

# Université Montpellier II

Ecole doctorale  
"Biologie intégrative"

## Habilitation à diriger des recherches

### Intervention du bactérioplancton dans les réseaux trophiques

Jean-Pascal Torréton

Chargé de Recherche de 1<sup>ière</sup> classe  
à l'Institut de Recherche pour le Développement

Soutenue le 2 Juillet 1999 devant le jury :

Président	Thang	<b>Do Chi</b>	Professeur à l'Université Montpellier II
Rapporteur	Armand	<b>Bianchi</b>	Professeur à l'Université Aix-Marseille II
Rapporteur	Louis	<b>Legendre</b>	Professeur à l'Université Laval, Québec
Rapporteur	Pierre	<b>Servais</b>	Directeur de recherche à l'Université Libre de Bruxelles
	Alain	<b>Herbland</b>	Directeur de recherche à l'IFREMER
	Jacques	<b>Lemoalle</b>	Directeur de recherche à l'IRD
	Marc	<b>Trousselier</b>	Chargé de recherche à l'Université Montpellier II

## Remerciements

La recherche n'est pas une activité solitaire et ce qui peut être présenté comme un travail personnel doit toujours beaucoup à de nombreuses collaborations. Le travail présenté ici ne fait pas exception à cette règle et a bénéficié, à des degrés variés, de la bonne volonté de nombreuses personnes qu'il n'est pas possible de citer ici. Je tiens à exprimer ma reconnaissance ici à tous les chercheurs, techniciens, allocataires, stagiaires, marins et administratifs qui, de près ou de loin, ont contribué à faciliter l'ensemble de mes activités, en particulier au centre de recherches océanographiques d'Abidjan, et au centre IRD de Tahiti.

Je voudrais également remercier le laboratoire de Microbiologie Marine du CNRS pour l'aide précieuse qui ne m'a jamais été mesurée lors de mes séjours à Abidjan et Tahiti et bien sûr lors de mon séjour dans ce même laboratoire à Marseille.

J'exprime ici ma gratitude aux divers chercheurs qui ont accepté de relire et critiquer les manuscrits que je leur soumettais, et plus particulièrement ceux avec lesquels ces apports ont pu se prolonger par des discussions toujours enrichissantes, parmi lesquels, Farooq Azam, Armand Bianchi, Pierre Caumette, Hugh Ducklow, James Hollibaugh, David Kirchman et David Moriarty.

L'IRD, le Ministère des Affaires Etrangères, le PNRCO, le PGRN, la CORDET, le ministère de la Recherche et le Ministère de l'Environnement de Polynésie Française ont contribué à financer ces activités et il convient également de les en remercier.

Ce travail de synthèse doit beaucoup à Marc Troussellier dont les conseils m'ont été précieux. J'espère que l'investissement qu'il a bien voulu consentir ici avec disponibilité et rigueur marque le début d'une collaboration fructueuse.

Enfin il m'est particulièrement agréable de manifester ma reconnaissance aux membres du Jury qui ont accepté de lire et évaluer ce travail malgré leur emploi du temps chargé.

# Sommaire

<b>1</b>	<b>INTRODUCTION .....</b>	<b>1</b>
1.1	IMPORTANCE GLOBALE DU MONDE BACTERIEN .....	1
1.2	LES BACTERIES HETEROTROPHES DANS LES ECOSYSTEMES AQUATIQUES .....	2
1.2.1	<i>Bref historique</i> .....	2
1.2.2	<i>Incidence des bactéries sur le fonctionnement des milieux oligotrophes</i> .....	2
1.2.3	<i>Incidence des bactéries sur le fonctionnement des milieux eutrophes</i> .....	3
1.2.4	<i>Conclusion</i> .....	4
<b>2</b>	<b>PRESENTATION GENERALE DES ACTIVITES DE RECHERCHE.....</b>	<b>5</b>
2.1	CADRE D'EXERCICE, CONTRAINTES ET STRATEGIE .....	5
2.2	FONCTIONNEMENT D'UN MILIEU ESTUARIEN EUTROPHE : LA LAGUNE EBRIE .....	7
2.3	FONCTIONNEMENT D'UN LAGON D'ATOLL DE TYPE OUVERT : LE PROGRAMME CYEL .....	13
2.4	CAPACITES TROPHIQUES D'UN ATOLL DE TYPE FERME POUR LA PERLICULTURE : PROGRAMME PGRN ...	17
2.5	ECODIVERSITE DES LAGONS D'ATOLL : LE PROGRAMME TYPATOLL .....	21
2.6	IMPACTS ANTHROPIQUES SUR UN MILIEU RECIFO-LAGONAIRE : LE PROGRAMME ANTROPIC .....	28
2.7	CONCLUSION, PROJET DE RECHERCHE .....	331
<b>3</b>	<b>PRODUCTION SCIENTIFIQUE.....</b>	<b>40</b>
3.1	PUBLICATIONS A COMITE DE LECTURE.....	40
3.1.1	<i>Revue</i> .....	40
3.1.2	<i>Chapitres d'ouvrages à comité de lecture</i> .....	41
3.1.3	<i>Actes de colloque à comité de lecture</i> .....	41
3.2	PRESENTATIONS EN CONGRES.....	41
3.3	RAPPORTS A DIFFUSION RESTREINTE .....	43
3.4	MEMOIRES DE DIPLOME.....	43
<b>4</b>	<b>ENSEIGNEMENT - FORMATION.....</b>	<b>44</b>
4.1	ENSEIGNEMENT .....	44
4.2	ENCADREMENT.....	44
<b>5</b>	<b>RESPONSABILITES DANS L'ANIMATION ET LA GESTION DE LA RECHERCHE.....</b>	<b>48</b>
5.1	CONCEPTION ET ANIMATION DE PROGRAMMES.....	48
5.2	INTERIM DE LA DIRECTION DU CENTRE IRD DE TAHITI.....	49
5.3	MEMBRE ELU DE LA COMMISSION SCIENTIFIQUE 32 DE L'IRD.....	49
5.3	MEMBRE DU COMITE SCIENTIFIQUE DU PNEC.....	49
5.4	PARTICIPATION A DES COMITES DE LECTURE .....	49

# 1 Introduction

## 1.1 Importance globale du monde bactérien

La présence des procaryotes s'inscrit dans une longue histoire. Les premières traces de la vie sont en effet bactériennes et datent de 3,5 à 3,6 milliards d'années (les stromatolites). Les premiers fossiles d'eucaryotes remontent à 1,8-1,9 milliards d'années et ceux des organismes multicellulaires à 0,58 milliard d'année. Une immense diversité métabolique autorise la croissance des procaryotes dans des conditions insupportables aux autres organismes vivants. Ils peuvent utiliser la lumière ainsi que de multiples composés réduits tant organiques que minéraux pour en tirer de l'énergie. Les accepteurs terminaux de leurs systèmes de transport d'électrons membranaires peuvent être aussi divers que O<sub>2</sub>, NO<sub>3</sub>, SO<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub>, Fe, Mn et de nombreux substrats organiques. Les bactéries peuvent donc prospérer en anoxie. Des configurations enzymatiques uniques les autorisent à se développer à des températures extrêmement élevées (Stetter *et al.* 1996). Leur diversité génétique est exceptionnelle. A la fin des années 70, les travaux de Carl Woese ont conduit à reconsidérer l'ensemble de la classification du vivant (Woese *et al.* 1992). Le monde bactérien y occupe maintenant une place prépondérante, constituant 2 (*eubacteria*, *archaeobacteria*) des 3 grands groupes évolutifs (les « domaines ») actuellement définis. Les onze grandes subdivisions du domaine des *eubacteria* présentent ainsi des distances génétiques au moins égales à la distance moyenne séparant les plantes des animaux (Fuhrman *et al.* 1992). En raison de leur diversité métabolique, de leur tolérance thermique et de leurs formes de résistance leur conférant une importante capacité de dissémination, les bactéries ont colonisé tous les lieux terrestres susceptibles d'héberger des êtres vivants. Surface des glaciers, profondeurs océaniques, cheminées océaniques, sources terrestres brûlantes (Stahl *et al.* 1985),

intérieurs terrestres - comprenant les nappes pétrolifères (Stetter *et al.* 1993, Szewzyk *et al.* 1994, L'Haridon *et al.* 1995), les sédiments océaniques profonds (Parkes *et al.* 1994), et les roches profondes (Stevens & McKinley 1995) - et bien sûr les êtres vivants. Ainsi chez l'homme, les bactéries représentent 10% du poids sec et le nombre de leurs cellules excède largement celui des cellules humaines (Margulis & Sagan 1986). Dans les systèmes océaniques oligotrophes, les seules bactéries hétérotrophes constitueraient 70% du carbone vivant et plus de 90% de la surface biologique (Fuhrman *et al.* 1989). Il faut ajouter les procaryotes photosynthétiques responsables de l'essentiel de la production primaire. Enfin, selon Gold (1992), la masse des seules bactéries souterraines (2<sup>20</sup> grammes) pourrait être comparable à la masse des êtres vivants en surface<sup>1</sup>.

La dominance du monde bactérien peut ainsi être constatée en terme de durée, de diversité métabolique et génétique, d'ubiquité et enfin de biomasse. Qu'on le veuille ou non, nous vivons donc dans un monde bactérien...

---

<sup>1</sup> Sur la base, bien sûr, d'un grand nombre d'approximations et en supposant que les dénombrements en milieu souterrain n'aient pas été surestimés par des contaminants.

## 1.2 Les bactéries hétérotrophes dans les écosystèmes aquatiques

### 1.2.1 Bref historique

Les milieux aquatiques n'échappent donc pas à cette dominance. Les bactéries hétérotrophes ne représentent qu'une catégorie fonctionnelle des procaryotes, tirant leur énergie de l'oxydation de la matière organique, et depuis la fin des années 1970, l'importance que l'on leur attribue dans les flux de matière et d'énergie a continuellement progressé. Cette progression conceptuelle est indissociable de l'évolution des méthodes. Les progrès effectués dans l'énumération des bactéries au microscope optique (Hobbie *et al* 1977), puis ceux réalisés pour la détermination des *taux de croissance*<sup>2</sup> bactériens (Hagström *et al* 1979, Fuhrman & Azam 1980, Karl 1980) ont conduit assez rapidement à réévaluer leur importance dans les stocks et les flux de matière. En terme de biomasse, on sait maintenant que le bactérioplancton représente une part importante du carbone planctonique. De manière *a priori* paradoxale cette contribution augmente avec le degré d'oligotrophie (Cho & Azam 1990). La *production de biomasse bactérienne* représente environ 10 à 30 % de la production primaire dans les écosystèmes fermés, c'est à dire sans apports allochtones de matière organique (Ducklow & Carlson 1992). Comme le *rendement de croissance* bactérien est de toute évidence loin d'atteindre 100% (del Giorgio & Cole 1998), le flux de matière organique traversant le compartiment bactérien (*l'activité hétérotrophe totale*) représente une des voies les plus importantes de circulation du carbone dans les écosystèmes aquatiques. Dans les écosystèmes ouverts cette proportion peut atteindre des valeurs du même ordre que la production primaire. Conditionnés par la

richesse du milieu et la température, les taux de croissance bactériens varient ainsi sur 5 ordres de grandeur (White *et al* 1991).

Cette perception de l'importance des communautés bactériennes hétérotrophes s'est accompagnée d'une réévaluation de leur rôle dans les flux de matière organique au sein de la colonne d'eau (Williams 1981, Azam *et al* 1983). Cette prise en compte est résumée dans le concept de «*réseau trophique microbien*» venant se greffer sur la chaîne trophique classique. Dans ce réseau, la matière organique dissoute produite par l'exsudation phytoplanctonique et l'activité des consommateurs («*sloppy feeding*», excrétion et production de fèces) est consommée efficacement par les bactéries hétérotrophes. Cette biomasse bactérienne produite est consommée par le nanoplancton hétérotrophe et retourne ainsi dans le réseau trophique. Les éléments minéraux libérés de la matière organique peuvent ainsi connaître une deuxième vie dans la couche euphotique et servir à produire un surcroît de production primaire, dite de régénération. Toutefois, ce premier modèle de fonctionnement ne résume pas à lui seul l'incidence des bactéries sur le fonctionnement des écosystèmes aquatiques. Celle-ci varie en effet considérablement avec l'état trophique de ces écosystèmes.

### 1.2.2 Incidence des bactéries sur le fonctionnement des milieux oligotrophes

Une première incidence de l'activité bactérienne est donc la **production d'un surcroît de biomasse exploitable** par rapport à celle des producteurs primaires. Dans les écosystèmes les plus oligotrophes, la productivité relativement faible du

---

<sup>2</sup> Les mots en italiques renvoient au glossaire en page 41

bactérioplancton - qui est principalement composé de cellules libres et de petites tailles ( $< 0,6 \mu\text{m}$ ) - conduit *a priori* à un transfert peu efficace de la biomasse vers les niveaux trophiques supérieurs. En effet, au minimum 2 étapes de prédatons (nano-flagellés puis ciliés par exemple) sont nécessaires avant que la biomasse bactérienne n'atteigne le mesozooplancton. Toutefois, ce transfert doit être comparé à celui du phytoplancton, qui, dans ces mêmes milieux, montre également une prédominance des très petites tailles (procaryotes comme eucaryotes). Cette biomasse est produite à partir de carbone organique<sup>3</sup> particulaire ou dissous qui serait autrement exporté de la couche euphotique par sédimentation ou convection (Carlson *et al* 1994). La production bactérienne s'exerçant dans la couche euphotique affecte donc considérablement la rétention des écosystèmes en **limitant les exportations de matière organique**. Les processus bactériens dans la couche euphotique jouent ainsi un rôle déterminant dans la proportion du dioxyde de carbone (fixé par la photosynthèse) qui sera séquestrée dans les couches profondes océaniques.

L'autre effet majeur du fonctionnement de la *boucle microbienne* est la **régénération des éléments minéraux**. Avec des rapports C/N et C/P plus faibles que ceux des autres organismes planctoniques (Lee & Fuhrman 1987), les bactéries elles-mêmes ne libèrent généralement pas ces éléments. Cependant, en tant que proies activement consommées par les protistes, elles participent à la régénération des éléments nutritifs provenant de la matière organique détritique lors de leur broutage. Le recyclage d'une part des éléments nutritifs autrement exportés vers les couches profondes sous forme d'organismes morts, de pelotes fécales ou de matière organique dissoute permet une production dite "de

régénération" venant s'ajouter à la production "nouvelle" issue de la diffusion des nutriments depuis les couches profondes.

Toutefois, cette vision simple et assez idéale doit être pondérée. Le bactérioplancton peut combler ses besoins élevés en N et P au détriment du phytoplancton en raison de son affinité plus importante (Currie & Kalff 1984, Caron *et al* 1988). De fait il semble représenter l'essentiel de l'assimilation de nutriments dans les zones les plus oligotrophes (Wheeler and Kirchman 1986, Suttle *et al* 1990). La carence nutritive du phytoplancton, accentuée par la compétition bactérienne, peut se traduire par un mécanisme de « surflux ». La croissance cellulaire et la division étant inhibées par la carence nutritive et la photosynthèse continuant (Wood & Van Valen 1990), les cellules phytoplanctoniques excréteraient alors de larges quantités de carbone organique dissous (Karl *et al* 1998) stimulant l'activité bactérienne et augmentant ainsi le stress nutritif du phytoplancton.

### 1.2.3 Incidence des bactéries sur le fonctionnement des milieux eutrophes

Dans les écosystèmes eutrophes, recevant généralement des apports allochtones, qu'ils soient d'origine terrestre ou benthique, naturels ou issus de l'activité humaine, la production bactérienne augmente considérablement et peut excéder la production primaire. Le bactérioplancton est composé de cellules plus grosses et une proportion importante est attachée sur des particules. Elles peuvent être alors activement consommées directement par des ciliés ou le mesozooplancton et accroissent ainsi la productivité terminale de ces écosystèmes déjà riches. Le couple bactéries-protistes régénère les éléments minéraux issus de la matière organique détritique. Ceux-ci s'ajoutant aux apports directs aggravent ainsi l'eutrophisation du milieu. Dans les

---

<sup>3</sup> les réactions anaplérotiques étant mineures,  $< 5\%$  en terme de flux, Li (1982)

cas extrêmes l'activité bactérienne se traduit par une demande en oxygène telle qu'elle conduit à l'anoxie où pratiquement seuls les procaryotes peuvent subsister.

#### **1.2.4 Conclusion**

Ces quelques exemples de l'incidence du bactérioplancton hétérotrophe sur des écosystèmes aquatiques situés aux deux extrémités de la gamme trophique montrent que celui-ci joue un rôle déterminant et varié dans leur fonctionnement et dans leurs propriétés

macroscopiques (productivité, recyclage, rétention, exportation...). On sait en effet maintenant que les implications de la boucle microbienne dans le fonctionnement des réseaux trophiques planctoniques n'obéissent pas à un schéma unique mais dépendent très largement des conditions de milieu (degré trophique, éléments limitants, structures de tailles, etc., Legendre & Rassoulzadegan 1995). L'écologie microbienne est donc une discipline essentielle dans l'étude des cycles biogéochimiques au sein des écosystèmes aquatiques.

## 2 Présentation générale des activités de recherche

### 2.1 Cadre d'exercice, contraintes et stratégie

Le fil conducteur de mes activités depuis mon recrutement en 1982 à l'IRD est de déterminer le rôle que peuvent jouer les bactéries hétérotrophes dans le fonctionnement des écosystèmes aquatiques et dans leur évolution après perturbation. L'eutrophisation des écosystèmes continentaux, lagunaires ou côtiers est malheureusement une conséquence fréquente du développement et de l'urbanisation des pays du Sud. Cette dégradation menace à la fois les apports alimentaires de complément par la pêche, la valorisation économique des paysages, le cadre de vie et la santé des populations. La compréhension des mécanismes de ces perturbations est essentielle à l'évaluation des risques économiques et écologiques et donc à la réalisation d'un développement durable.

Exerçant ses activités aux interfaces entre détritique et vivant, entre minéral et organique et entre dissous et particulaire, le compartiment bactérien hétérotrophe est un intervenant essentiel dans ces mécanismes. Les études d'écologie microbienne ont l'ambition de contribuer à apporter des éléments de réponse à de nombreuses questions de natures aussi bien fondamentales qu'appliquées. Il y a donc bien place pour une thématique de ce type dans un institut comme l'IRD.

Le travail de recherche présenté ici a été réalisé en participant à divers programmes de recherche issus de demandes socio-économiques fortes (Tab. 1). Outre l'évaluation des impacts environnementaux liés au développement, ces recherches m'ont permis de participer à la compréhension des mécanismes de fonctionnement des réseaux trophiques microbiens et ceci dans des milieux aquatiques généralement peu étudiés.

Cette activité de recherche a nécessité une large autonomie. L'écologie microbienne aquatique n'est en effet actuellement représentée à l'IRD que par 3 chercheurs. Ceux-ci n'ont qu'occasionnellement participé à des programmes communs et développent des thématiques qui leurs sont propres, bien que mutuellement complémentaires.

Lorsque l'on aborde l'écologie microbienne, il faut garder présent à l'esprit 5 contraintes : le coût d'acquisition élevé (en temps et en matériel) des variables bactériennes, leur relative sophistication les prêtant *a priori* assez peu aux études de terrain, l'impérieuse nécessité, pourtant, de réaliser les études de processus le plus rapidement possible après les prélèvements, la multiplicité des sources nutritives bactériennes, et enfin la relative nouveauté de la méthodologie qui impose de nombreuses vérifications et mises au point lorsque l'on aborde des milieux originaux. Le faible taux d'acquisition qui en résulte exclut de prétendre décrire de façon exhaustive les processus bactériens à l'échelle d'un milieu. La stratégie qui m'apparaît la plus adaptée est l'étude de situations environnementales contrastées, telles celles montrées par le degré d'eutrophisation, afin d'apprécier les relations entre variables bactériennes et ces conditions de milieu. Dans chacune de ces situations, la représentativité des mesures doit être établie sur un plan spatial et temporel.

La sélection des acquis présentée dans ce document porte donc à la fois sur des aspects méthodologiques et conceptuels. Ils ont été obtenus sur des milieux recouvrant et étendant même la gamme de richesse trophique abordée dans la littérature.

Tab. 1: Présentation résumée du cadre d'exercice de mes activités de recherche

Demande des partenaires / intérêt développement	Programme	Lieu	Période	Production scientifique <sup>4</sup>		
				Articles à Comité de lecture	Congrès	Rapports
Impacts anthropiques sur le système lagunaire Ebrié	Fonctionnement d'un milieu estuarien tropical eutrophe	lagune Ebrié, Côte d'Ivoire	1983-1990	P2 , P3, P4, P5, P7, P9, O1	C1, C2, C3, C4, C5	
Optimisation de la productivité d'un système aquacole	Relations trophiques dans un écosystème aquacole	Etangs d'aquaculture de Layo, Côte d'Ivoire	1990	P6, P8		
	Rédaction de thèse	France	1991			D3
Changement global / CO <sub>2</sub>	programme Eumeli-JGOFS	Atlantique Est	1992	P11		R1, R3
Connaissance des réseaux trophiques d'un lagon d'atoll	CYEL : Cycles de la matière et de l'énergie dans un lagon d'atoll	Tikehau, Tuamotu, Polynésie Française	1992-1994	P10, P12, P14, P15, A1	C6, C7, C8, C9, C11	R2, R7
Capacités trophiques d'un atoll de Polynésie Française pour la perliculture	PGRN : Programme Général de Recherches sur la Nacre	Takapoto, Tuamotu, Polynésie Française	1992-1993	P10, A1	C11, C13	R4, R6
Facteurs orientant le fonctionnement biologique des lagons d'atoll	TYPATOLL Ecodiversité des lagons d'atoll	Tuamotu, Polynésie Française	1994-1996	P13, P17, P18, P19, P21, A2, A4	C12, C14, C15, C16	R5
Impacts anthropiques sur un milieu récifo-lagonaire	ANTROPIC	Tahiti, Polynésie Française	1996-1998	P16,P20, A3	C10, C17	R5, R8, R9

<sup>4</sup> Les numéros précédés d'un P, O, A, R, D ou C renvoient respectivement aux Publications, chapitres d'Ouvrage, Actes de colloque, Rapports, rapports de Diplômes et présentations en Congrès énumérés dans la section 3. Production scientifique.

## 2.2 Fonctionnement d'un milieu estuarien eutrophe : la lagune Ebrié<sup>5</sup>

Mon parcours à l'IRD a débuté avec l'étude de la lagune Ebrié (Fig. 1), milieu estuarien eutrophe étudié depuis longtemps par l'Institut. Capitale économique de la Côte d'Ivoire, la ville d'Abidjan (~ 2 M hab.) s'étend sur ses berges et y rejette ses eaux résiduaires sans traitement préalable. Les premières études microbiologiques initiées en 1975 suggéraient des activités microbiennes élevées, phénomène confirmé par les approches culturales employées quelques années plus tard [O1].



