

**IMPACTS ANTHROPIQUES SUR LES ECOSYSTEMES  
LITTORAUX DE L'ILE MAURICE (OCEAN INDIEN)**

**ETUDE GEOCHIMIQUE DES SEDIMENTS DE LAGONS  
A L'INTERFACE EAU-SEDIMENT**

**MINERALOGIE, DOSAGE DES ELEMENTS MAJEURS  
ET DES ELEMENTS TRACES,  
CARACTERISATION DE LA MATIERE ORGANIQUE**

*Thèse*

présentée à la Faculté des Sciences de l'Université de Neuchâtel  
pour l'obtention du titre de Doctorat *es-Sciences*

par

**Sabine BROCERO**

# IMPRIMATUR POUR LA THÈSE

**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**

de Mme Sabine Brocero

---

UNIVERSITÉ DE NEUCHÂTEL  
FACULTÉ DES SCIENCES

La Faculté des sciences de l'Université de Neuchâtel sur le rapport des membres du jury,

MM. B. Kübler (co-directeur de thèse), C. Beck (co-directeur de thèse), J. Geister (Berne), L. Hottinger (Bâle), J. Müller (Marseille) et F. Rougerie (Monaco)

autorise l'impression de la présente thèse.

Neuchâtel, le 30 septembre 1998

Le doyen:



F. Stoeckli

***L'imagination est plus importante que le savoir.***

***Albert Einstein***

## *Libres Pensées*

*Merci!*

*A Vous, mes Parents, qui m'avez soutenue pendant quelques décennies, qui m'avez toujours laissée libre de mes choix, fait confiance et encouragée. C'est grâce à vous que j'ai le plaisir de rédiger cette page aujourd'hui, et c'est vers vous que je me tourne tout d'abord pour vous dire simplement "merci de m'avoir permis de devenir la personne que je suis aujourd'hui".*

*A Toi, Claude. Depuis que nos chemins se sont réunis, tu as Tout enduré ... Tu as toujours été présent pour adoucir les orages (orages secs provençaux ou moussons neuchâteloises), m'entourant de ton amour, ta sagesse et ta constance.*

*A Toi, Laurent, mon Minot préféré, qui as momentanément "perdu une jambe" en venant me soutenir, à grands renforts de crêpes, de carry-poulet et de fous-rires nocturnes.*



*Merci à vous, Carlos et Florence, par votre hospitalité vous m'avez permis me sentir entourée alors que j'arrivais en Helvétie. Vous m'avez également recueillie à toute heure du jour et de la nuit lorsque j'étais terrorisée par mes colocataires!... Je ne l'oublierai jamais.*

*Merci à toi, Viviane, qui m'as initiée très tôt aux méandres de la pensée anthropologique ... Nous avons souvent profité ensemble des bienfaits de l'ethnologie participante lors de cérémonies rituelles, à Bellevaux 24 ou ailleurs ... Une Grande Amitié est née du hasard, et le hasard fait bien les choses!*

*Merci à vous, Jean-Pierre et Sieglinde, qui m'avez chaleureusement accueillie dans votre famille comme une seconde fille ... et comme votre unique belle-fille!*

*Merci à vous, Bernard Kübler et Carlos Beck, mes directeurs de thèse, qui m'avez accueillie à Neuchâtel, enseignée, dirigée et conseillée chacun à votre manière durant ces quatre années.*

*Merci à toi, Florence Gendre qui m'a transmis tout ton savoir sur l'île qui nous a tant occupées pendant plusieurs années, aussi bien en ramassant des coquillages sur les envoûtantes plages blanches de Maurice qu'en travaillant dans notre verdâtre bureau frigorifique de Neuchâtel... et même encore après ton départ vers des horizons professionnels nouveaux.*

*Merci à vous, Olga Sierra et Ngoc-Tong Ettlin, qui avez eu tant de patience lors de mes premiers pas dans le laboratoire de géochimie, qui avez toujours gardé le sourire lorsque je vous demandais pour la millième fois ... je ne dirais pas quoi! Et à toi aussi, Lidia Paganuzzi, qui, entre quelques attaques, as appris à jouer de la guitare devant mes colonnes plic-plic ...*

*Merci à toi, Mac (alias Gérard Magranville), qui es toujours là, chaleureux et paternel, lorsqu'on a besoin de toi.*

Merci à vous, Marc Rolli et Essaid Zeroual, qui n'avez jamais été avares de votre temps pour me permettre de combler de nombreuses lacunes MacIntoshiennes (entre autres)! Et à vous, Marie-Caroline et Eric Blanc pour les chocolats chauds, jusque par e-mail! Et à mes autres collègues doctorants, Pierre Lambert, Patrick Schoellammer, et Rachel Hubert pour les nombreuses discussions animées de fins de thèses!

Toute ma reconnaissance va également aux Professeurs qui ont accepté de relire ce travail, et de prendre part au jury de soutenance (un vendredi 13!):

Jacques Muller, première personne du projet Maurice qu'il m'a été donné de rencontrer ... en Provence. Merci de m'avoir orientée vers Neuchâtel il y a quatre ans.

Lucas Hottinger qui m'a plusieurs fois donné de son temps avec bienveillance.

Jörn Geister, requérant principal du projet, qui a fait ses valises à la hâte après la soutenance, pour jalonner le Sinai avant notre arrivée!

Et Francis Rougerie que j'ai connu en lisant *La Recherche* avant d'être vraiment géologue, et qui a si spontanément accepté de prendre part à mon jury de thèse.

Une pensée toute particulière pour Patrick Ruch, qui a quitté cette terre le 17 juillet 1997. Si connaissait Maurice par coeur, et a toujours répondu présent à mes appels. Merci.

Je n'oublie pas Sabine Robert-Erb et Magali Holzhauer (en son temps), les secrétaires de l'Institut de Géologie, pour qui tout était toujours possible, même dans les instants de panique les plus inconcevables!

Ni Thierry Adatte, qui m'a entre autres initiée aux joies de la déconvolution!

Ni Manuel Da Silva, et sa joie de vivre si communicative, Albin Collaud qui aime bien le rhum Number One, et José Richard qui adore extraire les argiles des sédiments carbonatés!

Ni Martin Krähenbühl qui m'a soufflé le nom oublié des *Halimeda* et qui m'a généreusement donné de son temps en acceptant de se pencher sur les lames de palynofaciès dont les secrets lui étaient alors inconnus.

Ni Gérard Légier, Professeur de Droit à la Faculté d'Aix-en-Provence, qui sait pourquoi je le remercie!...

Ni toutes les personnes qui ont eu la mauvaise idée de croiser mon chemin les jours d'orage, et qui ont toujours su me faire entrevoir le rayon de soleil qui se cache derrière chaque nuage!

Cette étude a pu être réalisée grâce au soutien financier du FNRS, projets 21-26147.89 et 20-39636.93.

## RÉSUMÉ

### *Problématique*

L'île Maurice émerge à la pointe Sud de la ride des Mascareignes, à 20°21' de latitude Sud et à 57°30' Est. Sa superficie est de 1865km<sup>2</sup> (40 km sur 60 km), pour 1 million d'habitants. Le climat de l'île est de type tropical humide avec une période cyclonique entre les mois de janvier et avril (été austral).

Une ceinture récifale s'est développée tout autour de l'île sur 150 km, à une distance du littoral allant de quelques centaines de mètres à 7 km.

Actuellement, à peu près 50% de la superficie de l'île est cultivée; la culture de la canne à sucre représente 93% de la totalité des terres sous culture. Depuis 1945, les développements de l'agriculture (canne à sucre), des industries (textiles, électroniques, sucrières...) et du tourisme, ajoutés à une forte démographie, se sont effectués au détriment de l'environnement. Les pollutions sont multiples et en l'absence de traitement des eaux usées les lagons ont été contaminés et les réseaux trophiques déséquilibrés.

Dès 1985, les travaux des biologistes marins, océanographes, chimistes, géochimistes et géologues ont mis en évidence l'origine anthropique de la dégradation des écosystèmes récifaux. Il a été démontré que les éléments nutritifs dosés dans les eaux des lagons au niveau de l'écosystème récifal ont une origine insulaire, et que les teneurs élevées mesurées sur le littoral coïncident avec les zones des récifs les plus dégradés.

L'objectif de ce travail de thèse était de compléter ces premiers résultats par l'étude géochimique des sédiments des lagons.

### *Minéralogie*

Les sédiments des lagons sont principalement constitués de calcite, calcite magnésienne et d'aragonite. L'apport de minéraux détritiques (altération du socle basaltique de l'île) est perçu à l'embouchure des rivières. Dans la phase carbonatée des sédiments, les taux d'aragonite et de calcite magnésienne sont toujours supérieurs à celui de la calcite.

Le taux de substitution de MgCO<sub>3</sub> dans les calcites magnésiennes est remarquablement constant avec une moyenne de 13.8 ± 0.5 moles%.

### *Géochimie organique*

Dans les lagons, le COT est globalement faible (de 0.1% à 1%). Les sédiments des lagons contiennent peu de matière organique.

Après extraction alcaline, la part de chacun des constituant des substances humiques a pu être quantifiée : le COA, les AH et les AF sont faiblement représentés; l'humine est de loin le constituant majeur du cortège organique (taux > 80% par rapport à l'ensemble des constituants). Globalement, le taux d'extraction est faible.

Les faibles taux d'AH signifient que la matière organique à l'interface eau-sédiments est récente; les rapports AF/AH sont forts ce qui est synonyme d'une matière organique très peu mature. Les taux élevés d'humine indiquent une origine marine des substances humiques. La caractérisation des AH par quantification des rapports élémentaires O/C, H/C et N/C a prouvé qu'ils sont d'origine marine. Les analyses RMN H<sup>+</sup> effectuées sur les AH ont confirmé les résultats de l'analyse élémentaire : leurs faibles taux d'aromaticité prouvent leur origine marine.

Le coprostanol (biomarqueur de pollution fécale d'origine insulaire) montre des teneurs largement supérieures aux limites de pollution généralement admises. Il constitue un témoin de la pollution anthropique; son dosage a permis de déterminer des périmètres de

pollution dans les lagons, autour des grandes concentrations urbaines et des zones d'élevages de mammifères supérieurs.

### ***Géochimie minérale, dosage des éléments trace***

Pour doser les éléments trace (Co, Cr, Ni, Cu, Zn, Pb et Cd) dans les sédiments carbonatés des lagons, il n'existe aucun extracteur spécifique qui permette de différencier les parts naturelles, détritiques et anthropiques de ces éléments dans les sédiments analysés. Quatre acides ont été testés : HNO<sub>3</sub> 2N, HNO<sub>3</sub> 6N, HCl 6N et *aqua regia*. Ils se sont révélés particulièrement efficaces pour les 7 éléments dosés. Cependant, leur force d'extraction n'est pas la même : HCl 6N  $\geq$  *aqua regia* > HNO<sub>3</sub> 6N > HNO<sub>3</sub> 2N.

Le dosage des éléments trace a révélé deux sources d'apport distinctes : détritique et anthropique.

Co, Cr et Ni sont d'origine détritiques (altération du socle basaltique de l'île).

Cu, Zn, Pb et Cd sont d'origine anthropique.

Les plus fortes teneurs en ces éléments ont été mesurées principalement en deux endroits : dans les sédiments du sud-est de l'île, face à la Grande Rivière Sud Est (Cu : 52 mg/kg, Zn : 106 mg/kg, Pb : 16 mg/kg, Cd : 0.57 mg/kg), et dans les sédiments de la Baie de Port-Louis (Cu : 414 mg/kg, Zn : 129 mg/kg, Pb : 165 mg/kg, Cd : 0.37 mg/kg).

### ***Conclusion***

Un impact anthropique est significativement enregistré dans les sédiments des lagons de l'île Maurice au travers des fortes teneurs en coprostanol et en éléments trace Cu, Zn, Pb, Cd aux abords des zones d'activités humaines.

Cependant, les conclusions des analyses et des observations laissent à penser que la dégradation de l'écosystème littoral de l'île Maurice, outre les méfaits reconnus de la pollution, s'inscrit dans un cycle plus global de dégradation des écosystèmes récifaux non encore expliqué par la communauté scientifique.

# SOMMAIRE

<b>Chapitre 1 : INTRODUCTION</b> .....	1
<b>Chapitre 2 : CONTEXTE GENERAL</b> .....	3
2.1 Présentation géologique de l'île Maurice.....	3
2.1.1 L'île Maurice dans l'océan Indien.....	3
2.1.2 Cadre structural et géologique de l'île Maurice.....	4
2.1.3 L'île Maurice actuelle.....	6
2.2 Biologie et écologie des récifs coralliens.....	7
2.2.1 Introduction.....	7
2.2.2 Les architectes du récif.....	8
2.2.2.a Les madréporaires acteurs principaux de l'édification récifale.....	8
2.2.2.b Spécificité des madréporaires.....	8
2.2.3 Production minérale et érosion du récif.....	10
2.2.4 Ecologie des coraux.....	10
2.2.5 Répartition géographique des récifs coralliens.....	11
2.3 Aspects géographiques de l'île Maurice.....	12
2.3.1 Historique.....	12
2.3.2 Ressources et exploitation de l'île Maurice.....	13
2.3.3 Principales causes de la dégradation des écosystèmes littoraux.....	14
<b>Chapitre 3 : ECHANTILLONNAGE</b> .....	17
<b>Chapitre 4 : MINERALOGIE</b> .....	21
4.1 Introduction.....	21
4.2 Méthodologie.....	21
4.3 La roche totale.....	21
4.3.1 Composition minéralogique des sédiments.....	21
4.3.2 Les calcites magnésiennes.....	23
4.3.3 Le dosage semi-quantitatif de la roche totale.....	25



4.4 Les argiles : fractions 2-16 $\mu$ m et <2 $\mu$ m .....	28
4.4.1 Détermination des minéraux argileux .....	28
4.4.2 Répartition des minéraux argileux et non-argileux .....	28
4.5 Conclusion .....	31

**Chapitre 5 : GEOCHIMIE MINERALE, PREMIERE PARTIE :**

<b>SPECIATION DES CARBONATES</b> .....	33
5.1 Méthodologies .....	33
5.1.1 Analyse élémentaire CHN .....	33
5.1.2 La spéciation des carbonates .....	33
5.1.3 Calcul des paramètres caractérisant les carbonates .....	35
5.2 Résultats .....	37
5.3 Analyse conjointe des résultats de la minéralogie (roche totale) et de la spéciation des carbonates .....	40

**Chapitre 6 : GEOCHIMIE MINERALE, DEUXIEME PARTIE :**

<b>DOSAGE DES ELEMENTS TRACES</b> .....	43
6.1 Introduction .....	43
6.2 Matériaux et méthodes .....	44
6.3 Résultats .....	45
6.3.1 Remarques .....	45
6.3.2 Méthodologie .....	45
6.3.3 Eléments traces .....	50
6.4 Discussion .....	51
6.5 Conclusion .....	56

**Chapitre 7 : GEOCHIMIE ORGANIQUE :**

**ANALYSE QUANTITATIVE ET QUALITATIVE DE LA MATIERE**

<b>ORGANIQUE DANS LES SEDIMENTS</b> .....	57
7.1 Introduction .....	57
7.2 Analyse optique de la matière organique : détermination des palynofaciès .....	58
7.2.2 Méthodologie .....	58
7.2.3 Observation des lames au microscope .....	60
7.2.3.a Protocole d'observation .....	60
7.2.3.b Résultats des observations .....	62
7.2.4 Conclusions .....	62
7.3 Définition et isolation des substances humiques .....	63

7.3.1 Introduction et définition.....	63
7.3.2 Isolation et fractionnement des substances humiques .....	65
7.4 Analyse quantitative de la matière organique.....	68
7.4.1 Evaluation des pourcentages en composés organiques des sédiments.....	68
7.4.1.a Méthodologie.....	68
7.4.1.b Résultats.....	69
7.4.2 Le coprostanol, biomarqueur de pollution fécale.....	72
7.4.2.a Introduction .....	72
7.4.2.b Protocole .....	72
7.4.2.c Résultats .....	73
7.4.3 Conclusions de l'analyse quantitative .....	75
7.5 Analyse qualitative des substances humiques.....	76
7.5.1 Analyse élémentaire CHNOS des Acides Humiques .....	76
7.5.1.a Introduction .....	76
7.5.1.b Analyses.....	77
7.5.1.c Résultats .....	78
7.5.2 Analyses RMN <sup>1</sup> H sur les Acides Humiques .....	79
7.5.2.a Notions générales et méthodologie .....	79
7.5.2.b Résultats.....	80
7.5.3 Conclusions de l'analyse qualitative.....	82
7.6 Conclusion.....	82
<b>Chapitre 8 : CONCLUSIONS GENERALES.....</b>	<b>83</b>
<b>BIBLIOGRAPHIE.....</b>	<b>87</b>

## **ANNEXES**

# CHAPITRE 1

## INTRODUCTION

1670

*EXTINCTION DU DODO À L'ÎLE MAURICE*



XX<sup>e</sup> SIÈCLE

*LES ECOSYSTÈMES RÉCIFAUX VONT-ILS SUBIR LE MÊME SORT?*

Dans les îles tropicales, les écosystèmes coralliens constituent une réserve biologique, une barrière de protection littorale contre les cyclones et un capital touristique. Ces écosystèmes sont fragiles car ils sont adaptés à des eaux océaniques oligotrophes, très pauvres en nutriments. L'édification des barrières s'est faite sur des milliers d'années en suivant naturellement les variations du niveau marin.

