cernée par près de 300 îlots et écueils qui lui donnent une superficie totale de 7215 km². La Grande Terre est caractérisée par un grand nombre de fjords et de baies avec en particulier la Baie du Morbihan dans sa partie orientale. Le climat associé à ces îles est un climat océanique froid (température moyenne de 4,5°C, amplitude de 6°C) et humide (précipitations faibles mais fréquentes ; 850mm sur 246 jours par an) avec des

variations saisonnières peu marquées. La caractéristique climatique principale des îles Kerguelen est la force et la constance des vents dérivants des quarantièmes rugissants et des cinquantièmes hurlants. Ce flux permanent de vents (300 jours par an à 100 km. h⁻¹ en moyenne) est interrompu en hiver et au début printemps par de violentes tempêtes dont les vents pointent à plus de 250 km.h⁻¹.

L'hydrologie des eaux environnant l'archipel est conditionnée par la proximité de deux systèmes frontaux superficiels : au nord les fronts sub-antarctiques et sub-tropicales et au sud le front polaire. Cet archipel se situe ainsi dans la limite sud de la zone polaire frontale antarctique, au voisinage immédiat du front polaire, qui, dévié par son relief, longe la partie est de son vaste plateau péri-insulaire.

Les poissons forment d'importante communauté aux îles Kerguelen mais ce sont les prédateurs supérieurs qui retiennent le plus l'attention de scientifiques.

1.2. Le programme Interactions Oiseaux Zooplanctons (IOZ)

Les îles Kerguelen se caractérisent par l'importance de ses communautés de prédateurs supérieurs (oiseaux et mammifères marins), en effet l'ensemble de leurs populations est estimé à 479 millions d'individus dont 363 millions d'oiseaux (majoritairement des manchots et des petrels) consommant presque 245 millions de tonnes au total (Van Franeker et al., 1997). C'est pourquoi l'institut Paul Emile Victor a engagé un programme d'étude du milieu pélagique côtier de Kerguelen : le programme Interactions Oiseaux Zooplancton. Celui-ci a pour objectif de déterminer les interactions trophiques entre les oiseaux marins et le zooplancton.

Ce programme s'intéresse à l'ensemble des composantes de l'écosystème, on y retrouve donc des études sur la base du réseau alimentaire par exemple l'étude des relations entre la température, la salinité de la Baie du Morbihan et du plateau adjacent et les floraisons phytoplanctoniques, les teneurs en carbone et en azote. Cependant la plupart des études s'articule sur le régime alimentaire des Oiseaux et les relations directes avec le zooplancton à travers trois objectifs :

- établir les variations saisonnières de la structure des populations zooplanctoniques
- déterminer la biologie alimentaire des espèces d'oiseaux planctonophages dont les colonies de reproduction sont les plus abondantes dans la Baie du Morbihan ;
- estimer l'impact des oiseaux sur la dynamique de population des espèces clés zooplanctoniques.

De nombreux objectifs ont déjà été atteints, ainsi on connaît désormais les espèces de zooplancton consommées majoritairement par les oiseaux marins de Kerguelen, *Thémisto gaudichaudii*, *Parareuchaeta antarctica* et *Thysanoessa sp.* en étant les trois principales. De manière plus générale, ce programme a permis de mettre en évidence les espèces clés du réseau trophique de la Baie du Morbihan et du plateau péri-insulaire adjacent et ainsi de préciser les réserves énergétiques (et notamment lipidiques) ainsi que les bilans énergétiques de plusieurs espèces (comme *Drepanopus pectinatus* et *Parareuchaeta antarctica*) indispensables à la compréhension globale de ces écosystèmes. Mais le programme IOZ a aussi permis de montrer que les poissons mésopélagiques ne pouvaient être négligés, par exemple, les poissons sont des proies régulières pour certains oiseaux comme les prions et très importantes dans le cas du pétrel bleu. De plus, les poissons consomment du zooplancton et donc perturbent les estimations des prélèvements de zooplanctons par les oiseaux. Enfin, il est nécessaire de connaître l'importance des poissons dans cet écosystème pour prévoir l'impact de la pêche sur les communautés de prédateurs. Une étape supplémentaire ayant pour objectif de caractériser puis quantifier les proies consommées par les poissons mésopélagiques a donc été mise en place.

C'est au Laboratoire Océanologique de Villefranche sur Mer (Alpes Maritimes, France) que les régimes alimentaires de ces poissons sont déterminés, tout comme ceux des oiseaux l'ont été.

