

NOTES TECHNIQUES  
SCIENCES DE LA MER  
BIOLOGIE MARINE

N° 3

1999

Caractérisation géochimique des apports  
anthropiques dans les sédiments des lagons  
de Nouméa, Nouvelle-Calédonie et Suva, Fidji :  
Organisation de l'étude et premiers résultats  
concernant la spéciation du phosphore

Sabine BROCCERO-BODMER

**NOTES TECHNIQUES**  
**SCIENCES DE LA MER**  
**BIOLOGIE MARINE**

**N° 3**

**1999**

**Caractérisation géochimique des apports  
anthropiques dans les sédiments des lagons de  
Nouméa, Nouvelle-Calédonie et Suva, Fidji :  
Organisation de l'étude et premiers résultats  
concernant la spéciation du phosphore**

**Sabine BROCCERO-BODMER**



**Institut de recherche  
pour le développement**

© IRD, Nouméa, 1999

/Brocero-bodmer, S.

Caractérisation géochimique des apports anthropiques dans les sédiments des lagons de Nouméa, Nouvelle-Calédonie et Suva, Fidji : Organisation de l'étude et premiers résultats concernant la spéciation du phosphore

Nouméa : IRD. Décembre 1999. 37 p.  
*Notes Tech. ; Sci. Mer ; Biol. Mar.* 3

ENVIRONNEMENT ; GEOCHIMIE ; ANTHROPISATION ; LAGON ; SEDIMENT ; PHOSPHORE /  
NOUVELLE CALEDONIE ; FIDJI

## SOMMAIRE

### AVANT PROPOS

### RÉSUMÉ - ABSTRACT

<b>INTRODUCTION</b>	<b>1</b>
<b>1. PROBLÉMATIQUE, INTÉGRATION AU PROGRAMME ECOTROPE</b>	<b>3</b>
<b>2. SITES D'ÉTUDE</b>	<b>5</b>
<b>2.1 CHOIX DES SITES D'ÉTUDE</b>	<b>5</b>
<b>2.2 LA NOUVELLE-CALÉDONIE</b>	<b>5</b>
2.2.1 GÉOGRAPHIE	5
2.2.2 GÉOLOGIE	6
2.2.2.1 Cadre structural de la Nouvelle-Calédonie	6
2.2.2.2 Formation du lagon sud-ouest	7
2.2.2.3 Réseau hydrographique et bassins versants	7
2.2.2.4 Minéralogie des roches du bassin versant	7
2.2.3 COURANTOLOGIE	8
<b>2.3 LES ÎLES FIDJI</b>	<b>8</b>
2.3.1 GÉOGRAPHIE	8
2.3.2 GÉOLOGIE	10
2.3.2.1 Cadre structural des Fidji	10
2.3.2.2 Minéralogie des sédiments de Laucala Bay	10
2.3.3 LE LAGON DE SUVA	11
2.3.4 LA REWA ET SON ESTUAIRE	11
2.3.5 COURANTOLOGIE	12
<b>2.4 PRÉLÈVEMENT DES CAROTTES ET DES SÉDIMENTS DE SURFACE</b>	<b>12</b>
<b>3. MATÉRIEL ET MÉTHODES</b>	<b>15</b>
<b>3.1 INTÉRÊT DU DOSAGE DU COPROSTANOL ET DU PHOSPHORE</b>	<b>15</b>
<b>3.2 LE COPROSTANOL</b>	<b>15</b>
<b>3.3 SPÉCIATION DU PHOSPHORE</b>	<b>17</b>
3.3.1 MÉTHODES ANALYTIQUES	17
3.3.2 IMPONDÉRABLES ANALYTIQUES	19
<b>3.4 RÉCAPITULATIF DES DONNÉES PRÉCÉDEMMENT OBTENUES</b>	<b>20</b>
<b>4. RÉSULTATS SUR LE PHOSPHORE</b>	<b>23</b>

<b>4.1 APPROCHE GLOBALE</b>	<b>23</b>
Carotte N12	23
Carotte S14	23
Carotte S31	25
<b>4.2 EXTRACTIONS SÉQUENTIELLES</b>	<b>25</b>
Carotte N12	25
Carotte S14	27
Carotte S31	27
<b>5. DISCUSSION ET CONCLUSIONS</b>	<b>29</b>
COMPARAISON DES DEUX SÉRIES DE RÉSULTATS	29
BAIE DE SAINTE-MARIE, NOUMÉA, NOUVELLE-CALÉDONIE	29
SUVA HARBOUR ET LAUCALA BAY, SUVA, FIDJI	30
<b>6. PROSPECTIVES</b>	<b>33</b>
<b>RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES</b>	<b>35</b>

## **Avant propos**

Ce séjour de recherche a été rendu possible grâce au financement du Fonds National pour la Recherche Scientifique Suisse.

Je tiens à remercier vivement les membres de la Commission d'attribution des bourses de Neuchâtel pour cette opportunité qui m'a été offerte, ainsi que les Professeurs Karl Föllmi et André Strasser, et le Dr. P. Steinmann qui ont soutenu avec conviction ma démarche.

Je remercie vivement les différents responsables que j'ai eu à contacter cette année pour leur disponibilité, leur compréhension et leur efficacité, soit : Mme N. Derendinger (Université de Neuchâtel), Mme L. Bören (FNRS, Berne), M. C. Colin (Directeur du centre IRD de Nouméa), M. V. David (Administrateur du centre IRD de Nouméa), ainsi que tous les agents administratifs de l'IRD à Paris et à Nouméa qui ont "vu et re-vu" passer mon dossier sur leur bureau ...

L'accueil qui m'a été réservé à l'IRD de Nouméa par tout le personnel du centre, et en particulier par les Dr. R. Fichez (Responsable du programme ECOTROPE), J.M. Fernandez, P. Douillet, et S. Chifflet a permis une intégration rapide. Au delà de la collaboration scientifique qui s'est tissée et qui promet d'être longue et fructueuse, ce séjour a donné naissance à de sincères relations d'amitié.

Les membres du laboratoire de chimie de l'IRD, M. J.L. Duprey, Mme P. Moulin, Mme L. Jamet et M. J. Waneux ont très largement contribué à l'avancement de ce travail, qu'ils en soient grandement remerciés.

Je remercie enfin, une nouvelle fois, R. Fichez et J.M. Fernandez de m'avoir offert, durant toute cette année, l'opportunité d'un enrichissement rare et diversifié. Ils m'ont donné la liberté de participer activement à plusieurs missions en mer, d'effectuer des travaux de laboratoire délicats (marquage des sédiments au  $^{210}\text{Pb}$ ), et, de par mon intégration au programme ECOTROPE, de rencontrer et de collaborer avec les chercheurs australiens, américains, fidjiens et européens en mission en Nouvelle-Calédonie.



## Résumé

Ce rapport d'activité expose les résultats d'un stage de recherche d'un an (1998-1999) effectué à l'IRD de Nouméa (Nouvelle-Calédonie) dans le cadre d'un financement post-doctoral du Fonds National pour la Recherche Scientifique Suisse. L'étude conjointe du coprostanol (biomarqueur de pollution fécale) et du phosphore (agent d'eutrophisation), en adéquation avec la première action de recherche du programme ECOTROPE (*Origine et importance des principaux agents d'influence arrivant dans les lagons*), a été effectuée dans les sédiments de surface et archives sédimentaires de la baie de Sainte-Marie à Nouméa (Nouvelle-Calédonie) et de Suva Harbour et Laucala Bay à Suva (Fidji). Le choix de ces deux sites d'étude dans le Pacifique sud réside dans le fait que le lagon sud-ouest de Nouvelle-Calédonie et le lagon de Suva (Fidji) présentent des conditions environnementales contrastées. Les dosages du coprostanol, en cours à Neuchâtel (Suisse), se poursuivront jusqu'à ce que l'étude prévue initialement soit achevée. L'étude de spéciation du phosphore sur trois carottes datées confirme les résultats obtenus dans les études antérieures (métaux). Les trois carottes sont en aval d'environnements et de sources d'apports différents. En baie de Sainte-Marie (NC), les apports d'origine terrigène exercent une influence croissante depuis les 50 dernières années. L'augmentation de la population, le défaut d'équipement en terme d'épuration des eaux usées et l'élimination de la mangrove se sont combinés pour générer une forte élévation des rejets anthropiques se traduisant par une eutrophisation significative du milieu. Dans le lagon de Suva (FJ), les différences observées entre les sites de Suva Harbour et Laucala Bay peuvent être interprétées par une influence anthropique significative sur Suva Harbour (zone urbaine et industrielle), alors que l'énorme inertie du flux terrigène arrivant par la Rewa river l'emporte sur toutes les observations faites sur Laucala Bay.

## Abstract

The present paper presents results gained from a one year post-doctoral research project carried on at IRD from december 1998 to december 1999. This post-doctoral work was supported by a grant from the Swiss National Science Fundation. It was included within the research action "Origin, amount of the main influing agents delivered to the lagoon" which is one of the component of the IRD Ecotrope research programme. Coprostanol (biomarker of fecal contamination) and phosphorus (eutrophication agent) were jointly studied in the top sediment layer as well as in dated sediment cores, providing relevent information on the distribution of anthropogenic contaminats and historical records on past environmental changes. The study included a comparison between two contrasted sites : the Sainte Marie bay subject to eutrophication in the south west lagoon of New caledonia and the Suva lagoon subject to combined terrigeneous and anthropogenic influences. Analysis of coprostanol are currently underway at the University of Neuchâtel (Switzerland). The study of phosphorus speciation on three dated sediment cores provided results which were consistent with previous results on metals. It further demonstrated that Sainte-Marie Bay has been strongly impacted by terrigeneous after world war II due to the mechanisation of mining activities. Population increase, lack in adapted waste water treatment and the destruction of the mangrove swamp combined to generate a significant increase in anthropogenic inputs and a subsequent eutrophication of the coastal system, but this recent process is not already recorded in sediment deposits. In the Suva lagoon, the significant differences observed between Laucala Bay and Suva Harbour can be attributed to higher anthropogenic inputs (urban and industrial) in the latter and higher levels of natural terrigeneous discharge through the Rewa River in the former.



## Introduction

Ce rapport d'activité expose les résultats d'un stage de recherche d'un an (1998-1999) que j'ai effectué à l'Institut de Recherche pour le Développement de Nouméa (Nouvelle-Calédonie) dans le cadre d'un financement post-doctoral du Fonds National pour la Recherche Scientifique Suisse.

Le projet de recherche soumis courant 1998 à la commission de recherche avait pour intitulé : "*Etude de la répartition spatiale et temporelle d'un biomarqueur organique : le coprostanol*".

Il s'agissait d'étudier la répartition spatiale du coprostanol (sédiments de surface), ainsi que sa validité en tant qu'archive sédimentaire (carottes datées).

Les extractions et dosages du coprostanol devant être faits dans les laboratoires du Dr. Philipp Steinmann (GEA, Neuchâtel, Suisse), nous avons décidé que, dans le même temps, je mettrais en place à Nouméa, dans les laboratoires de l'IRD, une procédure d'extraction séquentielle du phosphore.

Les études conjointes du coprostanol et du phosphore sont en totale adéquation avec la première action de recherche du programme ECOTROPE : "*Quelles sont l'origine et l'importance des principaux agents d'influence arrivant dans le lagon?*". Le phénomène d'eutrophisation est souvent abordé dans les études environnementales. Il s'agit d'une pollution indirecte des milieux aquatiques : des rejets importants de phosphore ou d'azote favorisent le développement d'algues dont la prolifération puis la décomposition peuvent conduire à d'importants déséquilibres dans les milieux aquatiques (marins comme lacustres).

Il était donc intéressant, voire nécessaire, d'aborder ce thème en accord avec l'objectif d'expertise environnementale passée et actuelle du programme ECOTROPE.

Cette application était nouvelle, autant pour moi que pour les laboratoires de géochimie et de chimie de Nouméa. Les travaux ont été effectués sur trois carottes datées, en vue de retracer l'évolution des conditions de milieu, et en particulier la chronologie des apports en sels nutritifs dans les systèmes lagunaires étudiés.



## 1. Problématique, intégration au programme ECOTROPE

Parmi les menaces majeures qui pèsent sur les récifs coralliens figurent :

- Les pressions anthropiques locales. Elles sont liées aux activités humaines en zone côtière, et ont un impact localisé et immédiat.
- Les pressions naturelles, et particulièrement les effets des changements globaux. L'accroissement du CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère, notamment, représente une menace croissante. Il risque d'avoir un impact à plus large échelle et à plus longue échéance qui viendra compliquer les réponses des communautés coralliennes aux pressions locales (SCOR (Scientific Committee for Oceanographic Research), 1998).

Comme cela a été souligné aux congrès internationaux sur les récifs coralliens de Guam en 1992 et de Panama en 1996, les milieux coralliens sont soumis à des pressions anthropiques croissantes en raison de l'augmentation de la population, de l'urbanisation, et du développement agricole et industriel. La zone littorale mondiale, qui ne représente que huit pour cent de la surface des océans, abrite cependant plus de la moitié de la population mondiale, concentrée à moins de cent kilomètres des côtes. Elle apparaît de plus en plus menacée, aussi bien d'un point de vue global (modifications climatiques) qu'à l'échelle régionale (altérations anthropiques).

Les pays de la bande intertropicale présentent généralement une croissance démographique forte qui multiplie les interactions entre le développement économique et l'équilibre des écosystèmes marins côtiers (Hatcher *et al.*, 1989). En l'absence d'une gestion rationnelle de l'environnement basée sur une connaissance prédictive du fonctionnement des écosystèmes côtiers, les altérations observées ne pourront que s'amplifier (Malone & Wright, 1994). Cette situation est à l'origine de différents programmes scientifiques français (Programme National Environnement Côtier) et internationaux (Land Ocean Interactions in the Coastal Zone, International Coral Reef Initiative). Sachant tirer parti de l'expérience déjà acquise sur les environnements tropicaux, notamment les milieux coralliens, la stratégie de programmation scientifique de l'IRD s'inscrit dans cet axe de recherche (Fichez & Clavier, 1996).