Mon implication coïncidait avec le développement de techniques quantitatives d'estimation de la biomasse et de la production bactériennes. Ces techniques n'ayant à l'époque jamais été employées sur des milieux comparables, j'ai dû vérifier systématiquement leur validité et au besoin les adapter aux conditions très particulières de ce milieu.

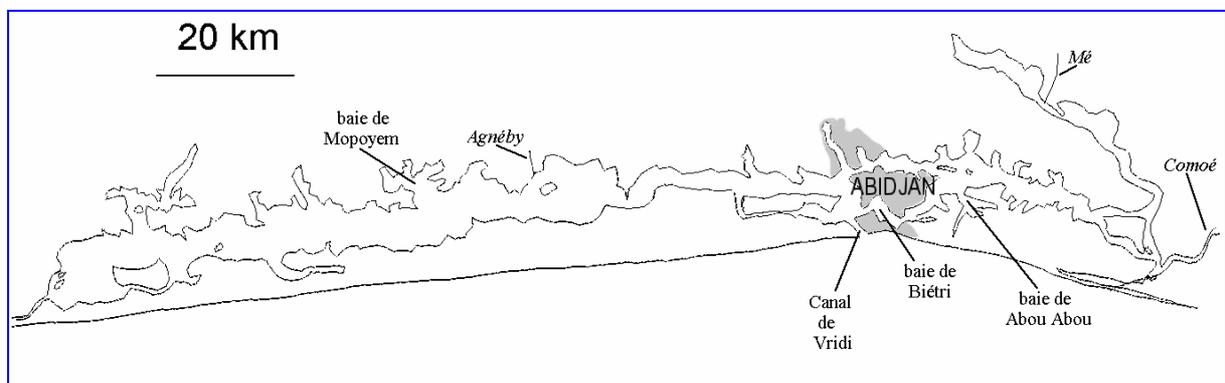


Fig. 1: La lagune Ebrié et les 3 sites étudiés

### Les questions...

Les objectifs des études d'écologie microbienne étaient (1) d'estimer si la production bactérienne hétérotrophe représentait un ajout significatif à la production phytoplanctonique, (2) d'évaluer la nature du *contrôle* exercé sur les activités et biomasses bactériennes.

### Les outils...

La production bactérienne a ainsi été estimée en déterminant la vitesse de synthèse de l'ADN bactérien. La comparaison des méthodes d'extraction de l'ADN marqué par la thymidine tritiée a permis de préciser l'origine des biais

observés par ces différentes techniques et de proposer l'amélioration d'une méthode d'extraction enzymatique [P7, C4]. Cette extraction montre que la proportion de l'ADN marqué dans la totalité des macromolécules marquées peut être très faible dans un milieu eutrophe estuarien comme celui de la lagune Ebrié. Cette proportion s'élève très significativement en *culture* chez les cellules en phase active de croissance utilisées pour l'étalonnage empirique de l'incorporation de thymidine en production de cellules. Cette évolution n'est pas sans conséquence. La production déterminée par le marquage dans les macromolécules seules surestime ainsi la production vraie. Ce biais peut atteindre une valeur importante dans les milieux eutrophes

<sup>5</sup> Financement IRD. Resp. D Guiral (IRD)

continentaux où la proportion du marquage est faible [P7].

La production est généralement calculée à partir de l'incorporation de thymidine (TTI) dans le précipité TCA (Trichloro Acetic Acid) par  $\text{ProdTCA} = \text{TTI TCA} \times \text{TCFTCA}$ , où TCFTCA est le facteur de conversion basé sur l'incorporation dans le TCA précipité. Toutefois, la valeur de production réelle (ProdDNA) doit être donnée par l'incorporation dans le DNA (TTIDNA), avec :  $\text{ProdDNA} = \text{TTIDNA} \times \text{TCFDNA}$ , où TCFDNA est le facteur de conversion basé sur l'incorporation dans le DNA. Si l'on appelle %DNA<sub>situ</sub> et %DNA<sub>culture</sub> la proportion du marquage dans le DNA représentée dans le TCA précipité total in situ et dans les cultures on peut montrer que :  $\text{ProdTCA} = \text{ProdDNA} \times \% \text{DNA}_{\text{culture}} / \% \text{DNA}_{\text{situ}}$ . La production bactérienne est donc sous-estimée d'un facteur  $\% \text{DNA}_{\text{culture}} / \% \text{DNA}_{\text{situ}}$ .

L'activité hétérotrophe globale (AH) représente la totalité des entrées dans le compartiment bactérien. Il n'est évidemment pas possible de déterminer directement celle-ci tant la nature des composés consommables est diverse. Il est possible de l'évaluer en divisant la production bactérienne par le rendement de croissance bactérien (RCB). Pour évaluer RCB, en conditions aérobies, la meilleure méthode est probablement d'estimer l'activité de respiration bactérienne ( $\text{RCB} = \text{production} / (\text{production} + \text{respiration})$ ). La comparaison entre consommation bactérienne d'oxygène et production de biomasse a permis d'estimer un rendement de croissance bactérien élevé (43-70%, limites de l'intervalle de confiance à  $P=0,05$ ).

La respiration n'est évidemment pas une spécificité bactérienne. L'établissement d'une corrélation entre consommation d'O<sub>2</sub>, Chl. *a* (représentant le phytoplancton) et production bactérienne a permis de distinguer les contributions bactérienne et phytoplanctonique à cette activité dans les couches aérobies [D3]. En admettant un quotient respiratoire de 0.9 mole d'O<sub>2</sub> consommé par mole de C respiré, il devenait possible d'évaluer le rendement de croissance bactérien  $\text{RCB} = \text{production} / (\text{production} + \text{respiration})$ .

Dans les couches anoxiques où estimer la consommation d'oxygène est

exclu, une approche analogue a été employée en déterminant l'activité potentielle maximale de la chaîne respiratoire membranaire. Après l'avoir adapté (notamment aux couches anoxiques) [P4], une analyse par corrélation a permis de distinguer la contribution bactérienne à cette activité dans les couches aérobies. L'activité ETS spécifique par bactérie en milieu anoxique a permis d'attester l'importance de l'activité hétérotrophe bactérienne dans l'hypolimnion désoxygéné de la baie de Biétri.

La mesure de l'activité potentielle maximale de la chaîne respiratoire membranaire (ETS pour Electron Transport System) avait été initialement développée pour contourner le problème de sensibilité de la mesure de consommation d'O<sub>2</sub>. Le principe est de concentrer les organismes planctoniques sur membrane, de mesurer l'activité ETS et d'en extrapoler l'activité respiratoire. Le postulat de base est qu'il existe une relation simple entre respiration effective et activité ETS.

Le taux de prédation sur les bactéries a d'abord été estimé par la cinétique de décroissance du marquage <sup>3</sup>H-TdR dans le précipité TCA (Servais *et al* 1985). Celle-ci n'a donné que des résultats peu satisfaisants [D3] avant que l'étude du marquage dans l'ADN n'en fournisse l'explication [P7]. L'emploi d'antibiotiques a permis d'estimer la décroissance des abondances bactériennes due à la prédation par les eucaryotes. Après plusieurs essais, le choix s'est porté sur un mélange streptomycine + pénicilline [D3]. La prise en compte de la vitesse d'inhibition de la croissance bactérienne par les antibiotiques a permis de déterminer que le taux de prédation était élevé comparé à la production (moyenne  $82 \pm 5\%$ ,  $n=13$ ).

### ... et leur application.

Le milieu lagunaire étant caractérisé par une très grande variabilité spatiale et temporelle, l'étude de son incidence sur les processus bactériens

s'imposait. La variabilité temporelle a ainsi été étudiée à l'échelle de la journée, du mois, et des saisons. La variabilité spatiale a été abordée sous l'angle de la zonation horizontale et de la distribution verticale (certaines zones sont très stratifiées).

Trois sites d'étude correspondant à 3 baies ont été privilégiés. Les conditions lagunaires les plus couramment rencontrées correspondent en effet à un écosystème peu profond comprenant de nombreuses baies. Les 3 baies choisies correspondent à des situations parmi les plus contrastées que l'on puisse rencontrer dans ce milieu. Elles ont été étudiées sur des fonds de 3 m, proches des conditions les plus couramment rencontrées. La baie d'Abou-Abou située vers l'extrémité Est de la lagune présente les caractéristiques d'un milieu estuarien non pollué. La baie de Biétri localisée en zone estuarienne est fortement affectée par les activités humaines. Enfin la baie de Mopoyem se situe vers l'extrémité ouest et correspond à un milieu oligohalin non pollué (Fig. 1).

Ces 3 sites ont été étudiés en 3 saisons caractéristiques de l'hydroclimat lagunaire : la saison d'étiage (janvier - avril), la saison des pluies (mai - juillet) et la saison des crues (octobre - décembre).

**Les variations temporelles des variables bactériennes sont modérées à différentes échelles de temps.**

Dans ce milieu, les fluctuations nycthémérales des variables bactériennes ont été suivies à la fois en mésocosmes et dans le milieu libre. Cette étude a montré que les variations étaient modérées mais structurées à cette échelle. Elle a mis en évidence le découplage des communautés attachées présentant un maximum diurne et libres montrant un maximum nocturne (Fig. 2).

Les mésocosmes flottants (1,5 m<sup>3</sup>) avaient pour objectif de privilégier les variations nycthémérales par rapport à celles induites par l'hydrodynamisme. Ils étaient remplis de nuit pour y inclure le mesozooplancton.

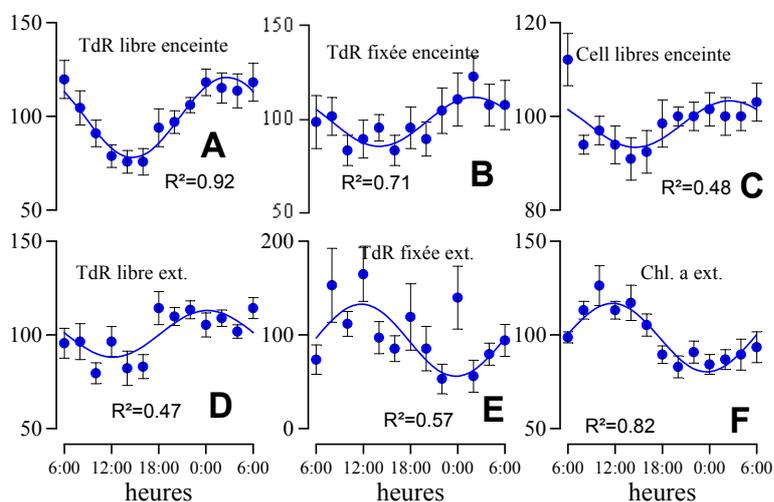


Fig. 2 : Variations nycthémérales des abondances (cell) et production bactériennes (TdR) et de la chlorophylle totale (Chl.a) en mésocosme ("enceinte") et dans le milieu (ext). Valeurs moyennes ( $\pm$  erreur-standard) de 5 (ext.) à 9 (enceintes) cycles, normalisées par la moyenne journalière (en %).  $R^2$  est la variance expliquée par l'ajustement sinusoidal sur ces valeurs moyennes.

**Noter:**

- 1 L'évolution nycthémérale de la chlorophylle *a* (F), avec un maximum diurne et un minimum nocturne, lié à la remontée du zooplancton (non montré).
- 2 L'évolution similaire de l'activité des cellules libres dans l'enceinte (A) et à l'extérieur (D) en opposition de phase avec la chlorophylle *a* (F). Elle est interprétée par la stimulation des activités bactériennes lors du broutage du phytoplancton par le zooplancton. L'amplitude est plus faible à l'extérieur, probablement à cause du mouvement des masses d'eau qui bruite le signal. L'amplitude plus forte sur les activités (A) que sur les abondances (C) de la fraction libre montre qu'il s'agit surtout d'une stimulation des activités et non d'un apport de cellules.
- 3 L'évolution inverse de l'activité des cellules attachées aux particules (TdR fixée) dans l'enceinte (B) (en phase avec l'activité des cellules libres), de celle des cellules attachées à l'extérieur (E), avec un maximum diurne. Ce dernier est interprété par la resuspension des particules liée au régime des vents diurnes, resuspension impossible évidemment dans l'enceinte. La trop faible précision des dénombrements de bactéries attachées n'autorise pas l'observation de cette tendance sur les abondances.

Les bactéries libres apparaissent ainsi stimulées par la remontée nocturne du zooplancton alors que les maxima d'abondance et d'activité des communautés attachées sont liés à la resuspension périodique des particules liée au régime des vents diurnes [P9, C5]. L'étude de l'influence des vents diurnes sur la quantité de matériel particulaire, très déterminante dans l'évaluation de la capacité trophique du milieu, a depuis été poursuivie avec succès par l'équipe d'Abidjan après mon départ (Arfi *et al.* 1993, Bouvy *et al.* 1994, Arfi & Bouvy 1995). La faiblesse de la stimulation des activités bactériennes, comparée à l'extrême variation des abondances zooplanctoniques, suggère que la disponibilité nutritive n'est pas une contrainte sévère.

A une échelle de temps plus longue, l'effet de la déstratification annuelle de densité sur les activités bactériennes a été étudié dans la baie eutrophe de Biétri. Cette déstratification annuelle correspond au changement de conditions environnementales le plus drastique dans ce milieu (Fig. 3) [P2, P5]. Contrairement à ce qui était observé dans

d'autres écosystèmes (Ducklow 1982) cet événement ne se traduit que par des modifications mineures des processus bactériens [P4] (Fig. 4). Les peuplements bactériens et phytoplanctoniques, non limités par les ressources nutritives, ne réagissent pas à la libération d'une partie des nutriments stockés dans l'hypolimnion. Là encore, l'extrême richesse du site conduit à une relative insensibilité des processus bactériens aux fluctuations des ressources nutritives occasionnées par la déstratification. Cette faible incidence d'un événement pourtant majeur comme la déstratification a depuis été observée sur d'autres biotopes eutrophes (Koepfler *et al.* 1993). L'importance des activités bactériennes sous la couche euphotique en période holomictique montre que l'oxygénation complète de la colonne d'eau occasionnée par cette déstratification ne peut être que transitoire. De fait, elle ne dure que quelques jours et l'anoxie est verrouillée par le retour aux conditions stratifiées.

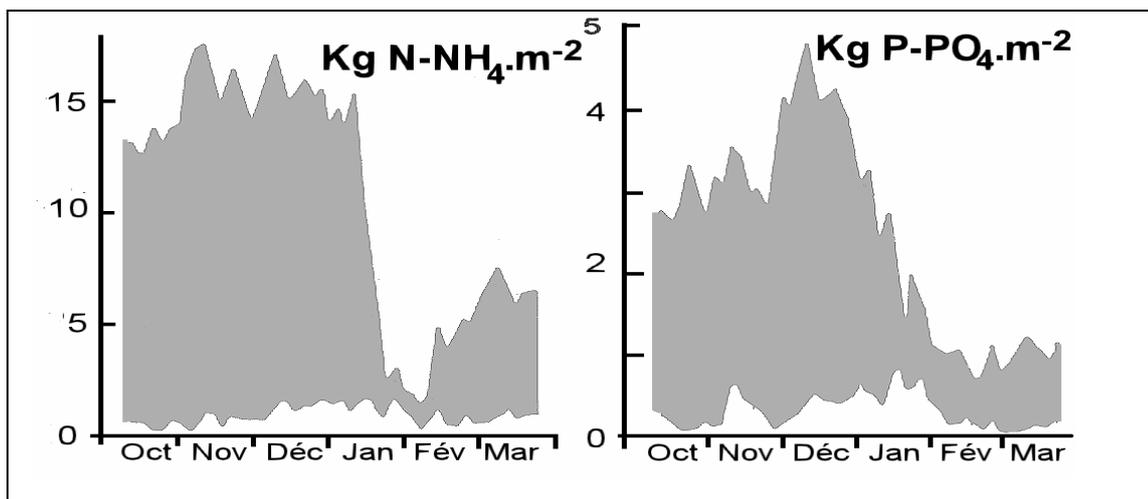


Fig. 3 : Effet de la déstratification en baie de Biétri (janvier) sur les charges en ammonium et en phosphates. En grisé charges de 5 à 9 m de profondeur, en blanc de 0 à 4 m.

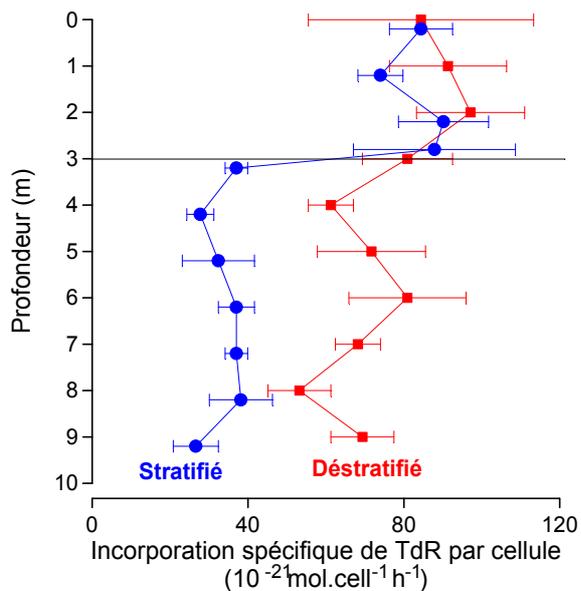


Fig. 4 : Effet de la déstratification en baie de Biétri sur les activités bactériennes spécifiques (moyennes  $\pm$  écart-type). La ligne pointillée horizontale montre les limites de l'oxygénation en conditions stratifiées. Dans l'épilimnion elles demeurent inchangées, dans l'hypolimnion leur augmentation traduit le remplacement des communautés anaérobies par des communautés aérobie.

Enfin à l'échelle saisonnière, les processus bactériens montrent, là encore, des fluctuations modestes avec des CV inférieurs à 30% pour l'abondance, la production et le taux de croissance (Fig. 5).

**La structure verticale des variables bactériennes est monotone aux profondeurs correspondant à la situation lagunaire « moyenne ».**



Malgré une décroissance rapide des productions primaires avec la profondeur, évidente dans ces milieux turbides, la structure verticale de la biomasse, de la production et du taux de croissance est monotone sur les 3 sites étudiés aux profondeurs correspondant à la situation lagunaire la plus couramment rencontrée. Cette homogénéité est bien sûr perdue dans les zones plus profondes des baies à seuil.

**Les variations des processus bactériens entre les 3 milieux étudiés sont modestes**



Les différences correspondent au maximum à un facteur 2,6, 2,8 et 1,2 respectivement pour l'abondance, la production et le taux de croissance entre les 3 sites étudiés (Fig. 5).

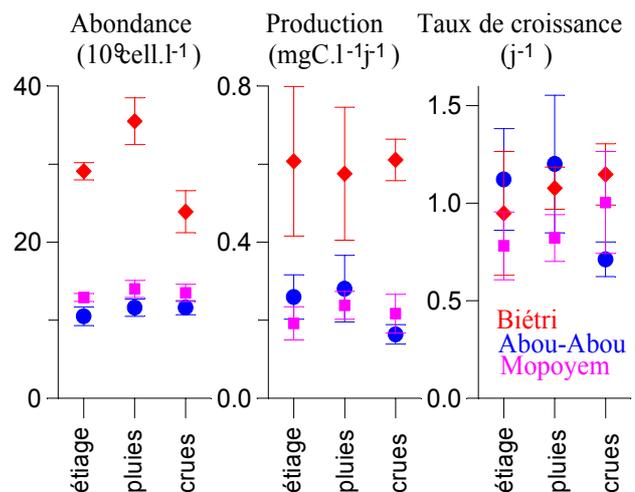


Fig. 5 : Moyennes ( $\pm$  écart-types) des variables bactériennes déterminées en 3 sites de la lagune Ebrié.

**De nombreux arguments conduisent à conclure à un contrôle essentiellement descendant du compartiment bactérien**



La richesse du milieu, attestée notamment en baie de Biétri par les plus fortes valeurs de production bactérienne reportées à ce jour dans la littérature [P4], comparables à celle des producteurs primaires, se traduit par un ensemble d'arguments convergents attestant du contrôle essentiellement descendant du compartiment bactérien : des taux de croissance extrêmement élevés, un rendement de croissance fort, une taille moyenne modeste en regard de l'activité, une consommation par le nanoplancton représentant une part majeure de la

production, un taux de croissance comparable des communautés libres et attachées, et de faibles variations des processus bactériens.

Les taux de croissance sont élevés. Ils varient entre  $0,55-1,13 \text{ j}^{-1}$  en moyenne sur les 3 sites, et équivalent à des temps de renouvellement de la biomasse de 1,8 à 0,9 j. De tels taux de croissance, parmi les plus élevés de la littérature (White *et al* 1991, Ducklow & Carlson 1992), les situent dans la gamme des milieux eutrophes voire hypereutrophes.

Les taux de croissance sont comparables pour les communautés libres et attachées. Certains auteurs ont pu montrer en culture que les bactéries libres présentaient un taux de croissance comparable à celui des communautés attachées aux particules lorsque les ressources ne sont pas limitantes. A mesure de l'épuisement du milieu, les taux de croissance des communautés libres diminuent plus rapidement que ceux des communautés attachées (Irriberi *et al* 1990). La distinction de ces 2 communautés et la comparaison de leurs taux de croissance respectifs apporte donc un indice sur la régulation de ces peuplements. En lagune Ebrié, le taux de croissance comparable des communautés libres ( $0,7-1,2 \text{ j}^{-1}$ ) et attachées ( $0,3-1,2 \text{ j}^{-1}$ ) montre que l'attachement ne représente pas un avantage trophique majeur. Les communautés libres ne sont donc vraisemblablement pas limitées par les ressources. Ceci plaide donc pour un contrôle de type descendant.

Le rendement de croissance est élevée. En culture *batch*, différents auteurs ont montré que le rendement de croissance diminuait avec l'épuisement des substrats organiques ou minéraux. En chemostat, d'autres travaux ont montré que les composés les plus labiles restent les seuls dégradés, avec des efficacités de croissance élevées, pour des taux de renouvellement du milieu élevés et donc des taux de croissance élevés. Le rendement de croissance élevé déterminé

en milieu lagunaire Ebrié (43-70%) est donc un indice de l'utilisation préférentielle de substrats labiles sans limitation minérale. Il suggère également que les ressources nutritives ne sont pas limitantes.

La taille moyenne est modeste en regard du taux de croissance. La taille moyenne d'un assemblage bactérien s'élève généralement avec le taux de production (Billen *et al* 1990). Toutefois, la prédation exerce une pression sélective probablement forte sur les tailles bactériennes (Fenchel 1982, Gonzalez *et al* 1990a). Une taille moyenne faible est ainsi considérée comme pouvant constituer un des refuges contre la prédation (Jurgens & Güde 1994). Une taille moyenne modeste ( $0,10-0,12 \mu\text{m}^3$ ) en regard des productions extrêmement élevées<sup>6</sup> peut donc être considérée comme un indice d'un fort contrôle par la prédation.