1.3. Le Laboratoire Océanologique de Villefranche sur mer (LOV)

L'équipe « Réponses Biologiques et Physiologiques aux Contraintes du Milieu », dirigée par Patrick Mayzaud est une des 5 équipes du Laboratoire d'Océanographie de Villefranche (LOV). Le LOV, créé en Janvier 2001, dépend de l'Université Pierre et Marie Curie (Paris VI), du Centre National de la Recherche Scientifique (CNRS) et de l'Institut National Science Univers (INSU).

Les zones de travail et les programmes à longs termes sur lesquels l'équipe travaille sont nombreux (figure 3).

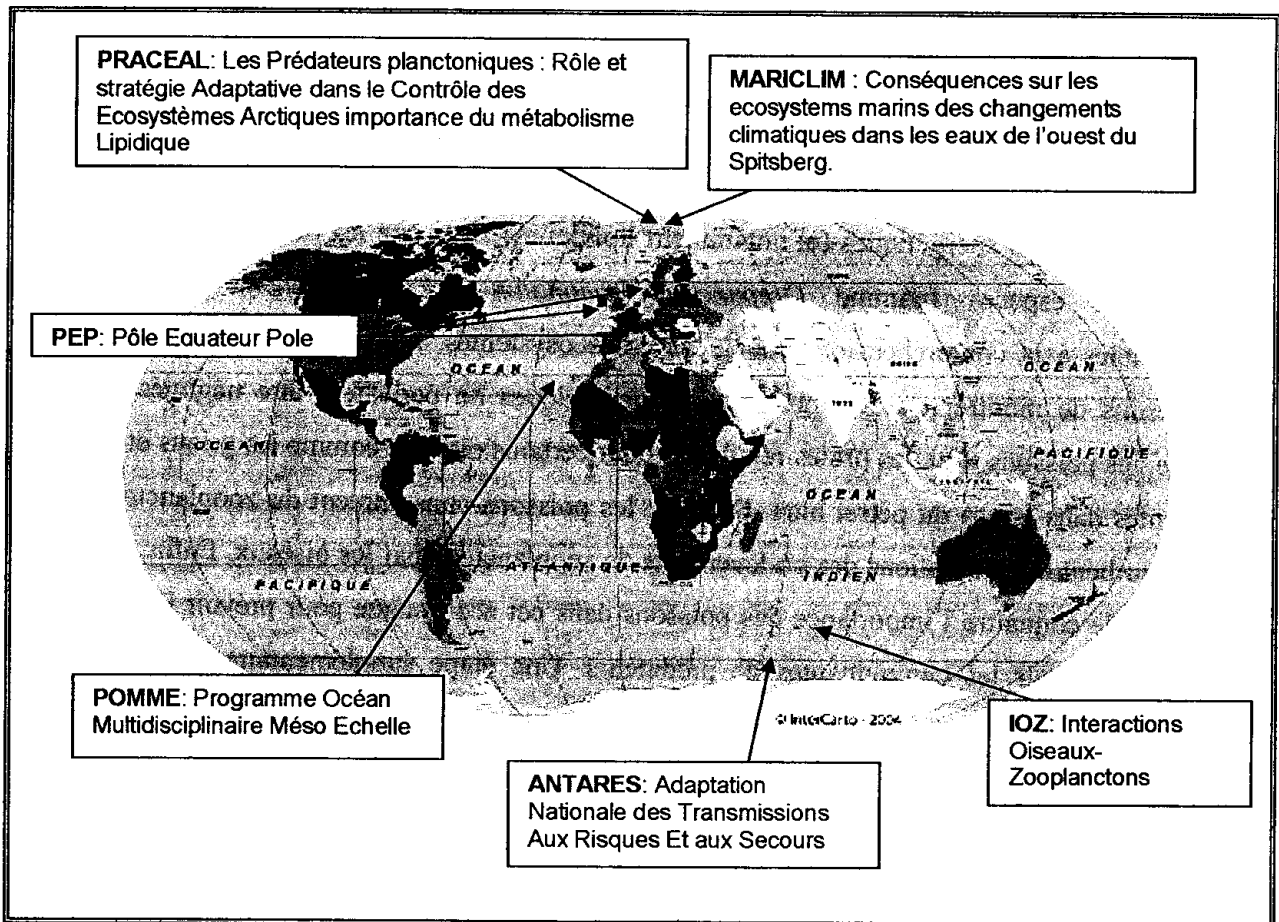


Figure 3 : Programmes et zones d'études principaux de l'équipe 5 du LOV

Cette équipe est originellement portée sur l'étude des populations zooplanctoniques avec comme objectifs (1) la compréhension des processus biologiques et des stratégies adaptatives, (2) l'étude de la variabilité spatio-temporelle du zooplancton et (3) la quantification de l'impact du zooplancton dans les cycles biogéochimiques.