Les états insulaires du Pacifique sont soumis à de profondes mutations économiques qui présentent de fortes implications sur l'équilibre de l'environnement. Le principal problème est posé par l'extension des centres urbains. Ces villes attirent une population croissante et disposent souvent d'équipements d'assainissement minima. De plus, la concentration des populations est généralement associée aux développements d'une "ceinture verte" d'agriculture intensive, d'exploitations minières (potentielles causes de déforestation), et à la surexploitation des ressources halieutiques. De même, le tourisme représente souvent pour les états insulaires du Pacifique (comme aux îles Fidji) une source majeure de revenus. La promotion touristique de cette zone repose principalement sur la valeur du cadre naturel, souvent mis en péril par le développement des produits touristiques (infrastructures, ...).

La recherche scientifique peut aider à fournir les outils nécessaires à une gestion raisonnée du milieu. C'est l'orientation de recherche retenue pour le programme ECOTROPE développé par les océanographes du centre IRD (Institut de Recherche pour le Développement) de Nouméa. Ce programme a pour objectif général de préciser comment l'homme influence les écosystèmes

littoraux du Pacifique, en définissant précisément l'influence des apports terrigènes et anthropiques sur les systèmes récifo-lagonaires situés autour des sites urbanisés de Nouméa (Nouvelle-Calédonie) et Suva (Fidji). Dans ce but, quatre actions de recherche permettront de répondre aux questions suivantes :

- Quelles sont l'origine et l'importance des principaux agents d'influence arrivant dans le lagon ?
- Comment ces agents d'influence sont-ils transportés dans le lagon et comment évoluent-ils ?
- Comment la qualité du milieu non-vivant (eau, sédiment) est-elle modifiée par ces agents d'influence ?
- Comment le milieu vivant (pelagos, benthos, ...) est-il modifié par l'évolution de la qualité du milieu ?

L'étude menée durant cette année post-doctorale s'inscrit dans la première action de recherche du programme ECOTROPE, traitant de la présence et de l'évolution de deux marqueurs anthropiques, le phosphore (agent d'eutrophisation) et le coprostanol (biomarqueur de pollution fécale), dans les sédiments de la baie de Sainte-Marie à Nouméa (Nouvelle-Calédonie) et de Suva Harbour et Laucala Bay à Suva (Fidji). La problématique envisagée peut se résumer en deux points :

- peut-on mettre en évidence une augmentation du phosphore dans les réservoirs sédimentaires (carottes datées), responsable d'une eutrophisation du milieu, ainsi qu'une tendance à l'accumulation de traceurs fécaux dans les baies étudiées (sédiments de surface et carottes datées)?
- Dans l'affirmative, quelle est la chronologie des modifications au cours du dernier siècle ?

Il est important de souligner que dans cette zone du Pacifique, une telle étude de répartition spatio-temporelle de polluants dans des sédiments récifo-lagonaires est relativement novatrice. Les résultats de cette étude sont des résultats intermédiaires, qui seront intégrés ultérieurement aux conclusions générales du programme de recherche.

## 2. Sites d'étude

### 2.1 Choix des sites d'étude

Le choix de ces deux sites d'étude dans le Pacifique sud (figure 1) réside dans le fait que le lagon sud-ouest de Nouvelle-Calédonie et le lagon de Suva (Fidji) présentent des conditions environnementales contrastées.

Le lagon sud-ouest de Nouvelle-Calédonie est très influencé par les entrées d'eaux océaniques. La barrière récifale est distante d'une vingtaine de kilomètres des côtes (figure 2). A Nouméa (capitale de la Nouvelle-Calédonie), la baie de Sainte-Marie, relativement abritée et faiblement influencée par les apports terrigènes subit une constante évolution liée à l'urbanisation de la zone, et l'eutrophisation observée y est récente.

Le lagon de Suva (figure 3), capitale des Iles Fidji, est à contrario un environnement très influencé par les apports terrigènes (notamment la partie est du lagon exposée aux apports de la rivière Rewa). A l'opposé de Nouméa, le lagon est de surface modeste, la barrière récifale étant distante de 1 km (Suva Point) à approximativement 8 km (Laucala Bay) de la côte. Suva (200 000 hab.) est deux fois plus peuplée que Nouméa (120 000 hab., Labrosse *et al.*, 2000). Cette zone est représentative d'une situation où les influences conjointes de l'urbanisation, de l'industrialisation et de l'activité agricole sont très fortes.

### 2.2 La Nouvelle-Calédonie

#### 2.2.1 Géographie

Eloignée d'environ 1 500 kilomètres de la côte est australienne, la Nouvelle-Calédonie est le Territoire français le plus éloigné de la métropole. Située entre 18° et 23° de latitude sud, et 164° et 167° de longitude est (figure 1), la Nouvelle-Calédonie est constituée d'une île principale, la "Grande Terre", et de dépendances, qui représentent une surface totale émergée de 18 585 km<sup>2</sup> (1 500 km d'est en ouest et 1 000 km du nord au sud) (figure 2).

L'île principale ou "Grande Terre", couvre une superficie de 16 890 km<sup>2</sup> (400 km par moins de 50 km). Elle se prolonge par de petites îles isolées comme l'île des Pins au sud (152 km<sup>2</sup>) ou l'archipel des Belep (220 km<sup>2</sup>) dans le lagon nord. L'archipel des Loyauté (1 981 km<sup>2</sup>) comprend trois îles principales d'origine corallienne, Ouvéa, Lifou et Maré (respectivement 132, 1207 et 642 km<sup>2</sup>). Du nord au sud, le littoral est bordé sur environ 1 600 km d'un chapelet presque ininterrompu de récifs, d'îlots et de hauts fonds qui constituent le deuxième ensemble corallien de la planète, après la Grande Barrière australienne. Cependant, le récif barrière de Nouvelle-Calédonie constitue la plus longue barrière récifale continue au monde. L'ensemble des lagons de Nouvelle-Calédonie et dépendances couvre une superficie totale d'environ 40 000 km<sup>2</sup> (Clavier *et al.*, 1995). Et la Nouvelle-Calédonie possède l'une des rares doubles barrières au monde.

La Nouvelle-Calédonie jouit d'un climat semi-tropical qualifié de "tropical océanique".

La population est de 196 836 habitants (1996). Avec une densité d'environ 11 hab./km<sup>2</sup>, le Territoire reste peu peuplé. La répartition de la population est très hétérogène avec 68% de la population en Province sud, dont 60% sur environ 1% du Territoire, le Grand Nouméa. Le taux d'accroissement annuel moyen de la population calédonienne est fort (2,6% entre 1989 et 1996).

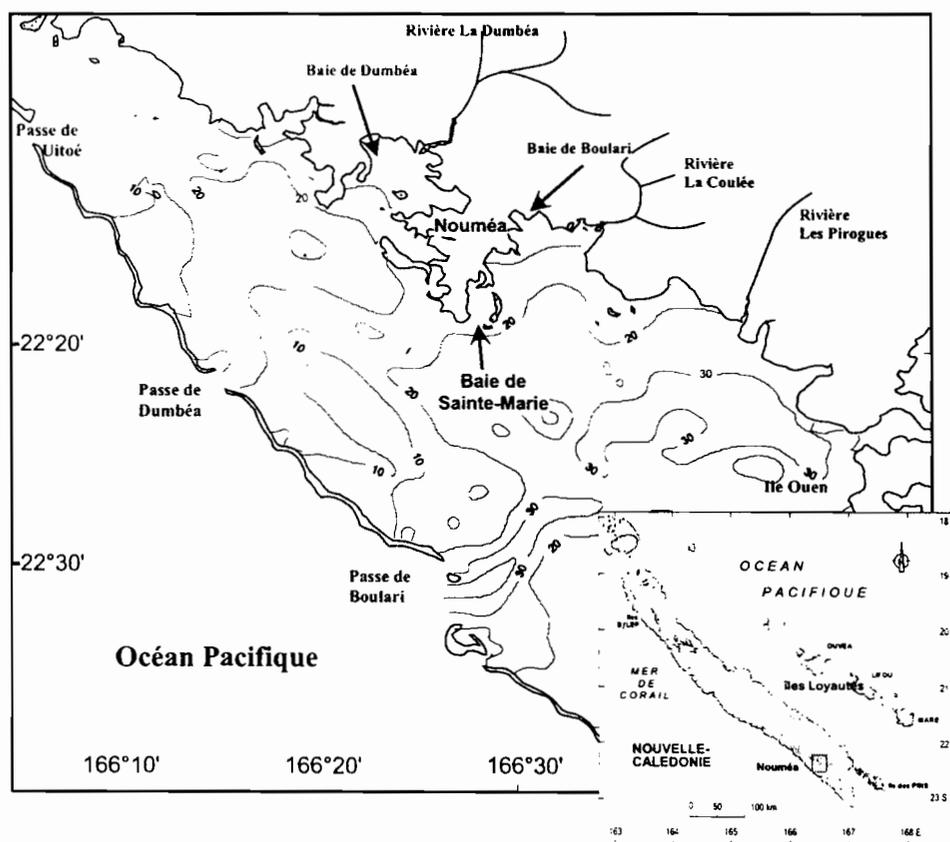


figure 2 : Nouvelle-Calédonie, localisation du grand lagon sud-ouest et de Nouméa sur la "Grande Terre"

## 2.2.2 Géologie

### 2.2.2.1 Cadre structural de la Nouvelle-Calédonie

La Nouvelle-Calédonie se situe sur une dorsale océanique localisée entre le continent australien et les arcs insulaires orientaux tectoniquement actifs (Iles Salomon, Vanuatu, ...). La construction des édifices actuels remonte à la période anté-permienne, soit plus de 280 millions d'années. De cette période tectoniquement active, il ne reste que de vieilles terrasses composées de schistes quartzofeldspathiques foliacés, présents dans la chaîne centrale. On y distingue aussi des vestiges de dépôts du Permien (290 - 245 Ma) et Trias inférieur (245 - 239 Ma) sous forme de sédiments volcanoclastiques au niveau de cette même chaîne centrale ainsi que sur la côte ouest.

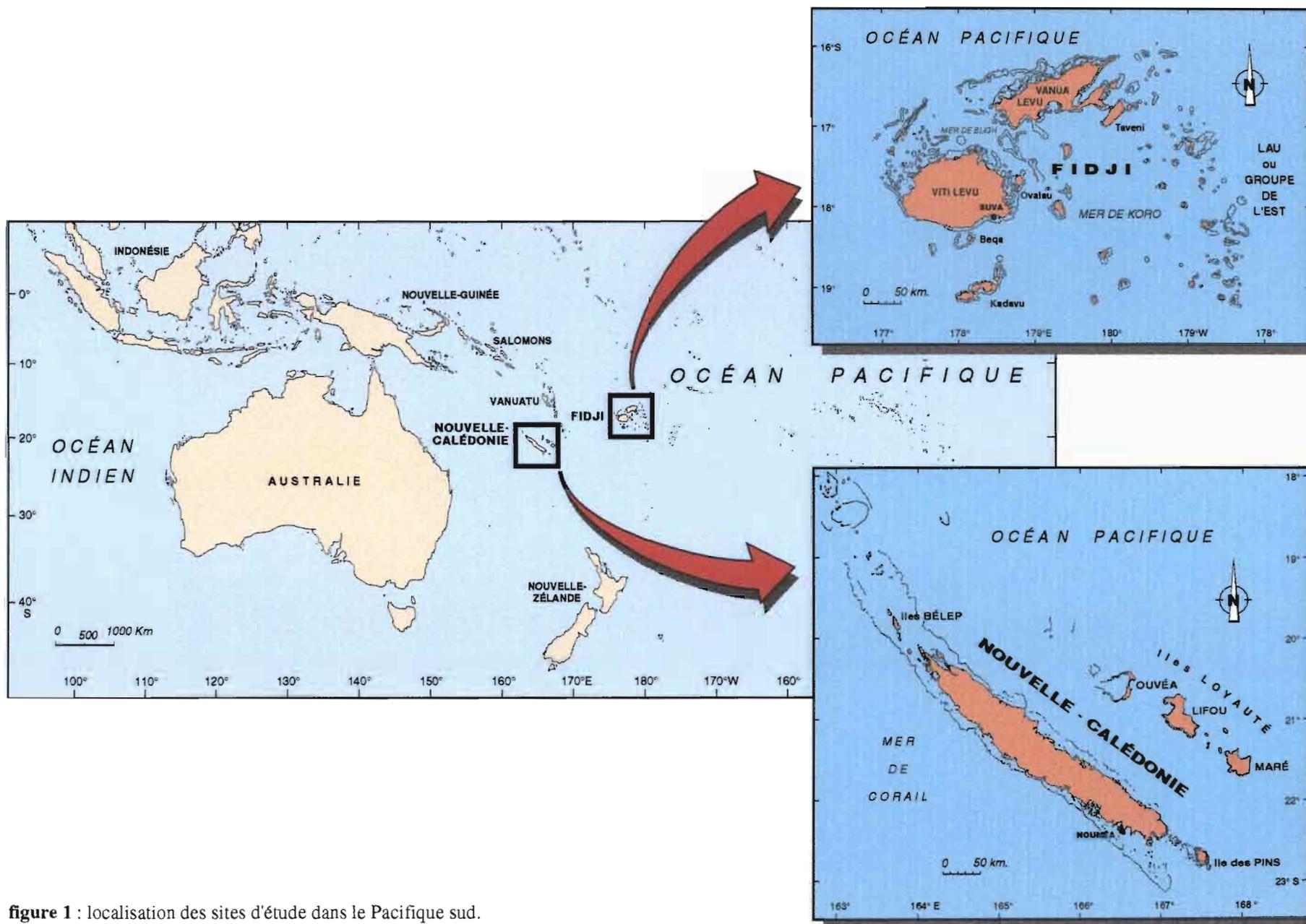


figure 1 : localisation des sites d'étude dans le Pacifique sud.