De fait, la consommation par le nanoplancton représente une part majeure de la production de biomasse bactérienne dans ce milieu ( $82 \pm 5\%$ ).

Les processus bactériens montrent de faibles variations dans ce milieu lagunaire pourtant caractérisé par de fortes variations temporelles des variables physiques, chimiques et biologiques, avec une périodicité supérieure aux temps de générations bactériens. La relative indifférence des processus bactériens aux différences de ressources plaide pour une disponibilité importante en ressources nutritives.

---

<sup>6</sup> Les moyennes de  $8 \text{ à } 24 \mu\text{gC.l}^{-1}\text{h}^{-1}$  aux 3 sites étudiés correspondraient ainsi à des volumes bactériens moyens de  $0,5 \text{ à } 1 \mu\text{m}^3$  selon la relation de Billen *et al* 1990.

## 2.3 Fonctionnement d'un lagon d'atoll de type ouvert : le programme CYEL<sup>7</sup>

Immédiatement après la soutenance de ma thèse, j'ai été amené à travailler en 1992 sur des milieux situés à l'autre extrémité de la gamme trophique, les lagons d'atolls. En Polynésie Française, ces lagons, utilisés pour la perliculture, la pêche ou le tourisme représentent une importance économique considérable. Le programme CYEL avait pour objectif de comprendre le fonctionnement trophique d'un lagon d'atoll de type ouvert, l'atoll de Tikehau (Fig. 6).

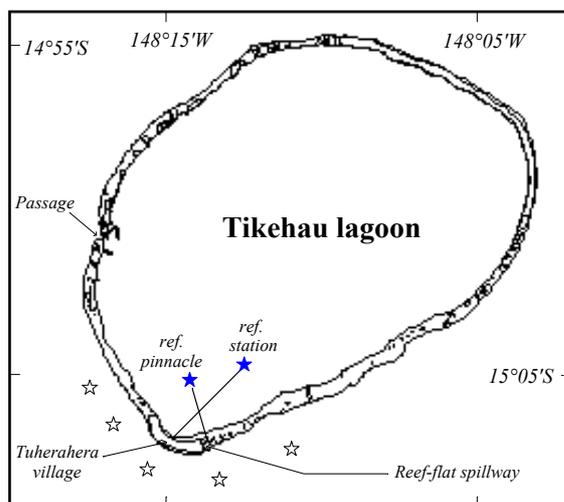


Fig. 6 : Lagon de Tikehau (Polynésie Française) et sites étudiés.

En écologie microbienne, les premiers résultats montraient une biomasse élevée du bactérioplancton et une production de biomasse faible conduisant à des taux de renouvellement de quelques jours. Ces caractéristiques allaient à l'encontre de l'image admise d'un compartiment bactérien très dynamique en milieu récifal en relation avec la présence du benthos [P16, C17]. Bien que nombre de lagons d'atolls de taille conséquente et donc de profondeur importante comme celui de Tikehau présentent de toute

évidence de faibles influences des peuplements benthiques rapportées à la colonne d'eau, un travail important a tout d'abord consisté à vérifier la validité des approches utilisées.

### Validation et adaptation des outils...

La production bactérienne était déterminée par la mesure du taux de synthèse d'ADN bactérien. Une attention particulière a été portée sur les différents modes de calcul de la relation entre production bactérienne et synthèse d'ADN. En milieu lagunaire, les différents modes de calculs donnaient des résultats *a priori* contradictoires comme dans nombre de milieux oligotrophes. Ils ont été réconciliés en tenant compte de la forte proportion de bactéries en latence [P10] (Fig. 7).

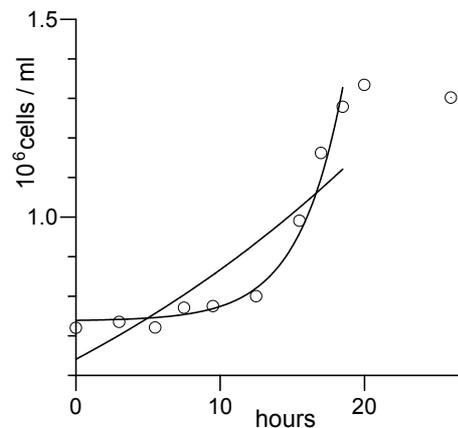


Fig. 7 : Evolution de l'abondance du bactérioplancton de Tikehau en culture. La courbe pleine représente l'équation  $N(t)=N(0) \exp(\mu t)$  admettant que les bactéries sont toutes en phase de croissance ( $R^2=0,80$ ), celle en pointillés représente l'équation  $N(t)=N_a(0) \exp(\mu_a t) + N_i$  où  $N_a$  et  $N_i$  sont les abondances bactériennes actives et inactives et  $\mu_a$  le taux de croissance des bactéries actives ( $R^2=0,97$ ). Les 2 derniers points (plateau) ne sont pas pris en compte dans les régressions.

<sup>7</sup> CYcle de la matière et de l'Energie dans les Lagons d'atoll. Financements: ORSTOM, PNRCO «Programme National sur les Récifs Coralliens" (INSU-ORSTOM) sur l'écologie microbienne, Ministère des Affaires Etrangères pour la campagne ASTRO sur le Grand Récif de l'Astrolabe. Resp. L Charpy (IRD)

Cette méthode de calcul a depuis été reprise et améliorée pour déterminer les facteurs de conversion entre incorporation de leucine et production de cellules dans les eaux récifales de Curaçao (Gast *et al.* 1998).

Les facteurs de conversion (FC) peuvent être calculés par dérivation, intégration et cumul. Ces 3 calculs sont discutés par Ducklow *et al.* (1992). Ils donnent des résultats équivalents si les taux de croissance des biomasses et des incorporations de traceurs sont similaires. Dans la plupart des cas toutefois, les incorporations de traceurs augmentent avec un taux bien supérieur à l'augmentation des biomasses. Ce qui tend à diminuer le FC au cours de la culture. Une faible proportion de bactéries en croissance peut expliquer la latence initiale et le taux de croissance inférieur de l'abondance bactérienne. dans l'augmentation Il suffit en fait de remplacer l'expression (1):  $N(t)=N(0) e^{\mu t}$  (impliquant que toutes les cellules se multiplient) par (2):  $N(t)=N_a(0) e^{\mu_a t} + N_i$  (où  $N_a$  est l'abondance des cellules "actives" et  $N_i$  des cellules "inactives", le taux de croissance des bactéries "actives"  $\mu_a$  étant égal au taux de croissance de l'incorporation de traceurs. Après avoir déterminé  $N_a(0)$  et  $N_i$  par régression non linéaire, on peut montrer que le calcul "dérivé" donnent des FC ( $0,96 \pm 0,47 \cdot 10^{18} \text{ cell.mol}^{-1}$ ) comparables aux 2 méthodes intégrées ( $0,89 \pm 0,19 \cdot 10^{18} \text{ cell.mol}^{-1}$ ) et cumulées ( $0,80 \pm 0,29 \cdot 10^{18} \text{ cell.mol}^{-1}$ ). Une très faible proportion de bactéries "actives" (0,1-5,4%) en début de culture suffit ainsi à expliquer la latence apparente du peuplement total et réconcilie les différents modes de calcul du FC. Cette très faible proportion de bactéries actives est probablement exagérée par la filtration (visant à éliminer les protistes) excluant les plus grosses cellules et notamment celles en division.

La production estimée par la synthèse d'ADN bactérien a ensuite été comparée avec une détermination indépendante obtenue en estimant la synthèse de protéines bactériennes *via* la mesure d'incorporation de leucine tritiée. Celle-ci a été adaptée aux milieux lagunaires coralliens en estimant systématiquement la dilution isotopique. Une excellente convergence a été obtenue entre les valeurs de production bactériennes estimées au moyen de ces 2 méthodes calibrées indépendamment [P10] (voir par exemple relation en Fig. 8).

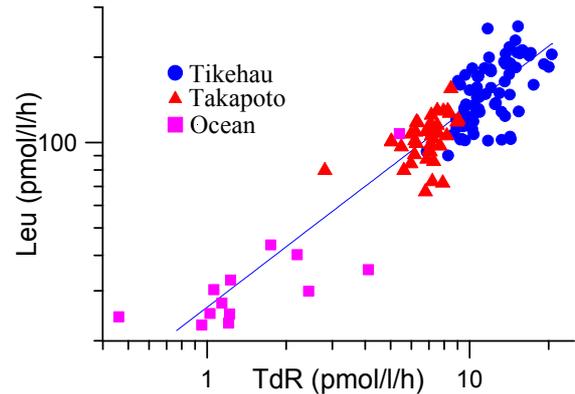


Fig. 8 : Relation entre incorporations de thymidine et de leucine à Tikehau, Takapoto et Océan environnant

L'activité hétérotrophe ne pouvait être estimée par la mesure de l'activité respiratoire comme dans le milieu lagunaire ivoirien, les faibles activités observées dans ce milieu excluant la détermination précise de la consommation d'oxygène. Elle peut être déterminée en suivant la décroissance du COD due à l'activité bactérienne en cultures d'assemblages bactériens naturels sans prédateurs. La polémique sur le carbone organique dissous ou COD (Sugimura & Suzuki 1988) a eu au moins un effet bénéfique. La méthode HTCO (High Temperature Catalytic Oxidation) a en effet permis une augmentation suffisante de la sensibilité pour espérer quantifier cette décroissance du COD sur des assemblages bactériens en milieu oligotrophe. Nous l'avons employé avec succès sur plusieurs milieux lagunaires (atolls de Tikehau et de Takapoto, Grand Récif de l'Astrolabe aux Fidji, [P15, A1] où de très faibles rendements de croissance (moyenne de 5,2 à 20,7% suivant les valeurs extrêmes de carbone par bactérie proposées dans la littérature) ont été déterminés (Fig. 9).

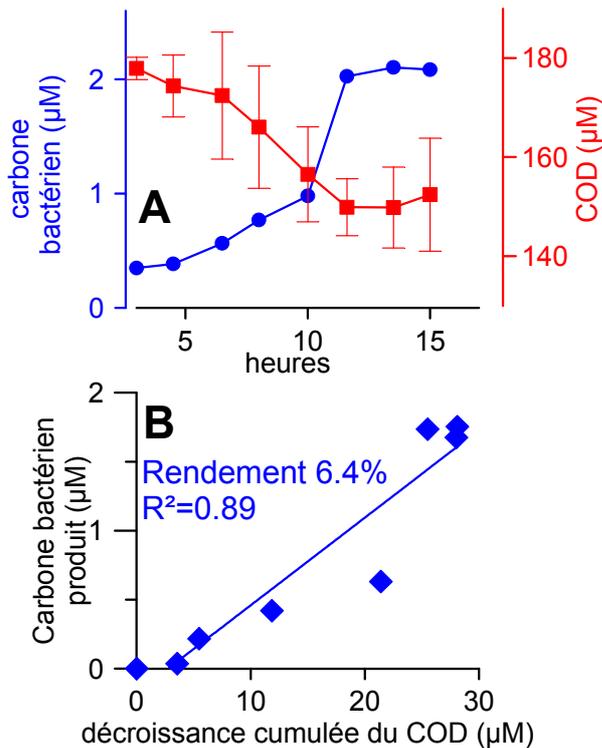


Fig. 9 : A) Décroissance du COD et croissance bactérienne en culture d'assemblage naturel à B) Relation entre augmentation de la biomasse et décroissance du COD. Le rendement de croissance est donné par la pente.

Les taux de prédation ne pouvaient être déterminés au moyen d'inhibiteurs sélectifs comme en lagune Ebrié. Les faibles taux de croissance auraient en effet nécessité des durées d'incubations susceptibles d'altérer sensiblement les communautés. Ils ont été estimés par la consommation de FLB et FLCB<sup>8</sup> par les protistes en collaboration avec JM Gonzalez, (Université Corvallis, OR). Cette méthode a permis de montrer que les flagellés consomment en moyenne 27% de la production bactérienne et que les ciliés ne jouent à cet égard qu'un rôle mineur (0,4% de la production bactérienne consommée). Les bactéries sont 3,2 fois moins consommées ( $1,74 \pm 0,15$  nl flagellé<sup>-1</sup>h<sup>-1</sup>) que les cyanobactéries ( $5,53 \pm 0,66$  nl flagellé<sup>-1</sup>h<sup>-1</sup>) ce qui est en bon accord avec le rapport du carré de leurs diamètres

<sup>8</sup> Fluorescently Labeled Bacteria et Fluorescently Labeled Cyanobacteria. Bactéries et cyanobactéries marquées par un colorant fluorescent dont on suit en microscopie l'ingestion par les protistes.

apparents respectifs (0,47 et 0,87 μm) [P14, C9] (Fenchel 1982).

... et application au lagon de Tikehau

Faibles variations temporelles aux différentes échelles de temps abordées, homogénéité verticale et horizontale



Les sources de variabilité ont ensuite été systématiquement explorées afin d'établir la représentativité des flux et de mettre en relation leurs éventuelles fluctuations avec les variations des conditions environnementales [P12, C6, C7]. La surprenante constance des processus bactériens à l'échelle de la journée, du mois et de la saison a pu être constatée (Fig. 10).

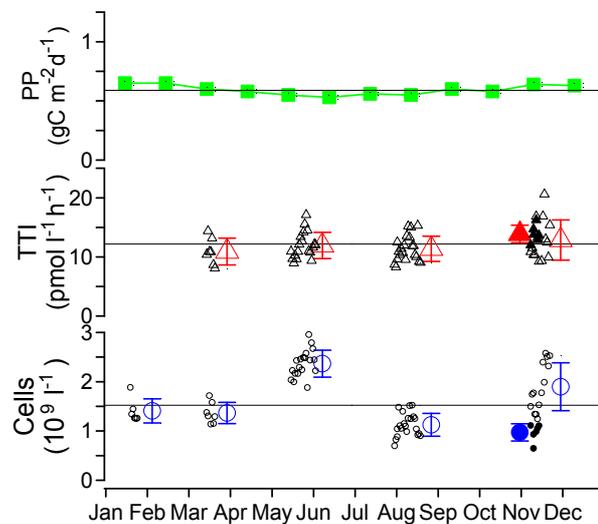


Fig. 10 : Abondance (Cells) et production bactériennes (TTI) au cours des différentes campagnes de mesure effectuées à Tikehau. Production primaire (PP) d'après Charpy & Charpy-Roubaud (1990). Les grands symboles représentent les moyennes et écart-types par campagne. Les 2 campagnes effectuées en Nov. 91 et Nov. 92 sont distinguées par leur couleur.

Sur le plan spatial, le lagon peut être considéré comme monotone tant verticalement qu'horizontalement. Cette homogénéité est occasionnée par 2 phénomènes : l'apport d'énergie auxiliaire régulier, et l'absence d'apports localisés en ressources nutritives. L'homogénéité est en effet facilitée par le régime permanent des alizés de sud-est, dont la moyenne annuelle de  $5 \text{ m.s}^{-1}$  est suffisante pour entretenir le mélange de la colonne d'eau de 25m. Il est probable, par ailleurs, que la remise en suspension des dépôts sédimentaires superficiels par l'agitation due au vent soit responsable d'une part essentielle de la variabilité à court terme de la biomasse bactérienne (Fig. 11). D'autre part, les apports possibles sont limités en importance par la pauvreté organique et minérale de la couronne corallienne et des eaux océaniques environnantes. Ces apports ont de plus un caractère diffus, le long de la couronne pour les apports terrestres, par les *hoa*<sup>9</sup> répartis sur une large part de cette couronne, pour les apports océaniques.

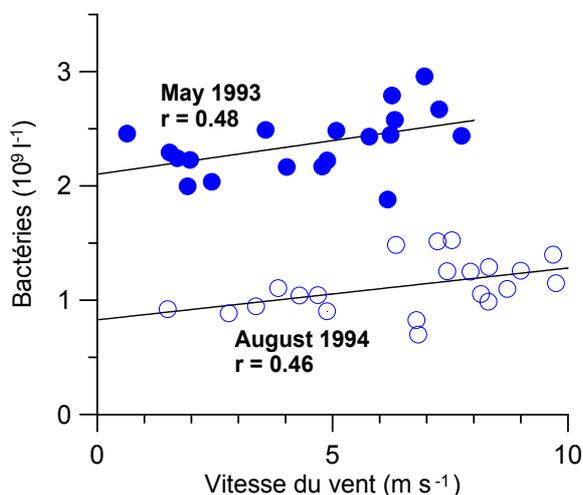


Fig. 11 : Relation entre abondance bactérienne et vitesse du vent à Tikehau

<sup>9</sup> terme polynésien désignant les échancrures perpendiculaires à la couronne permettant les échanges entre lagon et océan .

**Dans le lagon de Tikehau, le bactérioplancton montre une forte biomasse, une faible production, une très faible efficacité de croissance**



Dans ce milieu le bactérioplancton est caractérisé par une forte biomasse, comparable à celle des producteurs primaires. Le taux de croissance ramené à la population totale ( $0,14 \text{ j}^{-1}$ ) est faible en regard de la température moyenne annuelle proche de  $28^\circ\text{C}$ . Cette dernière caractéristique, associée à une faible proportion de cellules actives ( $<10\%$ ), une très faible efficacité de croissance sur le carbone organique dissous (5-20%) [A1, C11] et une faible proportion consommée par la prédation (27%) [P14, C9] suggère un contrôle de type ascendant.

Une mission financée par le Ministère des Affaires Etrangères a permis d'étendre ces particularités de fonctionnement au lagon du Grand Récif de l'Astrolabe, un lagon ouvert d'île haute situé aux Fidji [P15, R8].

Le programme général de recherches sur la nacre a fourni l'opportunité de vérifier si ces conclusions étaient valides pour un atoll cette fois de type fermé, Takapoto.

## 2.4 Capacités trophiques d'un atoll de type fermé pour la perliculture : le programme PGRN

Ce programme<sup>10</sup>, initié en réponse à d'importantes mortalités de nacres d'élevages, avait entre autres objectifs celui d'établir la capacité trophique de l'atoll de Takapoto (Fig. 12). Cet atoll présente en effet une activité de perliculture parmi les plus importantes de Polynésie.

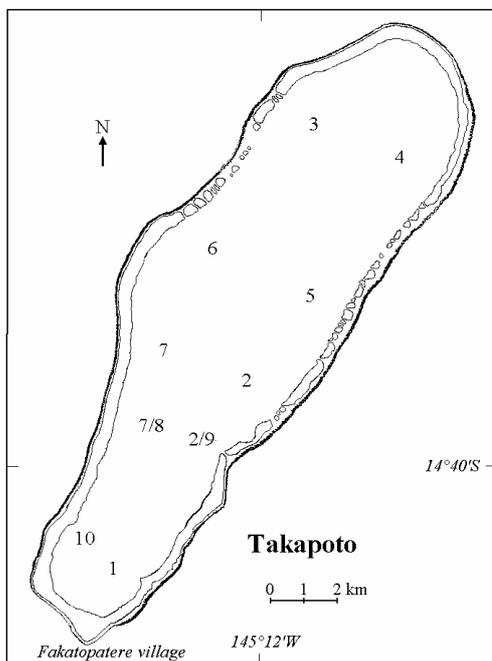


Fig. 12 : L'atoll de Takapoto et les stations étudiées.

Les nacres (*Pinctada margaritifera*) sont des mollusques benthiques, que l'on élève de manière pélagique, tournées vers le fond en pleine eau sur des filières. Ceci pour la commodité de l'exploitation mais

également pour leur épargner la dépense énergétique d'expulser activement les particules non ingérées au moyen des pseudofèces. Les mortalités observées ont conduit à envisager les problèmes potentiels occasionnés par cette exploitation intensive du milieu pélagique. Parmi ceux-ci, les questions qui concernaient plus particulièrement les réseaux trophiques planctoniques portaient sur la capacité trophique et l'effet des nacres sur leur environnement. Elles peuvent être résumées ainsi :

La capacité trophique du lagon est-elle suffisante pour nourrir les stocks naturels et en élevage ?

Les importantes concentrations de nacres d'élevage modifient-elles les caractéristiques chimiques et biologiques de leur milieu ?

Ces questions concernent bien évidemment l'échelon bactérien hétérotrophe. L'importante biomasse bactérienne à Tikehau justifiait d'évaluer la biomasse et la production du bactérioplancton ainsi que sa contribution au régime alimentaire de la nacre à Takapoto. Enfin les bactéries hétérotrophes, par la place qu'elles occupent dans les réseaux trophiques planctoniques, sont bien sûr parmi les premiers organismes sur lesquels l'impact des élevages devait être étudié.

<sup>10</sup> Financement : Programme Général de Recherches sur la Nacre, PGRN "Contrat de Plan 1989-1993 pour la recherche et les transferts de technologie entre l'Etat et le Gouvernement territorial" Ministère des DOM-TOM, Ministère de la Recherche et de la Technologie, Fonds Européens (V<sup>ème</sup> FED-PTOM) et gouvernement Territorial de Polynésie Française. Fiche programme 13: Etude de la production et de la transformation de la matière organique particulaire. Fiche programme 19: Etude de la nutrition de l'huître perlière *Pinctada margaritifera*.

## Les méthodes

Un suivi régulier du milieu au moyen de campagnes mensuelles de mesure a été réalisé par un institut local l'EVAAM<sup>11</sup>. Il avait pour objectif d'établir l'importance et la variabilité spatiale et temporelle des stocks du compartiment bactérien et des flux le traversant.

Production bactérienne. Il n'était pas possible de faire effectuer des mesures de production bactériennes au moyen de traceurs radioactifs au cours de ces campagnes. La fréquence des cellules en division (FDDC) était la méthode adaptée car elle ne requiert pas d'incubation des échantillons et peut être déterminée *a posteriori* sur des échantillons fixés.

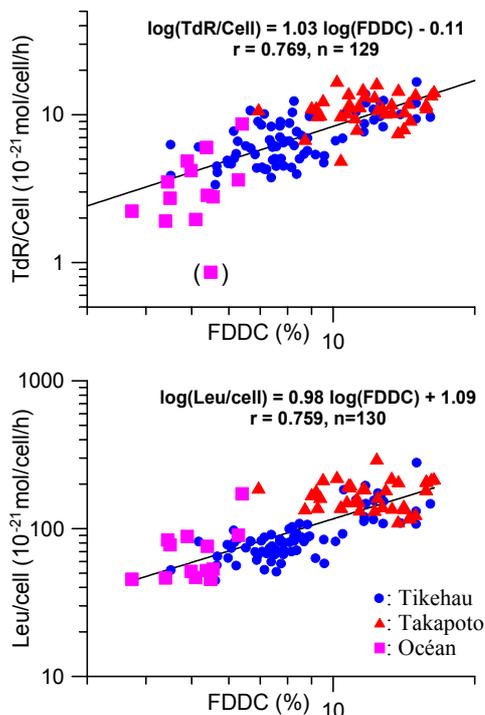


Fig. 13 : Relation entre fréquence des cellules en division ou récemment divisées (FDDC) et activités spécifiques d'incorporation de thymidine et leucine.