C'est un patrimoine qu'il faut protéger des atteintes anthropiques (Muller *et al.*, 1991).

Dans l'archipel des Mascareignes (océan Indien), l'île Maurice est ceinturée presque totalement par un récif corallien de type frangeant de haute énergie.

Depuis 50 ans, en plus d'une importante croissance démographique, les activités industrielles, agricoles et touristiques se sont fortement développées; les installations d'élimination et de retraitement des déchets n'ont pas suivi l'évolution de la situation et la majorité des rejets part directement dans les rivières et dans les lagons.

Des signes de dégradation des coraux ayant été observés en 1987 par J. Muller (Muller *et al.*, 1991), une étude pluridisciplinaire des écosystèmes littoraux de Maurice a été organisée. L'impact anthropique sur ces écosystèmes a été démontré par Gendre (1992) au travers des éléments nutritifs dosés dans les eaux insulaires et lagunaires; quantifiés au niveau de l'écosystème récifal, ils sont d'origine insulaire, les teneurs élevées mesurées sur le littoral coïncidant bien avec les zones des récifs les plus dégradées.

L'objectif du travail ici présenté est de compléter ces premiers résultats par L'ÉTUDE GÉOCHIMIQUE DES SÉDIMENTS DE LAGONS, au moyen de différentes analyses :

- la spéciation des carbonates par l'interprétation conjointe des résultats
  - de l'analyse minéralogique,
  - et du dosage des éléments majeurs;
- le dosage des éléments traces Co, Cr, Ni, Cu, Zn, Pb, Cd;
- la caractérisation de la matière organique par :
  - l'étude de lames de palynofaciès;
  - l'analyse quantitative : extraction, fractionnement et dosage des substances humiques; dosage du coprostanol, biomarqueur de pollution fécale;
  - l'analyse qualitative des Acides Humiques : teneurs élémentaires CHNOS et RMN <sup>1</sup>H.

## CHAPITRE 2

### CONTEXTE GÉNÉRAL

#### 2.1 Présentation géologique de l'île Maurice

##### 2.1.1 L'île Maurice dans l'océan Indien

L'océan Indien est entouré par une distribution asymétrique de continents caractérisés par des formations géologiques, des reliefs et des climats différents (Collet, 1912; et, Pepper & Everhart, 1963; Gerasimov, 1964; Lisitzin, 1972; *in* Kolla & Kidd, 1982). En comparaison avec les océans Pacifique et Atlantique, l'océan Indien est fermé au nord par des continents et n'est donc pas en contact avec les régions froides de l'hémisphère nord.

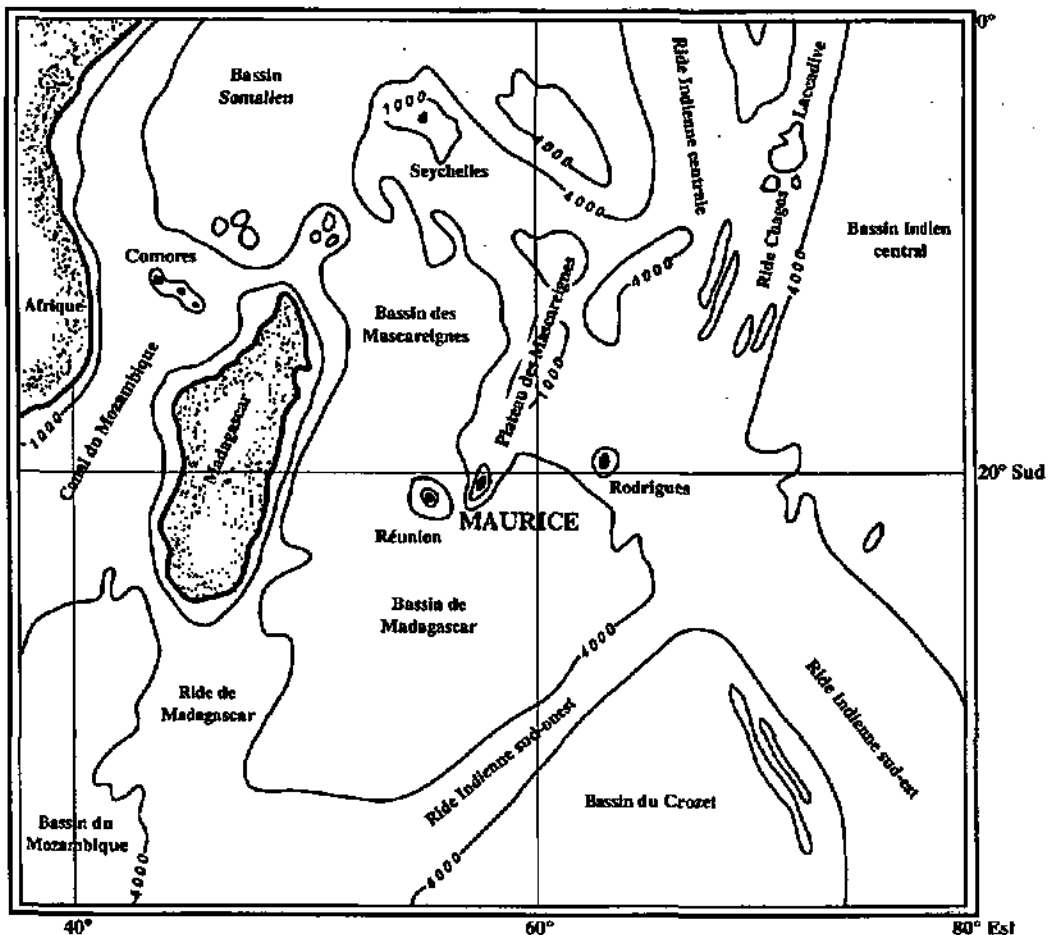


figure 2.1 : Carte bathymétrique simplifiée (isobaths 1000 m et 4000 m) et principales caractéristiques structurales de l'océan Indien (d'après Schlich, 1982)

La bathymétrie et la physiographie de l'océan Indien sont plus complexes que celles des autres océans. La présence d'une ride médio-océanique (zone d'expansion) en forme de Y

inversé, ainsi que de nombreuses rides asismiques et micro-continentes (ride Chagos-Laccadive) rendent l'océan Indien unique (fig. 2.1). Ces rides, plateaux, et marges continentales divisent l'océan en plusieurs bassins profonds. Les plus hauts points de nombreuses de ces rides émergent vont former des îles (Upton, 1982). La plus haute de l'océan Indien est La Réunion qui s'élève à 3000 mètres au dessus du niveau de la mer. La majeure partie de ces îles est principalement formée de roches basaltiques (à l'exception des Seychelles qui sont granitiques) recouvertes ou non de formations calcaires.

La morphologie de la ride medio-océanique en Y inversé divise l'océan en trois secteurs : ouest, sud et est. La plupart des îles basaltiques sont situées dans les secteurs ouest et sud. Les îles du secteur sud émergent toutes en dessous de la latitude  $35^{\circ}\text{S}$  et ne possèdent pas de récifs coralliens. En revanche, les îles des secteurs ouest et est émergent relativement au Nord de la latitude  $25^{\circ}\text{S}$ , et autour de nombre d'entre-elles se développent des récifs coralliens.

### 2.1.2 Cadre structural et géologique de l'île Maurice

Maurice, La Réunion et Rodrigues sont trois îles volcaniques émergeant dans le secteur ouest de l'océan Indien entre  $19^{\circ}$  et  $21^{\circ}$  de latitude sud. Elles sont connues sous le nom d'Archipel des Mascareignes.

Maurice, émerge à la pointe sud de la ride des Mascareignes (fig. 2.1), à  $57^{\circ}30'\text{E}$  et  $20^{\circ}21'\text{S}$ .

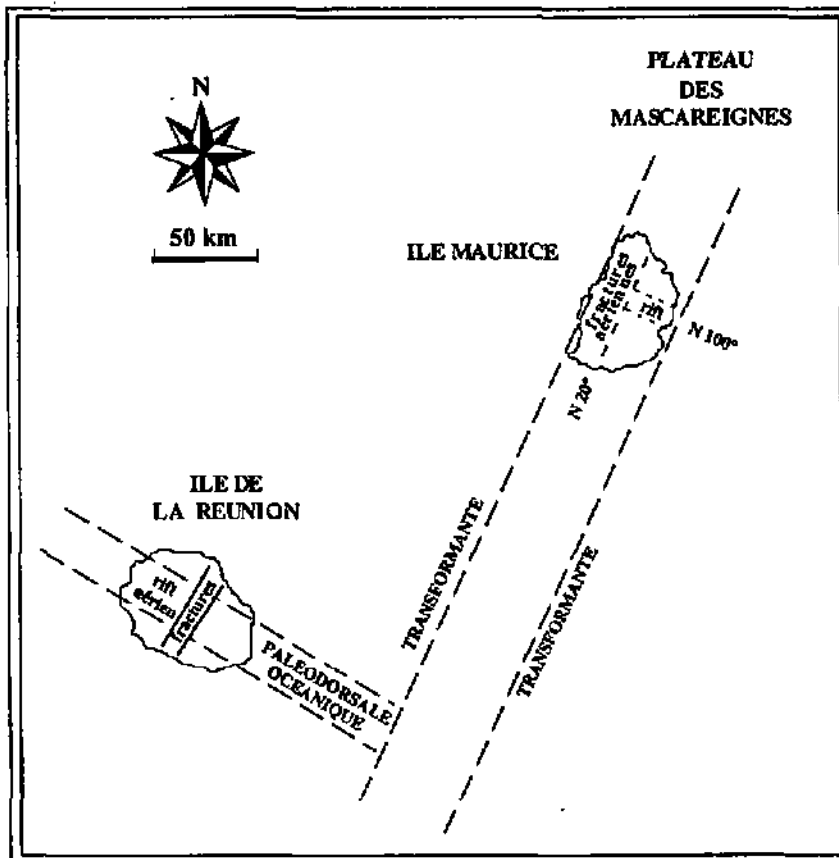


figure 2.2 : Relations structurales entre l'île Maurice, l'île de la Réunion et les accidents du fond océanique (d'après Perroud, 1982)

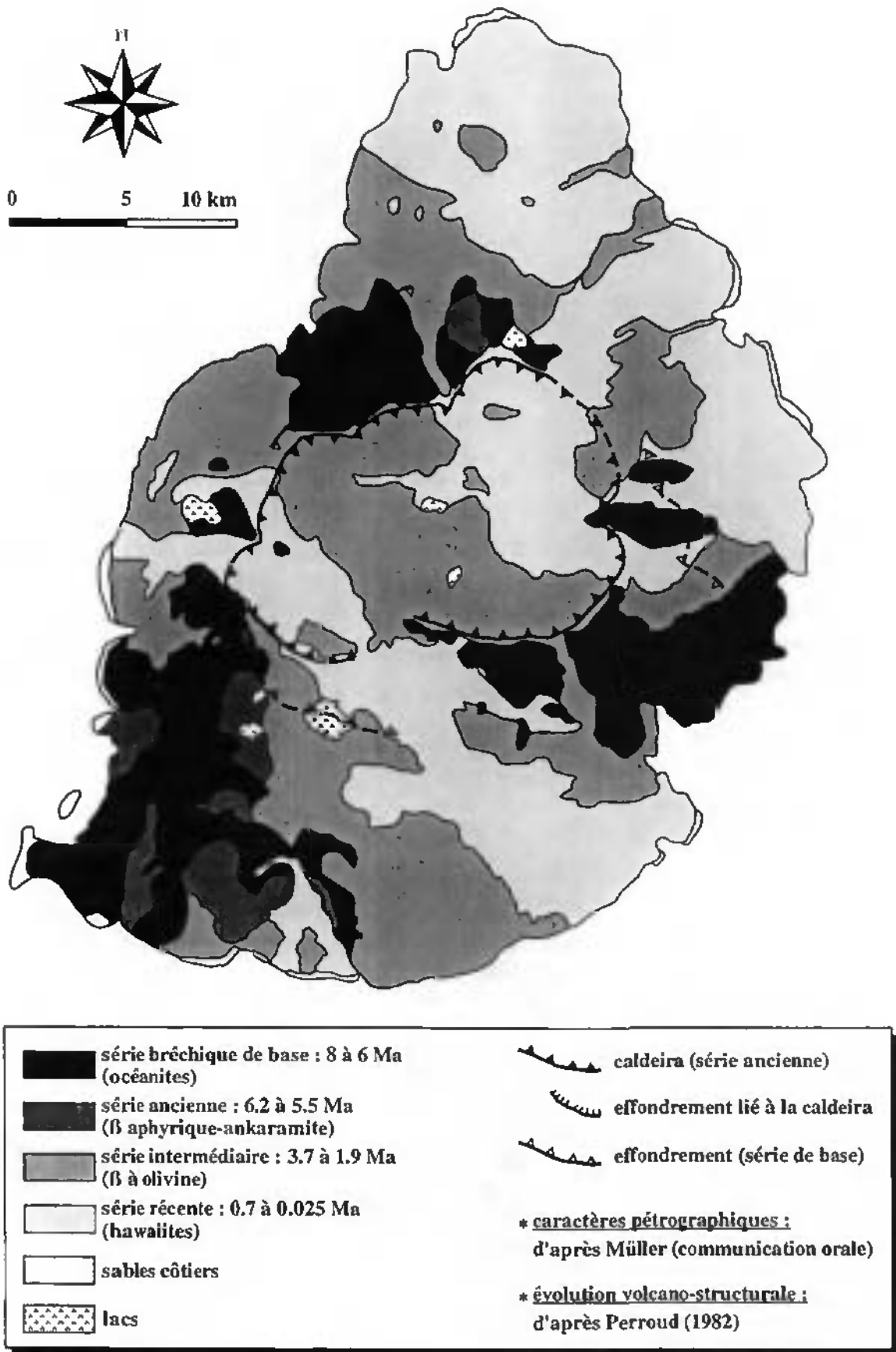


figure 2.3 : Carte géologique de l'île Maurice (d'après Muller, communication orale, et Perroud, 1982)

Son axe principal orienté NNE-SSO est parallèle à l'axe principal de la ride des Mascareignes. Elle repose en bordure d'un relief océanique situé à la profondeur de 1000 mètres. Ce relief, bien que partie intégrante du Plateau des Mascareignes, en est séparé par deux accidents tectoniques majeurs liés à la ride médio-océanique : un rift N100 à l'est, limité à l'ouest par une faille transformante N20 (fig. 2.2).