L'intense activité tectonique, en relation avec l'orogénèse alpine, associée aux périodes du Tertiaire (23 - 1.8 Ma) et Quaternaire (<1,8 Ma), explique les phénomènes d'obduction, les grandes poussées des nappes de péridotites, ainsi que le dépôt de Flysch de l'Eocène supérieur, principalement dans la partie ouest de l'île. Les couches de péridotites, principaux constituants des bassins versants de l'île, sont issues de poussées de lithosphère océanique du nord-est de l'île sur des couches sialitiques (Paris, 1981). Des mouvements tectoniques sont aussi à l'origine de la formation et de la croissance de la barrière récifale actuelle durant le Pléistocène (1.8 - 0.01 Ma) et l'Holocène (10 000 ans) (Coudray, 1975).

#### **2.2.2.2 Formation du lagon sud-ouest**

Les formations coralliennes du lagon sud-ouest de Nouméa datent du Pléistocène. Cette période de constructions coralliennes se distingue par plusieurs variations du niveau marin, impliquant émergences et immersions alternatives des coraux, et de nombreuses modifications de la géomorphologie du lagon au cours du temps. La morphologie actuelle du lagon sud-ouest rend compte de la dernière grande variation du niveau marin correspondant à la période de régression de l'âge glaciaire Würmien (18 000 ans BP). La baisse du niveau marin de -120 mètres par rapport au zéro actuel est à l'origine du creusement des vallées, canyons et passes au niveau du lagon et récif barrière, alors émergés, par les cours d'eau (Coudray, 1975).

#### **2.2.2.3 Réseau hydrographique et bassins versants**

La densité du réseau hydrographique de la Nouvelle-Calédonie contraste avec les tailles relativement modérées, voire réduites, de ses bassins versants. La forme allongée, la structure et le relief de la chaîne centrale de la Grande Terre expliquent en partie cette particularité, qui implique le faible développement de cours d'eau conséquents, en termes de débits et de tailles de lits (Moniod & Milatac, 1968).

Parmi les nombreux cours d'eau débouchant dans le lagon sud-ouest, trois grandes rivières entourent Nouméa et ont une influence au niveau du lagon (apports terrigènes, anthropiques, ...) : la Dumbéa (nord-ouest de Nouméa), la Coulée et les Pirogues (sud de Nouméa) (figure 2). Ces deux derniers cours d'eau, soumis à un régime torrentiel associé aux dépressions tropicales (décembre à mars) influencent le littoral ouest de Nouméa. En l'absence de fortes précipitations, les eaux des rivières sont limpides à l'embouchure des baies, et les phénomènes mécaniques (érosion, transport et sédimentation) sont relativement faibles, voire absents.

#### **2.2.2.4 Minéralogie des roches du bassin versant**

Les massifs de péridotites, principaux constituants des bassins versants du lagon sud-ouest de Nouméa, renferment des métaux de transition (nickel, cobalt, chrome, fer...) résultant d'un processus hypogénique d'enrichissement primaire. Ces roches ultrabasiques sont des harzburgites à orthopyroxènes (hypersthène) constituées de silicates de magnésium et de fer, et infiltrées d'autres métaux de transition (Lillie & Brothers, 1970 ; Paris, 1981). Olivine, serpentine, pyroxène et spinelles chromifères constituent généralement les minéraux primaires les plus abondants dans la roche mère (Trescases, 1997). Le lessivage des péridotites donne principalement des smectites nickélifères et ferrugineuses, de la serpentine, de la goëthite et de l'hématite. Mais l'évolution géochimique la plus importante, consécutive à cette altération, concerne la migration des métaux de transition et une forte concentration de ces derniers dans une partie du profil d'altération avec les saprolites (garniérites) et les latérites.

### 2.2.3 Courantologie

Les données courantologiques proviennent de mesures de terrain effectuées avec des courantomètres *Aanderaa* RCM7 et un courantomètre à effet doppler *RDI*.

La courantologie du lagon, générée par les marées et les vents, présente une orientation principale de direction sud-est nord-ouest (régime principal de vents du sud-est) (Douillet, 1998).

Concernant le courant de marée, la vitesse résiduelle lagrangienne de la composante principale M2 des ondes de marée est généralement utilisée pour décrire la courantologie du lagon. Le schéma classique présente une entrée de masses d'eau au sud du lagon, entre le récif barrière et l'île Ouen. Cette masse est ensuite divisée en deux veines : l'une reste en circulation dans le lagon, s'écoulant au nord et à l'est, et l'autre est évacuée par les passes de Boulari et Dumbéa principalement. Une autre masse d'eau pénètre par la passe de Uitoé, descend vers le secteur sud du lagon, et rentre en contact avec la cellule décrite précédemment, limitant ainsi la remontée de celle-ci à la passe de Dumbéa. Mais les ondes de marées présentent des intensités modérées, voire faibles, et n'expliquent pas à elles seules le mode de transport du matériel dissous et particulaire dans le lagon (Magand, 1999).

Il faut également prendre en compte les courants induits par les vents, dont l'action est importante dans un secteur à faible fond. Les simulations, calculées avec un vent dominant moyen d'orientation 110° (alizés du sud-est) et de vitesse de l'ordre de 5-10 m.s<sup>-1</sup>, montrent une courantologie relativement similaire en terme de directions, mais pas en intensité (Douillet & Lazure, 1999). La seule différence réside dans l'absence d'entrée de masses d'eau dans le lagon à partir de la passe de Uitoé. Les courants de fond sont, bien évidemment, plus faibles que les courants de surface.

## 2.3 Les îles Fidji

### 2.3.1 Géographie

L'archipel des Fidji s'étend entre 12° et 21° de latitude sud et 176° et 178° de longitude est (figure 1).

D'origine volcanique et corallienne, les îles Fidji comptent principalement quatre grandes îles, Viti Levu, Vanua Levu, Taveuni et Kandavu, auxquelles sont rattachées plusieurs centaines de petites îles et îlots. L'ensemble du territoire s'étend sur une surface de 728 000 km<sup>2</sup>, dont seulement 3% des terres (18 300 km<sup>2</sup>) sont émergées. L'île principale, Viti Levu, où se trouve la capitale Suva (figure 3), s'étend sur 10 938 km<sup>2</sup>.

Sous climat tropical, l'île de Viti Levu voit alterner une saison humide et chaude de novembre à avril et une saison plus fraîche et plus sèche de mai à octobre. Cette alternance est particulièrement prononcée dans la moitié ouest de l'île, moins exposée aux vents d'est dominants. Sur les versants est de l'île, l'air saturé en humidité est bloqué par le relief et donne en s'accumulant, de fréquentes précipitations tout le long de l'année. Les températures oscillent de 23°C à 31°C en janvier (été austral) et de 18°C à 28°C en juillet (hiver austral).

Le fleuve principal de Viti Levu, la Rewa, draine un bassin versant dont la surface occupe un quart de la surface de l'île. L'importance des précipitations (plus de 4 000 mm/an) explique le transport d'une charge solide considérable dont une fraction se retrouve piégée à l'intérieur du petit lagon

délimité par la baie de Laucala. La zone de balancement des marées en bordure du delta est constituée par une mangrove particulièrement dense.

La population fidjienne est aujourd'hui estimée à 772 600 habitants, dont 80% est installée sur les deux plus grandes îles, Viti Levu et Vanua Levu, et se répartit pour les deux tiers en zone rurale.

Suva, capitale administrative et économique, abrite environ 45% de la population urbaine de l'archipel fidjien. Les baies de Suva Harbour et de Laucala sont situés sur la côte sud-est de Viti Levu. Suva représente un pôle commercial majeur parmi les petites îles des territoires du Pacifique Sud. Depuis les années 60, l'activité commerciale du grand Suva s'est considérablement accrue, induisant une importante et constante migration de population vers cette ville. L'augmentation de l'urbanisation, l'accroissement des activités industrielles, portuaires et agricoles induisent par conséquent des problèmes de gestion des zones côtières. Les aménagements de retraitement et de stockage des déchets et effluents dans leur ensemble ne peuvent être adaptés à cette expansion constante.

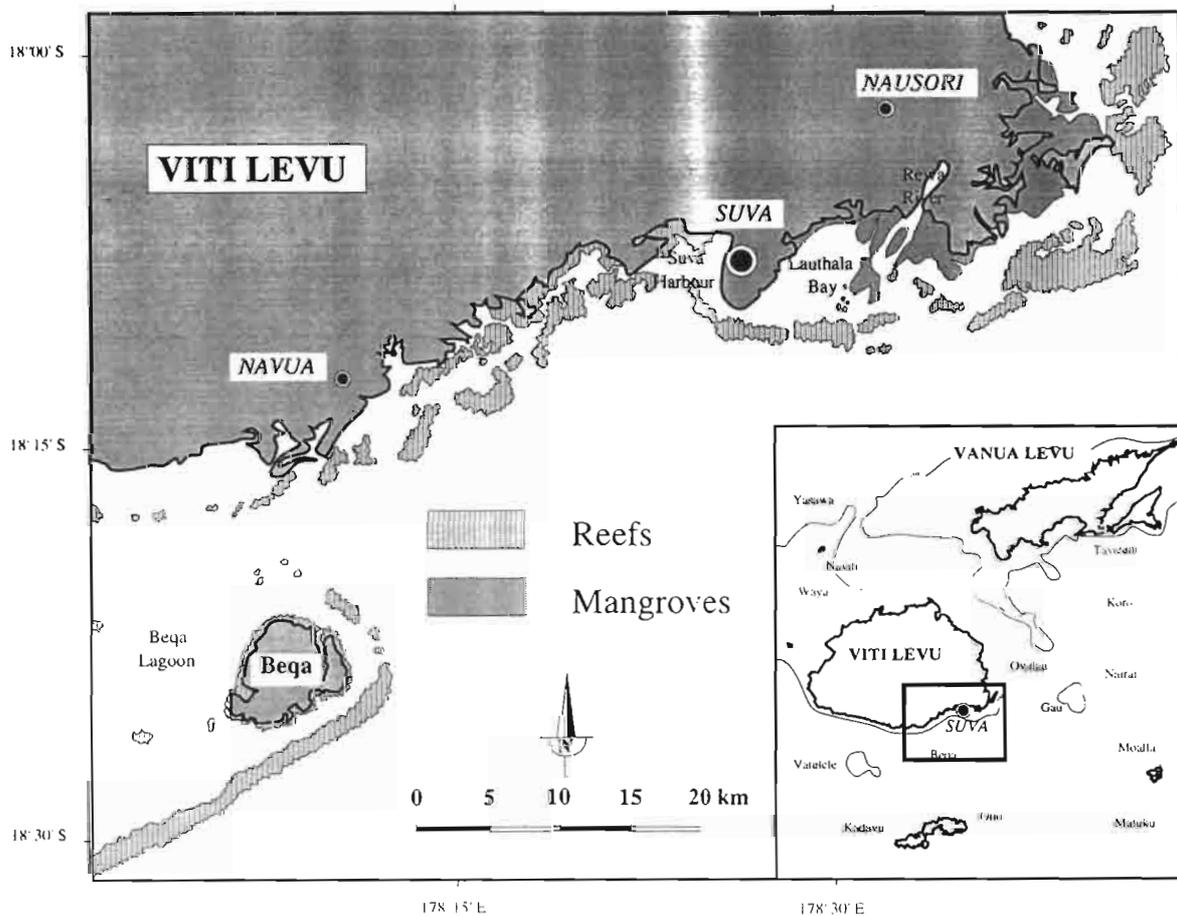


figure 3 : Iles Fidji, localisation de Suva sur Viti Levu et du lagon de Suva

## 2.3.2 Géologie

### 2.3.2.1 Cadre structural des Fidji

L'ensemble des îles qui constituent l'archipel des Fidji est situé sur la même plate-forme géologique. Les formations pré-orogéniques datées de l'Eocène au Miocène moyen se trouvent sur l'île principale, Viti Levu; la formation la plus ancienne, à l'ouest de l'île, est constituée de schistes verts dont l'origine est liée à l'omniprésence de l'activité volcanique sous-marine. Dans tout l'archipel, la déformation quaternaire se traduit par de nombreuses surfaces d'érosion soulevées et basculées.

Les plus anciennes roches de Viti Levu sont des basaltes sous-marins Eocène supérieur à Oligocène inférieur, des roches volcaniques acides, des carbonates d'eau peu profonde et des basaltes et dacites Oligocène supérieur. Elles appartiennent à l'ensemble Yavuna (arc de Yavuna).

Ces séquences rocheuses ont été recouvertes en discordance par des roches volcaniques Oligocène supérieur à Miocène moyen à supérieur, et des sédiments de l'ensemble Wainamala. Dans la partie sud-est de Viti Levu on trouve des pillow lava basaltiques de même âge appartenant à l'ensemble volcanique de Savura.

Des mélanges gabbroïques et tholeiitiques intrusifs se sont mis en place entre la fin du Miocène moyen et le début du Miocène supérieur (Colo-Plutonic-Series). Les brèches post-plutoniques, conglomérats et grès du Miocène moyen à supérieur de l'ensemble Tuva indiquent un soulèvement et l'érosion de l'arc. A partir du Miocène supérieur, les grès de Veisari (plant-bearing Veisari-Sandstone, ensemble Medrausucu) se sont déposés, avant les calcaires-Lami formés dans des conditions marines peu profondes. Ces derniers, affleurant autour de Suva, révèlent une émergence par érosion sub-aérienne qui coïncide avec l'événement Messinien. Des calcaires à foraminifères peu profonds Pliocène recouvrent cette séquence.

Des marnes post-Messinien (Suva-marl) se sont déposées sur le Pliocène inférieur (5.2 - 3.2 Ma). Des changements de faciès sont intervenus dans le bassin de la Rewa, passant de marnes profondes aux sables grossiers terrigènes de Nacua (Nacua-Sandstone) du Groupe Sédimentaire de Verata. Enfin, des sédiments fluviatiles se sont déposés au sud-est de Viti-Levu ; on les retrouve à différentes altitudes, et jusqu'à 100 m. au dessus du niveau de la mer.