L'utilisation d'assemblages bactériens naturels en culture pour intercalibrer FDDC et production a toutefois conduit à des valeurs déraisonnablement élevées. La relation entre FDDC et production de cellules est vraisemblablement dépendante du taux de croissance. Ce taux de croissance étant généralement plus élevé dans les cultures, exclut leur emploi pour déterminer une relation applicable au milieu. Nous avons donc choisi d'intercalibrer FDDC et synthèses d'ADN et de protéines bactériens. En milieu lagunaire et océanique nous avons ainsi obtenu une bonne corrélation avec les mesures des taux de synthèse d'ADN et de protéines bactériens [P10](Fig. 13).

La relation finale entre FDDC et  $\mu$  peut s'écrire :

$$\mu(d-1) = 10^{-1.66(\pm 0.06)} \times \text{FDDC}^{0.98(\pm 0.07)} \times 1.016$$

Le pouvoir prédictif de cette corrélation est encore limité et ces prédictions n'ont de sens que sur les moyennes issues d'un grand nombre de données. Cette corrélation a permis d'évaluer la production bactérienne dans le lagon de Takapoto déterminée par la FDDC au cours d'un cycle annuel [R5, R7]. Elle a depuis été utilisée par M. Rodier (IRD-Nouméa) au cours de la campagne EBENE et semble donner de bons résultats dans l'upwelling équatorial du Pacifique. Surmonter les problèmes de calibration de cette méthode comme nous l'avons suggéré et affiner ce type de corrélation au moyen d'un grand nombre de mesures permettrait d'employer celle-ci à une plus large échelle à l'aide de nouveaux outils d'analyse d'image (Blackburn et al 1998). Sur le terrain, seule la préparation des lames serait nécessaire ce qui représenterait un gain de temps considérable par rapport aux techniques

La prédation des nacres sur le bactérioplancton hétérotrophe a été déterminé en enceintes de faibles volumes en ajoutant une concentration connue de FLB et en algues *I. galbana*. L'évolution des concentrations en FLB comparée à celle des algues (rétention de 100%) a permis d'estimer le taux de rétention du bactérioplancton.

<sup>11</sup> Etablissement pour la Valorisation des Activités Aquacoles et Maritimes dépendant du Ministère de la Mer de Polynésie Française

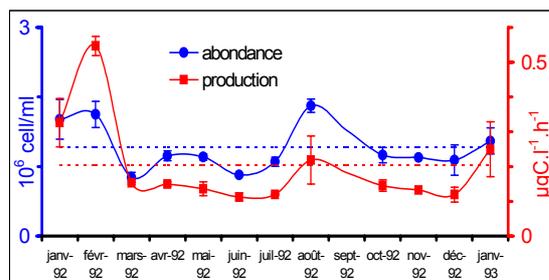
## Les résultats

**Les processus bactériens montrent de faibles variations temporelles, et une homogénéité verticale et horizontale prononcée à Takapoto. La biomasse est élevée, la production modérée et le rendement de croissance extrêmement faible.**



Le suivi ainsi réalisé et complété par une campagne de mesures plus intensives a montré là encore les faibles variations nyctémérales, jour après jour, saisonnières et spatiales dans un lagon d'atoll. Les maxima d'abondance et de production sont observés pendant l'été austral et dépassent d'environ 30 et 50% les valeurs moyennes annuelles (Fig. 14). Les bactéries représentent la plus importante biomasse planctonique (1,3 fois la biomasse du phytoplancton) dans une classe de taille minimale. La proportion de bactéries attachées à des particules est en effet généralement inférieure à 3% du total sauf en décembre et janvier où elle atteint 17% en moyenne.

Fig. 14 : Abondance et production



bactériennes mensuelles dans le lagon de Takapoto. Moyennes ( $\pm$  écart-type) des valeurs déterminées aux stations 1, 2, 3. Moyennes annuelles en pointillés.

Le compartiment bactérien hétérotrophe représentant l'essentiel du carbone vivant, il était donc nécessaire d'évaluer sa rétention par les nacres. Ce travail réalisé en collaboration avec l'IFREMER en conditions contrôlées a montré la rétention dérisoire du bactérioplancton par ces organismes (Tab.

2). Les nacres ne retiennent efficacement les particules qu'à partir de 3  $\mu\text{m}$  [R5, R7, C13]. A partir de ces expérimentations et du suivi annuel effectué dans le lagon de Takapoto, on peut estimer que la contribution des bactéries libres et attachées au régime alimentaire de la nacre ne représente en moyenne qu'entre 5 et 10 % du carbone exploitable par les nacres. Dans cette contribution modeste, la plus importante proportion est due aux bactéries attachées [R7].

Tab. 2 : rétention des bactéries planctoniques par les nacres.

Exp.	Volume d'eau clarifié de bactéries <sup>a</sup> (ml. h <sup>-1</sup> .g <sup>-1</sup> ) <sup>b</sup>	Volume d'eau clarifié <sup>c</sup>	% de bactéries retenues
1	25,20	795	3,17
2	19,15	821	2,33
3	29,48	1596	1,85
4	49,21	1898	2,59
5	61,25	2009	3,05
Moyenne	36,86	1424	2,60
Ecart-type	17,69	582	0,54

a : Volume d'eau clarifié de ses bactéries déterminé en suivant la cinétique de décroissance de FLB comparée à des témoins (coquille vides). b : Valeurs exprimées par g de poids sec pour des individus de 4 à 7g. c : *Isochrysis galbana* est une algue de 3 à 5  $\mu\text{m}$  de diamètre retenue efficacement (~100%) par la nacre *P. margaritifera*.

Cette importante biomasse bactérienne se situe donc dans une classe de taille inexploitable directement par les nacres, comme l'est d'ailleurs l'essentiel de la production phytoplanctonique, assurée par le picoplancton. Le lien trophique manquant entre les nacres et le picoplancton autotrophe et hétérotrophe est donc probablement le nanoplancton hétérotrophe qui est maintenant spécifiquement abordé dans le cadre du deuxième programme de recherche sur la nacre (PGRN-2).



**Les nacres ne consomment pas le bactérioplancton libre. L'apport représenté par le bactérioplancton attaché est négligeable par rapport à leur demande trophique.**

La deuxième question portait sur l'influence éventuelle de l'importante concentration de nacres d'élevage sur le milieu. Le suivi mensuel a été complété par une campagne de mesures plus intensives visant en particulier à comparer les processus bactériens à proximité et à distance des filières. Nos résultats ont montré l'absence de différence significative des biomasses, production et taux de croissance bactériens déterminés sur des stations situées à proximité de filières d'élevage ou éloignées de celles-ci (exemple en Fig. 15).

Le fonctionnement du réseau trophique planctonique microbien étant esquissé pour 2 atolls très différents, et la bonne représentativité de mesures ponctuelles établie [P12, C6, C7, R5], il restait à déterminer dans quelle mesure ces résultats étaient applicables aux autres atolls de Polynésie. Cet objectif a été autorisé par le programme TYPATOLL.

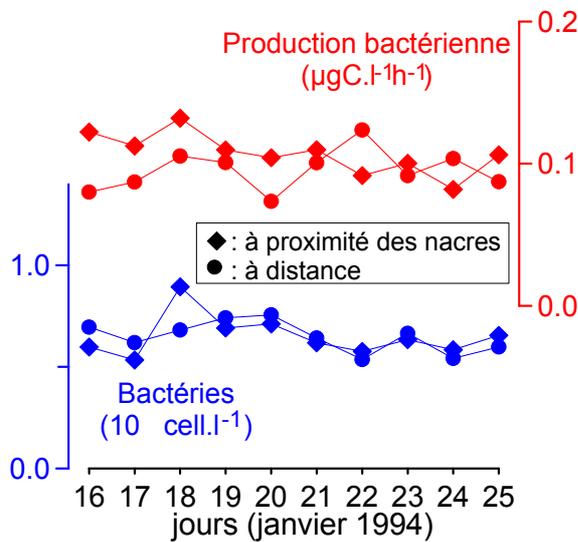


Fig. 15 : Valeurs quotidiennes d'abondance et production bactériennes dans le lagon de Takapoto à proximité et à distance de filières d'élevage de *P. margaritifera*.



**Il n'y a pas d'influence visible<sup>12</sup> des élevages de nacres sur les biomasses et activités bactériennes planctoniques.**

<sup>12</sup> dans les conditions d'hydrodynamisme qui régnaient lors de ces mesures.

## 2.5 Ecodiversité des lagons d'atoll : le programme TYPATOLL<sup>13</sup>

Les atolls, des Tuamotu ou d'ailleurs, paraissent en effet assez identiques à première vue. Mais la production exploitable de chacun des lagons d'atoll est différente, en nature et en quantité : certains produisent plutôt des huîtres perlières comme Takapoto, d'autres des poissons comme Tikehau. D'autres atolls sont envahis d'holothuries, certains enfin sont parfois victimes de crises *dystrophiques*. En Polynésie Française ces lagons, utilisés pour la perliculture, la pêche ou le tourisme présentent une importance économique considérable. Une mise en valeur rationnelle permettrait en outre de limiter l'exode insulaire vers Papeete. Une telle gestion nécessite une bonne connaissance de leur fonctionnement biologique. Cette connaissance ne peut évidemment être acquise en détail sur la totalité des 85 atolls des Tuamotu.

Le programme TYPATOLL visait à déterminer quels facteurs orientent leur fonctionnement biologique.

Nous avons opté pour une démarche d'écologie comparée, où l'état et le fonctionnement de lagons très différents sont comparés à leur environnement (situation, dimensions, climat, activités humaines, ouverture sur l'océan...). L'emploi de la télédétection satellitaire (SPOT) a permis de déterminer la géomorphologie de 49 atolls. Les mesures de terrain avaient pour objectif de décrire, de la façon la plus synthétique possible, le fonctionnement biologique de 10 lagons choisis pour représenter la diversité morphologique. Ceci a été réalisé, de novembre 1994 à novembre 1996, par six campagnes, pendant lesquelles 12 atolls des Tuamotu étalés sur 800 km ont été prospectés (Tab. 3, Fig. 16). Au cours de celles-ci ont pu être étudiés à la fois la colonne d'eau (chimie, phytoplancton, bactéries, zooplancton), les poissons, et le benthos.

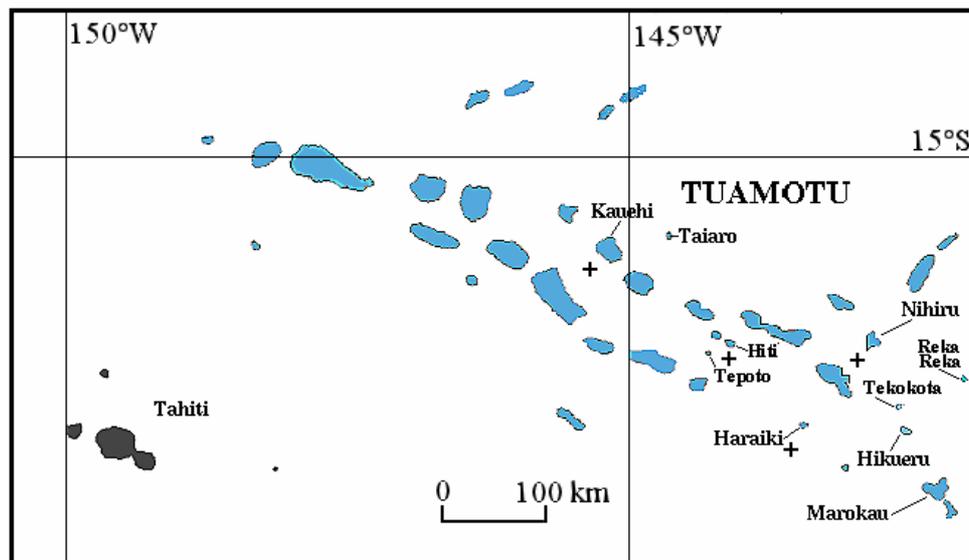


Fig. 16 : Atolls des Tuamotu étudiés au cours des campagnes TYPATOLL 1 (Nov. 94), 3 (Nov. 95) et 4 (Mars 96). Les croix indiquent les sites océaniques étudiés.

<sup>13</sup> TYPologie des lagons d'ATOLL. Financement : IRD, PNRCO, Ministère de la Recherche de Polynésie Française. Resp. P Dufour (IRD)

Tab. 3 : caractéristiques des atolls étudiés au cours de campagnes Typatoll 1, 2 & 3

Atoll	Surface lagon (km <sup>2</sup> )	profondeur* (m)	porosité**	passes	TYP
Amanu	210,3	42	21,2	2 larges profondes, 1 étroite peu profonde	1
Haraiki	10,4	12	18,9	1, large, profonde	1 3 4
Hikueru	82	28	17,9	0	1 3 4
Hiti	15	10	19,4	0	3 4
Kauehi	315	45	21,6	1, large, profonde	1 3 4
Marokau	217	28	17,4	1, étroite, peu profonde	3 4
Nihiru	80	21	24,5	0	1 3 4
Reka-Reka	0,7	1	1,7	0	1 3 4
Taiaro	12	13	0,9	0	3 4
Tekokota	5,1	3	59,5	1, très large, peu profonde	1 3 4
Tepoto Sud	1,6	5	15,2	1, étroite peu profonde	1 3 4
Tuanake	25,7	25	24,2	1, large peu profonde	1

\* : Profondeur moyenne estimée; \*\* : pourcentage de la couronne immergée autorisant les échanges entre lagon et océan (Andréfouët 1998).

Les objectifs en écologie microbienne étaient (1) de vérifier si les caractéristiques de fonctionnement du bactérioplancton estimées à Tikehau, Takapoto et dans le Grand récif de l'Astrolabe s'appliquaient plus généralement aux lagons d'atoll, et (2) d'estimer de quelle manière la géomorphologie des atolls influait sur l'importance et la nature des flux au sein du réseau trophique microbien.

### Les méthodes

La nature du travail de terrain effectué sur un navire de taille modeste, n'ayant qu'une journée à consacrer par atoll, n'autorisait qu'un nombre limité de prélèvements et des expérimentations simplifiées au maximum. Ceci excluait en particulier d'estimer le rendement de croissance du bactérioplancton de ces différents atolls. La biomasse et la production bactérienne furent déterminées comme précédemment avec quelques adaptations [P19]. L'indicateur d'activité hétérotrophe se prêtant le mieux à ce type d'étude était l'activité exoprotéolytique potentielle (AEP).

Les molécules organiques de poids moléculaire élevé ne peuvent être incorporées directement par le bactérioplancton. Celui-ci utilise des exoenzymes (excrétés dans le milieu environnant) ou des ectoenzymes (restant liés à la surface cellulaire) pour les hydrolyser en monomères susceptibles d'être incorporés par la cellule. L'AEP est assez facilement estimée au moyen d'analogues oligomères fluorescents lorsqu'ils sont hydrolysés (Hoppe 1993). La discrimination entre ces oligomères artificiels et le substrat naturel, ainsi que la concentration en substrat naturel étant généralement inconnus, les estimations ne sont pas quantitatives mais représentent une activité potentielle. Le coût énergétique représenté par la synthèse de ces enzymes étant probablement élevé, il est cependant vraisemblable que ces activités potentielles reflètent les importances relatives des flux réels.

L'étude de sites de degré trophique contrasté dans un environnement hydroclimatique commun fournissait une opportunité de tenter la mise en relations du degré trophique, des potentialités cataboliques et des peuplements bactériens. Cette relation entre peuplements et activités a été abordée, de manière encore succincte, en collaboration avec JT Hollibaugh (Univ. San Francisco) [P18, C16, A4, R6]. Les potentialités cataboliques bactériennes ont été évaluées avec le système Biolog® et la composition phylogénétique des peuplements par PCR et DGGE.

## Les résultats

**L'homogénéité horizontale et verticale des processus bactériens est vérifiée. Ils ne montrent pas de tendance saisonnière.**



Les coefficients de variations sont modérés à la fois sur les moyennes d'abondance, de production et de taux de

*Tab. 4 A : Coefficients de variation (CV) des variables bactériennes entre stations.*

Campagne	Bactéries totales	Production	Taux de croissance
TYP 1	19	29	30
TYP 3	19	21	19
TYP 4	18	23	19
Océan TYP 3 & 4	19	21	17

Moyennes des CV pour les 9 atolls étudiés au cours de TYP1 (6 stations de sub-surface par atoll excepté Reka-Reka, Tekokota et Tepoto 8 stations) et des 10 atolls étudiés au cours de TYP3 & 4 (5 stations).

**L'importance des processus bactériens est liée à la morphologie des atolls**



Les résultats de ces campagnes montrent qu'effectivement les lagons d'atoll présentent des conditions trophiques contrastées pour la plupart des variables chimiques et biologiques déterminées (Dufour & Harmelin-Vivien 1997).

croissance bactériens effectuées sur 5 à 8 stations les plus distantes possibles et sur les moyennes issues de profils verticaux (Tab. 4). Les variations entre campagnes effectuées à des saisons contrastées sont modérées et sans tendance saisonnière significative (Fig. 17).

*Tab. 4B : Coefficients de variation des variables bactériennes par profil vertical au cours de TYP 1 (2 à 4 niveaux par atoll).*

Atoll	Bactéries totales	Production	Taux de croissance
moyenne	10	21	25
ES	2	2	4
Min.	2	12	7
Max.	19	28	45

Moyennes, erreur-standard et valeurs extrêmes des CV pour les 9 atolls étudiés au cours de TYP1

Ces différences entre lagons concernent également les variables caractérisant les bactéries planctoniques (biomasse, production, taux de croissance) et ceci en liaison avec leur ouverture sur l'océan. Globalement, les atolls les plus ouverts sur l'océan sont les plus pauvres.

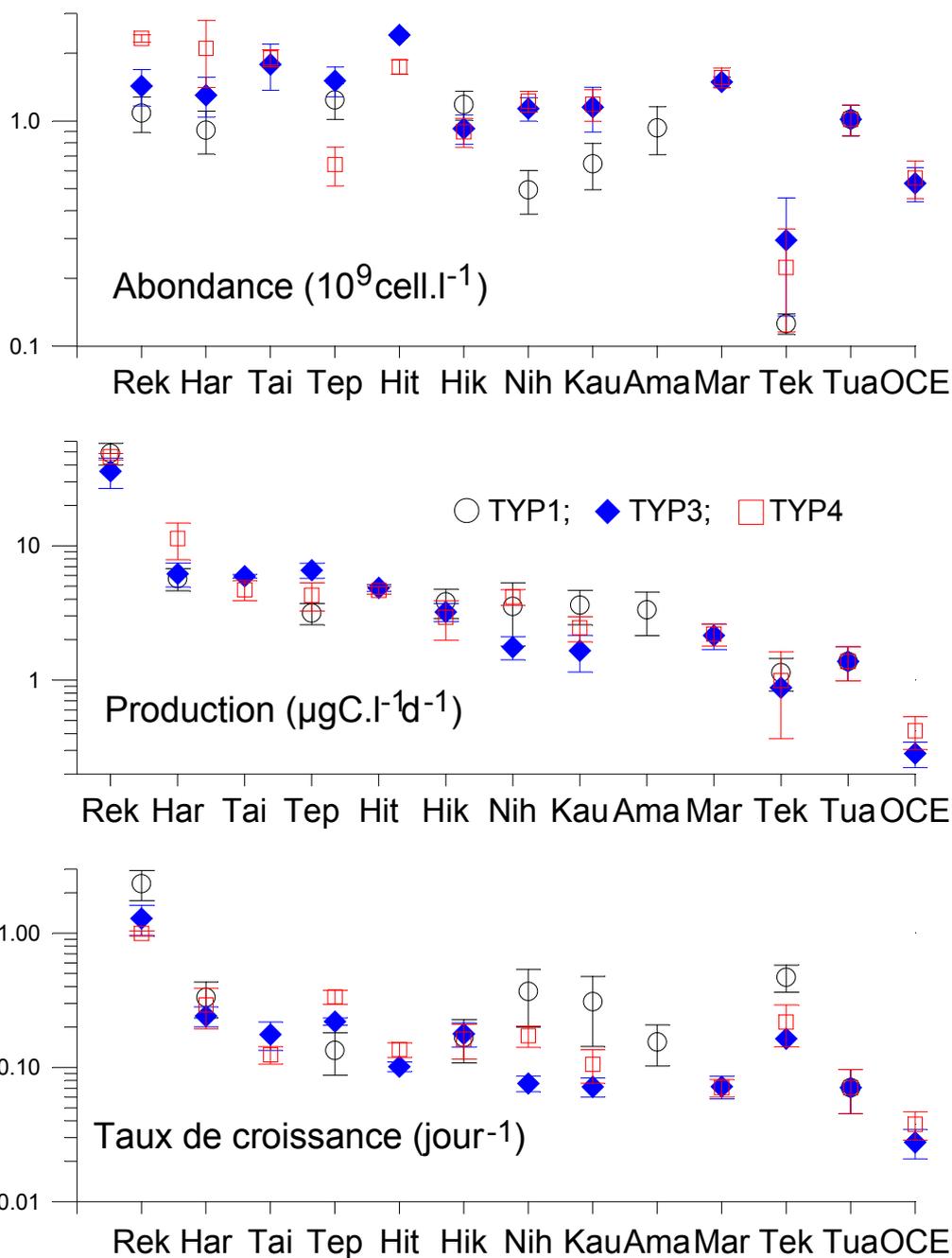


Fig. 17 : Abondance, production et taux de croissance bactériens moyens ( $\pm$  écart-type) dans différents lagons des Tuamotu.

**La nature des processus bactériens correspond à celle déterminée sur les atolls de Tikehau et Takapoto...**



Dans la plupart des lagons d'atoll, les bactéries présentent une biomasse élevée, représentant 1 à 3 fois celle du

phytoplancton, et une production faible équivalant, en moyenne, à 30% de la production primaire [P19, C14]. Les temps de renouvellement sont donc longs, et inférieurs à ceux du phytoplancton. Les indices d'une limitation ascendante des productions bactériennes ont été confirmés par des bioessais. Ceux-ci, effectués avec

différents nutriments (C, N et P) ont montré que dans la plupart des atolls visités, les bactéries sont contrôlées par l'azote, seul ou en co-limitation avec C (Fig. 18). Ces résultats sont confirmés par les relations entre nutriments dissous et réponses aux nutriments d'une part, et entre nutriments et taux de croissance d'autre part [P17, C15].