L'île Maurice est l'un des plus anciens volcans de l'océan Indien, qui s'est édifié au cours de deux périodes d'activité majeure, séparées par un hiatus de 1,5 Ma. environ : la période ancienne (10 à 5 Ma.) et la période des laves récentes (3,5 Ma. à 25 000 ans).

D'après Perroud (1982), quatre phases volcano-structurales participent à l'édification de l'île (fig. 2.3) :

- 10 Ma. à 6,7 Ma. : fonctionnement du rift N100 et émergence de l'île. Le rift N100 fonctionne comme une fissure éruptive génératrice de produits explosifs : tufs, bombes et produits bréchifiés. Le caractère de ce volcanisme est double : aérien et phréatomagmatique. La *série bréchique de base* (océanites) se met en place.
- 6,2 Ma. à 5 Ma. : gonflement du volcan et ouverture d'une caldeira sommitale. Un réservoir magmatique se forme au-dessus du précédent et ses produits contribueront à l'édification d'un important volcan central. La *série ancienne* se met en place, caractérisée par un volcanisme effusif de basaltes aphyriques et ankaramites.
- 3,5 Ma. à 1,7 Ma. : après une période de calme éruptif d'environ 1,5 Ma. , au cours de laquelle l'activité migre vers l'Ouest, sont émis des basaltes à olivine (*série intermédiaire*) qui commencent le remplissage de la caldeira.
- 0,7 Ma. à 0,025 Ma. : liée à un rejeu de la transformante N20, l'activité reprend. Les principaux centres d'émissions édifient des cônes de taille variable alignés sur les accidents N20. La *série récente* constituée par des basaltes peu différenciés (hawaïtes) finit de remplir la caldeira et s'épanche par les brèches des murs caldeiriques vers les plaines côtières.

### 2.1.3 L'île Maurice actuelle

De forme elliptique, mesurant 40 km sur 60 km, pour une superficie de 1865 km<sup>2</sup>, Maurice présente de nos jours l'aspect d'un plateau accidenté par des chaînons montagneux profondément disséqués qui isolent plusieurs plaines côtières (Montaggioni & Nativel, 1988). La partie centrale de l'île est une surface ondulée de 500 à 600 mètres d'altitude et de 10 km de diamètre, hérissée d'une série de cônes volcaniques selon l'axe SSO-NNE. Les plaines littorales sont au nombre de cinq : la plaine du Nord, la plus grande; la plaine ouest de Petite Rivière Noire et Tamarin; la plaine de Vieux Grand Port et de Mahébourg, au sud-est; et la plaine de Flacq à l'Est.

La partie émergée de l'île se poursuit par un vaste plateau insulaire (25 km de large) qui constitue l'assise de la ceinture récifale actuelle couvrant environ 300 km<sup>2</sup> (Faure, 1975).

L'île est ceinturée presque totalement par un récif corallien de type frangeant de haute énergie (fig. 2.4); Müller *et al.* (1991) donnent la description suivante de l'ensemble récifo-lagonaire (fig. 3.1, et annexes 1 à 4) :

- sur la côte occidentale, l'ensemble récifo-lagonaire excède rarement 1 km de large, exception faite du secteur de l'île aux Bénitiers, au sud-ouest de l'île où il atteint 4,5 km car il est installé à cet endroit sur une vieille plateforme récifale pléistocène.

- Sur la côte orientale, pour la même raison, il atteint 7 km à Mahébourg. En revanche, à Poudre d'Or, il est installé en partie sur des coulées récentes horizontales d'hawaïite à cuvettes et bombements. Ces coulées sont faiblement immergées, ce qui explique la



grande largeur du relief (4,5 km) dans cette baie.

- En trois secteurs de l'île Maurice, le récif n'existe pas : sur la côte sud, et sur la côte ouest de part et d'autre d'Albion. Dans ces trois secteurs, la côte est constituée par une falaise de basalte très abrupte et sans plage.

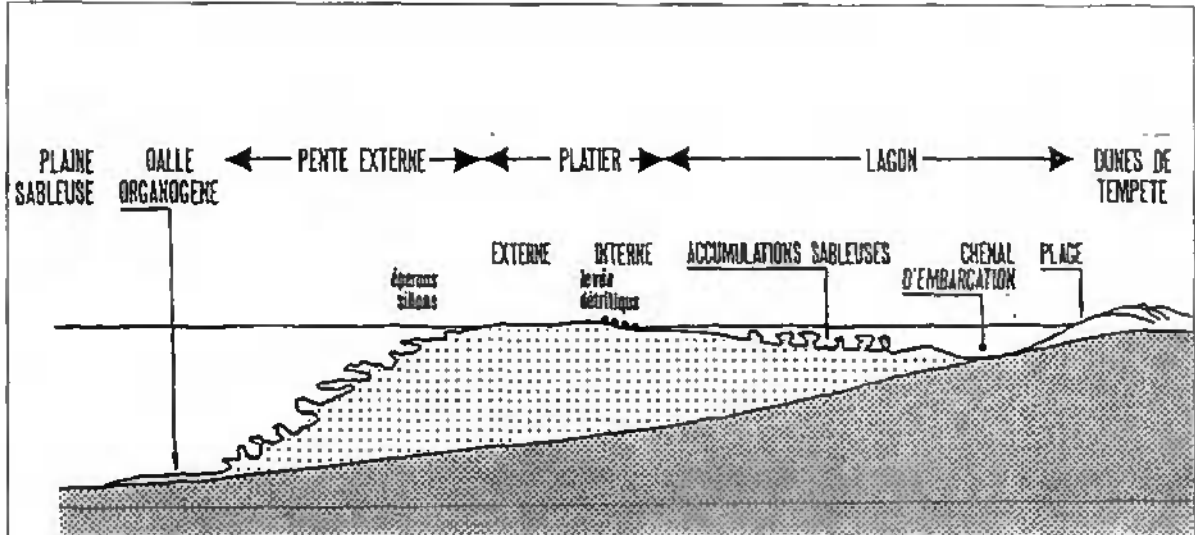


figure 2.4 : Les zones morphologiques principales des récifs de Maurice

## 2.2 Biologie et écologie des récifs coralliens

### 2.2.1 Introduction

D'origine arabe, le mot récif (alrasif) était utilisé pour désigner les formations construites à fleur d'eau par les coraux et algues calcaires, dans les régions côtières de la mer Rouge (Pétron, 1990).

Au sens biologique, un récif corallien est une construction calcaire édifiée dans les eaux superficielles par des organismes vivants. Les dimensions de ces formations, construites généralement en bancs, sont suffisamment grandes pour influencer les conditions physiques, donc écologiques, du milieu environnant. Leur structure est assez résistante à l'hydrodynamisme pour offrir une pérennité et des conditions stables de vie favorables au développement de nombreux organismes marins.

Dans le monde, la surface occupée par ces récifs est estimée à 600 000 km<sup>2</sup>, jusqu'à 70 m de profondeur. Ce chiffre représente probablement moins de la moitié de la surface réelle occupée par les récifs coralliens (Pétron, 1990).

Aucun être vivant, pas même l'homme, n'est parvenu à bâtir des édifices aussi colossaux.

Au sein des mers tropicales les plus pauvres en nutriments du globe, les récifs coralliens sont parmi les milieux biologiques les plus productifs; avec un nombre d'espèces souvent supérieur à 3000, l'écosystème récifal est avec la forêt tropicale, l'un des plus riches au monde, mais également l'un des plus complexes par la diversité et la sophistication des liens qui unissent les habitants du récif entre eux.

Dans le deuxième chapitre de leur ouvrage "*Les atolls de Mururoa et Fangataufa (Polynésie Française) III. Le milieu vivant et son évolution*", J.P. Bablet et al. (1995)

décrivent parfaitement le fonctionnement de l'écosystème récifal. Les données présentées dans les paragraphes suivants sont extraites de ce deuxième chapitre (pp. 17-25), qui résume d'une manière extrêmement claire la somme des connaissances acquises jusqu'à ce jour sur l'étude complexe des écosystèmes récifaux.

## 2.2.2 Les architectes du récif

### 2.2.2.a Les madréporaires acteurs principaux de l'édification récifale

Les coraux sont connus depuis la plus haute Antiquité. On pensait alors que le corail était une plante, une "herbe molle" durcissant à l'air. C'est un médecin marseillais, Peyssonnel, qui le premier eut des doutes sur la nature du corail, et démontra, vers 1750, qu'il appartenait en réalité au monde animal : *"Je fis fleurir le corail dans des vases pleins d'eau de mer, et j'observai que ce que nous croyions être la fleur de cette prétendue plante n'était, ou vrai, qu'un insecte semblable à une petite artie ou poulpe. Cet insecte s'épanouit dans l'eau et se referme..."* (Pétron, 1990).

Animaux vivant en symbiose avec des végétaux et construisant un squelette minéral, les coraux, principaux architectes du récif, associent en fait les trois règnes, animal, végétal et minéral.

Le mot corail, qui désignait initialement le corail rouge, *Corallium rubrum*, des eaux tempérées, est aujourd'hui synonyme de "constructeur corallien". Cette large définition regroupe le vaste ensemble des madréporaires, ou scléroractiniaires, qui sont les véritables fabricants des récifs.

### 2.2.2.b Spécificité des madréporaires

Les madréporaires sont des animaux carnivores marins appartenant à l'embranchement des Coelentérés. Le récif de madréporaires est constitué par l'association, sous forme de colonies, de polypes qui vivent à l'intérieur d'un squelette rigide en carbonate de calcium (aragonite) qu'ils sécrètent (fig. 2.5).

L'importance des madréporaires tient à deux caractéristiques spécifiques :

- les polypes vivent en symbiose avec des micro algues unicellulaires, les zooxanthelles, qui prolifèrent au sein des cellules endodermiques du polype, à des densités aussi considérables que 1 million d'algues par  $\text{cm}^3$  de tissu vivant. L'algue y trouve, en plus d'une protection, le  $\text{CO}_2$  dissous (provenant du métabolisme du corail) qui lui est nécessaire pour fabriquer de la matière organique et de l'oxygène par assimilation chlorophyllienne. Cette production, partiellement transférée au polype-hôte, est suffisante pour couvrir les besoins énergétiques de celui-ci;
- les polypes (fig. 2.6) possèdent des cellules capables de pomper des ions calcium dans l'eau de mer et d'élaborer des cristaux d'aragonite qui se soudent entre-eux pour former un squelette rigide, qui représente environ 90 % du poids total de l'animal. Ce squelette contient aussi du magnésium, de faibles quantités de strontium et des molécules organiques (0,1 à 0,4 % en poids). Les polypes vivent le plus souvent en colonies, les squelettes individuels étant réunis en une masse squelettique commune assurant la cohésion de l'ensemble.

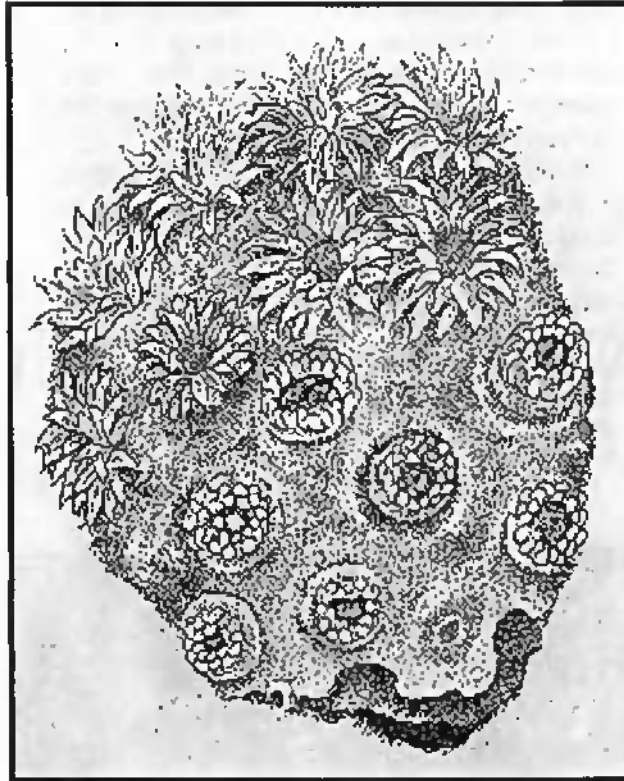


figure 2.5 : Fragment d'une colonie corallienne. Les individus (certains sont contractés et d'autres ouverts) sont en contact par une surface latérale de tissu (d'après Barnes, 1980)

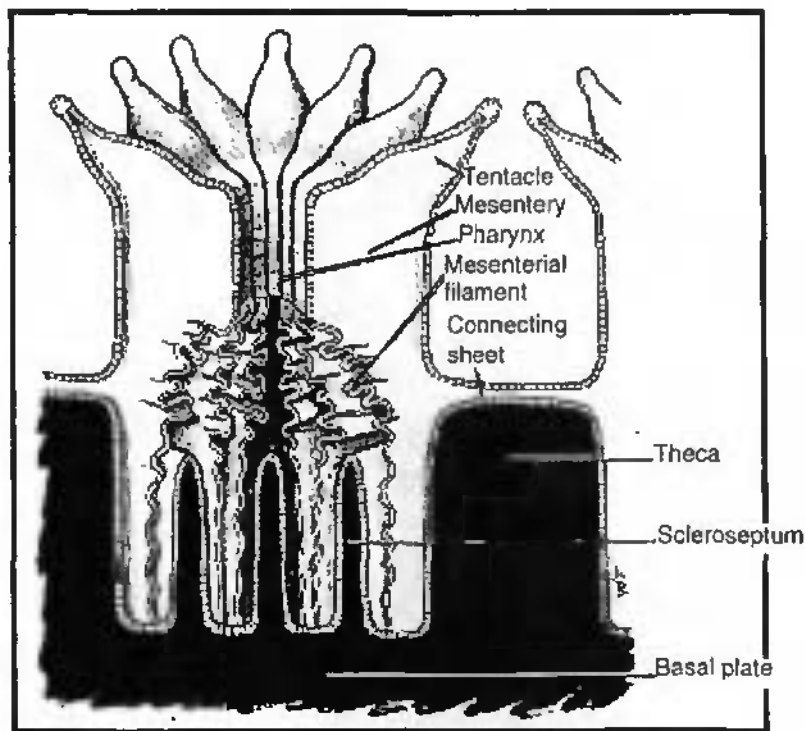


figure 2.6 : Coupe longitudinale d'un polype dans sa thèque (d'après Barnes, 1980)

### 2.2.3 Production minérale et érosion du récif

Les récifs coralliens, entretenus par des organismes vivants, compensent par leur croissance, l'érosion et les dégradations du milieu. A l'échelle mondiale, la fixation de carbonate de calcium par les récifs coralliens, évaluée à environ 1 milliard de tonnes par an, représente près de 50 % du calcium apporté aux océans par les fleuves et les rivières.