Depuis la dernière remontée glacio-eustatique du niveau marin (9 600 BP), des niveaux marno-silteux enrichis en carbone organique se sont déposés dans les lagons de Viti-Levu. Shorten (1992) a mis en évidence, autour de Suva Harbour, que ces boues recouvrent en discordance le Plio-Pléistocène sous-jacent, et représentent un prisme transgressif de haut niveau (Schneider *et al.*, 1995).

### 2.3.2.2 Minéralogie des sédiments de Laucala Bay

La baie de Laucala représente un environnement de dépôt principalement contrôlé par le delta de la rivière Rewa et le récif barrière de Suva. La Rewa fournit au lagon un apport important en siliciclastiques et éléments chimiques, le récif étant le siège de la production carbonatée.

Les sédiments lagonaires de la baie de Laucala, riches en C organique, sont constitués de quatre groupes de minéraux : les minéraux détritiques, les minéraux lourds, les minéraux carbonatés et les minéraux argileux (Schneider *et al.*, 1995).

L'assemblage des minéraux détritiques comprend quartz, feldspaths alcalins, plagioclases, glauconite et pierre ponce ; la paragenèse des minéraux lourds comprend de la hornblende brune et

verte, des pyroxènes monocliniques et orthorhombiques, épidote, apatite, verre volcanique basique et minéraux opaques.

Tous les minéraux, à l'exception de la ponce et la glauconite découlent des roches volcaniques de l'île. La ponce provient des éruptions volcaniques de Tonga (Riech, 1990) alors que la glauconite est un produit typique de la diagenèse tardive des environnements deltaïques (Porrenga, 1966).

La proportion des minéraux carbonatés, calcite, calcite magnésienne et aragonite est en rapport avec les organismes présents dans le récif et le lagon. Ainsi, les foraminifères, bryozoaires et certains mollusques produisent la calcite ; la calcite magnésienne découle des algues rouges, foraminifères et échinodermes ; l'aragonite constitue le squelette des coraux scléactiniaire et des algues vertes.

L'assemblage des minéraux argileux représentant en général moins de 5% de l'ensemble du sédiment, comprend des montmorillonites-Ca, chlorite, kaolinite, et des interstratifiés illite/montmorillonite. Les montmorillonites-Ca et chlorites sont des produits de transformation des roches volcaniques, la kaolinite découle typiquement de l'altération des latérites de l'intérieur de Viti Levu.

### 2.3.3 Le lagon de Suva

Le lagon de Suva (figure 3) est composé de deux baies principales, Suva Harbour et Laucala Bay. Ces deux unités sont séparées par la presqu'île de Suva et délimitées au sud par une barrière récifale. Les deux ensembles, relativement confinés, communiquent par un étroit chenal prenant naissance entre la pointe de la presqu'île et le récif corallien tout proche à cet endroit. Ces deux baies constituent d'excellents réceptacles d'un réseau hydrologique dense dont la plus importante des rivières, la Rewa, déverse ses apports dans Laucala Bay, essentiellement par la Vunindawa river, branche ouest du delta. D'autres rivières, moins conséquentes que la Rewa, viennent également alimenter Laucala Bay et Suva Harbour.

Les deux bassins de Laucala Bay et Suva Harbour ont des surfaces couvrant respectivement environ une quarantaine et une vingtaine de km<sup>2</sup>.

Des vallées sous-marines correspondant à des exutoires fossiles vers l'océan conduisent à trois passes, Ndaveta Levu, Ndaveta Nukumbutho et Ndaveta Nukulau, dont les profondeurs atteignent respectivement, 80 m, 60 m et 30 m.

Les passes assurent l'essentiel des échanges entre le lagon et l'océan, les barrières récifales protégeant efficacement le lagon de la forte houle du Pacifique. La marée, les vents et les apports par les rivières représentent donc les seules forces capables de mettre en mouvement les masses d'eau du lagon.

Dans les zones de faibles profondeurs sont développées des formations végétales (herbiers) et coralliennes (récif frangeant côtier). De part et d'autre de la presqu'île de Suva, la mangrove occupe une large part du littoral. Cette formation végétale constitue une zone de filtre et de piégeage de matériel allochtone, apportés par les cours d'eau et le ruissellement.

### 2.3.4 La Rewa et son estuaire

La Rewa possède un important bassin versant de 2 900 km<sup>2</sup>, soit un peu plus d'un quart de la surface de l'île. En régime normal, les débits moyens journaliers sont de l'ordre de 100 m<sup>3</sup>/s, valeurs mesurées en amont de Nausori. En période de crues, le débit augmente rapidement et peut atteindre des valeurs de 10 à 20 fois plus élevées qu'en régime normal. A son arrivée en mer, la Rewa se divise en trois bras dont le plus large correspond au cours principal actuel et se jette directement dans l'océan. A l'opposé, le bras ouest, la Vunindawa River, vient alimenter le lagon à Laucala Bay. L'écoulement vers l'océan du cours principal est entravé par la présence d'une barre

sableuse à l'embouchure de la rivière. Une partie des eaux estuariennes de mélange est détournée vers le lagon par le chenal séparant Laucala Point et Nukulau Island.

Une épaisse mangrove se développe et constitue la zone deltaïque de la Rewa, favorisée par la faible profondeur et les apports d'eau douce du delta qui lui fournissent des conditions idéales de croissance.

### 2.3.5 Courantologie

L'étude hydrodynamique des deux baies de Suva et Laucala a commencé en août 1998, et les résultats des mesures effectuées sont en cours de traitement. La courantologie de la zone sera donc donnée dans les grandes lignes (Douillet, *com. pers.*).

Les forces agissant sur les masses d'eau sont principalement la marée, le vent et les arrivées d'eaux douces liées à la Rewa. Les vents dominants qui soufflent sur le lagon sont les alizés, toujours suivant la direction SE; cependant, ces vents ne sont pas permanents. Les mesures instantanées de courant montrent qu'en dehors de l'estuaire, la marée et le vent lorsqu'il est présent participent chacun pour 50 % du courant. La résiduelle eulérienne de courant obtenue par filtrage et lissage (moyenne sur 24h) représente l'influence des courants liés aux vents, et la résiduelle eulérienne de marée; elles montrent également la relation étroite entre les vents et les courants. Lorsque les alizés ne soufflent que modérément (ce qui n'arrive que sur de courtes périodes), les courants sont nuls, voire inversés ; ces derniers sont alors d'une part influencés par les mouvements de la marée (de l'ordre de 1 à 2 cm/s, déterminé sur le profil de la résiduelle), et par les masses d'eau apportées par la rivière Rewa d'autre part. Au niveau des passes, l'intensité hydrodynamique augmente. Ainsi, dans la passe Ndaveta Nukumbutho, le courant enregistré est sortant (direction 200°) et atteint des vitesses maximales de 15 cm/s au fond, et 25 cm/s en surface. Les vents, la masse d'eau en provenance de la Rewa et la topographie de la zone expliquent la direction (200°) prise par le courant.

Une veine d'eau se dirigeant de Laucala Bay vers Suva Harbour (direction 330°) a été mise en évidence dans le chenal séparant les deux baies. L'intensité de ce courant est plus conséquente que celle du précédent : les valeurs maximales sont de 30 cm/s au fond et de 40 cm/s en surface. L'effet Venturi engendré par le rétrécissement et la faible profondeur (21 mètres) au passage du courant explique cette vitesse importante.

## 2.4 Prélèvement des carottes et des sédiments de surface

Le prélèvement des trois carottes étudiées a été effectué avec un carottier réalisé au centre ORSTOM de Tahiti. Conçu pour les faibles profondeurs (< 40 m), celui-ci peut être mis en œuvre en scaphandre autonome. Long de 1m pour un diamètre externe de 22.5 cm, il est formé de deux demi coques en PVC haute densité de 8.6 mm d'épaisseur. Le carottier, dont l'extrémité inférieure est biseautée, est enfoncé manuellement dans le sédiment à l'aide d'une masse; une fois en place, son extrémité supérieure est recouverte d'un bouchon étanche et les bords du carottier sont dégagés à l'aide d'une suceuse à eau à effet Venturi. Après la mise en place du bouchon inférieur, le carottier est extrait du sédiment et remonté à la surface et transporté verticalement jusqu'au laboratoire, où il est ouvert horizontalement et découpé en différents horizons d'épaisseur égale à l'aide d'une spatule en corne.

La carotte N12 (figure 4) a été prélevée dans la Baie de Sainte-Marie (Nouméa) en 1997. Elle mesure 54 cm et a été échantillonnée en 27 horizons de 2 cm d'épaisseur.

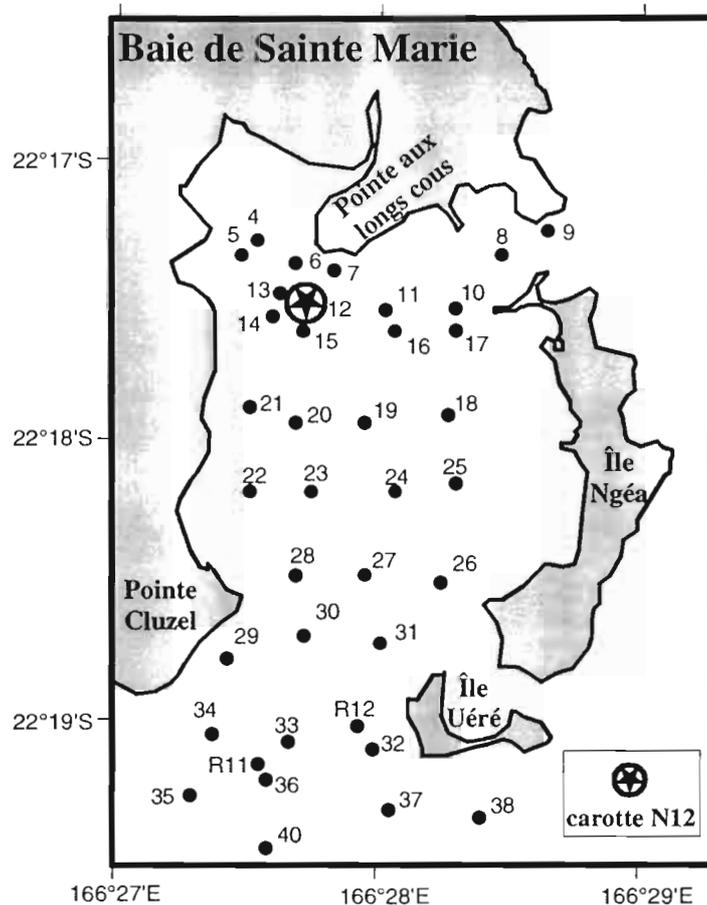


figure 4 : Echantillonnage en Baie de Sainte-Marie (Nouméa, Nouvelle-Calédonie)

Les carottes S14 et S31 (figure 5) ont été prélevées dans le lagon de Suva, respectivement à Suva Harbour et Laucala Bay, en 1998. Elles mesurent 52 et 48cm et ont aussi été échantillonnées en horizons de 2cm d'épaisseur.

Les prélèvements des sédiments de surface (figures 4 et 5) ont été réalisés à la main, ou avec une benne de type Van-Veen, constituée de deux éléments quart-cylindriques mobiles autour d'un axe. La benne descend en position ouverte jusqu'au fond à l'aide du treuil. La fermeture se fait automatiquement lors de l'impact grâce à la libération du verrouillage. Il ne reste plus qu'à remonter la benne pleine. Arrivée à la surface, celle-ci est ouverte au dessus d'un plateau en plastique, et le contenu déposé. La couche superficielle (1 cm) du sédiment est mise en sachet vinyl à usage unique (Whirl-pack), puis congelée. De retour au laboratoire les échantillons sont séchés dans une étuve à 60° jusqu'à obtention d'une masse constante.

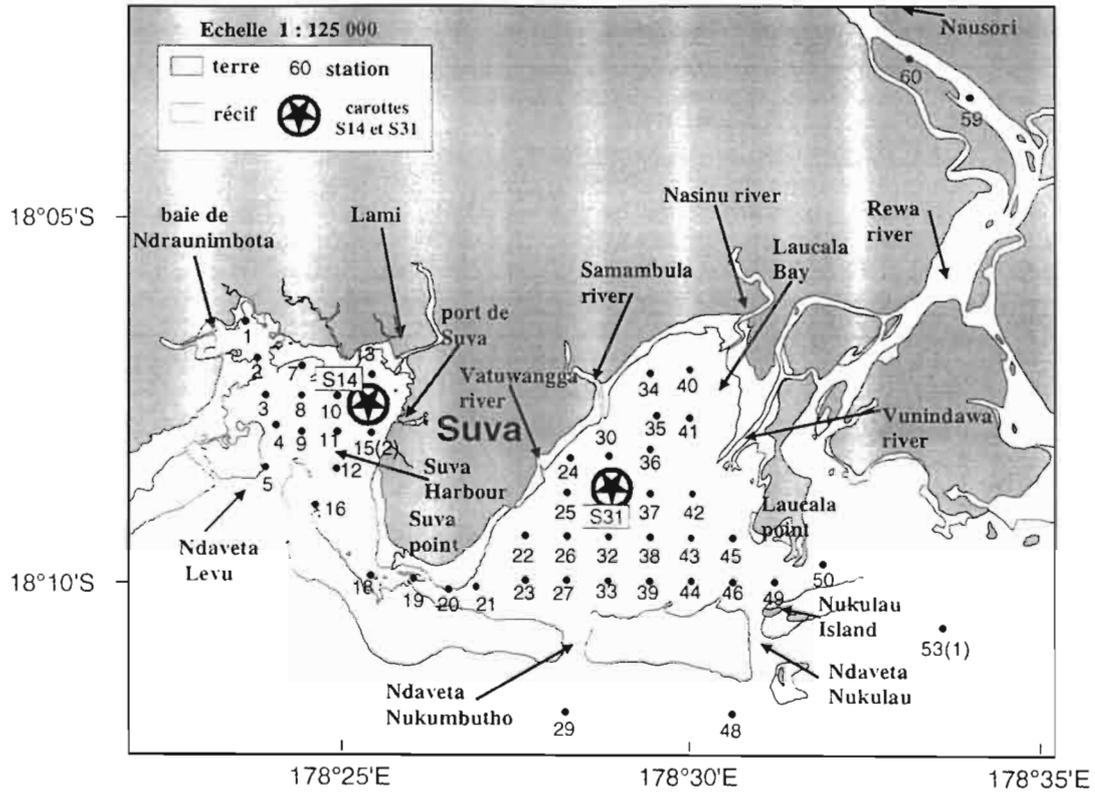


figure 5 : Echantillonnage à Suva Harbour et Laucala Bay (Fidji)

### 3. Matériel et méthodes

#### 3.1 Intérêt du dosage du coprostanol et du phosphore

Les sédiments ont la capacité de renfermer certains indicateurs inorganiques et organiques qui correspondent aux caractéristiques environnementales d'un moment donné. L'étude de l'évolution de ces composés dans des sédiments datés permet donc de reconstituer en théorie l'évolution passée des caractéristiques du milieu. Cependant, l'utilisation des archives sédimentaires pour déterminer la chronologie des apports en éléments nutritifs dans les systèmes aquatiques est relativement délicate. D'une part, une large proportion des apports organiques est minéralisée dans la colonne d'eau avant d'être intégrée aux sédiments. D'autre part, dans les sédiments eux-mêmes, les équilibres des éléments nutritifs sont profondément modifiés en fonction de processus complexes (minéralisation des composés organiques, adsorption, désorption, remise en suspension, ...) qui dépendent de nombreux facteurs environnementaux (potentiel redox, taille des particules, bioturbation, vitesse de sédimentation, ...) (Harris, 1998).