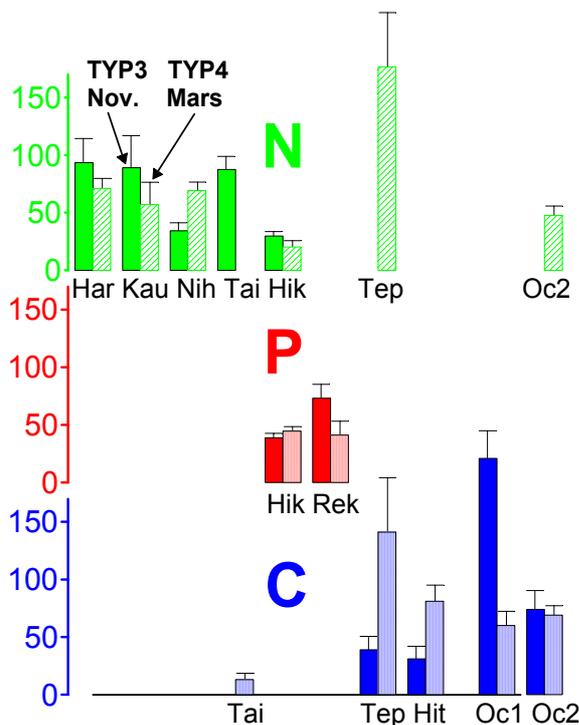


Fig. 18 : Réponse du bactérioplancton des 10 lagons d'atolls aux enrichissements en C, N et P durant les campagnes TYP3 (Nov. 95) et TYP4 (Mars 96). Réponses exprimées en % de stimulation par rapport au témoin. Barres d'erreur = erreur standard.

Le rapport entre activité exoprotéolytique (AEP) et production bactérienne indique la dépendance bactérienne vis à vis de l'hydrolyse des peptides. Un rapport élevé est le signe d'une utilisation préférentielle des substrats de haut poids moléculaire. Dans les lagons visités, ces rapports (1) évoluent en raison inverse de la production primaire et (2) semblent covarier avec le recouvrement en coraux de 9 de ces sites (Fig. 19). Une interprétation séduisante est que l'AEP est peu utilisée lorsque la production primaire peut fournir suffisamment de composés

simples par le biais de la production dissoute. Lorsque celle-ci est faible, ce qui coïncide avec un recouvrement élevé en coraux dans les atolls peu profonds et très renouvelés, il devient énergétiquement plus intéressant pour le bactérioplancton de synthétiser des taux plus élevés d'exoenzymes, nécessaires pour dégrader le mucus corallien.

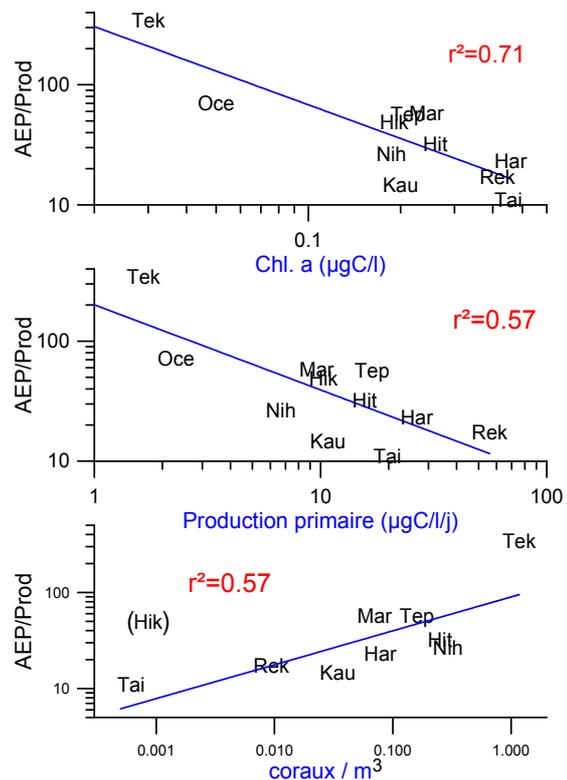


Fig. 19 : Evolution du rapport de l'activité exoprotéolytique potentielle à la production bactérienne (PEA/BSP) en fonction de la chlorophylle a, la production primaire et l'abondance des coraux ramenée au volume de chaque lagon à TYP4. Hikueru, ayant subi une crise dystrophique quelques mois avant TYP1 ne montre pratiquement plus de coraux vivants.

... hormis deux cas particuliers.



Le lagon de Tekokota s'apparente d'avantage à un récif qu'à un atoll. Très ouvert sur l'océan, peu profond et présentant des peuplements coralliens plus abondants que ceux des autres atolls, il

montre des biomasses bactériennes significativement plus faibles que dans les eaux océaniques entrantes. Ceci est généralement observé dans les zones récifales [P16] et est interprété par la consommation active par les organismes benthiques comme les éponges (Pile 1997) et certains coraux (Ferrier-Pagès *et al.* 1998). L'activité ectoprotéolytique ramenée à la production de biomasse bactérienne suggère une importance

déterminante des composés organiques de poids moléculaire élevé [P19] comme ceux compris dans le mucus corallien. Le bactérioplancton ne répond pas aux additions de nutriments inorganiques et apparaît donc plutôt contrôlé par les exportations. Enfin la proximité phylogénétique des peuplements bactériens de Tekokota avec les peuplements de surface de l'océan confirme le fort renouvellement de cet atoll (Fig. 20).

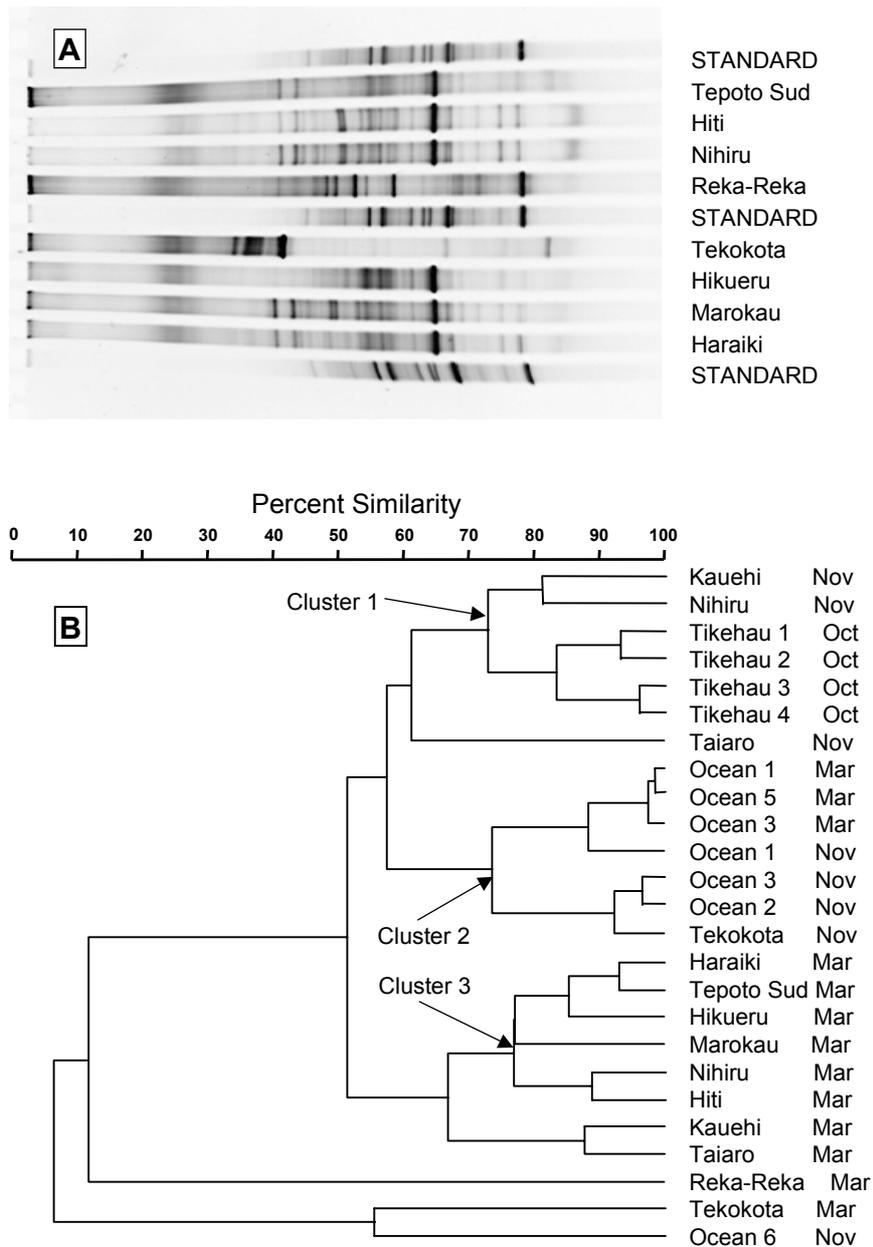


Fig. 20 : A) Gel DGGE de quelques échantillons collectés pendant la campagne TYP4 (Mars 96) B) Dendrogramme montrant la similarité des échantillons collectés pendant TYP3 (Nov. 96) et TYP4. Tekokota TYP4 et Ocean 6 TYP3 (en bas) sont contaminés.

Le lagon de Reka-Reka est encore moins profond, cette fois couvert de substrats meubles et très confiné. Il montre les biomasses bactériennes et les activités les plus élevées, et à l'inverse des autres lagons, le bactérioplancton apparaît contrôlé par le phosphore (Fig. 18). L'éloignement phylogénétique des peuplements de Reka-Reka de l'ensemble des autres confirme son caractère singulier (Fig. 20). Les fonds meubles d'atoll sont caractérisés par une fixation élevée d'azote atmosphérique. Le rapport entre surface des fonds meubles et volume est le plus élevé des lagons étudiés et favorise de toute évidence les entrées d'azote dans cet écosystème *via* le benthos.

**De nombreux arguments conduisent à conclure à un contrôle essentiellement ascendant du compartiment bactérien.**



Les taux de croissance sont extrêmement faibles en regard de la température moyenne élevée. Ils tendent à montrer que les communautés ne trouvent que des conditions sub-optimales de croissance. L'efficacité de croissance déterminée à Tikehau, Takapoto et dans le Grand lagon de l'Astrolabe est parmi les plus faibles reportées (del Giorgio & Cole 1998). Elle est en accord avec la qualité médiocre du carbone organique disponible (cas des atolls C limités) ou l'insuffisance des sources d'azote. La taille moyenne réduite, bien que le taux de prédation soit faible, est en accord avec la nécessité d'augmenter le rapport de la surface (déterminant la capacité d'uptake) au volume (déterminant l'énergie de maintenance nécessaire). Enfin, le taux de croissance des communautés libres est supérieur à celui des communautés attachées (au Grand Récif de l'Astrolabe, comparable aux lagons d'atolls à de nombreux points de vue). L'attachement constitue ici un avantage, à l'opposé de ce

qui était observé dans l'écosystème lagunaire Ebrié.

Dans ces conditions, la faiblesse des variations temporelles peut paraître surprenante au premier abord. Ceci, particulièrement à l'échelle nyctémérale car la remontée nocturne du zooplancton est nette dans ces lagons. Cette faible amplitude a en effet été employée comme argument pour confirmer la nature descendante du contrôle en milieu lagunaire ivoirien. Il ne faut pas perdre de vue cependant que pour des assemblages bactériens dont le temps de renouvellement de la population totale est bien supérieur à la journée, une stimulation avec une périodicité diurne ne doit pas conduire à des changements importants des taux d'activité.

Les résultats des études d'écologie bactérienne sur les lagons d'atoll oligotrophes décrivent donc une situation diamétralement opposée à celle observée en lagune Ebrié eutrophe et conduisent ainsi à plusieurs paradoxes des caractéristiques microbiennes typiquement observés en milieu oligotrophe comme : (1) un taux de croissance bactérien moyen inférieur à celui du phytoplancton, à l'opposé de ce qui est prédit par les relations allométriques, (2) une biomasse bactérienne élevée alors qu'elles sont peu actives, et (3) une carence nutritive du phytoplancton (Dufour & Berland 1999), accentuée probablement par la compétition bactérienne. Ces paradoxes seront discutés plus loin.

Le contrôle essentiellement ascendant des communautés bactériennes dans les milieux lagunaires et dans les eaux océaniques les environnant les rend particulièrement sensibles aux apports nutritifs. On peut donc s'attendre à une réaction bactérienne importante sous l'influence d'apports eutrophisants. L'opportunité d'étudier cette influence a été fournie par le programme ANTROPIC.

## 2.6 Impacts anthropiques sur un milieu récifo-lagonaire : le programme ANTROPIC

Les objectifs généraux de ce programme<sup>14</sup> réalisé sur Tahiti, étaient (1) d'évaluer les effets des apports eutrophisants et particuliers sur la structure et le fonctionnement des communautés pélagiques et benthiques en milieu lagunaire tropical, et (2) de proposer des outils de diagnostic de l'état de l'environnement lagunaire utiles pour la gestion du milieu [R9, R10]. L'objectif en écologie microbienne était étudier les effets de l'eutrophisation d'un milieu récifal très renouvelé sur le fonctionnement du compartiment bactérien.

**Les fluctuations sont modérées entre prélèvements mensuels...**

Dans la colonne d'eau, l'ensemble des mesures réalisées montre qu'en dehors des événements climatiques exceptionnels, comme la première crue de saison des pluies en septembre 1995, les fluctuations des diverses variables chimiques et biologiques entre prélèvements mensuels sont modérées. Cette relative constance des valeurs de la colonne d'eau, permet d'établir des moyennes par station sur la période de l'étude hors événements exceptionnels. Ces moyennes montrent une structure spatiale commune à la plupart des variables déterminées (Fig. 21). La zone portuaire (stations 4 à 11) et les embouchures de rivières (stations 4, 9, 14 et 22) apparaissent ainsi les plus touchées par l'eutrophisation. Les fonds de baie, notamment celle d'Arue (station 23), montrent également une très nette tendance à l'eutrophisation. A l'inverse, la zone récifale d'Arue (stations 18 et 19), sous

influence océanique, présente un état trophique peu différent de celui des lagons d'atoll ou d'îles hautes peu soumis aux pressions anthropiques (Fig. 21).

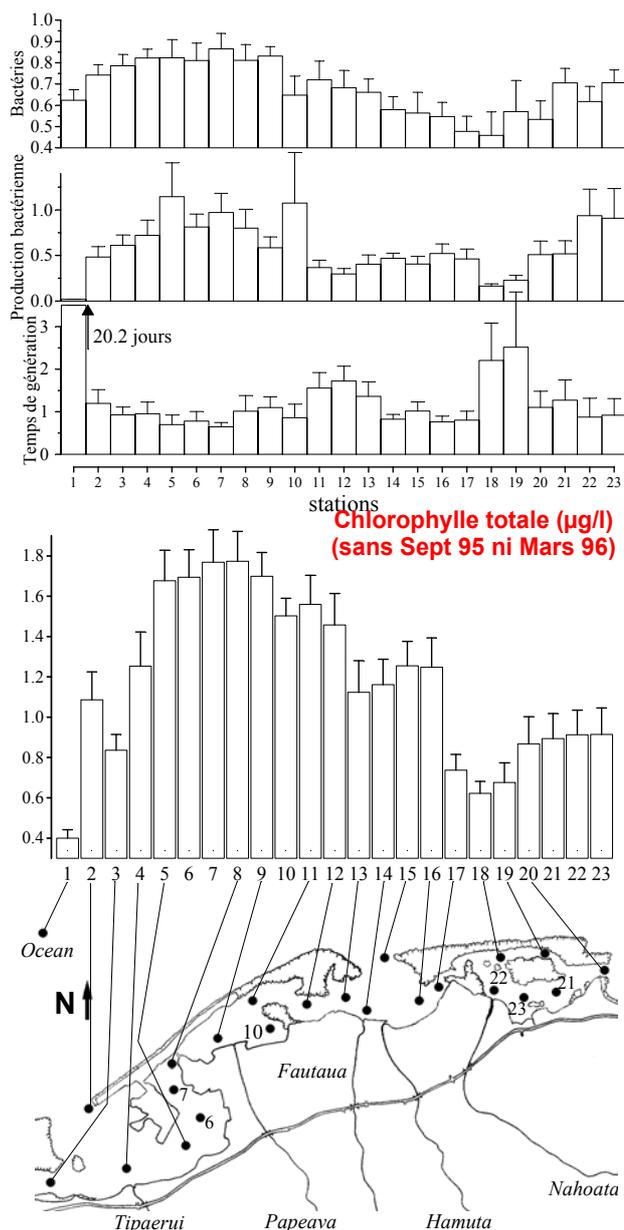


Fig. 21 : Répartition moyenne ( $\pm$  erreur-standard) de la chlorophylle a totale ( $\mu\text{g/l}$ ), de l'abondance ( $10^9$  cell/l), de la production ( $10^9$  cell/l/j) et du temps de renouvellement (j) des bactéries dans le lagon de Tahiti.

<sup>14</sup> Financement : ORSTOM, CORDET, Ministère de la Recherche de Polynésie Française, Ministère de l'Environnement de Polynésie Française

Comme l'on pouvait s'y attendre, le compartiment bactérien planctonique montre une forte réactivité à l'eutrophisation. Les temps de renouvellement moyens de la biomasse bactérienne évoluent ainsi de 20 jours dans les eaux océaniques, à 2,5 jours en zone récifale peu perturbée, pour atteindre 0,7 jour dans les zones portuaires les plus dégradées.

**... et la production bactérienne de biomasse vient s'ajouter de manière très significative à la production primaire aux sites les plus riches.**

La production bactérienne représente jusqu'à 100% environ de la production primaire aux sites les plus eutrophes (Fig. 22). Aux sites les moins altérés (stations 1, océanique et 18, récifale), la production bactérienne représente une proportion (3-31%) plus classiquement rencontrée dans les milieux récifo-lagonaires.

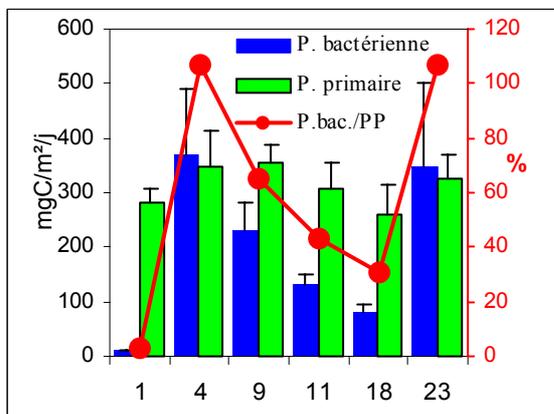


Fig. 22 : Productions bactérienne et primaire moyennes intégrées par m<sup>2</sup> dans le lagon de Tahiti (Jan, fév., mar., avril, août 96).

**Le taux de croissance du bactérioplancton apparaît directement lié aux teneurs en phosphates et en matière organique dissoute...**



A l'inverse de ce qui était observé dans les lagons d'atolls où les taux de croissance bactériens sont liés à la disponibilité en azote minéral, l'analyse montre que dans le lagon de Tahiti le bactérioplancton apparaît directement corrélé aux phosphates et à un indice optique de la matière organique dissoute [P13, A2, C12]. Ceci sur toute la gamme de richesse observée. La meilleure explication de la variance du taux de croissance du bactérioplancton est ainsi obtenue par  $\log(\mu_{\text{bact}}) = 1,6 \log(A_{254}) + 0,8 \log(\text{PO}_4) + 2,3$  ( $r^2=0,35$ ,  $n=85$ ,  $P<0,001$ ).

L'augmentation de la biomasse phytoplanctonique est liée, elle, à l'augmentation des nitrates jusqu'à 0,25 µg NO<sub>2+3</sub>.l<sup>-1</sup> (correspondant à ≈1 µg Chl.a.l<sup>-1</sup>, Fig. 23).

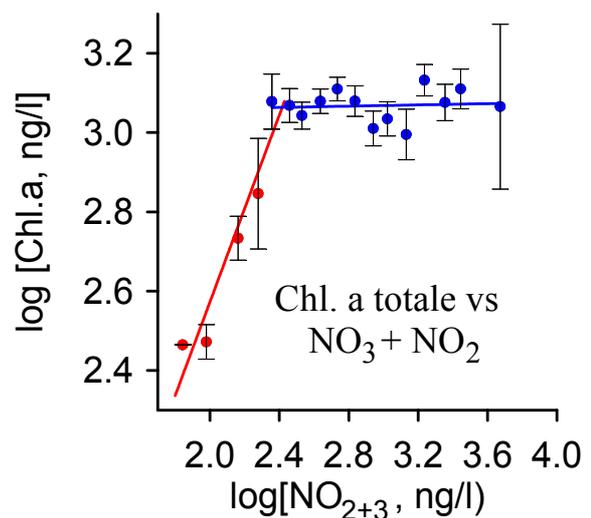


Fig. 23 : Relation entre Chl.a et nitrates + nitrites dans le lagon de Tahiti. Données en log groupées par séries de valeurs (± écart-type).

Au-delà de ce seuil, la liaison est bien moins nette. L'atténuation lumineuse importante est très probablement responsable en partie de cet amortissement. Celui-ci pourrait toutefois également refléter le passage d'un contrôle ascendant à un contrôle descendant [R10]. Ces deux tendances illustrent la difficulté d'évaluer la réponse d'un réseau trophique à l'eutrophisation. Dans le lagon de Tahiti, les 2 communautés fonctionnelles situées à la base de ce réseau montrent déjà des évolutions différentes avec la richesse en nutriments.

**... et en fait un indicateur sensible de l'eutrophisation**



La réponse sensible des activités bactériennes sur toute la gamme de conditions nutritives, au contraire des pigments chlorophylliens montrant un amortissement, leur confère donc les caractéristiques d'outils de diagnostic de l'eutrophisation bien plus sensibles que la concentration en pigments photosynthétiques [P20] couramment employée.

De manière comparable, dans les sédiments superficiels, la biomasse et la production bactérienne apparaissent très liées à la teneur en matière organique (Fig. 24) [A3, C10]. Cette corrélation, qui n'avait pas encore été démontrée dans un milieu récifal montre là encore un effet très net de l'eutrophisation. Elle suggère par ailleurs qu'il serait vraisemblablement possible de développer un modèle prédictif de la biomasse et de la production bactérienne dans de tels milieux.

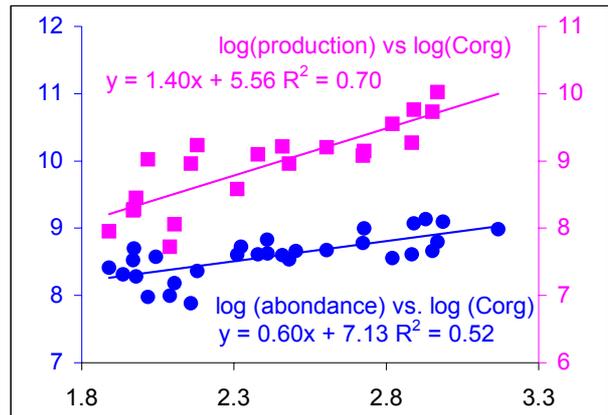


Fig. 24 : Abondance ( $cell.mt^{-1}$ ) et production bactériennes ( $cell.mt^{-1} j^{-1}$ ) dans les sédiments superficiels du lagon de Tahiti en fonction de la teneur en carbone organique ( $\mu gC.mt^{-1}$ ).