Dans la province Indo-Pacifique le taux de production de carbonate de calcium par les coraux peut atteindre 30 kg/m<sup>2</sup>/an. Il se situe en moyenne autour de 3 à 6 kg, soit une production linéaire du squelette rigide de quelques mm/an à quelques cm/an, selon la nature du madréporaire.

La masse minérale calcaire produite par les organismes récifaux est soumise à une érosion intense de trois natures :

- mécanique; exprimée par la hauteur moyenne érodée (par la houle et les avalanches des pentes externes dues aux tempêtes, cyclones, etc ...) : 0,1 à 1 mm/an environ;
- chimique; dissolution des carbonates : 0,01 à 0,1 mm/an;
- biologique; biodégradation par des organismes brouteurs et foreurs.

Ces mécanismes d'érosion, s'opposant à la croissance corallienne, sont des mécanismes permanents de destruction dans un écosystème récifal.

Les débris coralliens peuvent être cimentés par précipitation de cristaux de carbonates contenus à l'état dissous dans l'eau de mer, dont la saturation est de 3 à 5 dans l'océan tropical.

La croissance d'un édifice corallien résulte donc de la combinaison entre la construction corallienne, l'érosion et la cimentation. La vitesse de croissance d'un récif, pris dans son ensemble, est de l'ordre du mm/an alors que celle de nombreux coraux est de 1 à quelques cm/an.

### 2.2.4 Ecologie des coraux

Les coraux ne peuvent s'installer et se développer que dans des conditions écologiques spécifiques.

- Parmi les facteurs gouvernant leur croissance, la température est un élément fondamental puisque la localisation des récifs vivants est sensiblement limitée par l'isotherme 20°C des eaux océaniques de surface. L'optimum de croissance corallienne se produit lorsque la température des eaux se situe entre 20 et 28°C. De faibles écarts de température par rapport à ces limites occasionnent un retard de croissance ou une augmentation de la mortalité des coraux. Ainsi, un excès de température (plus de 30°C) induit des troubles qui se manifestent par un blanchissement consécutif à l'expulsion des zooxanthelles, précédant une nécrose des polypes, parfois mortelle pour la colonie.

- La croissance des coraux exige des conditions favorables à la photosynthèse : la lumière est donc un autre facteur important. Cependant, en zone intertropicale la lumière incidente ne constitue pas un facteur limitant. Par contre, la quantité de lumière transmise décroît avec l'augmentation de la profondeur et de la turbidité des eaux. Dans les eaux trop turbides, la construction est d'abord limitée par la réduction de la luminosité. Par ailleurs, les matières en suspension, lorsqu'elle décantent, entraînent des taux de sédimentation

importants. Les sédiments étouffent les coraux en réduisant considérablement leurs mécanismes cilio-muqueux utilisés pour expulser ces particules parasites, et envasent les substrats vierges qui deviennent impropres à la colonisation corallienne. Les coraux ne se développent donc bien que dans des eaux claires et principalement dans la couche euphotique dans laquelle les rayonnements solaires peuvent parvenir. Si certains coraux particulièrement tolérants vivent à des profondeurs de 100 à 200 mètres, la limite bathymétrique des récifs se situe le plus souvent vers 60 mètres de profondeur. Ils connaissent un développement maximum entre 0 et -30 mètres.

- Le dernier facteur très important est l'hydrodynamisme, c'est-à-dire l'agitation et la turbulence des eaux qui assurent une bonne oxygénation du milieu et un apport renouvelé de nutriments et de plancton. Elles favorisent également la dissémination des larves et limitent la sédimentation des particules en suspension.

Enfin, les coraux supportent mal les eaux saumâtres ou douces, ce qui explique l'interruption de la barrière corallienne face à l'embouchure des rivières (à cause également de la chimie actuelle des eaux et des teneurs élevées en sédiments) le long des côtes des îles hautes. Les récifs coralliens n'existent donc pas sur la côte nord-ouest de l'Amérique du Sud ainsi qu'au débouché des grands fleuves Amazone et Orénoque, ni sur la plupart des côtes indiennes (Gange, Brahmapoutre).

### 2.2.5 Répartition géographique des récifs coralliens

La répartition géographique des récifs coralliens dans le monde (fig. 2.7) dépend donc étroitement des exigences écologiques des coraux constructeurs.

Comme la température ne doit jamais descendre en dessous de 18°C, les récifs se répartissent dans les zones tropicales, entre les parallèles 32° nord et 30° sud, bien que des coraux isolés puissent exister au-delà de ces limites. La distribution des coraux au sein de cette ceinture tropicale est dissymétrique : ils sont mieux développés dans les aires occidentales des océans Indien, Pacifique et Atlantique, que dans les parties orientales, peu propices à l'installation des récifs en raison des eaux froides résultant des grands courants océaniques et des remontées d'eaux profondes riches en sels nutritifs (upwellings).

Les espèces animales et végétales qui composent les récifs coralliens dans le monde se répartissent en deux grandes provinces, sensiblement homogènes : l'Indo-Pacifique (fig. 2.7) et l'Atlantique. Ces provinces sont très différentes : la province récifale indo-pacifique est environ vingt fois plus étendue que la province atlantique, et elle comporte un nombre d'espèces incomparablement plus important, presque dix fois plus d'espèces de coraux (Veron, 1993).

Les récifs coralliens sont bien développés et diversifiés autour des nombreuses îles du sud-ouest de l'océan Indien (province indo-ouest-pacifique). Au nord-est de Madagascar, sur des fonds sous-marins de plus de 4000 mètres de profondeur, s'élève la crête des Mascareignes, supportant du nord au sud le banc des Seychelles, le banc des Amirantes, le banc Saya de Malha, le banc Nazareth avec le récif Cargados-Carajos et les trois îles des Mascareignes, Maurice, Rodrigues et La Réunion.

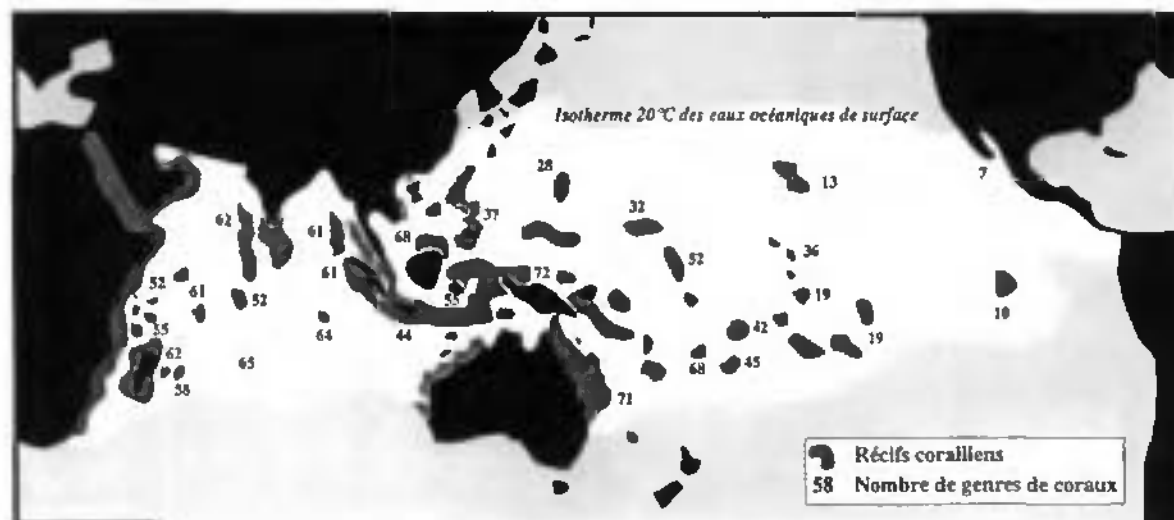


figure 2.7 : Zone de répartition des coraux constructeurs et richesse spécifique des peuplements de coraux dans la province Indo-Pacifique. L'isotherme moyenne 20°C des eaux océaniques de surface délimite le domaine où vivent les coraux (figure modifiée d'après Veron, 1993; Galzin *et al.*, 1993; in Bablet *et al.*, 1995)

Les récifs coralliens sont bien développés dans tout ce secteur et très variés : bancs coralliens à fleur d'eau ou complètement submergés, souvent presque totalement inconnus (Saya de Malha, Nazareth), récifs frangeants autour des îles granitiques (Seychelles) et des cônes volcaniques actuels ou anciens (Réunion, Rodrigues et Maurice).

## 2.3 Aspects géographiques de l'île Maurice

### 2.3.1 Historique

Les problèmes de pollution qui nous occupent aujourd'hui à l'île Maurice prennent leurs racines loin dans le temps. Les quelques dates qui suivent sont tirées de l'ouvrage "Historical Dictionary of Mauritius" de Selvon (1991) et montrent l'origine des rouages agricoles et industriels qui, comme le souligne Lacoste (1993), ont fait aujourd'hui de cette grande productrice de sucre le seul "nouveau pays industrialisé" africain (mais est-ce un pays africain, sinon par son appartenance à l'Organisation de l'Unité Africaine?).

La chronologie historique de Maurice peut se résumer comme suit :

- VIII<sup>e</sup> siècle : l'île était connue par les Arabes qui la nommaient *DINA MOZARE* (Lutz, 1994).
- 1407 : Maurice est en vue du Capitaine portugais Don Diego Fernandes Pereira qui se trouve dans l'impossibilité d'accoster à cause du mauvais temps.
- 1511 : le navigateur portugais Domingos Fernandez est le premier européen dont l'Histoire a retenu le nom pour avoir foulé le sol de l'île, le 8 décembre 1511.
- 1598 : l'Amiral hollandais Wybrandt Warwijk accoste au sud-est et prend possession de l'île, la baptisant *MAURITS* en l'honneur du Prince Maurits Van Nassau.
- 1639 : la canne à sucre et le cerf sont introduits par les hollandais.

- 1712 : les derniers colons hollandais quittent l'île le 1<sup>er</sup> janvier 1712.
- 1715 : le Capitaine français Guillaume Dufresne d'Arset annexe l'île au nom du roi de France, et la rebaptise *ISLE DE FRANCE*.
- 1721 : un détachement français arrive sur l'île pour ouvrir la route aux premiers colons qui débarqueront l'année suivante.
- 1731 : construction de la capitale de l'île, Port Louis.
- 1735 : arrivée du Gouverneur Mahé de Labourdonnais. **Port Louis devient un port important ainsi qu'un grand centre de constructions et de réparations navales** dans l'Océan Indien.
- 1810 : le 27 août une flotte anglaise perd une bataille pour la conquête de l'île contre une flotte française à Grand Port, au sud-est. Mais le 3 décembre le Général bonapartiste français Charles Mathieu Isidore Decaen, Gouverneur de l'île, se rend à l'armée anglaise qui a accosté au nord et à l'ouest et investi la capitale Port Louis.
- 1813 : les anglais abolissent la traite des esclaves.
- 1814 : Maurice est officiellement cédée à la Grande Bretagne par le Traité de Paris.
- 1826 : pour la première fois une sucrerie tourne à la vapeur. **Expansion de l'industrie sucrière et de l'économie basée sur la monoculture de la canne à sucre.**
- 1834 : l'immigration de coolies d'Inde permet **une expansion considérable de l'industrie sucrière.**
- 1835 : le 1<sup>er</sup> février l'esclavage est aboli.
- 1846 : nomination du premier représentant du peuple de couleur au Conseil du Gouvernement.
- 1847 à 1967 : mouvements pour l'émancipation politique des Indo-Mauriciens, puis pour l'accession à l'indépendance de l'île Maurice.
- 1903 : les Seychelles sont détachées de Maurice.
- 1968 : le 12 mars, Maurice devient une nation indépendante au sein du Commonwealth.
- 1992 : L'île Maurice devient une République (Lacoste, 1993).

### 2.3.2 Ressources et exploitation de l'île Maurice

Maurice, qui compte aujourd'hui 1 million d'habitants, est une République politiquement stable et économiquement prospère (Lacoste, 1993).

Les conditions climatiques sont déterminantes pour l'utilisation des terres (Ramjeawon, 1994). Le climat Mauricien est de type tropical humide. La proximité de la mer et l'influence saisonnière des alizés atténuent quelque peu les amplitudes thermiques. Le gradient pluviométrique est par contre très marqué : de 750 mm/an sur la côte Ouest à plus de 4000 mm/an au sommet du Plateau Central; il révèle une forte dissymétrie liée à l'exposition (versants "au vent" ou "sous le vent").

La période la plus arrosée, correspondant à l'été austral, s'étale de janvier à avril. Durant cette période l'intensité des précipitations peut être très forte (cyclones); malgré cela l'érosion hydrique reste globalement assez limitée car en de nombreux endroits se conjuguent une série de facteurs freinant considérablement le ruissellement des eaux météoriques (couvert végétal, faible déclivité, bonne perméabilité du substrat) (Willaime, 1984).

Selon Dinan (1989), sur la superficie totale de Maurice (environ 186 500 hectares), les étendues sous cultures (à l'exclusion des plantations forestières) sont d'environ 90 100

hectares. En d'autres termes, l'on peut dire que plus de 48% de la superficie de l'île est cultivée (fig 2.8).

Les plantations de canne à sucre occupent environ 84 000 hectares, soit 93% de la totalité des terres sous culture. Cependant, depuis 1979 la culture de la canne à sucre tend à baisser suite à une politique de diversification agricole (élevage, aquaculture, cultures vivrières).

Le thé occupe la deuxième place après la canne, étant cultivé sur 3 910 hectares.

Le reste des superficies cultivées est consacré à nombre de cultures diverses, dont celles du tabac et des légumes.

Néanmoins, la prospérité économique de l'île ne tient actuellement ni à l'agro-industrie sucrière stagnante, ni au tourisme, mais à l'industrie (confection, électronique) qui a pris son élan avec la création de la zone franche après l'indépendance (Lacoste, 1993).

### **2.3.3 Principales causes de la dégradation des écosystèmes littoraux**

D'après Muller (1991), si la dégradation des écosystèmes littoraux lagunaires de Maurice est imputable, en grande partie, à la qualité de l'eau insulaire trop riche en nutriments acheminée dans les lagons (Gendre, 1992), le développement industriel, touristique et urbain, tel qu'il est géré actuellement, a un impact non négligeable sur l'environnement littoral :

- l'industrie textile, par l'utilisation de teintures inorganiques et organiques ainsi que de solvants, est une des plus polluantes parmi les industries de Maurice,
- l'extension des zones industrielles, aux dépens de la mer, sur des remblais de matériel récifal prélevé dans les lagons par dragage, l'approfondissement de chenaux de navigation par dragage, la construction de jetées sans mise en oeuvre de protection et sans étude d'impact,
- l'extension de périmètres d'extraction de sable au détriment des herbiers de phanérogames marines,
- l'industrie touristique en pleine expansion implique la construction d'hôtels sur le littoral au détriment de la couverture forestière, et l'aménagement de plan d'eau pour le ski nautique avec élimination des coraux et approfondissement des passes pour les bateaux,
- le développement urbain pose des problèmes de gestion de l'eau; les eaux polluées et les déchets domestiques ne sont en effet pas traités.

L'ensemble de ces activités anthropiques seront prises en considération tout au long de l'étude.