#### 3.2 Le coprostanol

Les sédiments littoraux et lagonaires peuvent recevoir une quantité non négligeable de polluants organiques qui sont soit épandus sur les sols pour l'agriculture, puis transportés vers les lagons, soit des produits dérivés de différentes activités humaines et provenant de différentes sources. Ainsi, ces polluants organiques peuvent atteindre les lagons au travers des déchets industriels et urbains. Ils peuvent être des produits organiques et/ou biologiques (Brocero, 1998; Senesi, 1993).

Le coprostanol (5  $\beta$ -cholestan-3  $\beta$ -ol) est un produit organique biologique. C'est un des principaux stérols présents dans les fèces des mammifères supérieurs, produit par réduction bactérienne intestinale du cholestérol. Ce marqueur fécal est extrêmement stable en milieu marin (Brown *et al.*, 1982). Murtaugh & Bunch ont, dès 1967, défini le coprostanol comme un biomarqueur de pollution fécale.

La détermination du coprostanol dans les sédiments des lagons de Nouméa (Nouvelle-Calédonie) et de Suva (Fidji) permet donc de déterminer l'importance de ce type de contamination dans deux environnements lagonaires très différents. Une première approche basée sur l'analyse d'échantillons de surface (53 échantillons pour Suva et 27 échantillons pour la Baie de Sainte-Marie) a pour objectif d'identifier les sources et la distribution de ce traceur. Une seconde approche basée sur l'analyse de 10 échantillons de sédiment répartis le long de la carotte datée S14 prélevée dans Suva Harbour doit permettre :

1. de tester l'hypothèse d'une conservativité de ce biomarqueur dans le temps,
2. d'évaluer les potentialités en terme d'analyse de l'évolution passée des apports anthropiques.

La méthode utilisée pour l'extraction et la séparation du coprostanol dans les échantillons ainsi sélectionnées est dérivée de la méthode initialement décrite par Chalaux *et al.* (1995).

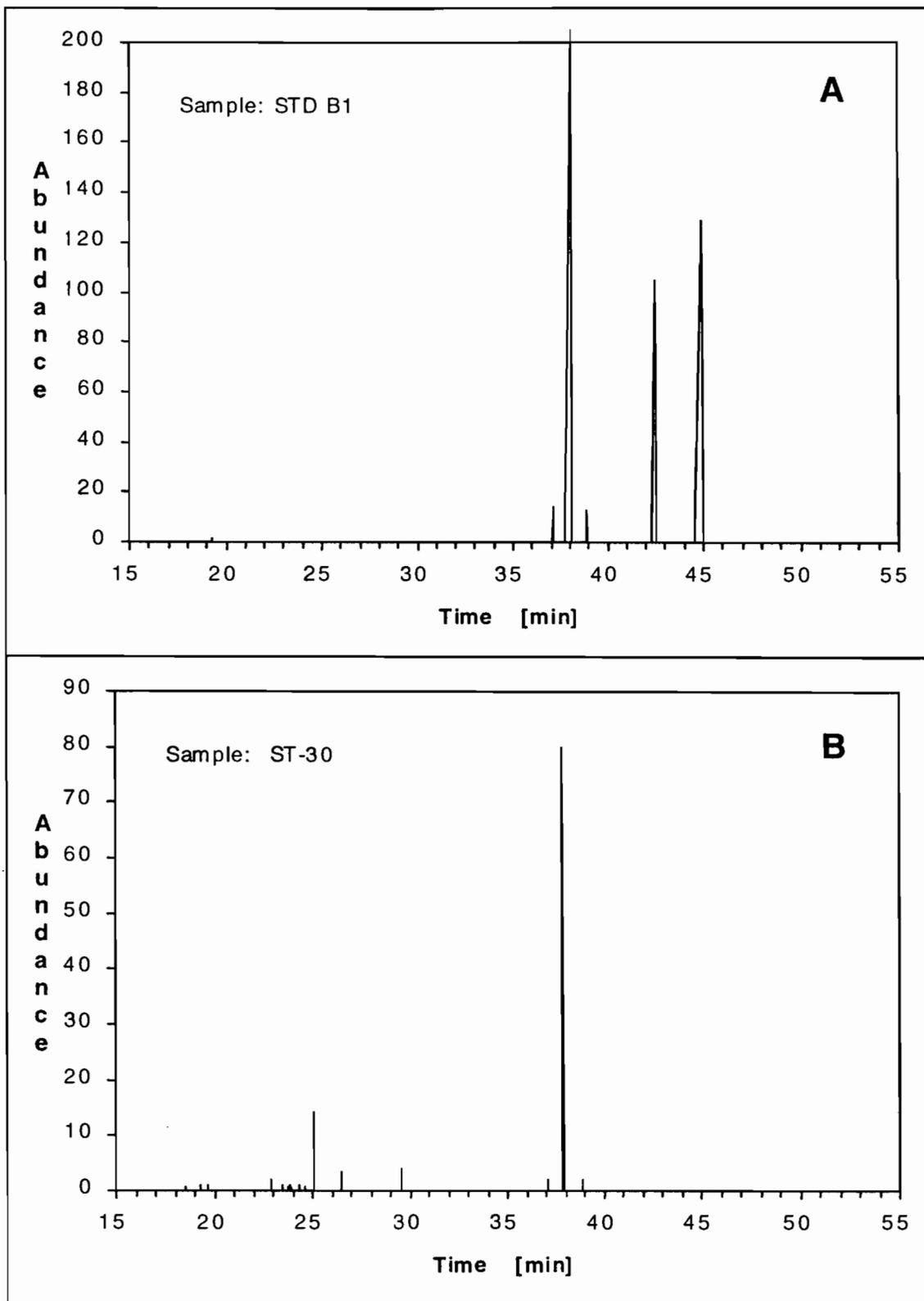


figure 6 : Chromatogrammes GC de la fraction IV. A) Standard avec des teneurs connues de prégnénolone, épi-coprostanol et cholestérol. B) Echantillon avec ajout dosé de prégnénolone

**Extraction du coprostanol :**

- Ajout de prégnénolone comme standard de recouvrement (50 µg/g de sédiment sec)
- Extraction de 10 g de sédiment sec avec 150 ml de dichlorométhane-méthanol (2:1) (10 h, Soxhlet)
- Evaporation sous azote
- Reprendre avec 1 à 2 ml d'hexane

**Colonnes de chromatographie :**

- Colonne (25 cm x 1 cm diamètre interne) remplie avec 8 g d'alumine neutre activée (120°C)

**Fractions recueillies :**

- **I** - 10 ml de n-hexane : aliphatic HC (hydrocarbons), LABs (linear alkylbenzene)
- **II** - 10 ml de dichlorométhane 10 % dans du n-hexane : LAB, TAB (tetrapropylène-based alkylbenzene), PCB (polychlorinated biphenyl)
- **III** - 10 ml de dichlorométhane : PAH (polycyclic aromatic hydrocarbons), FAME (fatty acid methyl esters), AP (alkylphosphate)
- **VI** - 10 ml de méthanol : TAM (trialkylamines) et stérols libres
- Evaporation de la fraction VI
- Formation d'un dérivé avec 100 µl de BSTFA (*N,O* - bis (trimethylsilyl) trifluoroacetamide) à 70°C pendant 1h, pour les analyses sur GC-MS

Les analyses préliminaires effectuées en GC-MS pour valider la mise au point de cette nouvelle méthode d'analyse montrent que les ajouts dosés de stéroïdes sont bien restitués (figure 6, A). Cependant, les premières analyses effectuées sur les échantillons ont produit des pics faibles à la limite du seuil de détection et qui ne permettent donc pas de doser les échantillons (figure 6, B). En présence de ces faibles concentrations en coprostanol il est donc nécessaire de passer par une étape préalable de pré-concentration incluant la colonne de chromatographie. Cette étape est actuellement en cours de développement et les échantillons devraient donc pouvoir être analysés début 2000.

### 3.3 Spéciation du phosphore

#### 3.3.1 Méthodes analytiques

Des rejets importants de phosphore ou d'azote dans le milieu marin favorisent le développement d'algues dont la prolifération puis la décomposition peuvent conduire à d'importants déséquilibres des écosystèmes marins tels les phénomènes d'eutrophisation. L'eutrophisation peut être définie comme correspondant à un enrichissement du milieu en éléments nutritifs qui conduit à une élévation de la production primaire et une modification générale du cycle du carbone.

En effectuant la spéciation du phosphore, nous considérons cet élément comme un traceur biogéochimique diagnostique d'origine (Harris, 1998), en déterminant différentes fractions chimiques correspondant à autant de sources de phosphore sédimentaire.

Pour ce faire, nous avons utilisé deux méthodes :

☞ Une première approche globale des réservoirs de phosphore par la méthode d'Aspila *et al.* (1976) (figure 7) qui permet de mesurer rapidement :

- le P total ( $P_{tot.}$ , exprimé en  $\mu\text{g/g}$ )
- le P inorganique ( $P_{inorg.}$ , exprimé en  $\mu\text{g/g}$ )
- le P organique, obtenu par différence des deux précédents ( $P_{org.}$ , exprimé en  $\mu\text{g/g}$ )

Les séparations et dosages ont été effectués à Nouméa, au laboratoire de chimie de l'IRD. La méthode colorimétrique de Murphy & Riley (1962) a été employée pour doser les teneurs de P total et P inorganique, sur *Technicon* par flux segmenté.

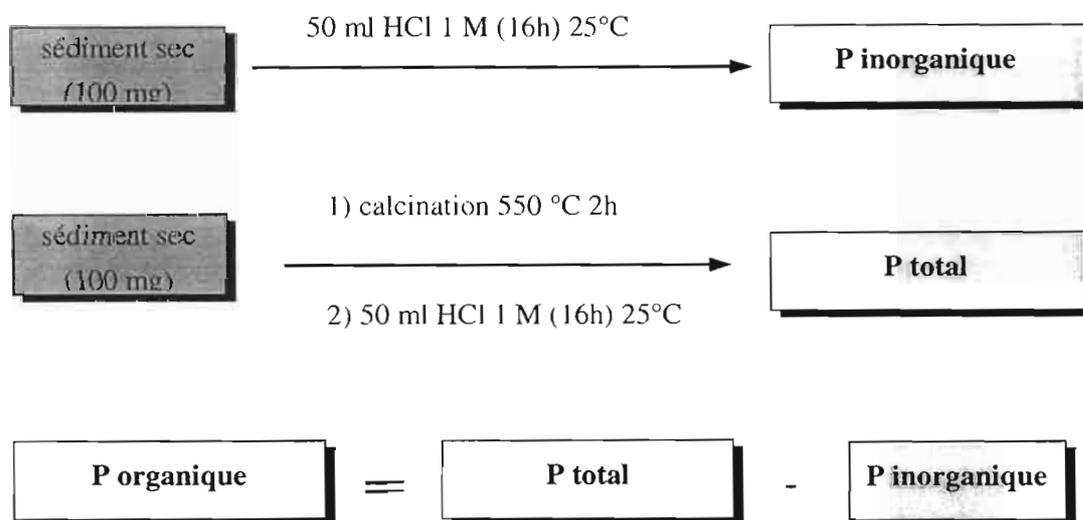


figure 7 : Détermination du phosphore organique, inorganique et total d'après Aspila *et al.* (1976); le dosage est effectué sur l'extractant acide

☞ Une étude plus approfondie basée sur la technique d'extraction séquentielle de Filippelli & Delaney (1996) (figure 8), d'après Ruttenberg (1992).

Les méthodes de spéciation du phosphore, largement utilisées dans les sols, les lacs ou les rivières (Lucotte & d'Anglejan, 1985 ; Rippey & Anderson, 1996 ; Golterman, 1996) ont peu été utilisées dans les sédiments marins (Hieltjes & Lijklema, 1980 ; Ruttenberg, 1992 ; Harris, 1998). Elles sont basées sur l'extraction séquentielle du phosphore adsorbé sur une phase particulière. Pour cela, on utilise des extractants susceptibles de réagir avec une partie spécifique des composés présents dans les sédiments. La méthode décrite par Filippelli & Delaney (1996) permet de déterminer quatre différents réservoirs de P dans la matrice sédimentaire :

- P lié aux oxy-hydroxydes de Fe et Mn ( $P_{ox.-hydrox.}$ , exprimé en  $\mu\text{g/g}$  de sédiment)
- P lié aux carbonates associés à l'apatite biogénique et à la fluorapatite authigénique [ $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3(\text{OH}, \text{F}, \text{Cl})$ ] ( $P_{carb.}$ , exprimé en  $\mu\text{g/g}$  de sédiment)
- P inorganique restant plus l'apatite détritique ( $P_{détr.}$ , exprimé en  $\mu\text{g/g}$  de sédiment)
- P organique ( $P_{org.}$ , exprimé en  $\mu\text{g/g}$  de sédiment)

Ces analyses ont été effectués à l'IRD de Nouméa, les extractions séquentielles au laboratoire de géochimie, les dosages au laboratoire de chimie. Le P ox.-hydrox., ainsi que le Fe et Mn liés à cette fraction ont été dosés sur un ICP-OES Perkin-Elmer Optima 3300DV. Les trois autres fractions ont été dosées sur Technicon, suivant la même méthode que précédemment.