**Même dans ces milieux lagunaires de petite taille, soumis à un renouvellement des eaux important, l'eutrophisation se traduit par des changements profonds du fonctionnement du compartiment hétérotrophe microbien.**



La production bactérienne augmente considérablement la biomasse disponible pour les niveaux supérieurs du réseau trophique. Les temps de renouvellement très courts de cette biomasse suggèrent qu'une part importante de la matière organique est dégradée durant son transit dans les eaux lagunaires.

## 2.7 Conclusion, projet de recherche

### les bactéries favorisent-elles l'évolution des écosystèmes vers les extrêmes trophiques ?

C'est une évidence, les caractéristiques des communautés bactériennes sont donc considérablement modifiées entre deux types d'écosystèmes tropicaux : les uns oligotrophes (les lagons d'atolls) et les autres eutrophes (la lagune Ebrié et dans une moindre mesure le lagon de Tahiti). Il est toutefois intéressant de s'interroger sur les implications de ces larges différences sur le fonctionnement du réseau trophique.

En situation d'oligotrophie, les bactéries sont abondantes et représentent la biomasse dominante en carbone et *a fortiori* en azote et en phosphore. Elles immobilisent donc une quantité considérable de nutriments inorganiques. Elles apparaissent limitées par leurs ressources, ce qui d'une part explique les longs temps de génération moyens qui les caractérisent, et d'autre part suggère qu'elles entrent en concurrence avec le phytoplancton pour les nutriments inorganiques. La supériorité du bactérioplancton dans cette compétition a été démontrée par plusieurs travaux. On peut donc s'attendre à ce qu'elles limitent la production primaire par cette activité. De fait, dans les atolls et les eaux océaniques de surface étudiées au cours de TYPATOLL, le phytoplancton apparaît limité également par la disponibilité nutritive (Dufour & Berland 1999). Bien sûr, ces caractéristiques bactériennes amènent à constater plusieurs paradoxes parmi lesquels :

(1) Le bactérioplancton présente un taux de croissance moyen pour la population totale largement inférieur à celui du phytoplancton, alors qu'il est censé bénéficier de la compétition pour les ressources nutritives, et de manière assez liée, (2) le bactérioplancton montre une biomasse élevée alors qu'il est peu actif.

(3) La carence nutritive du phytoplancton dans ces milieux est probablement accentuée par la compétition bactérioplancton, lui-même limité par les ressources. Cette carence du phytoplancton peut se traduire par un mécanisme de « surflux ». Les cellules phytoplanctoniques excréteraient alors de larges quantités de carbone organique dissous stimulant l'activité bactérienne et augmentant ainsi le stress nutritif du phytoplancton.

Comment comprendre ces paradoxes ?

(1) Il ne faut pas perdre de vue qu'estimer le taux de renouvellement moyen du peuplement total masque les différences de taux de renouvellement de plusieurs sous-populations. Les rares estimations de la fraction "active" des peuplements oligotrophes montrent généralement des valeurs très faibles [P6, P11], même si les méthodes employées souffrent malheureusement souvent d'une sensibilité limitée par la taille des cellules en situation oligotrophe, ainsi d'ailleurs que d'une approximation conceptuelle. Plutôt que 2 peuplements actifs et inactifs, il est fort probable en effet qu'il existe un continuum de cellules présentant des taux de croissance bruts variés, et déterminés par la distance des conditions de milieu à celles leur assurant l'optimum de croissance. La fluorescence du CTC<sup>15</sup> par cellule est d'ailleurs fort variable dans des communautés bactériennes mixtes en culture (Cook & Garland 1997). Discuter sur 2 sous populations ou sur 100 ne change toutefois pas le raisonnement. Il est

---

<sup>15</sup> CTC: 5-cyano-2,3-ditolyl tetrazolium chloride indicateur redox fluorescent lorsqu'il est réduit. Il permet ainsi la détection de l'activité du système de transport d'électrons membranaire sur des cellules individuelles observées en microscopie à épifluorescence.

clair que la large biomasse bactérienne en milieu oligotrophe (comparée à celle du phytoplancton) est composée d'une faible proportion de bactéries actives, dont le taux de croissance atteint probablement, voire même dépasse, celui du phytoplancton. Dans le lagon de Tikehau, la fraction réduisant l'INT<sup>16</sup> est d'environ 10% (données non publiées). Dans le lagon de Takapoto les cellules réduisant le CTC atteignent à peu près ce pourcentage (6-14% Sakka *et al* non publié). Dans ces 2 atolls, une forte proportion de bactéries inactives permet d'expliquer la latence en phase initiale de culture [P10]. Une proportion de bactéries en latence de 10% suffit à attribuer un taux de croissance des bactéries actives supérieur à celui du phytoplancton. Ces bactéries seraient responsables de la forte demande en nutriments inorganiques, accentuant la carence du phytoplancton. L'autre fraction, majoritaire, serait constituée de bactéries trouvant dans le milieu des conditions trop drastiques pour se multiplier ou même montrer une activité respiratoire mesurable. Il est probable que le passage d'un état actif à un état inactif (et réciproquement) par ces facteurs de type "ascendants" est complété par des facteurs "descendants" (aux effets cette fois non réversibles) comme l'attaque virale (Proctor & Fuhrman 1990) ou la digestion incomplète par les protistes (Gonzalez *et al* 1990b).

Postuler que ces 2 sous-populations coexistent revient à admettre qu'elles ne sont pas consommées de manière identique par les protistes. La petite taille est une des adaptations à la limitation nutritive (Morita 1982). En augmentant le rapport Surface/Volume, les cellules augmentent la capacité d'"uptake" (dépendante de S) par rapport à l'énergie de maintenance nécessaire (proportionnelle à V). La prédation préférentielle des plus grosses

cellules est ainsi démontrée depuis quelques années (Gonzalez *et al* 1990a). Ce phénomène a même pu faire écrire que les protistes consomment la production (les cellules en division), plutôt que la biomasse (Sherr *et al* 1992), et qu'une petite taille pouvait constituer un des refuges contre la prédation (Jurgens & Güde 1994). La prédation préférentielle des bactéries motiles a également été montrée en laboratoire (Gonzalez *et al* 1993). Plus récemment del Giorgio *et al* (1996) ont confirmé *in situ* la prédation préférentielle des cellules "actives" (réduisant le CTC) sur des assemblages naturels. Cette prédation sélective des protistes pourrait représenter un mécanisme autorisant le maintien d'une diversité génétique et métabolique des communautés bactériennes, comme l'exercent les virus bactériophages (Fuhrman 1992). Cette diversité permettrait au bactérioplancton de réagir rapidement à une augmentation soudaine des ressources nutritives. On peut donc se représenter le bactérioplancton à l'image du COD et de ses fractions réfractaires et labiles, *i.e.* constitué d'une part prédominante à très faible taux de renouvellement et d'une faible proportion très dynamique et représentant l'essentiel des flux mesurés.

Le paradoxe (3) est qu'il est difficile de concevoir l'intérêt adaptatif que peut présenter une telle situation pour le phytoplancton. Une première hypothèse est que le phytoplancton maintient ainsi un niveau d'activité élevé dans un cycle "futile" le préparant à réagir rapidement à des apports discontinus et plus massifs de nutriments (sédimentation induite par la compaction cellulaire en état carencé, sources ponctuelles comme les fèces...). Une autre hypothèse est que cette sécrétion active constitue une protection contre les fortes illuminations pour les organismes phytoplanctoniques ne disposant pas de mécanismes de photorespiration (Wood & Van Valen 1990). Une dernière hypothèse, est que le désavantage occasionné par cette

---

<sup>16</sup> P-iodonitro tetrazolium chloride, indicateur similaire au précédent, mais non fluorescent. Il est détectable par microscopie en transmission.

compétition est compensé par un avantage qui y est lié. Un avantage pourrait être le stockage de nutriments sous forme de bactéries dans la couche euphotique. La prédation et la lyse virale en maintiendrait ainsi une source régulière à proximité du phytoplancton (Williams 1990). Un autre avantage pourrait être la production très locale de métabolites bactériens essentiels au phytoplancton (Wood & Van Valen 1990) dans une association commensale en agrégats (un des "hot spots" suggéré par Azam, 1998).

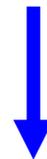
L'activité bactérienne présente donc 2 effets antagonistes sur la productivité : (1) un effet modérateur sur l'exportation physique nette de nutriments inorganiques (passant d'une taille propice à la sédimentation à une taille bactérienne non susceptible de sédimenter), et (2) une immobilisation de ces ressources nutritives limitant leur disponibilité. Il est difficile de faire un bilan de cet avantage et de cet inconvénient en terme de productivité dans les milieux oligotrophes océaniques. En revanche, dans les milieux oligotrophes peu profonds, comme les lagons d'atoll ou d'îles hautes, l'effet modérateur sur l'exportation par sédimentation est négligeable. On peut au contraire postuler qu'une part des nutriments nouveaux, consommés pour la production de la biomasse bactérienne, elle-même peu utilisée dans le milieu, soit exportée par advection dans les eaux océaniques environnantes sans avoir pu servir à la production primaire.

**Dans les écosystèmes oligotrophes peu profonds, la compétition pour les ressources nutritives et la séquestration de ceux-ci sous forme de biomasse bactérienne peu renouvelée a donc vraisemblablement un impact négatif sur la productivité.**

Dans les milieux soumis à l'influence d'apports eutrophisants, comme la lagune Ebrié, ou la partie urbanisée du lagon de Tahiti, le bactérioplancton présente une taille moyenne plus élevée, le rapport S/V devenant moins critique. Le rendement de croissance augmente avec la disponibilité en ressources minérales et organiques labiles. La proportion en cellules actives devient élevée (jusqu'à 90% dans un bassin d'aquaculture eutrophe [P6]), la plupart des cellules participent à la production de biomasse qui peut devenir du même ordre que la production primaire. Le taux de croissance moyen de la population s'élève jusqu'à atteindre des valeurs considérables. Enfin, l'efficacité du transfert de la biomasse produite vers les échelons supérieurs augmente [D3]. Tous ces facteurs concourent ainsi à augmenter le transfert de la matière organique détritique vers les niveaux supérieurs du réseau trophique.

D'autre part, l'activité bactérienne élevée se traduit également par une augmentation du flux de nutriments issus de la minéralisation de la matière organique.

**Dans les milieux soumis à l'influence d'apports eutrophisants, les bactéries, augmentant la production terminale et la disponibilité en nutriments inorganiques par ceux issus de la minéralisation de la matière organique, jouent un rôle accélérateur dans l'eutrophisation.**



**On peut donc postuler que les bactéries favorisent l'évolution des écosystèmes côtiers vers les extrêmes trophiques.**

Cette hypothèse qui contraste avec le rôle idéalisé du bactérioplancton dans les écosystèmes aquatiques est bien sûr encore très fragile. En particulier, la supériorité du bactérioplancton dans la compétition pour les ressources nutritives, si elle s'accorde assez bien avec les travaux effectués sur les lagons d'atoll (plusieurs atolls ne montrent pas de limitation du bactérioplancton par les nutriments inorganiques alors qu'elle est attestée pour le phytoplancton), a été néanmoins établie sur des peuplements phytoplanctoniques où les procaryotes n'étaient pas nécessairement dominants comme dans ces milieux oligotrophes tropicaux.

Par les questions qu'elle suscite, l'incidence de ces changements profonds du fonctionnement du compartiment bactérien sur celui des réseaux trophiques planctoniques sous l'influence des apports eutrophisants mérite une attention particulière.

### Le contexte

Mon projet actuel est de poursuivre cette étude dans le cadre d'un programme de recherche de l'IRD portant sur la dégradation des écosystèmes côtiers et, plus spécifiquement, sur les milieux coralliens (ECOTROPE<sup>17</sup>). La dégradation préoccupante des écosystèmes côtiers est en effet en partie à l'origine d'une réorientation et d'un renforcement de la programmation scientifique nationale (PNEC<sup>18</sup>, LITEAU<sup>19</sup>) et internationale (LOICZ<sup>20</sup>, ICRI<sup>21</sup>). Au sein de ces écosystèmes côtiers, les milieux coralliens sont particulièrement menacés par les activités humaines tant à court terme qu'à moyen terme. Leur préservation constituera ainsi l'un des enjeux

---

<sup>17</sup> Resp. R Fichez (IRD)

<sup>18</sup> Programme National sur l'Environnement Côtier

<sup>19</sup> Programme sur l'environnement littoral du Ministère de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement

<sup>20</sup> Land Ocean Interactions in the Coastal Zone

<sup>21</sup> International Coral Reef Initiative

environnementaux majeurs des prochaines décennies<sup>22</sup>. Ces milieux fournissent en outre l'excellente opportunité scientifique d'étudier les effets de l'eutrophisation sur les réseaux trophiques planctoniques d'écosystèmes côtiers de nature plutôt oligotrophe.

### Les sites d'étude

Les sites ateliers actuellement choisis sont le lagon sud-ouest de la Nouvelle-Calédonie près de Nouméa et la zone urbanisée du lagon Sud Est de Viti Levu, près de Suva aux Fidji.

Le lagon sud-ouest de la Nouvelle-Calédonie s'étend sur 2000 km<sup>2</sup> autour de la péninsule de Nouméa qui regroupe près de la moitié de la population du Territoire. En particulier, le site urbain de Nouméa et les zones estuariennes environnantes sont soumis à une influence terrigène naturelle forte et à une augmentation importante de la pression anthropique, malgré un effort de contrôle des rejets et de gestion de l'espace maritime côtier.

Comme nombre de nations insulaires en développement, Fidji est confronté à de sérieux problèmes environnementaux. Une des plus dramatiques est la destruction des récifs coralliens par les charges croissantes de sédiments transportés par les rivières et les courants. Dans la baie de Suva, la colonne d'eau et les sédiments lagunaires reçoivent les effluents urbains et industriels. Ces apports se traduisent par des contaminations chimiques ou biologiques ainsi que par une sévère eutrophisation.

### Les questions

Le programme ECOTROPE, prolongeant l'effort de recherche sur l'anthropisation des milieux côtiers tropicaux initié au cours du programme ANTROPIC a pour axe central l'étude de l'influence des apports terrigènes et

---

<sup>22</sup> Voir par exemple International Coral Reef Initiative sur <http://coral.aoml.noaa.gov/icri/>

anthropiques sur les biotopes et les biocénoses. Pour ce qui concerne les biocénoses pélagiques, le projet se propose, en particulier, de répondre aux questions suivantes :

1. Quelle est la nature du contrôle exercé sur les premiers échelons trophiques (phytoplancton - y compris les *procarvotés* -, bactéries hétérotrophes et protistes) dans les milieux lagunaires non perturbés ?
2. Quelle est la nature des modifications induites sur les peuplements originaux par les apports en éléments nutritifs et en particules (spectre de taille, potentialités cataboliques, composition spécifique) ?
3. Ces modifications se traduisent-elles par des changements des voies de transfert du carbone produit par la base du réseau trophique vers les niveaux supérieurs ?

Ces questions de nature plutôt fondamentale sont étroitement liées à celles qui intéressent plus spécifiquement la gestion des milieux :

4. Peut-on mettre en évidence des seuils de perturbations au-delà desquels la nature des relations trophiques est modifiée ?
5. Au-delà de ces seuils, l'altération des relations trophiques modifie-t-elle les potentialités de ces écosystèmes pour les usages qui en ont été faits ?
6. Peut-on utiliser les activités bactériennes en tant qu'indicateurs simples d'altération du milieu pour un suivi régulier de la qualité des eaux ?

### La stratégie

Pour répondre à ces questions **deux démarches complémentaires** seraient utilisées :

- Décrire l'état d'eutrophisation du milieu et observer *in situ* l'influence des conditions de milieu sur la structure et l'activité des communautés planctoniques ;

- déterminer *in vitro* les réponses spécifiques des organismes aux altérations, et l'évolution de la compétition entre

phytoplancton et bactéries hétérotrophes pour les minéraux limitants en fonction du degré trophique.

Caractériser *in situ* la structure des communautés en conjonction avec les descripteurs physiques et chimiques de l'environnement permettrait d'identifier, par corrélation, les variables forçantes agissant sur ces communautés.

Cette exploration statistique des relations entre contraintes physiques ou chimiques et communautés vivantes serait complétée par des expérimentations en conditions contrôlées. Une des voies possibles est d'étudier la réponse des communautés dans leur intégralité (en mésocosme) ou fractionnées à un enrichissement en nutriments.

### Les résultats attendus

L'effort de recherche serait conçu pour concilier recherche pour le développement en coopération, formation et recherche fondamentale. Les résultats attendus sont :

#### En terme de recherche pour le développement

- Dresser un bilan des conditions de milieu dans la partie urbaine des lagons de Nouméa et Suva ,
- Proposer aux bureaux d'études et aux aménageurs des outils de diagnostic présentant les meilleurs rapports coût / compétence / information pour décrire l'état de l'environnement lagunaire (maille d'échantillonnage, variables à déterminer, méthodologies à appliquer, valeurs critiques...).

#### En terme de recherche fondamentale

Ceux-ci ont déjà été développés plus haut. Il est possible de les résumer ainsi

- Identifier la nature du contrôle exercé sur les premiers échelons des réseaux

trophiques planctoniques dans les sites récifo-lagonaires non perturbés.

- Etudier la compétition entre bactéries et phytoplancton pour le ou les éléments limitants
- Comprendre l'évolution des réseaux trophiques pélagiques lagonaires tropicaux sous l'influence d'apports eutrophisants.
- Etablir d'éventuels niveaux seuils au delà desquels les réseaux trophiques basculent d'un mode à dominante "microbienne" à un fonctionnement où le réseau trophique "classique" prédomine.

#### *En terme d'enseignement/ formation*

- Encourager l'émergence d'étudiants du Pacifique dans ce secteur de recherche en assurant cours et travaux pratiques à l'USP<sup>23</sup> et l'UFP<sup>24</sup>, cours et séminaires occasionnels par des collaborateurs extérieurs lors de leurs missions,
- Former par la recherche des étudiants et des techniciens en proposant des stages pratiques (DEA, Thèse, MSc, PhD) à l'USP et au Centre IRD de Nouméa,
- Encourager l'intégration des chercheurs de l'USP dans la communauté internationale en combinant recherche appliquée au développement et recherche à caractère plus fondamental.

La dégradation des écosystèmes continentaux, lagunaires ou côtiers est étroitement liée au développement et à l'urbanisation des pays du Sud comme cela a été évoqué plus haut. La compréhension des mécanismes de ces perturbations est essentielle à l'évaluation des risques économiques et écologiques, et donc à la réalisation d'un développement durable. Exerçant leur rôle à une échelle microscopique aux interfaces entre détritique et vivant, entre minéral et organique, entre dissous et particulaire, les bactéries hétérotrophes jouent un rôle décisif dans les propriétés macroscopiques des écosystèmes aquatiques (Azam 1998, Williams 1998). Leur influence est particulièrement déterminante dans le fonctionnement des réseaux trophiques oligotrophes où, de plus en plus, le réseau trophique microbienne apparaît entrer en concurrence avec la chaîne trophique classique, notamment en fonction de la concentration en éléments limitants (Legendre & Rassoulzadegan 1995). Cette influence leur confère un rôle clef dans l'évolution de ces écosystèmes aquatiques sous la pression anthropique. L'écologie microbienne a donc vocation à répondre aux questions de natures fondamentales et appliquées, posées par leur étude, et en particulier dans le contexte des changements de leur statut trophique sous l'influence humaine.