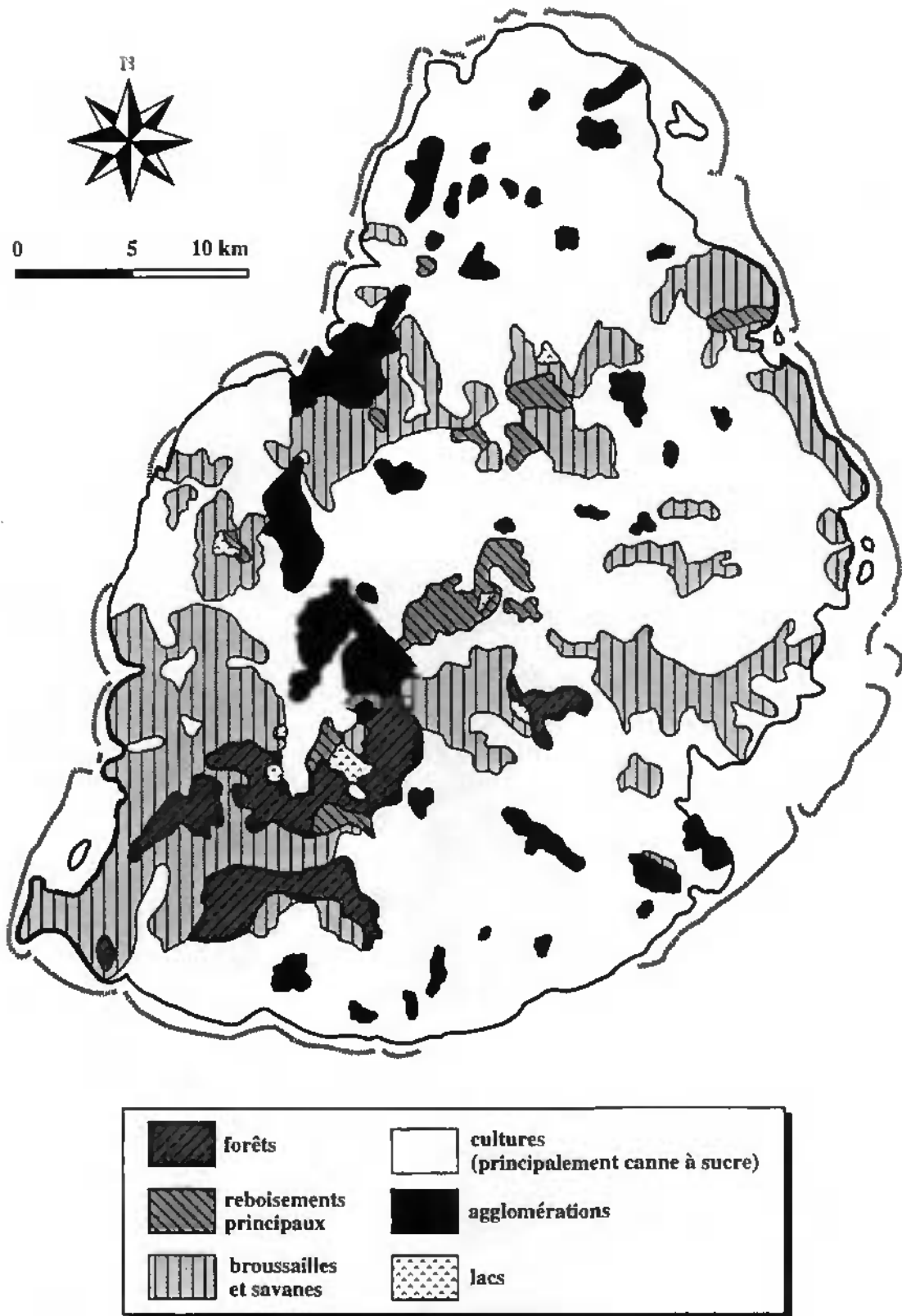


figure 2.8 : Carte d'utilisation des terres (d'après Sussman & Tattersall, 1986)

## CHAPITRE 3

### ECHANTILLONNAGE

La campagne de prélèvement des échantillons a été effectuée à l'île Maurice en novembre-décembre 1992. Tous les résultats rendant compte de cette étude reflètent donc l'état géochimique des sédiments de l'île Maurice à la fin de l'année 1992.

Pour mener à bien l'étude géochimique des sédiments de lagons de l'île Maurice, nous avons choisi d'échantillonner sur tout le pourtour de l'île afin d'avoir un aperçu de tous les lagons quel que soit l'état de santé des écosystèmes déterminé dans les études précédentes, et dans le but également de compléter les résultats de Gendre (1992) qui avait concentré son étude sur les zones sud-est et ouest de l'île.

Au cours des trois semaines de mission, nous avons également recherché les sites qui semblaient être les moins préservés, à proximité des industries (sucrrières ou autres), des décharges d'égouts, des zones d'élevages de bovins, face aux grands hôtels.

Dans les lagons, les sédiments ont été prélevés à l'interface eau-sédiment à la benne ou en plongée; à terre ils ont été prélevés à la main. Ils ont été séchés à l'air libre sur place, puis au LASUR (Laboratoire d'Analyses au Service de l'Université et de la Recherche de Neuchâtel) dans une étuve à 110°C.

Au total, 45 échantillons de surface ont été récoltés (tabl. 3.1, fig. 3.1, annexes 1 à 4) :

- 6 échantillons ont été prélevés à terre :
  - SE1, SE2, SE3 dans des champs cultivés,
  - NE3 dans une mangrove, près d'un élevage bovin,
  - NW11 dans un ruisseau drainant les eaux usées d'Elisabethville,
  - SW1 sur une berge du ruisseau longeant l'usine sucrière de Bel Ombre;
- les 39 autres échantillons sont des sédiments marins.

*Remarque* : les échantillons ont été nommés en fonction de leur position géographique autour de l'île. Ainsi (fig. 3.1 et annexes 1 à 4) :

- les échantillons *SE* se situent au *sud-est* de l'île,
- les échantillons *NE* se situent au *nord-est* de l'île,
- les échantillons *NW* se situent au *nord-ouest* de l'île,
- les échantillons *SW* se situent au *sud-ouest* de l'île.

Dans le courant de l'étude, lorsque nous avons effectué le dosage des éléments traces, nous nous sommes rendus compte que les échantillons de basaltes qui étaient censés figurer parmi les anciennes collections d'échantillons de Maurice étaient introuvables. Or il nous fallait faire la comparaison des teneurs en traces entre la source naturelle d'apport

que constituent ces roches volcaniques, substratum de l'île, avec nos échantillons.

M. Collaud, régisseur de l'Université de Neuchâtel a accepté de nous rapporter 5 échantillons de ces roches d'un de ses voyages à l'île Maurice. L'origine géographique de ces échantillons ( $\beta 1$ ,  $\beta 2$ ,  $\beta 3$ , L1, L2) est mentionnée sur la figure 3.1 ainsi qu'en annexes (1 à 4), mais il n'a pas été possible d'effectuer d'observations de terrain; aucune précision concernant ces échantillons n'est donc rapportée dans le tableau 3.1.

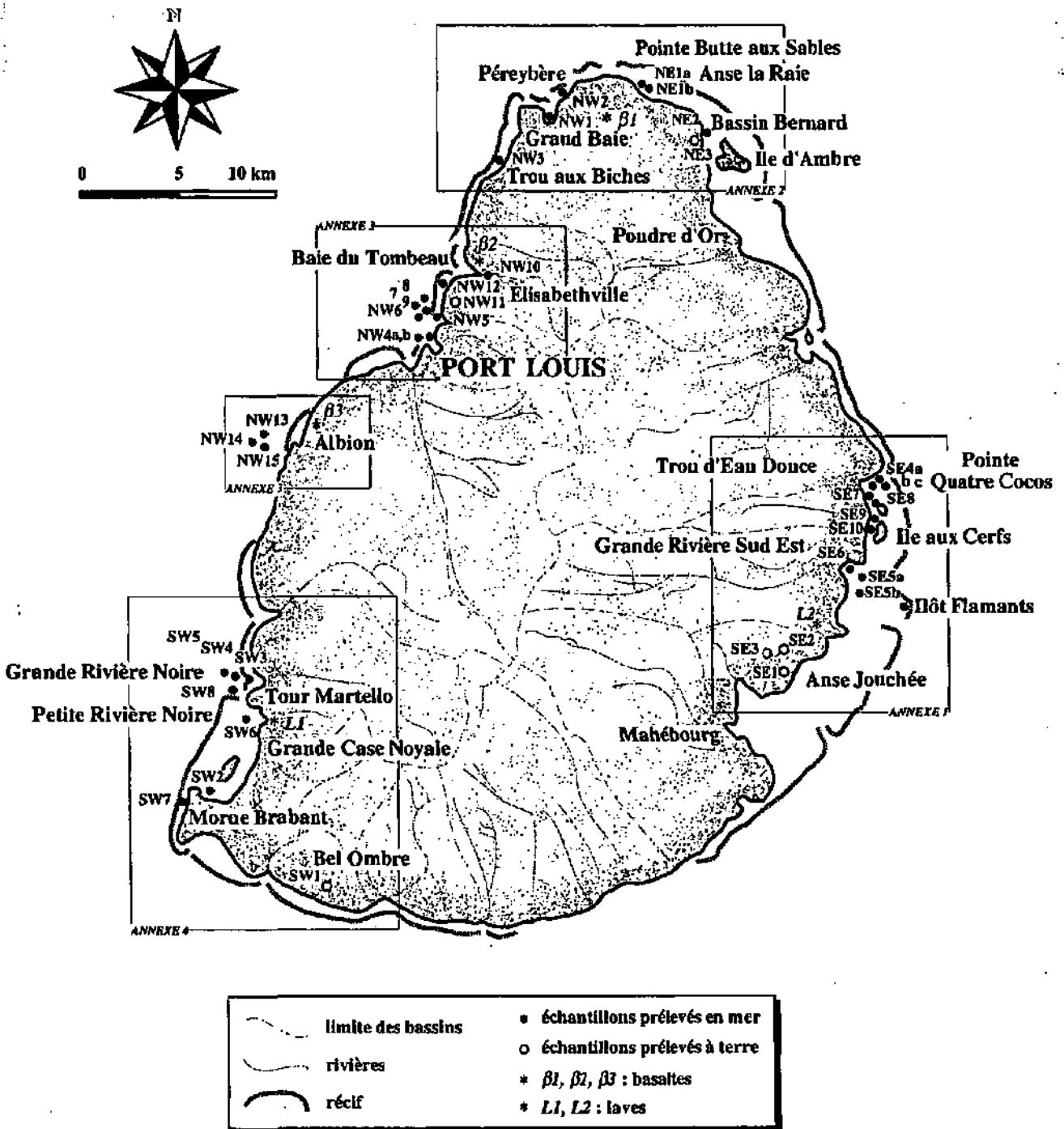


figure 3.1 : Carte de localisation des échantillons. Les zones encadrées ont été agrandies et reportées en annexes (1 à 4)

Echantillons	G.P.S.	Localisation	Prof (m)	Description
SE1		Domaine du Chasseur (Anse Jonchie) Champs de canne brûlée, coupée	0	Sol brun-rouge
SE2		Domaine du Chasseur (Anse Jonchie) Champs de canne non brûlée, non coupée	0	Sol brun-rouge plus clair
SE3		Domaine du Chasseur (Anse Jonchie) Champs d'ananas, non coupés	0	Sol brun-rouge plus clair
SE4A	20 13 . 676 S . 057 22 . 602 E	Sud pointe des Cocos, face maison Le Cikazo	12	Vase vert de gris à passées gris sombre
SE4B	20 14 . 622 S . 057 48 . 187 E	idem	12	Vase vert de gris à passées gris sombre
SE4C		idem	12	Vase vert de gris à passées gris sombre
SE5A	20 18 . 297 S . 057 47 . 080 E	Plus au Sud, en face de l'embouchure de la Grande Rivière Sud Est	20	Vase vert de gris à passées gris sombre
SE5B		idem	30	Vase vert de gris à passées gris sombre
SE6	20 17 . 396 S . 057 46 . 844 E	Embouchure GRSE	5	Vase vert sombre à noire
Ilôt Flamants				Sable corallien
SE7	20 14 . 439 S . 057 48 . 083 E	Bais de TED, en face de l'Hotel Tropical	5	Vase vert de gris clair à grise
SE8	20 14 . 533 S . 057 47 . 458 E	Face au débarcadère près de chez Le Cikazo	14,36	Vase vert de gris clair-clair
SE9	20 15 . 792 S . 057 48 . 039 E	Devant le débarcadère de l'île aux Cerfs	8	Vase vert de gris clair à grise
SE10		Abords de l'île aux Cerfs, au milieu des mangliers	0,3	Vase noire
NE1A		Anse la raie, sous Pointe Baite aux Sables	2	Sable clair
NE1B		Anse la raie, plus au Sud	2	Sable clair
NE2		(Bassin Bernard, bord de plage, mauvaises odeurs; mangrove à proximité (eau douce)	0,4	Sable moyen grisâtre; nombreux gros débris d'organismes
NE3	20 01 . 893 S . 057 40 . 702 E	Bassin Bernard, près élevage bovin; mangliers, marée basse, dans eau stagnante	0	Vase vert foncé à noir; beaucoup de basalite
NW1	20 00 . 511 S . 057 34 . 744 E	Baie de Grand Baits, en face de l'Hotel Pullman	3,5	Sable gris et algues éternouées (Halimeda)
NW1 Algues		idem	3,5	Algues (Halimeda)
NW2		Baie de Pérybère	4	Sable corallien grossier beige
NW3		Aquarium de Trou aux Biches	0,4	Sable grossier beige-gris à passées gris sombres
NW4A	20 08 . 593 S . 057 28 . 837 E	Devant la Baie de Port-Louis	20	Vase très fine vert pâle avec quelques points noirs très fins
NW4B	20 08 . 449 S . 057 28 . 894 E	idem (côté N de la borne rouge du port)	20	Vase très fine vert pâle avec quelques points noirs très fins
NW5	20 08 . 405 S . 057 28 . 899 E	Dans l'embouchure	25	Sable très fin, bcp. de basalite, d'org. vivants et de débris
NW6	20 08 . 729 S . 057 28 . 698 E	idem (SE de la borne verte du port) - direction WNW du port-	10	Vases et sables vert sombre à noir, nb. débris coquilliers et org. vivants
NW7		idem, plus à l'Est	18	Sédiment grossier; nombreux organismes vivants
NW8	20 08 . 769 S . 057 28 . 983 E	Rade de Port-Louis, entre usine sucrière et raffinerie de pétrole (plus bas, minieric	15	Vase très fine vert pâle avec quelques points noirs très fins
NW9	20 08 . 880 S . 057 29 . 152 E	idem	14	Vase très fine vert pâle avec quelques points noirs très fins
NW10		Embouchure de la Rivière du Tombeau	1	Sable fin couleur fauve
NW11		Elisabethville, un bras d'égout	0,3	Vase très fine, noire, odeur putride
NW12		Elisabethville, bras de mer face dépôt brûlage d'ordures, raffineries pétrole et sucre	0	Sable vaseux vert sombre
NW13S		Au sud de la pointe d'Albion, au sud du tuyau d'égout	20	Sable orangé
NW13C	20 13 . 930 S . 057 22 . 883 E	idem	20	Carail rouge
NW14A	20 13 . 676 S . 057 22 . 602 E	idem	105	Sable et coraux
NW14B		idem	105	Sable et coraux
NW15		idem	105	Sable et coraux
SW1		Ilet Ombre, niveau derrière usine sucrière; odeur putride à 300 m. à la ronde	0	Vase marron, odeur putride; en surface: vert foncé (oxydation)
SW2		Lagon au nord du Morne Brabant	0,2	Sable gris, nombreux débris d'organismes; très peu de vase
SW3		Rivière Noire, en face du Centre de Pêche	5	Sable noir un peu vaseux; nombreuses algues
SW4		idem, 800 m. de la côte	20	Sable fin gris sombre à passées noires
SW5		idem, 1,5 à 2 km. de la côte	30	Sable idem, un peu plus grossier
SW6		Chenal Case Noyale, face à la Baie de Petite Rivière Noire	22	Sable plus grossier; nombreux débris coquilliers
SW7		Entre la Passe de l'Ambulante et Trou à Aiguilles (plus près de la Passe), 1km. côte	10	Sable fin clair corallien
SW8		Face Tour Marrello, 800 m. de la côte	18	Sable occr. nombreux débris animaux et coralliens

Tableau 3.1 : Données de terrain, description des échantillons

## CHAPITRE 4

# MINÉRALOGIE

### 4.1 Introduction

L'île Maurice est une "île corallienne". Ses plages sont généralement d'un blanc éclatant, composées essentiellement de foraminifères, de débris coralliens et d'algues calcaires.