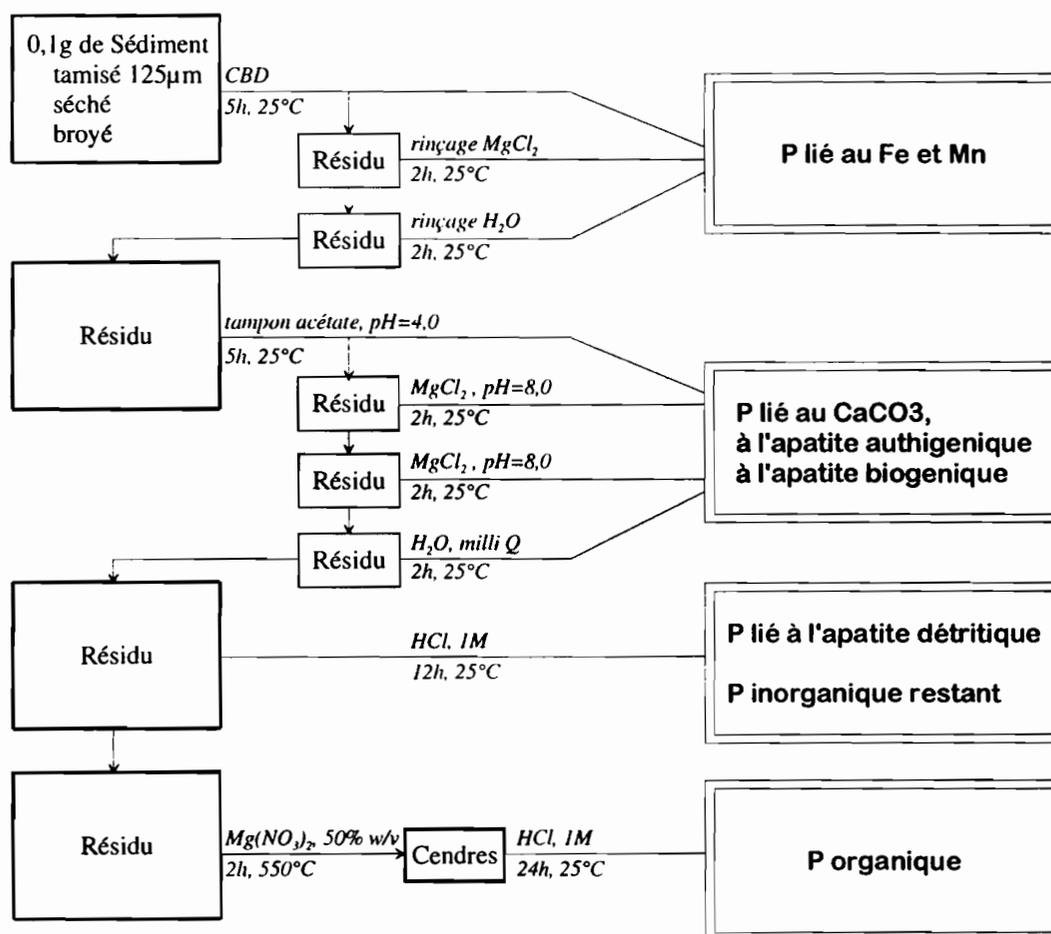


figure 8 : Schéma d'extraction séquentielle du phosphore d'après la méthode de Filippelli & Delaney (1996)

### 3.3.2 Impondérables analytiques

A Neuchâtel, P. Steinmann a décidé de réactualiser la méthode d'extraction du coprostanol préconisée dans le projet initial.

Ici, à Nouméa, j'ai installé une méthode d'extraction séquentielle du phosphore. Ce type d'analyse n'avait pas encore été réalisé dans les laboratoires de Nouméa.

Nous avons donc mis en place de nouveaux protocoles dans nos laboratoires respectifs, et nous avons dû composer avec les impondérables, car la mise en place d'une analyse, quelle qu'elle soit, est toujours longue, exigeant le temps nécessaire, d'une part à l'acquisition du matériel, et d'autre part aux nombreux essais préliminaires. La mise en place d'un protocole est donc aléatoire lorsque les limites de temps sont imposées.

Au terme de cette année de travail, les deux protocoles ont été mis en place.

Cependant :

- les dosages du coprostanol sont en cours à Neuchâtel, et se poursuivront jusqu'à ce que l'étude prévue initialement soit achevée. Les résultats seront intégrés à des rapports IRD ultérieurs, et aux articles toujours en prévision, mais, incomplets, ils ne seront pas exposés dans ce rapport.
- La mise en place du protocole d'extraction séquentielle du phosphore a été réalisée. Toutefois, certains problèmes rencontrés au niveau du dosage ne permettent pas pour l'instant, dans le cadre du présent rapport, de dépasser le cadre de l'analyse des tendances générales.

Les problèmes analytiques rencontrés sont probablement à mettre en relation avec des problèmes d'évolution des matrices d'extraction. Pour des questions de rationalisation de temps et d'occupation des appareillages de mesure en laboratoire, les dosages n'ont pas été effectués immédiatement après les extractions, mais avec un décalage variant de une à quatre semaines. Sur une même carotte (S31), les solutions dosées respectivement à 8 jours et 32 jours de l'extraction ont montré des différences anormales. L'examen des différentes hypothèses explicatives montre que les solutions renfermant les fractions de P extraits sont vraisemblablement instables dans le temps.

Certains tests semblent donc encore nécessaires afin de procéder à l'ajustement correct de la méthode.

Les difficultés exposées conduisent à rester circonspect au regard des concentrations absolues des teneurs de P, même si les profils obtenus ont des tendances évolutives comparables à celles des études précédentes menées sur les métaux dans les sédiments (Breau, 1998, Cadiou, 1999).

### 3.4 Récapitulatif des données précédemment obtenues

Les principales caractéristiques géographiques, géologiques et géochimiques des carottes étudiées (Breau, 1998, Cadiou, 1999) sont résumées dans les deux tableaux suivants.

	N12	S14	S31
<i>Lieu</i>	Nouvelle-Calédonie, Nouméa : Baie de Sainte-Marie	Fidji, Suva : Suva Harbour	Fidji, Suva : Laucala Bay
<i>Profondeur</i>	13.2 mètres	18 mètres	11 mètres
<i>Longitude (carte)</i>	166° 27.61 E	178° 25.014 E	178° 28.886 E
<i>Latitude (carte)</i>	22° 17.60 S	18° 07.228 S	18° 08.780 E
<i>Situation géographique</i>	Fond de baie, sédiments oxydés	Fond de baie, émissaires, sédiments réduits	Zone d'influence d'une buse de rejets domestiques et apports terrigènes importants
<i>Densité humaine</i>	<i>à l'échelle des états insulaires du Pacifique</i>		
	moyenne	moyenne	faible
<i>Activité anthropique</i>	Habitat élevé	Habitat élevé Forte industrialisation Zone portuaire	Habitat faible Très forte activité agricole, forte activité industrielle Nombreux émissaires, dont la Rewa

tableau 1 : Caractéristiques géographiques des trois carottes

	N12	S14	S31
<b>Longueur</b>	54 cm	52 cm Mise en évidence d'une surface lithologique* à 40 cm.	48 cm
<b>Age du dernier horizon</b>	~ 130 ans	~ 60 - 65 ans	~ 40 ans
<b>Taux de sédimentation</b>	~ 0.4 cm/an (0 - 30 cm) ~ 0.2 cm/an (30 - 54 cm)	~ 0.8 cm/an	~ 1.2 cm/an
<b>Épaisseur de la couche bioturbée</b>	23 - 25 cm	6 - 8 cm	10 cm
<b>Granulométrie : taux de pélites, fraction &lt; 40µm</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 0 - 11 cm : ↘ de 60 à 55%</li> <li>• 11 - 23 cm : ↗ de 55 à 60%</li> <li>• 23 - 53 cm : ↘↘ jusqu'à 50%</li> <li>↔ ↗ des apports terrigènes</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 0 - 20 cm : ~ 60%</li> <li>• 20 - 40 cm : ~ 80%</li> </ul>	Relativement constant : 70 - 75%
<b>Phase organique (fraction &lt; 40µm)</b>	Taux de MO (perte au feu) : <ul style="list-style-type: none"> <li>• En moyenne 9.9% de M.O.</li> <li>• ↗ du taux de M.O. de 9% de la base au sommet de la carotte</li> </ul>	Entre 15 et 35% ⊃ dépendant des apports des rivières et émissaires naturels	<i>en cours</i>
<b>Taux de C.O. élémentaire (fraction &lt; 40µm)</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• En moyenne 0.7% de C.O.</li> <li>• ↗ du taux de C.O. de 37% de la base au sommet de la carotte</li> </ul>	-	<i>en cours</i>
<b>Taux de CaCO<sub>3</sub> (fraction &lt; 40µm)</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• couche bioturbée : 42%</li> <li>• 23 cm - 54 cm : 54%</li> <li>⊃ ↘ de l'influence marine</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 0 - 10 cm : de 3 à 5%</li> <li>• 10 - 40 cm : 1.7%</li> <li>⊃ influence marine très faible</li> </ul>	<i>en cours</i>

tableau 2 : Caractéristiques géologiques et géochimiques des trois carottes

\* Le profil de distribution du  $^{210}\text{Pb}$  le long de la colonne S14 a été obtenu par comptage alpha des particules alpha émises par son descendant en équilibre séculaire, le  $^{210}\text{Po}$ . L'allure générale du graphique a conduit à renouveler les mesures à partir du comptage direct par spectrométrie gamma de la radioactivité du  $^{210}\text{Pb}$ . Les deux différentes techniques de mesure ont montré des valeurs équivalentes pour chaque niveau sédimentaire dont la radioactivité présente des anomalies remarquables avec la profondeur.

Dans cette carotte, la couche de surface qui résulte des phénomènes de bioturbation est relativement limitée (6 à 8 cm). Cette condition, favorable et nécessaire à la technique de datation par le  $^{210}\text{Pb}$  est cependant entravée par la présence successive de deux couches sédimentaires présentant des niveaux de radioactivité anormaux. En effet, la décroissance linéaire, en échelle logarithmique, est interrompue à une vingtaine de centimètres de profondeur, un deuxième segment de droite s'intercale sur une dizaine de centimètres, puis un troisième dans la partie inférieure de la carotte. Les interruptions sont à mettre en parallèle avec la présence d'une interface lithologique supposée à une profondeur de 40 cm (Cadiou, 1999 ; Fernandez, comm. pers.).



## 4. Résultats sur le Phosphore

### 4.1 Approche globale

Les teneurs en phosphore total (P tot.), inorganique (P inorg.) et organique (P org.) déterminées pour les trois carottes d'après la méthode d'Aspila *et al.* (1976) sont représentées figure 9, en fonction de la profondeur, et comparées avec la somme des quatre phases d'extraction séquentielles.

#### Carotte N12

- P tot. : les concentrations augmentent faiblement du fond jusqu'à la limite inférieure de la couche bioturbée (23 cm), puis reste constant sur toute l'épaisseur de la couche bioturbée. Les teneurs sont comprises entre 400 et 515  $\mu\text{g/g}$ .
- P inorg. : les teneurs présentent les mêmes tendances que le P tot., et sont comprises entre 309 et 391  $\mu\text{g/g}$ .
- P org. : les teneurs présentent un profil à peu près rectiligne, avec une légère augmentation entre 55 et 23 cm, et des teneurs comprises entre 72 et 143  $\mu\text{g/g}$ , si l'on fait exception du niveau 33 cm.

#### Carotte S14

*Remarque* : les profils présentent deux ruptures de pente, à 35 et 40 cm. Il a été signalé précédemment que la profondeur 40 cm présentait une interface lithologique (\*, tableau 2). Les profils laissent supposer que la zone 35 – 40 cm est une zone de remaniement. De ce fait, la partie de la carotte située en dessous de 35 cm n'a pas été prise en compte dans le cadre de l'analyse du continuum temporel.

- P tot. : les concentrations augmentent de 126  $\mu\text{g/g}$  (35 cm) à 382  $\mu\text{g/g}$  (5 cm), puis sont constantes entre 5 cm et la surface.
- P inorg. : les teneurs présentent les mêmes tendances que pour le P tot., avec une augmentation de 86 à 269  $\mu\text{g/g}$  entre 35 cm et la surface.
- P org. : les teneurs présentent une augmentation plus modérée puisque de 39  $\mu\text{g/g}$  à 35 cm elles atteignent 118  $\mu\text{g/g}$  dans les 5 premiers centimètres de sédiment.