---

---

<sup>23</sup> University of the South Pacific

<sup>24</sup> Université Française du Pacifique

## Références citées

- Andréfouët S (1998) Apports de la télédétection à une approche descriptive et fonctionnelle des systèmes coralliens de Polynésie Française. *Thèse Université Française du Pacifique*. 201 p
- Arfi R, Guiral D, Bouvy M (1993) Wind Induced Resuspension in a Shallow Tropical Lagoon *Est Coast Shelf Sci* 36: 6 587-604
- Arfi R, Bouvy M (1995) Size, composition and distribution of particles related to wind-induced resuspension in a shallow tropical lagoon. *J Plankton Res* 17: 557-574
- Azam F (1998) Microbial control of oceanic carbon flux: the plot thickens. *Science* 280:694-696
- Azam F, Fenchel T, Field JG, Gray JS, Meyer-Reil LA, Thingstad F (1983) The ecological role of water-column microbes in the sea. *Mar Ecol Prog Ser* 10: 257-263
- Billen G, Servais P, Becquevort S (1990) Dynamics of bacterioplankton in oligotrophic and eutrophic aquatic environments: bottom up or top-down control ? *Hydrobiologia* 207: 37-42
- Blackburn N, Hagstrom A, Wikner J, CuadrosHansson R, Bjornsen PK (1998) Rapid determination of bacterial abundance, biovolume, morphology, and growth by neural network-based image analysis. *Appl Environ Microbiol* 64: 3246-3255
- Bouvy M, Arfi R, Guiral D (1994) Short-term variations of seston characteristics in a shallow tropical lagoon: effect of wind-induced resuspension. *Neth J Aquat Ecol* 28: 433-440
- Carlson CA, Ducklow HW, Michaels AF (1994) Annual flux of dissolved organic carbon from the euphotic zone in the northwestern Sargasso sea *Nature* 371: 6496 : 405-408
- Caron DA, Goldman JC, Dennett MR (1988) Experimental demonstration of the roles of bacteria and bacterivorous protozoa in plankton nutrient cycles. *Hydrobiologia* 159:27-40
- Charpy L, Charpy-Roubaud CJ (1990) A model of the relationship between light and primary production in an atoll lagoon. *J Mar Biol Ass UK* 70:357-369
- Cho BC, Azam F (1990) Biogeochemical significance of bacterial in the ocean's euphotic zone. *Mar Ecol Prog Ser* 63: 253-259
- Cook KL, Garland JL (1997) The relationship between electron transport activity as measured by CTC reduction and CO<sub>2</sub> production in mixed microbial communities. *Microb Ecol* 34:237-247
- Currie DJ, Kalff J (1984) Can bacteria outcompete phytoplankton for phosphorus ? A chemostat test. *Microb Ecol* 10 : 205-216
- Del Giorgio P, Cole JJ (1998) Bacterial growth efficiency in natural aquatic systems. *Annu Rev Ecol Syst* 29 :503-541
- Del Giorgio PA, Gasol JM, Vaque D, Mura P, Agusti S, Duarte CM (1996) Bacterioplankton community structure: protists control net production and the proportion of active bacteria in a coastal marine community. *Limnol Oceanogr* 41: 1169-1179
- Ducklow HW (1982) Chesapeake Bay nutrient and plankton dynamics. 1. Bacterial biomass and production during spring tidal destratification in the York River, Virginia, estuary. *Limnol Oceanogr* 27: 651-659
- Ducklow HW, Carlson CA (1992) Oceanic bacterial production. *Adv Microb Ecol* 12: 113-181
- Ducklow HW, Kirchman DL, Quinby HL (1992) Bacterioplankton cell growth and macromolecular synthesis in seawater cultures during the North Atlantic spring phytoplankton bloom, May, 1989. *Microb Ecol* 24:125-144
- Dufour P, Harmelin-Vivien M (1997) A research program for a typology of atoll lagoons: strategy and first results. *Proc 8th Int Coral reefs Symp. Panama* Lessios HA (ed.), Allen Press, New-York 1 :843-848
- Dufour P, Berland B (1999) Nutrient control of phytoplanktonic biomass in atoll lagoons and Pacific Ocean waters: studies with factorial enrichment bioassays. *J Exp Biol Ecol* 234(2):147-166
- Fenchel T (1982) Ecology of heterotrophic microflagellates. 2. Bioenergetics and growth. *Mar Ecol Prog Ser* 8: 225-231
- Ferrier-Pagès C, Allemand D, Gattuso JP, Jaubert J (1998) Microheterotrophy in the zooxanthellate coral *Stylopora pistillata*: effects of light and ciliate density. *Limnol Oceanogr* 43:1639-1648
- Fuhrman JA, Azam F (1980) Bacterioplankton secondary production estimates for coastal waters of British Columbia, Antarctica, and California. *Appl Environ Microbiol* 39: 1085-1095
- Fuhrman JA, Sleeter TD, Carlson CA, Proctor LM (1989) Dominance of bacterial biomass in the Sargasso sea and its ecological implications. *Mar Ecol Prog Ser* 57: 207-217
- Fuhrman J (1992) Bacterioplankton roles in cycling of organic matter - the microbial food web. *Primary productivity and biogeochemical cycles in the sea*. 361-383
- Fuhrman JA, McCallum K, Davis AA (1992) Novel major archaeobacterial group from marine plankton. *Nature* 356: 148-149
- Gast GJ, Wiegman S, Wieringa E, vanDuyf FC, Bak RPM (1998) Bacteria in coral reef water types: removal of cells, stimulation of growth and mineralization. *Mar Ecol Prog Ser* 167:37-45
- Gold T (1992) The deep hot biosphere. *Proc Natl Acad Sci USA* 89:6045-6049
- Gonzalez JM, Sherr EB, Sherr BF (1990a) Size-selective grazing on bacteria by natural assemblages of estuarine flagellates and ciliates. *Appl Environ Microbiol* 56: 583-589
- Gonzalez JM, Iriberry J, Egea L, Barcina I (1990b) Differential rates of digestion of bacteria by freshwater and marine phagotrophic protozoa. *Appl Environ Microbiol* 56 : 1851-1857
- Gonzalez JM, Sherr EB, Sherr BF (1993) Differential feeding by marine flagellates on growing versus starving, and on motile versus nonmotile, bacterial prey. *Mar Ecol Prog Ser* 102: 257-267
- Hagström A, Larsson U, Hörstedt P, Normark S (1979) Frequency of Dividing Cells, a new approach to the

- determination of bacterial growth rates in aquatic environments. *Appl Environ Microbiol* 37: 805-812
- Hobbie JE, Daley RJ, Jasper S (1977) Use of Nuclepore filters for counting bacteria by fluorescence microscopy. *Appl Environ Microbiol* 33: 1225-1228
- Hoppe HG (1993) Use of fluorogenic model substrates for extracellular enzyme activity (EEA) Measurement of bacteria. Handbook of methods in *Aquatic Microbial Ecology*, Kemp PF, Sherr BF, Sherr EB, Cole JJ eds. , Lewis Publishers, Boca Raton FL, USA pp. 423-431
- Iriberry J, Unanue M, Ayo B, Barcina I, Egea L (1990) Bacterial production and growth rate estimation from <sup>3</sup>H-thymidine incorporation for attached and free-living bacteria in aquatic systems. *Appl Environ Microbiol* 56: 483-487
- Jurgens K, Güde H (1994) The potential importance of grazing-resistant bacteria in planktonic systems *Mar Ecol Prog Ser* 112: 1-2 : 169-188
- Karl DM (1980) Cellular nucleotide measurements and applications in microbial ecology. *Microb Rev* 44: 739-796
- Karl DM, Hebel DV, Bjorkman K, Letelier RM (1998) The role of dissolved organic matter release in the productivity of the oligotrophic North Pacific Ocean. *Limnol Oceanogr* 43: 1270-1286
- Koepfler ET, Kator HI, Wetzel RL, Haas LW, Webb KL (1993) Spatial and temporal bacterioplankton dynamics during destratification of the James River estuary, Virginia, USA. *Mar Ecol Prog Ser* 102:229-244
- L'Haridon S, Reysenbach AL, Glénat P, Prieur D, Jeanthon C (1995) Hot subterranean biosphere in a continental oil reservoir. *Nature* 377:223-224
- Lee S, Fuhrman JA (1987) Relationships between biovolume and biomass of naturally derived marine bacterioplankton. *Appl Environ Microbiol* 53: 1298-1303
- Legendre L, Rassoulzadegan F (1995) Plankton and nutrient dynamics in marine waters. *Ophelia* 41:153-172
- Li WKW (1982) Estimating bacterial productivity by inorganic radiocarbon uptake: importance of establishing time courses of uptake. *Mar Ecol Prog Ser* 8:167-172
- Margulis L, Sagan D (1986) *Microcosmos*. New York Simon & Schuster eds.
- Morita RY (1982) Starvation survival of heterotrophs in the marine environment. *Adv Microb Ecol* 6:171-198
- Parkes RJ, Cragg BA, Bale SJ, Getliff JM, Goodman K, Rochelle PA, Fry JC, Weightman AJ, Harvey SM (1994) Deep bacterial biosphere in Pacific Ocean sediments. *Nature* 371:410-413
- Pile AJ (1997) Finding Reisswig's missing carbon: quantification of sponge feeding using dual beam flow cytometry. *Proc 8<sup>th</sup> Int Coral Reef Symp, Panama*, vol. 2:1403-1410
- Proctor LM, Fuhrman JA (1990) Viral mortality of marine bacteria and cyanobacteria. *Nature* 343: 60-62
- Servais P, Billen G, Vives-Rego J (1985) Rate of bacterial mortality in aquatic environments. *Appl Environ Microbiol* 49: 1448-1454
- Sherr BF, Sherr EB, McDaniel J (1992) Effect of protistan grazing on the frequency of dividing cells in bacterioplankton assemblages. *Appl Environ Microbiol* 58: 2381-2385
- Stahl DA, Lane DJ, Olsen GJ, Pace NR (1985) Characterization of a Yellowstone hot spring microbial community by 5S rRNA sequences. *Appl Environ Microbiol* 45 :1379-1384
- Stetter KO, Huber R, Blöchl E, Kurr M, Eden RD, Fielder M, Cash H, Vance I (1993) Hyperthermophilic Archaea are thriving in deep North Sea and Alaskan oil reservoirs. *Nature* 365:743-745
- Stetter KO, Antranikian G, Konings WN, de Vos WM (1996) Hyperthermophilic prokaryotes. *Proc 1<sup>st</sup> Int Congress on extremophiles. FEMS Microbiol Rev* 18: 149-158
- Stevens TO, McKinley JP (1995) Lithoautotrophic microbial ecosystems in deep basalt aquifers. *Science* 270:450-454
- Sugimura Y, 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. *Mar Chem* 24: 105-131
- Suttle CA, Fuhrman JA, Capone DG (1990) Rapid ammonium cycling and concentration-dependent partitioning of ammonium and phosphate: Implications for carbon transfer in planktonic communities. *Limnol Oceanogr* 35: 424-433
- Szewzyk R, Szewzyk M, Stenström TA (1994) Thermophilic anaerobic bacteria isolated from a deep borehole in granite in Sweden. *Proc Natl Acad Sci USA* 91:1810-1813
- Wheeler PA, Kirchman DL (1986) Utilization of inorganic and organic nitrogen by bacteria in marine systems. *Limnol Oceanogr* 31:998-1009
- White PA, Kalf J, Rasmussen JB, Gasol JM (1991) The effect of temperature and algal biomass on bacterial production and specific growth rate in freshwater and marine habitats. *Microb Ecol* 21:99-118
- Williams PJ LeB (1981) Incorporation of microheterotrophic processes into the classical paradigm of the planktonic food web. *Kieler Meeresforsch, Sonderh* 5 :1-28
- Williams PJ LeB (1990) The importance of losses during microbial growth: commentary on the physiology, measurement and ecology of dissolved organic material. *Mar Microb Food Webs* 4:175-206
- Williams N (1998) The Mediterranean beckons to Europe's oceanographers *Science* 279:483-484
- Woese CR, Kandler O, Wheelis ML (1992) On the nature of global classification. *Proc Natl Acad Sci USA* 89: 2930-2934
- Wood AM, van Valen LM (1990) Paradox lost? On the release of energy-rich compounds by phytoplankton. *Mar Microb Food Webs* 4: 103 116

## Glossaire

- Activité hétérotrophe totale* : Elle représente la totalité des entrées dans le compartiment bactérien. Une partie servira à produire de la biomasse bactérienne, l'autre sera respirée ou excrétée. Elle est généralement exprimée en carbone, par unité de temps et de volume ou de surface. On peut l'estimer directement en suivant la consommation de carbone organique dissous dans une culture sans prédateurs. On peut l'estimer indirectement en estimant l'activité de respiration (respiration + production = activité hétérotrophe totale, en négligeant l'excrétion) en déterminant par exemple consommation d'O<sub>2</sub> ou production de CO<sub>2</sub>.
- Boucle microbienne* : Caractérise selon la terminologie employée par Legendre & Rassoulzadegan (1995) le système presque clos comprenant bactéries et protistes. La biomasse bactérienne produite est consommée par les protistes, dont en retour les produits d'excrétion sont consommés par les bactéries.
- Contrôle* : Le contrôle du bactérioplancton est dit "descendant" (*Top-Down*) lorsqu'il est exercé par les exportations (prédation, sédimentation, advection...) et "ascendant" (*Bottom-up*) par les entrées (ressources nutritives) ou la température.
- Cultures d'assemblages bactériens naturels* : Elles permettent de calibrer les mesures de production brute (synthèse d'ADN ou de protéines, fréquence des cellules en division) dans un assemblage bactérien en croissance nette, où la prédation est fortement réduite voire supprimée. On les utilise également pour évaluer la consommation de carbone organique dissous naturel par unité de biomasse bactérienne produite. Les cultures en mode *batch* ne sont pas renouvelées à l'opposé de celles effectuées en continu.
- DGGE* : Denaturing Gradient Gel Electrophoresis. Procédé permettant de séparer les fragments d'ADN selon leurs propriétés migratrices dans un champ électrique.
- Dystrophique* : fonctionnement anormal du milieu se traduisant par exemple par des efflorescences algales, toxiques ou non, conduisant à des mortalités massives.
- Équilibre dynamique* : L'équilibre dynamique caractérise les peuplements dont production et exportations sont équilibrées à une échelle de temps donnée. Il y a constance de la biomasse, de la production et donc du taux de croissance à cette échelle de temps.
- PCR* : Polymerase Chain Reaction. Procédé enzymatique permettant l'amplification de certains fragments d'ADN
- Production de biomasse* : La production de biomasse représente le flux de biomasse produite. Elle est généralement exprimée en carbone, par unité de temps et de volume ou de surface. On la détermine sans découpler production et prédation principalement par 3 méthodes : en suivant la synthèse d'ADN ou de protéines bactériens ou encore en estimant la fréquence des cellules en division. Ces 3 approches sont généralement calibrées au moyen de cultures d'assemblages bactériens naturels.
- Productivité* : La productivité (turnover rate en anglais) est le rapport de la production de biomasse à la biomasse (temps<sup>-1</sup>). Elle est homogène d'un taux de croissance en conditions d'équilibre dynamique.
- Rendement de croissance bactérien* : Le rendement de croissance bactérien est le rapport de la production de biomasse à l'activité hétérotrophe totale.
- Réseau trophique microbien* : caractérise la voie trophique qui, à la différence de la chaîne trophique classique ("grazing food chain") conduit des organismes pico- et nanoplanctoniques (producteurs primaires procaryotes et eucaryotes, producteurs secondaires comme les bactéries hétérotrophes) aux niveaux supérieurs en passant par les protistes.
- Sloppy feeding* : Libération de composés organiques lors de la rupture des cellules au cours du broutage.
- Taux de croissance* : Le taux de croissance ( $\mu$ , temps<sup>-1</sup>) est égal au rapport de la production de biomasse à la biomasse (productivité = P/B) en conditions d'équilibre dynamique. En dehors de ces conditions, si l'on suppose un modèle exponentiel de croissance,  $\mu = \ln(1+P/B)$
- Temps de renouvellement* : Le temps de renouvellement de la biomasse bactérienne est l'inverse de la productivité.

## 3 Production scientifique

### 3.1 Publications à comité de lecture

#### 3.1.1 Revues

- P1 Miassod R, Got C, Torréton JP (1984) Immunological estimation of changes in the absolute amounts of nuclear RNA polymerases in strictly auxin-requiring cultured soybean cells upon addition of 2,4-dichlorophenoxy acetic acid. *Planta* 162(5):434-440
- P2 Guiral D, Arfi R, Torréton JP (1988) Mécanismes et incidences écologiques de l'homogénéisation annuelle de densité dans un milieu eutrophe stratifié. *Hydrobiologia* 183 : 195-210
- P3 Arfi R, Guiral D, Torréton JP (1989) Cycle hydrologique annuel d'une baie lagunaire eutrophe: La baie de Biétri (lagune Ebrié, Côte d'Ivoire) *Rev. Hydrobiol. Trop.*, vol. 22, no. 4, pp. 263-273
- P4 Torréton J-P, Guiral D, Arfi R (1989) Bacterioplankton biomass and production during destratification in a monomictic eutrophic bay of a tropical lagoon. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* :57, no. 1, pp. 53-67
- P5 Guiral D, Arfi R, Torréton JP (1990) Conséquences biogéochimiques de l'atténuation de stratification dans une baie eutrophe: La baie de Biétri en lagune Ebrié (Côte d'Ivoire). *Rev. Hydrobiol. Trop.*, vol. 23, no. 1, pp. 11-25
- P6 Dufour P, Torréton JP, Colon M (1990) Advantages of distinguishing the active fraction in bacterioplankton assemblages: some examples. *Hydrobiologia* 207: 295-301
- P7 Torréton JP, Bouvy M (1991) Estimating bacterial DNA synthesis from 3H-thymidine incorporation: Discrepancies among macromolecular extraction procedures. *Limnol. Oceanogr.* vol. 36(2): 299-306
- P8 Arfi R, Guiral D, Torréton J-P (1991) Natural recolonization of a productive tropical pond: Day to day variations in the photosynthetic parameters. *Aquat. Sci.*, vol. 53, no. 1, pp. 39-54
- P9 Torréton JP, Bouvy M, Arfi R (1994) Diel fluctuations of bacterial abundance and productivity in a shallow tropical lagoon. *Arch. Hydrobiol.* 131(1) : 79-92
- P10 Torréton JP, Dufour P (1996a) Bacterioplankton production determined by DNA synthesis, protein synthesis and frequency of dividing cells in Tuamotu atoll lagoons and surrounding ocean. *Microb. Ecol.* 32(2): 185-202
- P11 Dufour P, Torréton JP (1996) Bottom-up and top-down control of bacterioplankton from eutrophic to oligotrophic sites in the North-eastern tropical Atlantic. *Deep Sea Res.* 43 (8): 1305-1320
- P12 Torréton JP, Dufour P (1996b) Temporal and spatial stability of bacterioplankton biomass and productivity in an atoll lagoon. *Aquatic Microbial Ecology* 11:251-261
- P13 Pagès J, Torréton J-P, Sempéré R. (1997b) Dissolved organic carbon in coral-reef lagoons, by High Temperature Catalytic Oxidation and UV spectrometry. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences. série IIa. Geochemistry* 324:915-922
- P14 González JM, Torréton J-P, Dufour P, Charpy L. (1998) Temporal and spatial dynamics of the pelagic microbial foodweb in an atoll lagoon. *Aquatic Microbial Ecology* 16:53-64

P15 Torréton JP (1999) Biomass, production and heterotrophic activity of bacterioplankton in the Great Astrolabe Reef Lagoon (Fiji). *Coral Reefs* 18: 43-53

*soumises*

P16 Torréton J-P. Intervention du bactérioplancton dans les cycles de la matière organique en milieu corallien. Soumis à *Oceanis*

P17 Torréton J-P, Talbot V and Garcia N. Nutrient stimulation of bacterioplankton growth in Tuamotu atoll lagoons. *Aquatic Microbial Ecology*. *Accepté, en révision*

*en préparation*

P18 Hollibaugh JT, Pagès J, Torréton J-P, Wong PS (in prep.) Phylogenetic and metabolic variation in bacterial populations from Tuamotu atoll and Tahiti lagoons, French Polynesia.

P19 Torréton J-P, Pagès J, Talbot V (in prep.) Bacterioplankton and phytoplankton biomass and production in Tuamotu atoll lagoons.

P20 Harris PA, Torréton JP, Fichez R, Pournier S (in prep.) Spatial and temporal distributions of chlorophyll a as indicator of eutrophication process in a tropical lagoon (Tahiti, French Polynesia).

P21 Talbot V, Torréton J.P. (in prep.) Ectoproteolytic activity and bacterial dynamics in Tuamotu atoll lagoons (French Polynesia).

### 3.1.2 Chapitres d'ouvrages à comité de lecture

O1 Caumette P, Guiral D, Torréton JP (1991) Caractérisation, biomasse et activités des communautés bactériennes en lagune Ebrié. In: *Environnement et ressources aquatiques de Côte d'Ivoire*. 2 : Les milieux lagunaires. Durand JR, Dufour P, Guiral D, Zabi, GS eds. Paris, ORSTOM, pp 281-306

### 3.1.3 Actes de colloque à comité de lecture

A1 Torréton J.-P., J Pagès , P. Dufour , G. Cauwet (1997a) Bacterioplankton carbon growth yield and DOC turnover in some coral reef lagoons. *proc. 8th International Coral Reef Symposium*, 1 :947-952, HA Lessios ed., Allen Press New York.

A2 Pagès J. , J.-P. Torréton, S Andréfouët (1997a) Dissolved organic matter in coral-reef lagoons as determined by in vitro UV absorption. Preliminary results. *proc. 8th International Coral Reef Symposium*, 1 :791-796, HA Lessios ed., Allen Press New York.

A3 Torréton J.-P., O Fouquet, P Frouin (1997b) Bacteriobenthos biomass and productivity in relation to organic matter in the lagoon of Tahiti. *proc. 8th International Coral Reef Symposium*, 2 :1857-1862, HA Lessios ed., Allen Press New York.

A4 Hollibaugh JT, J Pagès, JP Torréton and PS Wong. (In press.) Phylogenetic variation in bacterial populations from 10 atoll lagoons in the Tuamotu archipelago, French Polynesia. In: MJ Brylinsky (Ed.) *Trends in Microbial Ecology*. *In press*.