Dans les lagons, sur le plan minéralogique, les produits de la sédimentation carbonatée sont dominants, mais le sous bassement volcanique de l'île va amener des minéraux détritiques allochtones en quantités parfois non négligeables.

L'analyse minéralogique des sédiments a été effectuée par diffraction X sur la roche totale et sur les fractions fines 2-16 $\mu$ m et <2 $\mu$ m.

### 4.2 Méthodologie

La préparation des échantillons a été faite selon les méthodes de routine utilisées au Laboratoire de Minéralogie, Pétrographie et Géochimie de l'Université de Neuchâtel, d'après les méthodes de Kübler (1987).

L'analyse diffractométrique a porté sur :

- la roche totale : poudres non orientées.  
Les échantillons ont été séchés dans une étuve à 110°C, réduits en poudre au broyeur à agate, homogénéisés, puis pressés à 20 bars dans des portes objets, sur un buvard qui favorise la désorientation.
- Les fractions 2-16 $\mu$ m et <2 $\mu$ m, préparations orientées.  
La séparation des fractions 2-16 $\mu$ m et <2 $\mu$ m, après décarbonatation, a été effectuée par centrifugation selon la méthode de Rumley & Adatte (1983).

Ces préparations ont été analysées par diffraction RX sur un appareil *SCINTAG XRD 2000* muni d'un détecteur spectral à cristal de silicium de type PSI 1 (Kevex) et refroidi par effet Peltier.

### 4.3 La roche totale

#### 4.3.1 Composition minéralogique des sédiments

Pour l'interprétation des diffractogrammes, les réflexes utilisés pour le relevé des intensités relatives des différents minéraux reconnus dans la roche totale sont rassemblés dans le tableau 4.1.

minéral	hkl	Å	°2θ
Phyllosilicates	hkl	4.45	19.8
Quartz	101	3.34	26.6
Plagioclases	002	3.18	28.02
Calcite	104	3.03	29.4
Mg-Calcite	-	-	-
Aragonite	111	3.39	26.22
Hématite	104	2.7	33.15
Goethite	110	4.18	21.22
Gibbsite	002	4.85	18.27
Halite	200	2.82	31.69

tableau 4.1 : Réflexes des minéraux analysés

	n° éch	prof (m)	PH	Q	P	C	MC	A	HE	GOE	GIB	H	
sol	SE1	0	1718	31936	0	0	0	0	2130	2124	3681	0	
	SE2	0	2823	8264	0	0	0	0	3721	4575	1286	0	
	SE3	0	0	68690	0	0	0	0	1674	4144	2839	0	
	sol	NW11	0.3	0	0	0	8233	22544	40783	0	0	0	7926
terrestre	SW1	0	3623	705	1868	0	0	0	6834	2626	11226	0	
mangrove	NE3	0	1522	1283	4376	8002	26534	11701	0	0	0	23483	
	SE10	0.3	0	0	0	7133	39877	52224	0	0	0	12052	
GRSE	SE5A	20	0	2638	0	8706	27872	22642	0	0	9383	13743	
	SE5B	20	0	0	0	11952	37621	37995	0	0	4737	7241	
	SE6	5	2254	1968	0	0	7242	0	0	0	9047	29421	
	GRN	SW3	5	0	0	1374	4905	25296	34302	0	0	0	7148
	GRN	SW4	20	0	0	0	5737	31357	47419	0	0	0	4844
	GRN	SW5	30	0	0	0	4977	35005	46110	0	0	0	7042
R. Tombeau	NW10	1	0	0	0	6031	26797	43604	0	0	0	2930	
Port-Louis	NW4A	20	0	0	0	8545	52529	36285	0	0	0	13440	
	NW4B	20	0	0	0	10731	45063	41515	0	0	0	10812	
	NW5	25	0	1611	0	6456	37258	33697	0	0	0	10497	
	NW6	10	0	1313	2457	21494	21014	28579	19849	0	0	0	7461
	NW7	18	0	1471	2933	17751	18884	17231	0	0	0	7100	
	NW8	15	0	0	0	9210	44441	39805	0	0	0	12492	
Elisabethville	NW12	0	0	2189	1576	8932	34102	35692	0	0	0	1526	
Ablion	NW13S	20	0	0	0	64592	51328	21045	0	0	0	7141	
	NW13C	20	0	0	0	2907	60920	25468	0	0	0	2575	
	NW14A	105	0	0	0	24495	59985	29759	0	0	0	7302	
	NW14B	105	0	0	0	23929	66855	25289	0	0	0	12300	
	NW15	105	0	0	0	5308	64472	35551	0	0	0	7363	
lagons	SE4A	12	0	0	0	12774	45527	44307	0	0	0	5671	
	SE4B	12	0	0	0	12871	46751	50917	0	0	0	4766	
	SE4C	12	0	0	0	12285	45995	48670	0	0	0	5689	
	IF	0.3	0	0	0	19974	68722	25759	0	0	0	0	
	SE7	5	0	0	0	11389	49030	47841	0	0	0	5680	
	SE8	14.6	0	0	0	15153	45629	47142	0	0	0	4314	
	SE9	8	0	0	0	14147	40977	42075	0	0	0	5833	
	NETA	2	0	0	0	7746	34886	34948	0	0	0	7463	
	NETB	2	0	0	0	7974	36929	34549	0	0	0	6881	
	NE2	0.4	0	0	0	5233	31729	44996	0	0	0	6827	
	NW1	3.5	0	0	0	6540	18919	66376	0	0	0	9779	
	NW1 Alg.	3.5	0	0	0	2390	8819	81018	0	0	0	19585	
	NW2	4	0	0	0	6724	40900	52498	0	0	0	3915	
	NW3	0.4	0	0	0	12520	29375	51966	0	0	0	4718	
	SW2	0.2	0	0	5899	21402	23679	23730	0	0	0	3475	
	SW6	22	0	0	0	9828	40588	45169	0	0	0	3348	
SW7	10	0	0	0	6004	27943	15876	0	0	0	3488		
SW8	18	0	0	0	6977	46838	45601	0	0	0	7762		

tableau 4.2 : Intensité des pics des minéraux de la roche totale, en CPM (coups par minutes)

L'analyse minéralogique a permis de déterminer la présence des minéraux suivants (tabl. 4.2) :

- des minéraux détritiques allochtones : phyllosilicates (PH), quartz (Q), plagioclases (P, anorthite 70), hématite (HE), goëthite (GOE), gibbsite (GIB);
- des minéraux carbonatés autochtones : calcite (C), calcite magnésienne (MC), aragonite (A);
- et de la halite (H) dans tous les sédiments marins (précipitée à partir de l'eau interstitielle).

Trois ensembles sédimentaires différents sont mis en relief :

- les sols SE1, SE2 et SE3 (domaine du Chasseur), et le sédiment terrestre SW1 (Bel Ombre) ne contiennent que des minéraux détritiques.
- Les lagons ou mer ouverte présentant une sédimentation mixte détritique allochtone et carbonatée autochtone se situent :
  - au débouché de la Grande Rivière du Sud Est : SE5A, SE5B et SE6,
  - autour de Port-Louis : NW6 et NW7,
  - dans le bras de mer d'Elisabethville : NW12,
  - dans la mangrove de Bassin Bernard : NE3.

Dans ces zones, l'apport de détritique procédant du substrat volcanique de l'île dans les lagons est mis en évidence.

- Les lagons ou mer ouverte avec sédimentation carbonatée dominante : les 34 autres échantillons répartis sur tout le pourtour de l'île.

### 4.3.2 Les calcites magnésiennes

Les calcites magnésiennes, solutions solides de  $MgCO_3$  dans la maille de la calcite sont les marqueurs sédimentologiques des milieux de dépôts de mers chaudes tropicales à subtropicales, et des systèmes récifaux, atolls ou lagons (Dickson, 1990; Kübler, 1992).

Elles peuvent avoir diverses origines :

- une origine biologique pure : tests d'organismes; dans ce cas les taux de solutions solides sont variables suivant les classes, les familles, les genres d'organismes et la température des eaux (Lippmann, 1973; Bathurst, 1975).
- ou être formées par précipitation chimique, biochimique primaire ou secondaire (enduits, concrétions, ciments).

Les diagrammes de diffraction X montrent, pour les échantillons contenant des minéraux carbonatés, un "pic de calcite bifide" illustrant en fait deux minéraux distincts : la calcite stoechiométrique (C) et la calcite magnésienne (MC) (fig. 4.1).

Pour distinguer qualitativement et quantitativement ces deux pics, les raies de diffraction ont été désommées (déconvoluées) par une fonction de Pearson VII, outil fourni par le programme *DMS* qui gère les données des diffractogrammes *SCINTAG*.

Puis le taux de solution solide de  $MgCO_3$  dans la maille de calcite magnésienne a été mesuré par la position du pic de calcite magnésienne entre les deux "bornes" de la calcite et de la dolomite.

Les taux calculés de solutions solides dépendent de la précision de la mesure des angles

de diffraction. En général, la raie du quartz est utilisée comme standard d'angle. Cependant dans les sédiments de Maurice le quartz est souvent absent. L'aragonite est au contraire ubiquiste, on la retrouve dans tous les sédiments marins; de plus, Kübler a pu démontrer la validité de l'aragonite comme référence angulaire (Kübler, 1992; Kübler *et al.*, inédit).

Selon Graf (1960), en admettant une migration linéaire entre :

- l'angle de diffraction de la calcite de référence JCPDS à  $29.4056^{\circ}2\theta$  (0% de  $MgCO_3$ ),
- et l'angle de diffraction de la dolomite de référence JCPDS à  $30.9389^{\circ}2\theta$  (50% de  $MgCO_3$ ),

il est possible de calculer le taux de  $MgCO_3$  selon la formule de la droite de régression :

$$y = -958.9 + 32.609x$$

où x correspond à la différence d'angle entre la calcite magnésienne observée et l'aragonite corrigée (aragonite observée - aragonite standard).

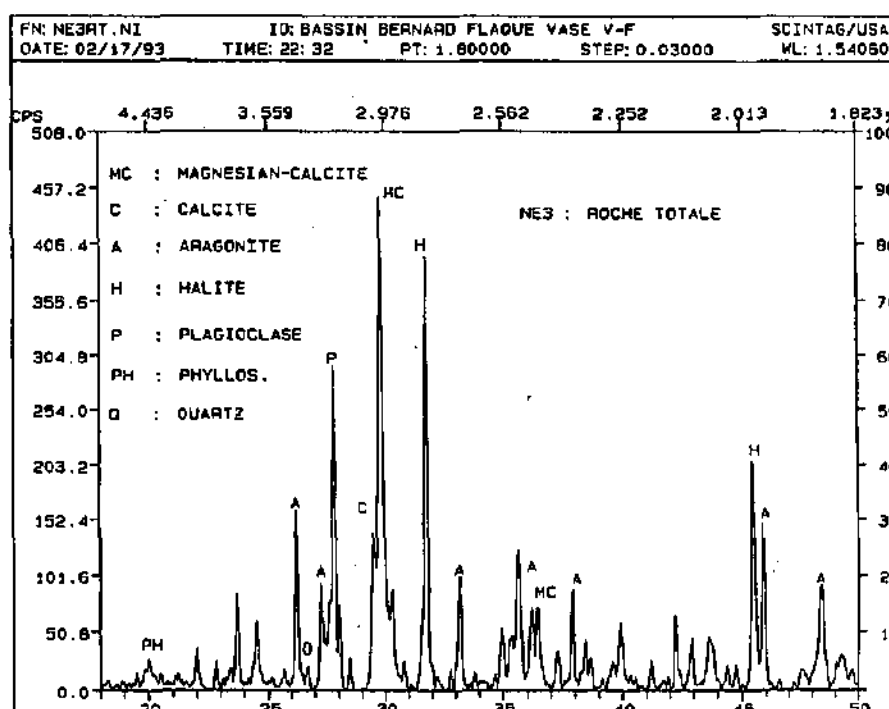


figure 4.1 : Diagramme RX de l'échantillon NE3 montrant le double pic de calcite stoechiométrique et de calcite magnésienne, entre  $29.4^{\circ}2\theta$  et  $\approx 30^{\circ}2\theta$

**Le taux moyen de substitution de  $MgCO_3$  dans les calcites magnésiennes calculé pour cet échantillonnage (annexe 5) est de  $13.8 \pm 0.5$  moles %.**

Si l'on compare ce résultat avec ceux des études précédemment menées à Maurice (Gendre (1992) et collection privée de L. Hottinger (Bâle, annexe 6), *in* Kübler *et al.*, inédit), on observe que, quelle que soit la position des échantillons dans les écosystèmes (embouchures, passes, chenaux de marées, plateforme externe,...), et quels que soient les taux de calcite magnésienne dans les autres carbonates (calcite stoechiométrique, aragonite), le taux de substitution de  $MgCO_3$  dans les calcite magnésiennes des sédiments de Maurice est remarquablement constant.



Frank & Lohmann (1996) viennent de publier un résultat tout-à-fait étonnant qui rejoint le notre : sur la zone côtière Nord de la Jamaïque, dans des ciments marins Pliocènes constitués de *High Magnesian Calcite*, ils ont dosé un taux extrêmement constant de  $\text{MgCO}_3$  dans les calcites magnésiennes égal à  $13.7 \pm 0.2$  moles%. Pour les auteurs, la constance de ce résultat témoigne de l'origine marine des calcites magnésiennes. Il peut signifier également l'existence d'un processus unique de formation.

### 4.3.3 Le dosage semi-quantitatif de la roche totale

Les pourcentages des différents minéraux (tabl. 4.2) ont été calculés par la méthode de l'étalon externe, avec appréciation du coefficient d'absorption massique selon Ferrero (1965, 1966; Persoz, 1969) et les logiciels de Kettiger (1981) transcrits par Rolli (1991) pour MacIntosh.

#### Remarques :

Pour réaliser le dosage semi-quantitatif du cortège minéral présent dans les échantillons, l'utilisation d'étalons externes (standards) est impérative.

Or les standards de gibbsite et de calcite magnésienne n'existent pas.