Ces objectifs sont principalement abordés par l'étude des lipides. En effet l'étude de l'accumulation et du transfert des lipides au sein des différents maillons du réseau trophique pélagique a un triple intérêt

- la nature des réserves détermine la stratégie de survie hivernale des espèces dont la durée de vie est supérieure à un an, et les modalités de leur reproduction,
- les acides gras polyinsaturés et les phospholipides étant des éléments essentiels pour la croissance des invertébrés marins, toute carence à l'un des échelons du réseau trophique déterminera une limitation des niveaux de production,

- l'accumulation d'un niveau à l'autre du réseau alimentaire des lipides neutres (triglycérides et cires) fournit un moyen analytique d'appréhender les interactions trophiques dominantes d'une espèce ou d'un groupe d'espèce.

Mais la compréhension d'un niveau trophique ne pouvant se faire sans l'étude des maillons adjacents, l'équipe a donné aux poissons et aux oiseaux une importance croissante. Ainsi l'analyse des relations proies prédateurs est envisagée à tous les niveaux des systèmes pélagiques et au niveau des interactions pelagos-benthos. L'étude des relations au sein du pelagos (zooplancton/matière organique particulaire; zooplancton/zooplancton ; et plus particulièrement zooplancton/prédateurs terminaux) est donc la continuité des travaux en cours réalisés dans le cadre du programme de l'IPEV (le programme IOZ) en association avec la Station Biologique de Chizé (Deux Sèvres, France) et le Muséum National d'Histoire Naturelle à Paris. Dans ce cas, l'étude porte plus particulièrement sur les populations pélagiques dont le cycle biologique repose sur une forte accumulation de lipides (Zone d'étude en Antarctique : Archipel de Kerguelen ; en Arctique : Ny Alesund).

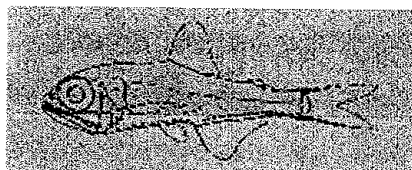
Les récentes publications (Connan et al., 2007; Mayzaud et al., 2007 ; Tarling et al., 2007) ainsi que l'arrivée à la rentrée 2007 d'un enseignant-chercheur spécialiste de l'ichtyofaune antarctique, confirment le développement des recherches sur les lipides des niveaux trophiques supérieurs en région polaire.

2. *Protomyctophum bolini*.

2.1. Données morphologiques et biologiques.

Protomyctophum bolini (également mal nommé *Electronica bolini*) est un poisson peu connu. Il a été nommé par Fraser Brunner en 1949, ses caractéristiques anatomiques sont fondées sur peu d'observations et quasiment toutes proviennent de Hulley (1990) (Figure 4).

Figure 4: Unique représentation de *P.bolini* (Heemstra P, collaborateur Fishbase)



Il appartient à la classe des actinoptérygiens (poissons à nageoires rayonnées), à l'ordre des myctophiformes (ou poissons lanternes). Ces derniers se caractérisent par la présence de photophores, qui sont des organes émettant une lumière d'origine non bactérienne d'intensité et de couleur variables chez le même individu (Stiassny, 1997 ; annexe 2).

P.bolini a une longueur standard de 6-7 cm (du rostre à la base de la nageoire caudale) à l'âge adulte, sa tête et son corps sont aplatis latéralement. Sa bouche est large et terminale, ses yeux sont en position latérale. Il possède une nageoire dorsale à 12-14 rayons mous, des nageoires pectorales à 14-16 rayons mous et une nageoire anale à 23-26 rayons mous. Il n'a aucune épine. Aucune description sur la présence et la répartition des photophores de *P.bolini* n'a été faite. La majorité des observations repose sur des animaux non sexés. Très peu de données sont disponibles sur la reproduction des myctophidés dans l'Océan Austral, il apparaîtrait que ces poissons ont majoritairement une période estivale de reproduction par an. Cependant certaines espèces présenteraient plusieurs périodes annuelles de reproduction, voire une reproduction continue (Sabourenkov, 1991). Aucune donnée n'a été publiée concernant *P.bolini* excepté un temps de doublement de la population < 15 mois (données Fishbase, d'après Hulley, 1990).