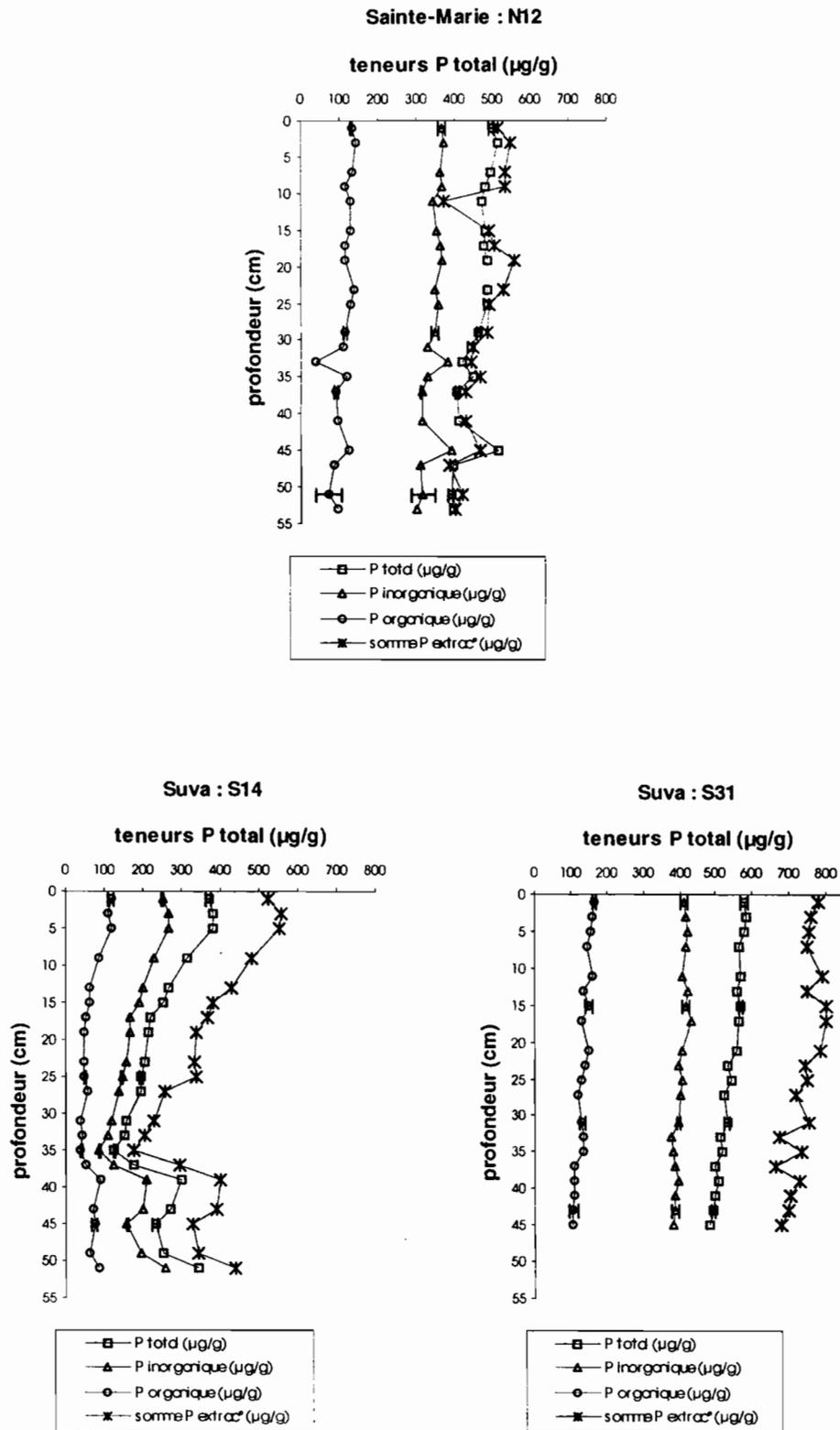


figure 9 : Evolution des concentrations en phosphore total, inorganique et organique ( $\mu\text{g/g}$ ) en fonction de la profondeur

### Carotte S31

Cette carotte présente des profils remarquablement linéaires du fond jusqu'à la surface, avec, pour les trois phases, les valeurs les plus élevées des trois carottes.

- P tot. : les concentrations augmentent légèrement de 485  $\mu\text{g/g}$  au fond jusqu'à 582  $\mu\text{g/g}$  en surface.
- P inorg. : les concentrations augmentent légèrement de 377  $\mu\text{g/g}$  au fond jusqu'à 435  $\mu\text{g/g}$  en surface.
- P org. : les concentrations augmentent légèrement de 104  $\mu\text{g/g}$  au fond jusqu'à 164  $\mu\text{g/g}$  en surface.

Deux remarques peuvent être appliquées aux trois carottes :

- la fraction inorganique est toujours dominante, particulièrement dans les carottes N12 et S31.
- Pour les trois carottes, les valeurs les plus élevées de P org. se situent toujours dans les 5 premiers centimètres, puis diminuent de la surface vers la profondeur. Trois causes, qui ne sont pas indissociables peuvent être évoquées pour expliquer ce phénomène : les processus de minéralisation de la matière organique avec l'enfouissement, une augmentation des apports terrigènes, et les modifications de la qualité de la matière organique (plus ou moins réfractaire).

## 4.2 Extractions séquentielles

### Carotte N12

*Remarque* : les valeurs de l'échantillon à 11 cm ne sont pas prises en considération, correspondant probablement à un artefact.

- Le profil des quatre fractions montrent une nette discontinuité au niveau de la limite de la couche bioturbée (23 cm).
- La fraction ox.-hydrox. est largement majoritaire, représentant en moyenne 51% de l'ensemble des fractions (P carb.  $\approx$  29% ; P détr.  $\approx$  8% ; P org.  $\approx$  12%).
- Les fractions P org. et P détr. augmentent légèrement du fond jusqu'à 23 cm, puis très nettement au dessus de la limite de bioturbation (respectivement de facteurs 7.8 et 2.8). Le P détr. est relativement constant jusqu'à 23 cm, puis augmente d'un facteur 8.5 jusqu'en surface.
- A l'opposé, le P carb. est relativement constant du fond jusqu'à 23 cm, puis diminue d'un facteur 4.7 dans la couche bioturbée.

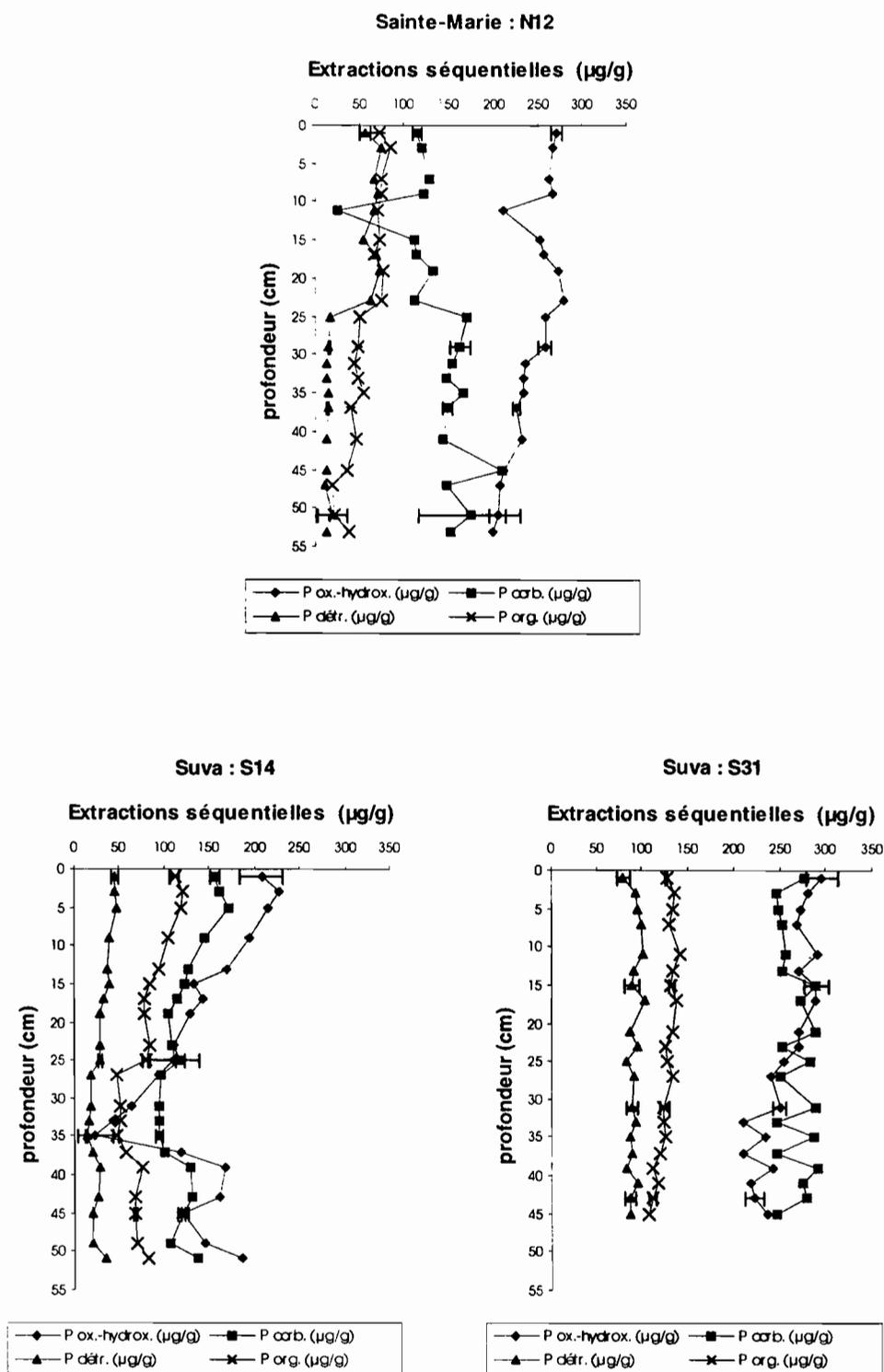


figure 10 : Evolution des concentrations des quatre phases de phosphore (extractions séquentielles,  $\mu\text{g/g}$ ) en fonction de la profondeur

**Carotte S14**

- De 35 cm jusqu'à la surface, le profil des quatre fractions montre une augmentation.
- La fraction ox.-hydrox. est majoritaire, représentant en moyenne 38% de l'ensemble des fractions (P carb.  $\approx$  33% ; P détr.  $\approx$  8% ; P org.  $\approx$  21%).
- Les fractions P org., P détr. et P carb. ont des profils constants de 35 cm à 27 cm, augmentent brusquement entre 27 et 25 cm, puis continuent à augmenter plus légèrement jusqu'en surface. Globalement, ils augmentent respectivement de facteurs 6.2, 7 et 4.5 entre le fond et la surface.
- Le P ox.-hydrox. augmente d'un facteur 9 entre 35 cm et la surface du sédiment.

**Carotte S31**

- Les profils de la carotte S31 sont globalement très constants.
- Les fractions P détr. et P org. ont des valeurs nettement inférieures à celles des fractions P ox.-hydrox. et P carb.. Les fractions P ox.-hydrox. et P carb. représentent en moyenne 35% et 36% de l'ensemble des fractions (P détr.  $\approx$  12% ; P org.  $\approx$  17%).
- Les fractions P ox.-hydrox., P org. et P détr. augmentent légèrement de facteurs 2.9, 2.4 et 2.2 jusqu'à la limite inférieure de la couche bioturbée (10 cm), puis diminuent très légèrement jusqu'en surface.
- Le P carb. diminue régulièrement d'un facteur 1.5 entre 46 cm et la surface.

teneurs	<i>P ox.-hydrox.</i>		<i>P carb.</i>		<i>P détr.</i>		<i>P org.</i>	
	max ( $\mu\text{g/g}$ )	min ( $\mu\text{g/g}$ )	max ( $\mu\text{g/g}$ )	min ( $\mu\text{g/g}$ )	max ( $\mu\text{g/g}$ )	min ( $\mu\text{g/g}$ )	max ( $\mu\text{g/g}$ )	min ( $\mu\text{g/g}$ )
<i>N12</i>	280	199	210	111	74	11.	85	19
<i>S14</i>	227	23	172	94	47	14	121	46
<i>S31</i>	296	210	290	246	103	80	141	107

*tableau 3 : Teneurs maxima et minima obtenues pour les quatre fractions des extractions séquentielles de P*



## 5. Discussion et conclusions

### Comparaison des deux séries de résultats

- La somme des valeurs des extractions séquentielles (quatre réservoirs de P) reportée sur les diagrammes de la figure 9 montre des valeurs de P total supérieures à celles obtenues avec la méthode de l'approche globale du phosphore (deux réservoirs de P isolés).
- Cependant, la méthode globale permet une bonne approche du problème car, pour les deux méthodes, les courbes obtenues montrent les même tendances, et la fraction du P inorganique domine celle du P organique (tableau 4).
- Les teneurs en P org. déterminées par la méthode d'extractions séquentielles sont plus faibles que celles déduites de la méthode globale. Cette différence résulterait, soit d'une surestimation du P org. par la méthode globale, due à une solubilisation partielle après calcination du P inorg. (dans les sédiments carbonatés, les risques d'erreur dus à la calcination sont plus élevés), soit d'une sous-estimation de la méthode d'extractions séquentielles, due à une pré-extraction du P org. au cours des premières étapes (Ruttenberg, 1992, Harris, 1998).

	<i>Approche globale</i>		<i>Extractions séquentielles</i>			
	P inorganique (%)	P organique (%)	P ox.-hydrox. (%)	P carb. (%)	P détr. (%)	P org. (%)
<i>N12</i>	72 - 81	19 - 28	49 - 54	22 - 38	3 - 14	5 - 16
<i>S14</i>	68 - 71	29 - 32	13 - 41	29 - 53	8	22 - 26
<i>S31</i>	72 - 79	21 - 28	32 - 38	36 - 37	10 - 13	16 - 18

*tableau 4 : Intervalles de pourcentages des fractions de P obtenues par les deux méthodes d'extraction*

L'interprétation environnementale est basée sur l'analyse des valeurs issues des extractions séquentielles.