- La gibbsite ( $\text{Al}(\text{OH})_3$ ), minéral détritique, n'a pu être dosé.
- La calcite magnésienne est un constituant important de la sédimentation carbonatée des lagons. Afin de la prendre en compte dans le dosage semi-quantitatif des minéraux constituant la roche totale, nous avons "élaboré" un étalon externe de ce minéral.

#### • Dosage semi-quantitatif de la calcite magnésienne

Le principe du dosage (Rolli, 1991) peut se résumer ainsi : les intensités des pics d'un mélange reflètent les proportions de chaque composant dans ce mélange. La quantification se fait donc en utilisant l'intensité d'un pic caractéristique pour le minéral présent dans l'échantillon analysé.

Le dosage des minéraux majeurs par diffraction X en utilisant des étalons externes est basé sur l'équation suivante :  $I = I_0 C_m (\mu_m / \mu_e)$

avec :  $I_0$  = intensité du minéral pur (étalon externe)

$I$  = intensité du minéral à quantifier

$\mu_m$  = coefficient d'absorption massique du minéral pur

$\mu_e$  = coefficient d'absorption massique de l'échantillon

$C_m$  = concentration du minéral dans l'échantillon

L'intensité  $I$  (en Coups Par Minute) d'un composant  $P$  dans le mélange est fonction de la concentration  $C_m$  de  $P$  dans le mélange, de l'intensité 100%  $I_0$  d'un standard externe et des coefficients d'absorption massique  $\mu_m$  de  $P$  et  $\mu_e$  du mélange.

#### • Calcul de $\mu_{\text{MgCalcite}}$ : coefficient d'absorption massique de la calcite magnésienne

Brindley & Brown (1984) définissent le coefficient d'absorption massique d'un mélange composé de  $P, Q, R, \dots$  en proportions de poids  $W_P, W_Q, W_R, \dots$  avec des coefficients d'absorption massique  $\mu_P, \mu_Q, \mu_R, \dots$  comme suit :  $M(\text{mélange}) = W_P \mu_P + W_Q \mu_Q + W_R \mu_R + \dots$

Considérant que la calcite magnésienne  $(Ca-Mg)CO_3$  est un mélange de calcite  $CaCO_3$  et de magnésite  $MgCO_3$ , nous utilisons leurs  $W$  et  $\mu$  pour définir notre standard.

Le taux moyen de substitution de  $MgCO_3$  dans les calcites magnésiennes (§ 4.3.2) a été utilisé pour déterminer les coefficients d'absorption massique en proportions de poids  $W_{Calcite}$  et  $W_{Magnésite}$ ; considérant que ce taux de  $13.8 \pm 0.5$  moles% est à peu près égal à 14 moles%, nous déterminons que :

$$- W_{Magnésite} = 0.14$$

$$- W_{Calcite} = (1 - 0.14) = 0.86$$

d'où :

$$\mu_{MgCalcite} = (W_{Calcite} \times \mu_{Calcite}) + (W_{Magnésite} \times \mu_{Magnésite})$$

$$\mu_{MgCalcite} = (0.86 \times 74.43243) + (0.14 \times 18.66462)$$

$$\mu_{MgCalcite} = 66.625$$

• *Détermination du  $I_0$  (intensité du minéral pur) de la calcite magnésienne*

Pour déterminer ce paramètre, un échantillon de la collection de L. Hottinger (Bâle, annexe 6) a été utilisé; il s'agit d'un échantillon dénommé "Echinide 1" de Maurice, et défini comme étant pur en calcite magnésienne par B. Kübler.

Nous pouvons effectuer une règle de trois avec la valeur ALIENOR, valeur  $I$  de la calcite de référence le jour où l'échantillon considéré a été analysé.

$$I_{Echinide1} = 218\ 661\ CPM\ \text{pour ALIENOR} = 326\ 360\ CPM$$

$$I_{MgCalcite} = x\ CPM\ \text{pour ALIENOR} = 300\ 000\ CPM$$

$$I_{MgCalcite} = 201\ 000\ CPM$$

Les paramètres déterminés pour l'étalon standard de calcite magnésienne sont donc :

$$\mu_{MgCalcite} = 66.625$$

$$I_{MgCalcite} = 201\ 000\ CPM$$

Les "Indosés (%)" sont donnés par la formule suivante :

$$\text{Indosés} = 100 - \sum C_m$$

où  $C_m$  représente la concentration de chaque minéral.

La fraction des Indosés représente une forte proportion par rapport aux pourcentages des minéraux dosés. Ceci peut s'expliquer par l'addition de différents facteurs :

- la gibbsite n'a pu être dosée dans les échantillons SE1, SE2, SE3, SE5A, SE5B, SE6 et SW1.
- En général, les hydroxydes (de Fe ou d'Al) sont présents sous des formes amorphes et l'intensité de leurs pics principaux est faible; ils peuvent donc être sous-dosés.
- De la même manière, les phyllosilicates présentent des pics de faible intensité et de "forme étalée" (fig. 4.1); ils sont également sous-dosés.
- Le calcul de l'étalon externe de calcite magnésienne peut également aboutir à une sous estimation de ce minéral; mais dans ce cas, il est impossible de vérifier cette hypothèse, le calcul étant nouvellement élaboré.
- Enfin, la présence de matière organique dans les échantillons initie un fort bruit de fond visible sur les diagrammes RX. Cette matière organique rentre dans les

pourcentages d'indosés.

Le tableau 4.3 illustre les résultats obtenus pour le dosage semi-quantitatif des minéraux constituant les échantillons de Maurice.

	n° éch	prof (m)	PH	Q	P	C	MC	A	HE	GOE	H	Indosés
<i>sol</i>	SE1	0	9.3	5.4	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0	1.9	0.0	82.4
<i>sol</i>	SE2	0	16.8	1.6	0.0	0.0	0.0	0.0	1.9	4.4	0.0	75.3
<i>sol</i>	SE3	0	0.0	12.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.8	3.8	0.0	83.3
<i>terrestre</i>	NW11	0.3	0.0	0.0	0.0	2.8	10.0	36.8	0.0	0.0	1.1	49.3
<i>terrestre</i>	SW1	0	21.6	0.1	0.9	0.0	0.0	0.0	3.5	2.5	0.0	71.3
<i>mangrove</i>	NE3	0	8.5	0.2	2.0	2.4	10.4	9.4	0.0	0.0	2.8	64.2
<i>mangrove</i>	SE10	0.3	0.0	0.0	0.0	2.7	19.1	51.0	0.0	0.0	1.8	25.5
<i>GRSE</i>	SE5A	20	0.0	0.5	0.0	2.8	11.4	19.0	0.0	0.0	1.7	64.5
<i>GRSE</i>	SE5B	20	0.0	0.0	0.0	4.1	16.8	34.7	0.0	0.0	1.0	43.4
<i>GRSE</i>	SE6	5	11.6	0.3	0.0	0.0	2.6	0.0	0.0	0.0	3.3	82.1
<i>GRN</i>	SW3	5	0.0	0.0	0.8	1.6	10.8	29.9	0.0	0.0	0.9	55.9
<i>GRN</i>	SW4	20	0.0	0.0	0.0	2.0	14.4	44.5	0.0	0.0	0.7	38.4
<i>GRN</i>	SW5	30	0.0	0.0	0.0	1.8	16.0	43.2	0.0	0.0	1.0	38.0
<i>R. Tombeau</i>	NW10	1	0.0	0.0	0.0	2.1	12.0	39.9	0.0	0.0	0.4	45.6
<i>Port-Louis</i>	NW4A	20	0.0	0.0	0.0	3.0	23.7	33.5	0.0	0.0	1.9	38.0
	NW4B	20	0.0	0.0	0.0	3.8	20.7	38.9	0.0	0.0	1.5	35.1
	NW5	25	0.0	0.3	0.0	2.4	17.8	52.6	0.0	0.0	1.6	25.3
	NW6	10	0.0	0.3	1.7	9.7	12.2	34.0	14.4	0.0	1.3	26.3
	NW7	18	0.0	0.3	1.4	5.5	7.5	14.0	0.0	0.0	0.9	70.4
	NW8	15	0.0	0.0	0.0	3.3	20.2	36.9	0.0	0.0	1.8	37.9
	NW9	14	0.0	0.0	0.0	2.9	19.4	36.1	0.0	0.0	1.3	40.3
<i>Elisabethville</i>	NW12	0	0.0	0.4	0.8	3.0	14.9	31.8	0.0	0.0	0.2	48.9
<i>Albion</i>	NW13S	20	0.0	0.0	0.0	22.9	23.4	19.6	0.0	0.0	1.0	33.1
	NW13C	20	0.0	0.0	0.0	1.0	26.2	22.3	0.0	0.0	0.3	50.2
	NW14A	105	0.0	0.0	0.0	8.6	27.0	27.4	0.0	0.0	1.0	35.9
	NW14B	105	0.0	0.0	0.0	8.3	29.9	23.1	0.0	0.0	1.7	36.9
	NW15	105	0.0	0.0	0.0	1.9	29.3	33.0	0.0	0.0	1.0	34.9
<i>lagons</i>	SE4A	12	0.0	0.0	0.0	4.6	21.2	42.1	0.0	0.0	0.8	31.4
	SE4B	12	0.0	0.0	0.0	4.8	22.5	50.0	0.0	0.0	0.7	22.1
	SE4C	12	0.0	0.0	0.0	4.5	21.8	47.2	0.0	0.0	0.8	25.6
	IF	0.3	0.0	0.0	0.0	6.9	30.5	23.4	0.0	0.0	0.0	39.2
	SE7	5	0.0	0.0	0.0	4.2	23.2	46.3	0.0	0.0	0.8	25.4
	SE8	14.56	0.0	0.0	0.0	5.6	21.5	45.5	0.0	0.0	0.6	26.8
	SE9	8	0.0	0.0	0.0	5.0	18.8	39.4	0.0	0.0	0.8	36.0
	NE1A	2	0.0	0.0	0.0	2.9	16.8	54.0	0.0	0.0	1.1	25.2
	NE1B	2	0.0	0.0	0.0	3.0	17.8	53.6	0.0	0.0	1.0	24.6
	NE2	0.4	0.0	0.0	0.0	1.8	14.4	41.8	0.0	0.0	1.0	41.0
	NW1	3.5	0.0	0.0	0.0	2.6	9.5	68.1	0.0	0.0	1.5	18.3
	NW1 Alg.	3.5	0.0	0.0	0.0	1.0	4.8	89.7	0.0	0.0	3.3	1.2
	NW2	4	0.0	0.0	0.0	2.5	19.5	51.2	0.0	0.0	0.6	26.3
	NW3	0.4	0.0	0.0	0.0	4.6	13.9	50.2	0.0	0.0	0.7	30.6
	SW2	0.2	0.0	0.0	2.9	6.9	9.8	20.0	0.0	0.0	0.4	60.0
	SW6	22	0.0	0.0	0.0	3.5	18.7	42.6	0.0	0.0	0.8	34.3
	SW7	10	0.0	0.0	0.0	1.8	11.0	12.8	0.0	0.0	0.4	73.9
SW8	18	0.0	0.0	0.0	2.5	21.8	43.4	0.0	0.0	1.1	31.2	

tableau 4.3 : Minéralogie de la roche totale (%); dosage par la méthode de l'étalon externe (Rolli, 1991)

## 4.4 Les argiles : fractions 2-16 $\mu$ m et <2 $\mu$ m

### 4.4.1 Détermination des minéraux argileux

Présentées dans les annexes 7 et 8, les intensités des différents minéraux (argileux et non-argileux) ont été relevés sur les diagrammes des préparations 2-16 $\mu$ m normales, et <2 $\mu$ m normales et glycolées.

Les réflexes des minéraux observés dans la fraction 2-16 $\mu$ m sont les suivants :

- 001 de la smectite à 5.2° (16.8Å)
- 001 du mica à 8.85° (9.98Å)
- 002 de la chlorite à 12.40° (7.11Å)
- 001 de la kaolinite à 12.35° (7.16Å)
- 001 de l'halloysite à 12.11° (7.3Å)
- 002 du mica à 17.75° (4.9 - 5Å)
- 002 de la gibbsite à 18.27° (4.85Å)
- 003 de la chlorite à 18.8° (4.7Å)
- 001 du quartz à 20.85° (4.25Å)
- 110 de la goethite à 21.22° (4.18 Å)
- 001 de l'halloysite à 24.57° (3.62Å)
- 002 de la kaolinite à 24.9° (3.57Å)
- 004 de la chlorite à 25.15° (3.54Å)
- 101 du quartz à 26.65° (3.34Å)
- 002 des plagioclases Na à 28.02° (3.18Å)
- 311 de la pyrite à 33.03° (2.7Å)

A l'exception du quartz, les mêmes minéraux ont été relevés dans les préparations des fractions <2 $\mu$ m normales, avec en plus le réflexe 001 de la chlorite vers 6.2Å.

Les fractions <2 $\mu$ m glycolées ont permis de distinguer la chlorite à 14Å et les smectites à 17Å.

D'une manière générale, dans toutes les préparations, les intensités des pics sont très faibles et les différentes phases sont mal cristallisées.

Comme Moore & Reynolds (1989), on observe que les minéraux argileux et non-argileux sont mélangés, et que les pics de minéraux non-argileux sont plus hauts et plus aigus que ceux des minéraux argileux.

### 4.4.2 Répartition des minéraux argileux et non-argileux

D'une manière générale :

- les micas (illite) et la chlorite sont présents en faibles quantités dans les zones où il y a des détritiques.
- Le quartz est absent de la majorité des sédiments.
- Les minéraux les plus représentés sont les plagioclases basiques (An 70), la kaolinite,

- l'halloysite, la gibbsite, la goethite, les smectites et la pyrite.
- Les plagioclases basiques sont présents dans tous les sédiments (annexe 8).
  - La kaolinite, la gibbsite, et dans une moindre mesure l'halloysite (qui est une kaolinite hydratée) sont présents tout autour de l'île; c'est également le cas de la goethite; mais elle est plus faiblement représentée.
  - Les smectites sont concentrées dans deux zones précises : autour de Port-Louis et dans le lagon des bénitiers.
  - La pyrite, si l'on considère les deux fractions 2-16 $\mu$ m et <2 $\mu$ m, est présente partout sauf dans les sols, Grand-Baie et Péreybère, au Nord du Morne Brabant, et entre la tour Martello et la passe de l'Ambulante dans le lagon de Bénitiers.

En fait, le cortège argileux caractérisant les sédiments de Maurice est directement lié au sous-bassement de l'île ainsi qu'aux conditions climatiques auxquelles l'île est soumise.

Le socle de l'île Maurice est formé de basaltes (cf. chapitre 2). L'étude en lames minces des 5 échantillons de roches volcaniques a montré que :

- $\beta$ 1,  $\beta$ 2 et  $\beta$ 3 sont des basaltes à olivine, avec des minéraux bien cristallisés d'olivine, de pyroxène et de plagioclases dans une matrice grenue.
- L1 et L2 sont des laves présentant la même minéralogie, mais une matrice plus fine.

Smith *et al.* (1987) ont observé que la goethite (riche en Fe), les smectites trioctaédriques et dioctaédriques et l'halloysite sont des minéraux d'altération de l'olivine (Fogo). Une partie de ces minéraux dans les échantillons de Maurice peuvent provenir de l'olivine.

Selon Millot (1964), la kaolinite et l'halloysite peuvent être néoformées sous climat intertropical; elles procèderaient de l'hydrolyse des feldspaths, et de la mise en solution des ions constituant ces feldspaths.