Ce poisson marin vit exclusivement dans l'Océan Austral, plus majoritairement entre la divergence antarctique et la zone de convergence subtropicale au niveau de l'océan Indien et de l'Atlantique. Il se situe au large des côtes (poisson océanique) dans les couches moyennes de la colonne d'eau (mésopélagique).

2.2. Un poisson mésopélagique.

Les poissons mésopélagiques, par définition, occupent une couche d'eau de profondeur moyenne et se caractérisent par les déplacements verticaux qu'ils y effectuent. En effet, ces poissons restent dans la zone des 100-700 mètres de profondeur mais ils accomplissent à l'intérieur de cette zone des migrations verticales journalières.

La figure 5 est tirée de l'étude de Duhammel (2000). Cette étude a permis de diviser les myctophidés en différents groupes selon leurs types de migration et ainsi de différencier *P.bolini* des autres myctophidés.

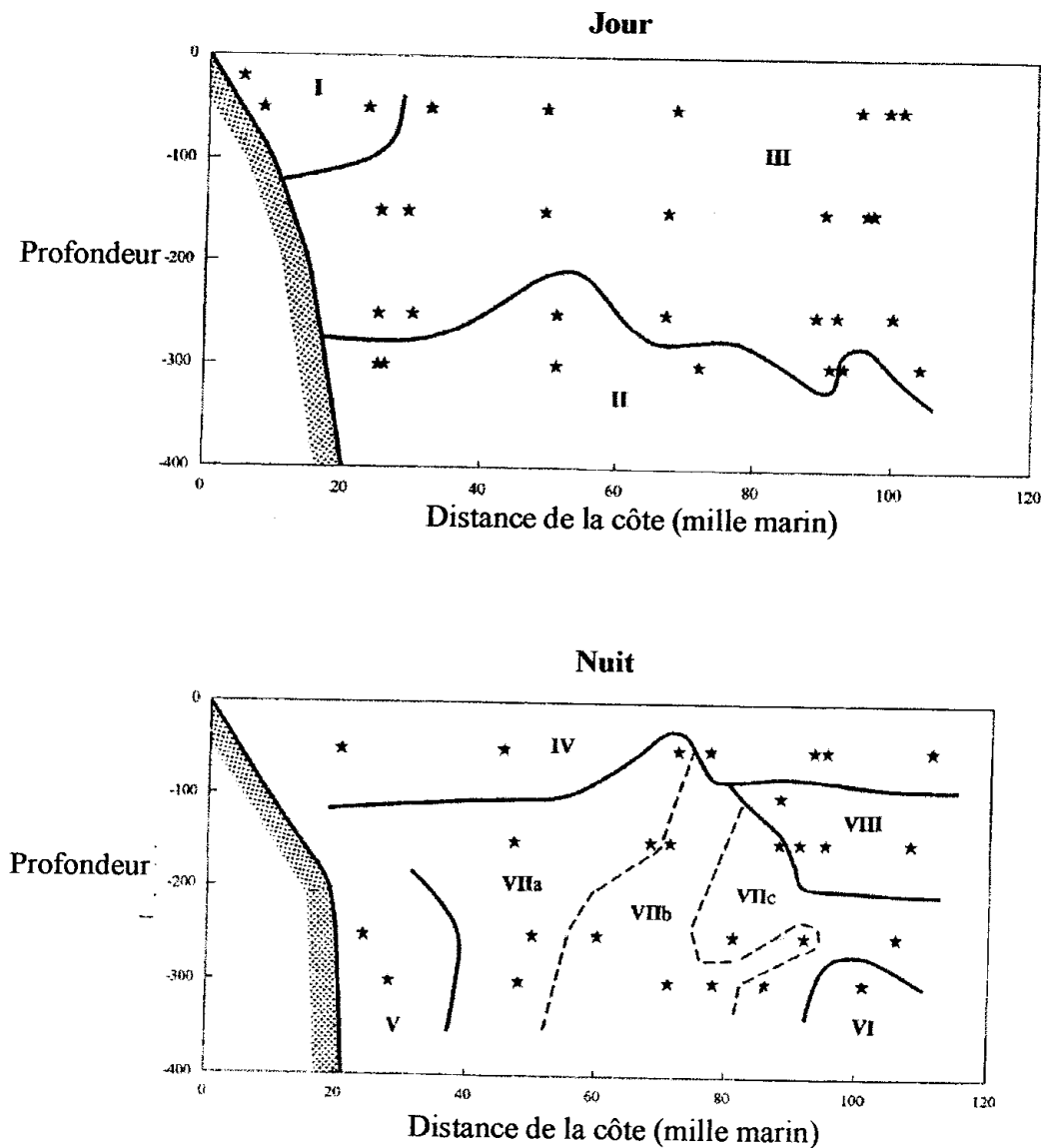


Figure 5: Groupement en deux dimensions des échantillonnages de jour et de nuit obtenu par la Curieuse (navire scientifique) en Mars 1995 (Duhammel, 2000)

Ainsi *P.bolini*, dans la journée, se situe dans les couches profondes, il est associé au groupe II (figure 5jour), qui contient la majorité des myctophidés. La nuit, il est retrouvé en masse dans les couches occupées par le groupe IV (figure 5nuit) ce qui a permis à Duhammel de montrer que *P.bolini* fait parti des 5 espèces (avec *Electrona Antarctica*, *Gymnoscopelus braueri*, *P. tenisoni* et *Gymnoscopelus fraseri*) qui migrent le plus. Pour autant *P.bolini* est aussi présent la nuit dans les couches définies par les groupes VIIa et VIIIb : il le seul à ne pas avoir de positionnement claire la nuit.

Les migrations verticales des myctophidés sont dues aux migrations du zooplancton (particulièrement les copépodes, les euphausiacés et les amphipodes hyperiidés ; annexe 3) qu'ils consomment (Kozlov and Tarverdiyeva, 1989). Les relevés hydroacoustiques obtenus lors de l'étude de Duhammel ont montré que la journée, la majorité du zooplancton était distribuée dans la zone des 320-425 m avec quelques regroupements entre 70 et 260 m. La nuit en revanche le zooplancton se situe au dessus de la zone des 100m.

La présence de *P.bolini* dans les couches profondes la nuit est à l'heure actuelle inexplicquée et soulève des questions sur le régime et le rythme d'alimentation de cette espèce.