## 3.2 Présentations en congrès

C1 Torréton JP (1986) Détermination des biomasses et activités bactériennes en milieu lagunaire. Atelier régional de l'UNESCO sur la méthodologie d'étude des lagunes côtières. Abidjan, Côte d'Ivoire

- C2 Torréton JP, Guiral D, Caumette P (1988) Les communautés bactériennes de la lagune Ebrié : Caractérisation, biomasse et activités. Colloque de synthèse sur les lagunes ivoiriennes. Taabo, Côte d'Ivoire. 16-21 Mai 1988
- C3 Torréton J-P, Guiral D, Arfi R (1988) Biomasse et productivité dans une baie tropicale eutrophe: contributions respectives des compartiments bactériens et phytoplanctoniques. 3<sup>ème</sup> conférence internationale sur les zones humides, Rennes, France 19-23 Sept
- C4 Torréton JP, Bouvy M (1990) Interest of using enzymatic digestion to estimate bacterial DNA synthesis from <sup>3</sup>H-thymidine incorporation: 4<sup>th</sup> European Marine Microbiology Symposium, 8-12 Oct. 1990 Kiel (FRG)
- C5 Torréton JP, Bouvy M, Arfi R (1991) Diurnal variations of bacterial productivity in an eutrophic tropical lagoon. 5<sup>th</sup> International workshop on the measurement of microbial activities in the carbon cycle in aquatic environments. 18-23 Aug. 1991. Helsingor
- C6 Dufour P, Torréton JP (1992) Rôle des bactéries dans un lagon d'atoll (Tikehau, Tuamotu) 3<sup>èmes</sup> journées de la science en Polynésie Française, Papeete PF
- C7 Torréton JP, Dufour P (1995) Importance du bactérioplancton hétérotrophe dans le cycle du carbone au sein des lagons d'atoll de Polynésie Française. Colloque de l'année Pasteur "Microbes, environnement, Biotechnologies" 8-12 mai 95 Institut Malardé Papeete
- C8 Torréton, JP, Dufour P (1995) Bacterioplankton dynamics in Tikehau Atoll (Tuamotu, French Polynesia). 7<sup>th</sup> International Symposium on Microbial Ecology (ISME-7) 27Aug-1 Sept 1995. São Paulo Brazil. Book of abstracts p 109
- C9 González J.M., J.-P. Torréton , P. Dufour , L. Charpy (1996) Dynamics of the pelagic microbial foodweb in Tikehau lagoon. 8<sup>th</sup> International Coral Reef Symposium, Panama, June 24-29, 1996. Book of abstracts. HA Lessios ed. p 74
- C10 Torréton J.-P., O. Fouquet and P. Frouin (1996) Bacteriobenthos biomass and productivity in relation to eutrophication in the lagoon of Tahiti. 8<sup>th</sup> International Coral Reef Symposium, Panama, June 24-29, 1996. Book of abstracts. HA Lessios ed. p 197
- C11 Torréton J.-P., J Pagès , P. Dufour , G. Cauwet (1996) Bacterioplankton carbon growth yield and DOC turnover in some coral reef lagoons. 8<sup>th</sup> International Coral Reef Symposium, Panama, June 24-29, 1996. Book of abstracts. HA Lessios ed. p 197
- C12 Pagès J. , G. Cauwet and J.-P. Torréton (1996) Dissolved organic matter in coral-reef lagoons, from in vitro UV absorption. Preliminary results. 8<sup>th</sup> International Coral Reef Symposium, Panama, June 24-29, 1996. Book of abstracts. HA Lessios ed. p 151
- C13 Dufour P. & J.-P. Torréton (1996) Utilization of bacterioplankton as a food source by the pearl oyster *Pinctada margaritifera*. 8<sup>th</sup> International Coral Reef Symposium, Panama, June 24-29, 1996. Book of abstracts. HA Lessios ed. p 55
- C14 Torréton JP, Talbot V (1996) Microbiologie sur le programme Typatoll. Colloque national PNRCO (Programme National sur les Récifs Coralliens) Marseille 9-13 décembre 1996 (Typatoll Workshop)
- C15 Torréton JP, Talbot V, Garcia N (1998) Nutrient stimulation of bacterioplankton growth in Tuamotu atoll lagoons. 1998 Ocean Sciences Meeting AGU/ASLO (Feb 98, San Diego, USA). Supplement to Eos, Transactions, American Geophysical Union, Vol. 79(1) 1998. p 154
- C16 Hollibaugh JT, Pagès J, Torréton JP, Wong PS (1998) Phylogenetic variation in bacterial populations from 10 atoll lagoons in the Tuamotu Islands, French Polynesia. 8<sup>th</sup> International Symposium on Microbial Ecology (ISME-8) Halifax, Canada 3-7 Aug- 1998.
- C17 Torréton JP (1998) Bacterioplankton mediated organic matter cycling in the water column of coral reef waters. International Workshop on CO<sub>2</sub> cycling and metabolism in Coral Reef. 19-20 Nov. 1999 Kyoto, Japan. Book of abstracts. Research Institute of Innovative Technology for the Earth. (**Invité**)

### 3.3 Rapports à diffusion restreinte

- R1 Servais P, Torréton JP (1990) Mesure des activités bactériennes in "Etude de l'activité microbienne dans les eaux profondes". rapport PFO INSU pp 30-32
- R2 Dufour P, Torréton JP (1993) Programme National Récifs Coralliens (PNRCO) Rapport final 1991-1993 du thème A4: la boucle microbienne 16 pp
- R3 Dufour P, Torréton JP (1994) Biomasses et activités bactériennes à EUMELI IV Leg 1. In: premiers résultats des campagnes EUMELI. Rapport N°9. JGOFS France A. Morel Ed. p33
- R4 Dufour P, Torréton JP (1994) Etude de la production et de la transformation de la matière organique particulaire: Les bactéries dans l'environnement trophique de la nacre. Programme Général de Recherches sur la Nacre (PGRN) Rapport final de la fiche 13 65 pp
- R5 Hollibaugh JT, Pagès J, Torréton JP (1995) Microbial populations in lagoon and sea in French Polynesia. A preliminary assessment. Note Diff. Restreinte IRD Tahiti 20 pp
- R6 Jonquières G, Amouroux J-M, Benett A, Blanchot J, Bougrier S, Buestel D, Caisey X, Delesalle B, Dormoy J-M, Dufour P, Gearion P, Hautefeuille F, Loret P, Pagès J, Pellan A, Pouvreau S, Robert S, Teissier H, Tiapari J, Torréton J-P (1995) Etude de la nutrition de l'huître perlière *Pinctada margaritifera*. Programme Général de Recherches sur la Nacre (PGRN) Rapport final de la fiche 19. 155 pp
- R7 Torréton JP (1996) Biomass, production and heterotrophic activity of bacterioplankton in the Great Astrolabe Reef Lagoon (Fiji). Notes & Doc. Centre ORSTOM Papeete 46: 78-90
- R8 Fichez R, Harris P, Pagès J, Talbot V, Torréton JP (1996) Caractéristiques du milieu lagunaire autour de Papeete, influence des apports terrigènes et anthropiques. Rapport de convention Ministère de l'Environnement de P. F. 42 pp.
- R9 Torréton J-P, Pagès J, Harris P, Talbot V, Pourlier S, Fichez R (1997) « Eutrophisation en milieu lagunaire ». Compte-Rendu Subvention CORDET N° 94 T 09. 72 pp.

### 3.4 Mémoires de diplôme

- D1 Torréton JP (1982) Mémoire de DEA Biologie moléculaire et biochimie. Aix-Marseille II. 40pp
- D2 Torréton JP (1984) Mémoire d'élève ORSTOM
- D3 Torréton JP (1991) Importance des bactéries hétérotrophes aérobies dans une lagune eutrophe tropicale (lagune Ebrié, Côte d'Ivoire) Thèse de Biologie cellulaire et microbiologie Université Aix-Marseille II. Travaux et Documents microfichés ORSTOM éditions 245pp

## 4 Enseignement - formation

### 4.1 Enseignement

- 6 heures d'enseignement en Ecologie Microbienne pour le DEA (*Connaissance et Gestion des Milieux Coralliens Littoraux et Océaniques* ou CGMiCLO) à l'Université Française du Pacifique de 1992 à 1994 inclus (co-enseignement avec P Dufour en 1992-1993). DEA non renouvelé en 1995.
- 18 heures d'enseignement en Ecologie Microbienne, University of the South Pacific (USP) à Suva, Fidji (Msc 300-level) en Juin - Juillet 1998. Ce cours en langue anglaise composé de lectures (18h), de travaux pratiques (12h) et de séminaires (10) comportait les chapitres suivants :

1. Short overview of bacterial characteristics
2. Classical food chain – transfer efficiencies
3. Trophic networks - The role of protists in the pelagic food webs.
4. The role of heterotrophic bacteria in aquatic systems
5. Does oligotrophy exist for heterotrophic bacteria? The « cluster hypothesis ».
6. Phylogenetic diversity of marine bacteria
7. Structure, cycles and implication of viruses on bacterial processes in aquatic systems
8. Trophic role of bacterioplankton in coral reef ecosystems

Ce cours a permis de former une assistante de l'USP, Dhana Rao, à ce type d'enseignement. J'ai laissé à la disposition de l'USP un support de cours détaillé (68 p.).

- J'ai été sollicité par V. Dufour et M. Pichon (EPHE) pour rédiger une synthèse en français sur le rôle trophique du bactérioplancton dans les écosystèmes coralliens. Cette synthèse [P16] pourra être utilisée comme support de cours pour les étudiants de DEA Récifs Coralliens de l'EPHE - Univ. de Perpignan.

### 4.2 Encadrement

Les programmes auxquels j'ai participé depuis mon affectation en Polynésie Française se prêtaient particulièrement peu à l'encadrement d'étudiants. Les atolls étudiés aux cours des programmes CYEL, PGRN-1 et TYPATOLL étaient éloignés de 400 à 1000 km de Tahiti. Le travail de terrain, prédominant dans les études d'écologie bactérienne, était réalisé sous forme de campagnes de mesures périodiques, et dans des conditions difficiles (stations de terrain aux équipements sommaires, place limitée à bord des moyens navigants). Ces conditions ne correspondent pas à mon souci d'un encadrement régulier. Il est d'ailleurs symptomatique que ces programmes n'ont permis la réalisation que d'un travail de thèse (pour partie), malgré la présence de 2 directeurs et 3 chargés de recherche à l'IRD. Cette thèse portait sur l'exploitation d'images SPOT pour la reconnaissance de la géomorphologie des atolls et n'a nécessité que peu de travail de terrain pour valider le traitement mathématique des images. L'accès aisé et régulier au lagon de Tahiti, étudié au cours du programme ANTROPIC, m'a depuis permis d'encadrer directement 4 stages. L'arrêt du DEA CGMiCLO de l'Université Française du Pacifique en 1995 n'a malheureusement pas permis de poursuivre cette activité de formation.

### 1 - O. Fouquet, DEA CGMiCLO Université Française du Pacifique (Prog. ANTROPIC)

Les objectifs de ce travail étaient de (1) mettre au point les déterminations de l'abondance et de la production bactériennes du premier centimètre des sédiments meubles du lagon de Tahiti, (2) déterminer s'il existait une relation entre ces variables bactériennes et la richesse organique des sédiments. Une fois les méthodes adaptées au sédiments particuliers du lagon de Tahiti, l'abondance et la production bactériennes ont montré des corrélations significatives avec la richesse organique des sédiments. Ces relations indiquent qu'il serait possible de développer un modèle prédictif de la biomasse et de la production bactériennes dans les fonds meubles du lagon de Tahiti.

#### Valorisation

Fouquet O (1995) Importance du bactériobenthos dans les fonds meubles du lagon de Tahiti. Rapport de DEA Connaissance et gestion des milieux coralliens littoraux et océaniques UFP Tahiti. 39p + annexes

Torréton J.-P., O Fouquet, P Frouin (1997) Bacteriobenthos biomass and productivity in relation to organic matter in the lagoon of Tahiti. *proc. 8<sup>th</sup> International Coral Reef Symposium* HA Lessios ed. 2 :1857-1862

### 2 - S. Pourlier, étudiante d'INTECHMER (27/04/96 –31/08/96, Prog. ANTROPIC)

Les objectifs de ce stage étaient multiples. Il s'agissait de (1) tester et adapter différentes méthodes de dosage de la chlorophylle à 3 compartiments distincts du lagon de Tahiti (colonne d'eau, matériel particulaire sédimenté et sédiment), (2) mettre au point une méthode de collecte et de dosage de chlorophylle adaptée aux perliculteurs des Tuamotu (emploi d'unités de filtrations stériles jetables, tests de conservation et d'extraction), (3) mettre au point une méthode de dosage du phosphore organique particulaire et (4) apprendre les techniques de dénombrements bactériens et de mesures de production bactérienne. A la suite de ce stage et après obtention de son diplôme, S. Pourlier a été engagée comme technicienne chimiste au centre de Tahiti pour un CDD de 12 mois.

#### Valorisation

Pourlier S. (1996) Mesure de quelques paramètres environnementaux du lagon de Papeete, Tahiti. Adaptation des dosages de la chlorophylle *a* et du phosphore organique particulaire. *Institut National des Sciences et Techniques de la Mer (CNAM – INTECHMER). GENIE DE L'ENVIRONNEMENT MARIN. Rapport de stage de fin d'étude.* 40pp.

Torréton J-P, Pagès J, Harris P, Talbot V, Pourlier S, Fichez R (1997) « Eutrophisation en milieu lagonaire ». Compte-Rendu Subvention CORDET N° 94 T 09. 72 pp.

Harris P. A., Torréton J.P., Fichez R., Pourlier S. (*in prep.*) Spatial and temporal distributions of chlorophyll *a* as indicator of eutrophication process in a tropical lagoon (Tahiti, French Polynesia).

### 3 - F. Diaz, Maîtrise d'Océanographie (Aix-Marseille) (30/6/96–15/9/96, Prog. ANTROPIC)

L'objectif de ce stage était d'apprendre les mesures de biomasse, de production et d'activité exoprotéolytiques bactériennes, de chlorophylle et de matière organique dans les sédiments et d'appliquer celles-ci au cours du suivi régulier opéré dans le cadre du programme ANTROPIC.

#### Valorisation

Diaz F (1996) Approche expérimentale de l'étude de la dynamique bactérienne dans le lagon de Papeete. Stage post-maîtrise 53p

#### 4 – V. Talbot Volontaire à l'aide technique (4/12/95-28/2/97, Prog. ANTROPIC, fin de TYPATOLL)

J'ai accueilli et encadré V. Talbot dans le cadre de son service national effectué en tant que Volontaire à l'Aide Technique sur le programme ANTROPIC. V Talbot a ainsi appris et pratiqué un grand nombre de techniques de bases en chimie des eaux (notamment nutriments organiques et minéraux dissous, P et N particuliers) ainsi qu'en écologie microbienne (production bactérienne, bioessais, caractérisation catabolique).

##### Valorisation

Fichez R, Harris P, Pagès J, Talbot V, Torréton JP (1996) Caractéristiques du milieu lagunaire autour de Papeete, influence des apports terrigènes et anthropiques. Rapport de convention Ministère de l'Environnement de P. F. 42 pp.

Torréton J-P, Pagès J, Harris P, Talbot V, Pourlier S, Fichez R (1997) « Eutrophisation en milieu lagunaire ». Compte-Rendu Subvention CORDET N° 94 T 09. 72 pp.

Torréton J-P, Talbot V and Garcia N. (soumis) Nutrient stimulation of bacterioplankton growth in Tuamotu atoll lagoons. *Aquatic Microbial Ecology accepté en révision*

Torréton J-P, Pagès J, Talbot V (*in prep.*) Bacterioplankton and phytoplankton biomass and production in Tuamotu atoll lagoons.

Talbot V, Torréton J.P. (*in prep.*) Ectoproteolytic activity and bacterial dynamics in Tuamotu atoll lagoons (French Polynesia).

De manière non formelle et beaucoup plus ponctuelle, j'ai été amené à participer à l'encadrement pour leurs travaux de DEA ou thèse les étudiants suivants :

#### 1 - Serge Crouzery DEA CGMiCLO de l'Université Française du Pacifique (Prog. CYEL)

Responsable : P Dufour, DR à l'IRD

Contribution personnelle : Mon intervention a porté sur la thématique, l'ensemble des approches utilisées (dénombrements bactériens, fraction active par INTRM, production bactérienne) et leur interprétation ainsi que sur le suivi du manuscrit.

##### Valorisation

Crouzery S (1992) Abondance et fraction active bactériennes dans la colonne d'eau d'un lagon d'atoll (Tikehau, Tuamotu). Mémoire de DEA CGMiCLO UFP

#### 2 - P. Frouin. Thèse Université de Bretagne Occidentale (Prog. ANTROPIC)

Sujet : Structure, fonctionnement et évolution des écosystèmes benthiques des lagons soumis aux perturbations anthropique.

Responsable : C Hily, CNRS

Contribution personnelle : Ma participation a porté sur l'intérêt d'utiliser les variables bactériennes benthiques pour caractériser l'état d'anthropisation des stations étudiées, l'encadrement pour les mesures d'abondances bactériennes, l'aide à l'interprétation des résultats, et des commentaires sur les parties du manuscrit de thèse y faisant référence.

##### Valorisation

P Frouin (1996) *Chap. 3.2. Variables biotiques* in "Ecosystèmes benthiques des lagons soumis aux perturbations anthropiques : structure, fonctionnement, évolution, (lagon de Tahiti, Polynésie Française)." Thèse Université de Bretagne Occidentale

Torréton JP, O Fouquet, P Frouin (1997) Bacteriobenthos biomass and productivity in relation to organic matter in the lagoon of Tahiti. *proc. 8<sup>th</sup> International Coral Reef Symposium* HA Lessios ed. 2 :1857-1862

### 3 - P. Harris Thèse de l'Université Française du Pacifique (Prog. ANTROPIC)

Sujet : Modifications des caractéristiques chimiques du lagon de Papeete liées à l'activité humaine : intérêt des traceurs sédimentaires géochimiques et biogéochimiques dans la reconstitution de l'évolution de l'environnement au cours des 150 dernières années.

Responsables : B. Coste, Univ Aix-Marseille II, R. Fichez IRD Nouméa

Contribution personnelle : Mon apport a consisté, par l'animation du programme ANTROPIC, à fournir le cadre et le financement du travail de thèse de P. Harris sur le programme ANTROPIC, et à contribuer à la caractérisation trophique de la colonne d'eau du lagon de Tahiti, déterminante dans le choix et la définition du contexte des 4 stations étudiées au cours de son travail.

#### Valorisation

Fichez R, Harris P, Pagès J, Talbot V, Torréron JP (1996) Caractéristiques du milieu lagonaire autour de Papeete, influence des apports terrigènes et anthropiques. Rapport de convention Ministère de l'Environnement de P. F. 42 pp.

Torréron J-P, Pagès J, Harris P, Talbot V, Pourlier S, Fichez R (1997) « Eutrophisation en milieu lagonaire ». Compte-Rendu Subvention CORDET N° 94 T 09. 72 pp.

Harris P. A., Torréron J.P., Fichez R., Pourlier S. (*in prep.*) Spatial and temporal distributions of chlorophyll *a* as an indicator of eutrophication process in a tropical lagoon (Tahiti, French Polynesia).

### 4 - M. Schrimm. Thèse Université de Perpignan

Sujet : Transfert de carbone entre l'écosystème récifal et le domaine océanique sur l'île de Moorea (Polynésie Française).

Responsable : Roselyne Buscail (CNRS)

Contribution personnelle : Mon intervention a porté sur l'intérêt d'étudier les processus de dégradation du carbone récifo-lagunaire au cours de son exportation vers l'océan. J'ai accueilli Muriel Schrimm au centre IRD de Tahiti (convention d'accueil IRD -EPHE du 27-03-96) et l'ai encadré pour les mesures de biomasse, production et activité exoprotéolytiques bactériennes dans le lagon de Moorea. Je relis et corrige actuellement les premiers chapitres de son manuscrit de thèse.

#### Valorisation

En cours, soutenance prévue fin 1999.

## 5 Responsabilités dans l'animation et la gestion de la recherche

### 5.1 Conception et animation de programmes

#### 1. Programme ANTROPIC (IRD) - Tahiti

J'ai assuré la direction du programme ANTROPIC en Polynésie de mars 96 à juillet 98 inclus. Ce programme a requis environ 40% de mon temps, principalement pour la coordination des activités de recherche, gestion, rédactions de rapports (rapports et exposés d'avancements réguliers auprès du comité de suivi mis en place par la Délégation à l'Environnement de Polynésie Française dans le cadre de son financement), recherche de financements (Ministère de la Recherche et Ministère de l'Environnement de P.F.), rapports sur financements plus anciens (CORDET).

A l'inverse des programmes CYEL, TYPATOLL et PGRN-1 réalisés sous forme de missions sur des sites éloignés, la réalisation de ce programme sur Tahiti même convenait bien à l'accueil et à la formation de stagiaires de courte durée (le programme ayant été défini pour une période de 2 ans). J'ai ainsi pu accueillir et encadrer 4 stagiaires (voir plus haut) et d'autres participants du programme ont encadré 2 autres stagiaires en licence et DESS. Ce programme a permis la réalisation de deux thèses sous encadrements extérieurs.

#### **Participants au programme Antropic**

Chercheurs IRD	R Fichez (IRD-Nouméa), J Pagès & JP Torréton (IRD Tahiti)
Techniciens	R Jouen, J Orempuller, N Maihota, J Paofaaite, J Teuri, S Pourlier
Stagiaires	O Fouquet (DEA), S Pourlier (Intechmer), V Salbert (DESS) F Diaz (maît.) P Wong Chou (lic.) V Talbot (VAT)
étudiants en thèse	P Frouin (Brest), P Harris (UFP)
Collaborations extérieures	Univ. San Francisco, Paris VI, Bordeaux, LESE-CEA

Enfin par la réalisation de ce programme, l'IRD a maintenu un laboratoire disposant d'importantes capacités analytiques utilisées localement par : G Wotling (IRD, thèse d'hydrologie, Université de Montpellier, chimie des eaux), M Schrimm (EPHE, thèse université de Perpignan, bactériologie & géochimie), M Rodier (ingénieur IRD Nouméa, bactériologie pour EBENE), S Pouvreau (thèse à l'IFREMER Vairao, Spéciation de l'azote pour PGRN-2), Y Mechraoui, J Nias (Institut Malardé, analyses en HPLC comptages en scintillation liquide), C. Payri et collaborateurs (UFP, analyses physico-chimiques, PNRCO), C. Egretaud (Bureau d'études SNC Pae Tai - Pae Uta, analyses physico-chimiques), P. Loret (thèse EPHE, microscopie nanoplancton PGRN-2), S LeGall (CREMA La Rochelle, microscopie du nanoplancton PGRN-2), L Henman (EVAAM) puis B Costa (CAIRAP) (analyses physico-chimiques PGRN-2).

#### 2. Participation au projet d'UR CAMELIA

Dans le cadre de la restructuration de l'IRD en unités de recherche, je participe actuellement à la rédaction d'un projet d'unité de recherche (Caractérisation et modélisation du transport et du devenir des apports anthropiques et terrigènes dans les écosystèmes lagunaires, CAMELIA) portant sur l'impact des apports anthropiques sur les communautés planctoniques des milieux récifo-lagonaires. Les activités de recherche menées dans ce cadre permettront d'étudier l'incidence des changements profonds du fonctionnement du compartiment bactérien hétérotrophe sous l'influence des apports eutrophisants sur l'évolution des réseaux trophiques planctoniques, comme cela a déjà été évoqué dans mon projet de recherche. Ce travail serait une opportunité d'encadrer une thèse d'écologie microbienne dans le cadre de l'école doctorale "Biologie des systèmes intégrés. Agronomie. Environnement" de l'Université Montpellier II en co-tutelle avec Marc Trousselier (laboratoire d'Hydrobiologie Marine et Continentale).

## **5.2 Intérim de la Direction du Centre IRD de Tahiti**

J'ai assuré la direction du Centre IRD de Tahiti et la représentation de l'IRD en Polynésie à titre intérimaire au cours de 4 périodes (4-21/2/97, 16/6-7/7/97, 4/9/97-7/1/98, 10-20/7/98) totalisant environ 6 mois d'exercice. La direction de ce centre (environ 40 personnes) m'a occupé à mi-temps pendant ces périodes.

A ce titre j'ai participé aux conseils d'administration de l'Institut Territorial de Recherches Médicales Louis Malardé (2), du Centre Universitaire de Polynésie Française (1 + 1 Conseil de Centre) et du Centre Polynésien des Sciences Humaines (2).

J'ai organisé la participation de l'IRD à « Sciences en Fêtes » en Polynésie Française (accueil du public au centre, expositions à l'Assemblée Territoriale) et sa promotion radiophonique et télévisée.

J'ai eu enfin à finaliser des conventions IRD/Territoire de Polynésie Française (Zepolyf & Hydrologie des Marquises) et à gérer la préparation du grand carénage du N/O *Alis* de l'IRD.

## **5.3 Membre élu de la Commission Scientifique 32 de l'IRD**

Je suis membre élu de la commission scientifique Hydrobiologie - Océanographie de l'IRD (CSHO, sous-commission 32) depuis le 7-10-97. A ce titre je participe aux évaluations courantes, aux évaluations pour avancement, aux évaluations de programmes ainsi qu'au jurys d'admissibilité des candidats CR, DR et en accueil.

## **5.3 Membre du Comité Scientifique du PNEC**

Je fais partie depuis Mai 1999 du Comité Scientifique du Programme National pour l'Environnement Côtier (PNEC). Le PNEC (partenaires CNRS, IFREMER et IRD) rassemble maintenant 4 programmes incitatifs (PNOC, PNEAT, PNDR, PNRCO) autrefois séparés. Le comité scientifique (17 membres) a pour objectif d'évaluer et classer les propositions de recherches qui lui sont soumises pour financement. Les décisions sont prises ultérieurement au sein du Comité Inter-Organismes du PNEC.

## **5.4 Participation à des comités de lecture**

Revue d'articles pour : Revue d'Hydrobiologie Tropicale, Limnology & Oceanography, Aquatic Microbial Ecology, Bulletin of Marine Science.