### Baie de Sainte-Marie, Nouméa, Nouvelle-Calédonie

Breau (1998), dans son étude de l'évolution de la fraction péritique de la carotte N12, a mis en évidence une augmentation importante d'apport et de dépôt de particules fines dans la Baie de Sainte-Marie au cours du temps, associée à une diminution des carbonates. Les modifications de la composition des sédiments indiquent que les apports d'origine terrigène exercent une influence croissante depuis les 50 dernières années. Cette hypothèse est confortée par la mise en évidence d'une hausse significative des concentrations totales de certains métaux (Ni, Fe, Mn, Zn, Cr). De

plus, l'étude des teneurs relatives de ces métaux montre clairement que des changements se sont produits dans la composition du matériel particulaire déposé : enrichissement progressif en Ni, Mn et Zn et appauvrissement en Fe et Cr. Ces modifications géochimiques coïncident avec le développement de l'exploitation minière à ciel ouvert (entraînant déforestation et érosion) dans le sud de l'île au siècle dernier. Le changement important du régime de sédimentation a été daté approximativement, et est inclus dans un intervalle allant de 1933 à 1953 (niveau 31 cm daté à  $1943 \pm 10$ ). Bien qu'une signature terrigène soit identifiée, l'augmentation de ces apports a donc une origine anthropique essentiellement attribuable aux activités de prospection et d'exploitation minières dans le sud de l'île.

Les quatre fractions de P montrent une légère augmentation à ce niveau, mais une réelle rupture de pente est observable à 25 cm, où le P carb. diminue alors que les trois autres fractions augmentent. La diminution du réservoir carbonaté allant de pair avec l'augmentation des réservoirs terrigènes est en adéquation avec l'interprétation qui avait été donnée par Breau (1998), concluant à une diminution de l'influence marine dans cette baie.

Il faut également noter que, dans les années 1980, les aménagements côtiers effectués en Baie de Sainte-Marie (1986) ont conduit à l'élimination de la mangrove sur pratiquement l'ensemble de ce littoral. Depuis, l'augmentation de la population, le défaut d'équipement en terme d'épuration des eaux usées et la disparition d'un filtre naturel se sont combinés pour générer une forte élévation des rejets anthropiques se traduisant par une eutrophisation significative du milieu (Labrosse *et al.*, 2000).

L'apport de nutriments dans la baie de Sainte-Marie correspondant plutôt à des rejets domestiques, il serait intéressant d'effectuer la spéciation de phosphore également sur les sédiments de surface afin de juger de l'évolution des réservoirs de phosphore dans l'espace, et d'avoir une meilleure appréciation des rejets de cet élément eutrophisant dans le milieu. Ces résultats seraient à mettre en étroite corrélation avec ceux obtenus pour le coprostanol, aussi bien en surface qu'en terme d'archives sédimentaires.

#### Suva Harbour et Laucala Bay, Suva, Fidji

L'étude du lagon du Suva étant en cours (en particulier l'étude géochimique approfondie de la carotte S31), l'interprétation des résultats est donnée pour l'ensemble du lagon.

Les conclusions de Cadiou (1999) sur la détermination du niveau d'anthropisation du lagon de Suva rapportent que l'étude des phases géochimiques des sédiments met en exergue une évidente influence terrigène se traduisant par des teneurs élevées en matière organique, composés oxydés et surtout détritiques. En raison de l'existence d'un réseau hydrographique dense et de conditions climatiques tropicales, l'ensemble du lagon subit cette influence, et plus particulièrement Laucala Bay qui reçoit des volumes importants de matériel particulaire apportés par la Rewa river. L'analyse séquentielle des métaux révèle que les principales sources d'apports sont étroitement reliées aux rejets anthropiques : zone portuaire de Suva, décharge de Lami.

Les extractions séquentielles du phosphore montrent également l'augmentation de l'influence terrigène au cours du temps. Cependant, Suva Harbour et Laucala Bay ne subissent pas les mêmes variations environnementales. Suva Harbour voit une augmentation importante des teneurs de phosphore dans les quatre réservoirs, avec une surprenante évolution de la phase liée aux oxyhydroxydes de Fe et Mn. Il est encore trop tôt, à ce stade du travail, pour proposer une interprétation fiable et argumentée de cette tendance évolutive

A Laucala Bay, la sédimentation semble plus régulière et les évolutions sont plus mesurées. La diminution de la phase carbonatée couplée à l'augmentation de la phase réductible (ox.-hydrox.) montre l'influence des apports allochtones. Les teneurs de P org. sont les plus élevées des trois

carottes, résultat à mettre en relation avec l'importante activité agricole pratiquée en amont, induisant un apport de matériel organique plus conséquent, et certainement qualitativement différent, que celui des zones industrialisées (S14) ou urbanisées (S14, N12).

Comme pour Nouméa, l'étude du phosphore dans les sédiments de surface constituerait un complément nécessaire à une bonne interprétation environnementale.

Les différences observées entre les deux sites peut être interprétée par une influence anthropique significative sur Suva Harbour, alors que l'énorme inertie du flux terrigène l'emporte sur toutes les observations faites sur Laucala Bay.



## 6. Prospectives

Les conclusions données, en particulier en ce qui concernent le site de Suva, soulignent l'intérêt d'une étude approfondie de la matière organique dans le cadre d'une telle étude environnementale.

Les trois carottes sont en aval d'environnements différents, et de sources d'apports différentes. Concernant la spéciation du phosphore, selon H. Golterman (*comm. pers.*), le fractionnement de l'apatite en deux réservoirs distincts (P carb. et P détr.) ne constitue pas la meilleure approche pour la caractérisation des réservoirs de phosphore. Une étude approfondie de la fraction organique serait plus intéressante, l'effort devant être plutôt porté sur le fractionnement du phosphore organique en deux ou trois réservoirs, pour évaluer en particulier le P org. réfractaire. La caractérisation des substances humiques, matériau réfractaire (difficilement dégradable) constituerait un bon complément à cette étude, en parfaite adéquation avec l'objectif de différencier les apports terrigènes et anthropiques des sources naturelles d'enrichissement des sédiments des lagons. Elle indiquerait précisément la source d'apport de la matière organique : autochtone (marine) ou terrigène. Mise en relation avec les études sédimentologiques et géochimiques en cours ou achevées, elle permet également de caractériser les flux sédimentaires. L'étude des phénomènes de complexation des substances humiques avec les majeurs (P, agent eutrophisant) et les éléments trace déjà dosés viendrait renforcer les conclusions en cours.

Pour que les conclusions à cette année de recherche soient complètes, les résultats de plusieurs analyses toujours en cours manquent encore :

1. la répartition spatiale du phosphore et du coprostanol
2. les dosages de C, H, N, O, S, P élémentaires et de COT (carbone organique total), pour évaluer et préciser l'évolution de la matière organique (MO) dans les sédiments (surface et archives sédimentaires)

En proposition : la caractérisation des substances humiques

Les dosages élémentaires et le COT permettraient de préciser l'origine de la MO.

La mise en commun de l'ensemble de ces données nous permettront d'affirmer l'origine et le devenir du cortège organique, du P et d'une fraction des métaux (effluents domestiques ou terrigènes), aussi bien dans les sédiments de surface que dans les archives sédimentaires.



## Références bibliographiques

- ASPILA K.I., AGEMIAN H. & CHAU A.S.Y., 1976. A semi-automated method for the determination of inorganic, organic and total phosphate in sediments. *Analyst*, 101, pp. 187-197.
- BREAU L., 1998. Extractions séquentielles et analyses de métaux dans une carotte de sédiments lagonaires datée : mise en évidence de l'évolution des apports terrigènes liée aux activités humaines au cours du dernier siècle. *Rapport de DEA*, Univ. Aix-Marseille II, 60 p.
- BROCERO S., 1998. Impacts anthropiques sur les écosystèmes littoraux de l'île Maurice (océan Indien). Etude géochimique des sédiments de lagons à l'interface eau-sédiment. Minéralogie, dosage des éléments majeurs et des éléments traces, caractérisation de la matière organique. *Thèse Doct., Faculté des Sciences de Neuchâtel (Suisse)*, 93p.
- BROWN R.C., WALKER R.W., WUN C.K., & LITSKY W., 1982. Coprostanol as an indicator of fecal pollution. *CRC Critical Reviews in Environmental Control*. Paper n°2402, Massachusetts Agricultural Experiment Station, University of Massachusetts, Amherst., pp 91-112.
- CADIOU G., 1999. Détermination du niveau d'anthropisation du lagon de Suva (Fidji) : étude de la biodisponibilité potentielle de quelques métaux lourds dans les sédiments et délimitation des zones d'influence des principales sources d'apports. *Rapport de DEA*, Univ. Aix-Marseille II, 50 p.
- CHALAUX N., TAKADA H. & BAYONA J.M., 1995. Molecular markers in Tokyo Bay sediments : sources and distribution. *Marine Environmental Research*, vol. 40, n° 1, pp. 77-92.
- CLAVIER J., CHARDY P. & CHEVILLON C., 1995. Sedimentation of particulate organic matter in the south west lagoon of New Caledonia. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, vol. 40, pp. 281-294.
- COUDRAY J., 1975. *Recherches sur le néogène et le quaternaire marin de la Nouvelle-Calédonie - Expéditions françaises sur les récifs de Nouvelle-Calédonie*. Fondation Singer-Polynac, vol. VIII, 275 p.
- DOUILLET P., 1998. Tidal dynamics of the south-west lagoon of New Caledonia : observations and 2D numerical modelling. *Oceanologica Acta*, Vol 21, 1, pp. 69-79.
- DOUILLET P. & LAZURE P., 1999. Wind-driven circulation in the south-western lagoon of New Caledonia : observations and 3D numerical modelling. *Submitted*.

- FICHEZ R. & CLAVIER J., 1996. *Programme ECOTROPE - Ecosystèmes côtiers du Pacifique. Influence terrigène et anthropique*. Ed. ORSTOM, Paris, 37 p.
- FILIPPELLI G.M. & DELANEY M.L., 1996. Phosphorus geochemistry of equatorial Pacific sediments. *Geochemica et Cosmochimica Acta*, vol. 60, n°9, pp. 1479-1495.
- GOLTERMAN H.L., 1996. Fractionation of sediment phosphate with chelating compounds : a simplification, and comparison with other methods. *Hydrobiologia*, vol. 335, pp. 87-95.
- HARRIS P., 1998. 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. *Thèse Doct., Univ. Française du Pacifique, Papeete*. 281 p.
- HATCHER B.G., JOHANNES R.E. & ROBERTSON A.I., 1989. Review of research relevant to the conservation of shallow tropical marine ecosystems. *Oceanogr. Mar. Annu. Rev.*, 27, pp. 337-414.
- HIELTJES A. & LIJKLEMA L., 1980. Fractionation of inorganic phosphates in calcareous sediments. *J. Envir. Qual.*, vol. 9, pp. 405-407.
- LABROSSE P., FICHEZ R., FARMAN R. & ADAMS T., 2000. New Caledonia marine environment : its lagoons and coral reefs. In "*Seas at the millennium*". Ed. C. Sheppard. Elsevier. *In press*.
- LILLIE A.R. & BROTHERS R.N., 1970. The geology of New-Caledonia. *New Zealand Journ. of Geology and Geophysics*, vol. 13, 1, pp.159-167.
- LUCOTTE M. & D'ANGLEJAN B., 1985. A comparison of several methods for the determination of iron hydroxydes and associated orthophosphates in estuarine particulate matter. *Chem. Geol.*, 48, pp. 257-264.
- MAGAND O., 1999. Recherche et définition des signatures géochimiques (métaux lourds, lanthanides) des sources terrigènes du lagon sud-ouest de Nouvelle-Calédonie. *Rapport de DEA, Univ. Aix-Marseille II*, 43 p.
- MALONE T. C. & WRIGHT L. D. (1994) - Planning today for the coastal research of tomorrow. *EOS*, 75, pp. 243-244.
- MONIOD F. & MILATAC N., 1968. Régimes hydrologiques de la Nouvelle-Calédonie. In *Atlas de la Nouvelle-Calédonie*, Ed. ORSTOM, Paris, planche 12.
- MURPHY J. & RILEY J.P., 1962. A modified single solution method for the determination of phosphate in natural waters. *Anal. Chim. Acta*, vol. 27, pp. 31-36.
- MURTAUGH J.J. & BUNCH R.L., 1967. Sterols as a measure of fecal pollution. *J. Water Pollut. Control Fed.*, 39, pp. 404-409.

- PARIS J.P., 1981. *Géologie de la Nouvelle-Calédonie : un essai de synthèse*. Mémoire BRGM, 113 p.
- PORRENGA D.H., 1966. Clay minerals in recent sediments of the Niger delta. *Clays clay Minerals*, vol. 16, pp. 221 - 223.
- RIECH V, 1990. Calcareous ooze, volcanic ash, and metalliferous sediments in the Quaternary of the Lau and North Fiji Basin. *Geol. Jb.*, vol. D2, pp. 109 - 162, Hannover.
- RIPPEY B. & ANDERSON N. J., 1996. Reconstruction of lake phosphorus loading and dynamics using the sedimentary record. *Environ. Sci. Tech.*, 30 (5), pp. 1786-1788.
- RUTTENBERG K.C., 1992. Development of a sequential extraction method for different forms of phosphorus in marine sediments. *Limnol. Oceanogr.*, 37 (7), pp. 1460-1482.
- SENESI N., 1993. Organic pollutant migration in soils as affected by soil organic matter. Molecular and mechanistic aspects. *NATO ASI Series*, vol. G32, pp. 47-74.
- SCHNEIDER W., SCHMELZER I. & WURTZ J., 1995. Sedimentological interplay of siliciclastic Rewa River input and organic carbonate production of the Suva barrier reef, Laucala Bay, Fiji. *The University of the South Pacific, Marine Studies, Technical report*, n° 95, 4, 12p.
- SCOR, 1998. Coral Reefs and global change : adaptation, acclimatation or extinction ? *Initial report of a symposium and workshop* (Boston, 1998).
- SHORTEN G., 1992. Relative sea level changes : Past, present and future presentation. (Abstract). *Second Meeting on coastal processes in Island Nations of the South and Central Pacific*, 21 - 24 Sept. 1992, Nukualofo, Tonga.
- TRESCASES J.J., 1997. The lateritic Nickel-Ore Deposits. In : PAQUET H. & CLAUER N., 1997. *Soils and sediments : mineralogy and geochemistry*. Ed. Springer, pp. 125-138.