3. Les relations proies-prédateurs.

Identifier les relations proies-prédateurs est une question centrale dans la compréhension des processus écologiques du fonctionnement des écosystèmes. L'identification des interactions prédateurs-proies peut être relativement aisée dans le cas de prédateurs spécialistes (cas très rare) ou lorsque des observations directes sont possibles (cas de grands prédateurs terrestres tels que le lion), mais l'exercice est plus problématique dans le cas présent. En effet, les spécificités du milieu marin (milieu liquide, dimension verticale importante dans le cas de *P. bolini* notamment) ne permettent pas des observations nombreuses et continues, et imposent des moyens d'exploration coûteux. De plus, l'écosystème étudié est organisé en patch : les communautés forment de petits groupes isolés dans de grandes quantités d'eau (conséquence de la pauvreté des eaux antarctiques et de la discontinuité des masses d'eaux). Enfin l'espèce étudiée est très mobile (horizontalement et verticalement) et son régime se fait à partir de différentes espèces et/ou de différentes populations d'une même espèce.

Pour faire face à toutes ces difficultés, des méthodes indirectes doivent être utilisées pour reconstruire son régime alimentaire.

3.1. Les différentes méthodes d'exploration

Deux grands groupes de méthodes peuvent être utilisées pour déterminer le régime alimentaire :

- les méthodes permettant d'identifier spécifiquement (donc jusqu'à l'espèce) les proies à partir de restes récoltés dans les contenus stomacaux.
- les méthodes utilisant des biomarqueurs ou traceurs alimentaires accumulés dans les tissus ou les organes.

3.1.1. Méthodes d'analyses des contenus stomacaux

- Analyse directe

La principale, et la plus ancienne de ces méthodes, est l'analyse directe des restes de proies récoltés sur les cadavres (ou par lavage gastrique sur les prédateurs supérieurs). Elle permet dans la plupart des cas une identification spécifique des proies. Elle consiste à trier les restes des proies plus ou moins digérés dans les contenus stomacaux, puis, à identifier ces restes jusqu'au plus petit taxon possible. Les restes caractéristiques (parties mal digérées telles que l'exosquelette des crustacés) peuvent ensuite être mesurés afin d'estimer la taille et la masse des proies ingérées. Toutefois, certaines pièces vont être plus retenues que d'autres et