D'autre part, l'auteur décrit ainsi le processus d'altération latéritique en région intertropicale sous climat tropical humide : les silicates sont hydrolysés (ce qui peut aboutir à la dissolution complète du quartz); les ions Si, Al, Mg, Ca, K, Na sont libérés. Une grande partie de ces ions est évacuée par percolation, ceux qui restent (en particulier Fe, Al et Si) seront répartis dans les profils des trois constituants fondamentaux des sols latéritiques (ou sols ferrallitiques) : les silicates d'alumines cristallisés en kaolinite, les oxydes de Fe (hématite), et les oxy-hydroxydes de Fe (goethite) ou d'Al (gibbsite).

En 1995, Righi & Meunier donnent le même profil d'altération.

Ils décrivent également le processus de formation des smectites dans les vertisols.

Les vertisols se forment dans les zones tropicales à saisons sèches et humides bien marquées. En période sèche, le lessivage des cations basiques (Ca, Mg) est minimum; ils s'accumulent dans le sol, induisant des conditions favorables (pH, concentrations de Ca et Mg) à la formation des smectites. Cependant, la roche mère sur laquelle le sol se développe doit avoir des teneurs suffisantes en cations basiques; c'est pourquoi les vertisols ne se développent que sur des roches basaltiques (*i.e.* Maurice), schisteuses, calcaires ou des cendres volcaniques. De plus, les smectites des vertisols sont directement ou indirectement dérivées de roches mères contenant des minéraux ferro-magnésiens.

Si l'on compare la répartition du cortège argileux des échantillons avec la carte pédologique dressée par P. Willaime en 1984 (fig. 4.2), on constate que les données

concordent avec celles définies dans la littérature :

- sur l'île, autour de Port-Louis et en bordure du lagon des Bénitiers, Willaime (1984) a cartographié des vertisols; leur localisation correspond exactement avec la répartition des smectites dans notre échantillonnage.
- Le reste de l'île présente des sols ferrallitiques à différents stades d'évolution dont découlent les kaolinites, halloysites, gibbsites et goethites.

La présence de pyrite dans la majeure partie des sédiments prélevés, souvent des vases ou des sables vaseux, témoigne de l'installation d'un environnement confiné, ce qui est peu surprenant dans ce type de sédiments.

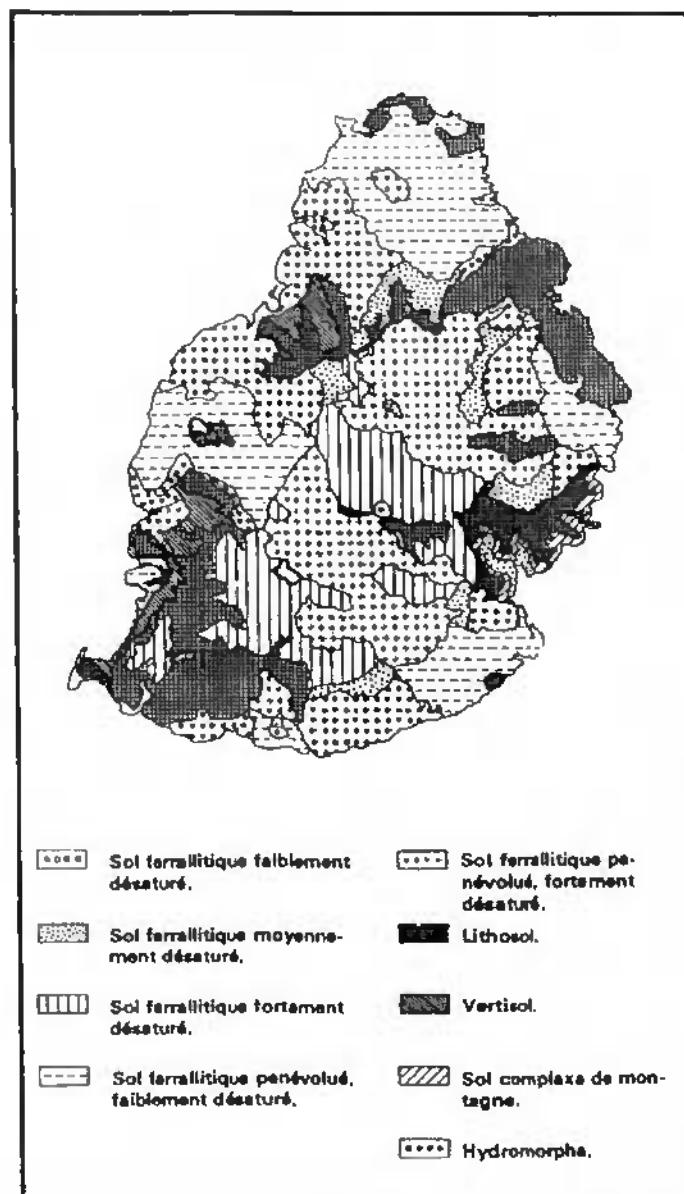


figure 4.2 : Carte pédologique de l'île Maurice dressée par P. Willaime (1984)

## 4.5 Conclusion

Les résultats des analyses de la roche totale et des fractions argileuses sont sans surprises quant à la sédimentation prévalant dans les lagons et en mer autour de Maurice.

- Pour la roche totale, la sédimentation carbonatée est dominante dans les lagons, devenant mixte (carbonatée et détritique) aux abords des exutoires de rivières. Seul le taux de substitution de  $\text{MgCO}_3$  dans les calcites magnésiennes ( $13.8 \pm 0.5$  moles%) est un résultat remarquable, de par sa constance.
- Les fractions fines proviennent de l'altération des laves et des basaltes.

L'analyse minéralogique des sédiments peut en outre nous permettre de comprendre la composition en éléments majeurs des échantillons. Dans cet objectif, une analyse conjointe du dosage des éléments majeurs et de la minéralogie des sédiments sera effectuée à la fin du chapitre 5.

## CHAPITRE 5

### GÉOCHIMIE MINÉRALE, PREMIÈRE PARTIE :

### SPÉCIATION DES CARBONATES

#### 5.1 Méthodologies

Le dosage des éléments majeurs a été effectuée suivant la méthode de routine de "spéciation des carbonates" développée au LMPG de Neuchâtel (Kübler *et al.*, 1979). Les analyses ont été réalisées au LASUR (laboratoire d'analyses géochimiques) à Neuchâtel.

La spéciation des carbonates consiste à distinguer les cations et anions qui sont spécifiquement liés aux carbonates de ceux qui sont liés aux silicates, aux sulfures, aux sulfates, aux oxydes et aux hydroxydes (Beck, 1987; Kübler *et al.*, 1979).

L'analyse géochimique globale nécessite la mise en œuvre de plusieurs méthodes :

- une analyse élémentaire sur la roche totale,
- la spéciation des carbonates après une mise en solution par attaque acide.

##### 5.1.1 Analyse élémentaire CHN

Le dosage des éléments C, H et N a été effectué sur un *Carlo-Erba Elemental Analyser 1108* géré par micro-ordinateur.

Le principe du dosage est une chromatographie en phase gazeuse. L'échantillon réduit sous forme de poudre est introduit dans une nacelle d'étain, laquelle est calcinée à très haute température (1800°C au moment de la combustion) en présence d'oxygène.

Les gaz issus de cette pyrolyse sont véhiculés par de l'hélium à travers deux colonnes d'oxydo-réduction. Les gaz à analyser ont des vitesses d'éluion différentes. L'azote est le premier à être détecté, suivi du carbone puis de l'hydrogène.

Les signaux chimiques sont transformés en signaux électriques exprimés en millivolts. Ces mesures sont comparées à celles d'un standard, le cyclohexanone-2,4-dinitrophenyl-hydrazone (C<sub>12</sub>H<sub>14</sub>N<sub>4</sub>O<sub>4</sub>). L'unité informatique calcule et enregistre les pourcentages des éléments mesurés. L'erreur due à l'analyse est estimée à 0.2%.

Les paramètres obtenus sont :

- le carbone total, CTOT (%)
- l'hydrogène total, H (%)
- l'azote total, N (%)

##### 5.1.2 La spéciation des carbonates

Les carbonates ont été mis en solution par attaque chimique à l'HCl 1.25N.

L'HCl 1.25N met en solution principalement les cations provenant de la phase



carbonatée, mais aussi, en partie, des minéraux argileux, de la matière organique, des phosphates, de la silice amorphe, des hydroxydes de fer et d'aluminium (Kübler *et al.*, 1979).

1g d'échantillon séché une nuit à 110°C, broyé à l'agate et homogénéisé, est attaqué avec 20 ml d'HCl 1.25N pendant 30 minutes, à  $\approx 80^\circ\text{C}$  et sous agitation. Après filtration sur filtre *Millipore HVLP 0.45\mu\text{m}* le filtrat est amené à 100ml avec de l'eau désionnisée. Le résidu insoluble, rincé abondamment puis séché, est pesé et rapporté à la roche totale.

Après ce traitement, on obtient deux phases sur lesquelles sont effectués plusieurs dosages chimiques :

- le **résidu insoluble (RI)**, qui contient les silicates, alumino-silicates, une partie des sulfures et hydroxydes, et de la matière organique.
- la **phase acidosoluble**, qui contient le carbone des carbonates, une partie des phosphates, sulfates, hydroxydes, sulfures, phyllosilicates et une partie de la matière organique qui est bien solubilisée lorsqu'elle est fraîche.

- *Analyse du RI*

Une analyse élémentaire CHN est faite sur le RI, de manière à connaître principalement la teneur en carbone organique du sédiment.

Par cette analyse on obtient le carbone organique du résidu insoluble (**CORI**).

- *Analyses de la phase acidosoluble*

Pour obtenir les pourcentages de majeurs présents dans les sédiments, les teneurs en anions et cations dosées par les différentes méthodes suivantes sont ensuite rapportées au sédiment total.

- Les teneurs en **K, Mn, Fe, Mg et Sr** sont mesurées par *Spectrophotométrie d'Absorption Atomique à Flamme (FAAS) Perkin Elmer 5100*.

Le principe de l'absorption peut être résumé ainsi. Chaque élément du tableau de Mendeleiev a un nombre propre d'électrons associés à son noyau. La configuration normale de ces électrons est un état stable sur les différentes orbitales. Si on applique une énergie importante sur un atome, il entre dans un état instable ou état d'excitation. La spectroscopie d'absorption atomique repose sur le fait que les atomes absorbent la lumière. Les propriétés optiques des atomes libres peuvent uniquement être observés à l'état gazeux. L'échantillon est vaporisé dans une flamme produite par un mélange d'air et d'acétylène. Cette énergie thermique est le moteur déclanchant l'état désordonné des atomes. Les atomes absorbent sélectivement la lumière à une longueur d'onde caractéristique correspondant à une lampe (cathode) de cet élément. Le système est donc équipé d'une source lumineuse (de type H.C.L. *Hollow Cathode Lamp*) émettant une radiation spécifique de l'élément à doser. Le faisceau émis par cette lampe est divisé en un rayon qui traversera les atomes à l'état instable et y sera absorbé. L'autre partie du rayon est déviée et servira de référence à l'appareil lors de la détection. Dans ce système de double faisceau, la mesure représente le rapport entre l'intensité de la lumière transmise à travers les échantillons et l'intensité du faisceau de référence (loi de Lambert-Beer) :  $\text{Absorbance} = \log(I_0/I) = KLN$ , où K = constante en relation avec l'absorptivité, L = longueur du chemin traversé par la lumière et N = concentration des atomes dans la vapeur.

Pour chaque échantillon le dosage est dupliqué; un résultat moyen est calculé puis enregistré directement par l'ordinateur.

- Les teneurs en **Al, PO<sub>4</sub> et SiO<sub>2</sub>** sont mesurées par colorimétrie automatique *FIA*

*"Flow Injection Analysis Tecator™"*

L'appareil de dosage *FIA* se présente en trois blocs : un *Autosampler 5017* suivi d'un *FIAstar 5010 Analyser* lui-même relié à un spectrophotomètre automatique *FIAstar 5023*. Cette chaîne de mesure est gérée par un ordinateur PC.

Il est possible de mesurer un paramètre identique en série sur 40 échantillons. Une analyse dure en moyenne 55 secondes par paramètre et par échantillon. Le nombre d'injections de l'échantillon et le temps de rinçage sont des fonctions qui peuvent être programmées individuellement.

Une prise d'essai de 40 µl, 100 µl ou 200 µl d'échantillon est prélevée puis propulsée par un liquide de composition proche de celle contenant les éléments à doser (Carrier). Différents réactifs sont injectés en fonction de l'élément à doser et réagissent avec ceux-ci en donnant des composés colorés dosables par colorimétrie. La quantité de lumière transmise est proportionnelle à la concentration de l'élément dosé. Une cellule spectrophotométrique analyse la quantité de lumière transmise par rapport au faisceau lumineux de référence, elle convertit la différence entre les deux signaux lumineux en un signal électrique exprimé en millivolts. Ce dernier est comparé à une courbe d'étalonnage.

Chaque échantillon est passé au moins deux fois, un résultat moyen est calculé puis enregistré directement par l'ordinateur.

- Le Ca est dosé par colorimétrie (EDTA) avec un *Titroprocesseur 682 Metrohm* à électrode spécifique de calcium.
- La teneur en carbone organique acido-soluble (COA) est donnée par le *TOC Dohrmann Xertex* (cf. chapitre 6 pour le principe de fonctionnement).

### 5.1.3 Calcul des paramètres caractérisant les carbonates

Le carbone minéral des carbonates (CMIN) est le seul élément typique des carbonates.

Tous les éléments qui se corrélient bien avec le CMIN sont rattachés aux carbonates. A Maurice, les carbonates ayant une origine exclusivement récifo-lagonaire, les éléments qui se corrélient bien avec le CMIN auront une origine autochtone.

Au contraire, tous les éléments qui se corrélient bien avec le RI sont rattachés aux silicates, aux silico-aluminates, en général aux silicoclastiques. A part les sulfures et une partie de la matière organique, l'origine du RI est terrigène détritique (socle basaltique de l'île); donc tous les éléments qui se corrélient bien avec le RI auront une origine allochtone.

Le carbone minéral est obtenu en soustrayant le carbone organique au carbone total :

$$\text{CMIN} = \text{CTOT} - \text{COT}$$

Le carbone organique total (COT) est réparti entre les phases insoluble et acido-soluble du sédiment. Il est obtenu en sommant le carbone organique acido-soluble (COA) et le carbone organique du RI (CORI) rapporté au sédiment total (CORT) :

$$\text{COT} = \text{COA} + (\text{CORI} \times \text{RI})$$

$$\text{COT} = \text{COA} + \text{CORT}$$

Les résultats de ces différentes analyses sont réunis dans le tableau 5.1.



## 5.2 Résultats

Il ressort du traitement statistique des paramètres de spéciation des carbonates que ( $r$  = coefficient de corrélation) :

- CMIN covarie avec :
  - le CTOT ( $r = 0.98$ )
  - le Ca ( $r = 0.99$ )
- CMIN est inversement proportionnel au :
  - CORT ( $r = - 0.81$ )
  - COA ( $r = - 0.84$ )
  - COT ( $r = - 0.85$ )
  - RI ( $r = - 0.99$ )
  - Mn ( $r = - 0.78$ )
  - Fe ( $r = - 0.95$ )
  - Al ( $r = - 0.96$ )
- RI covarie avec :
  - H ( $r = 0.93$ )
  - COA ( $r = 0.81$ )
  - COT ( $r = 0.79$ )
  - Mn ( $r = 0.81$ )
  - Fe ( $r = 0.94$ )
  - Al ( $r = 0.94$ )
- Ca est inversement proportionnel au :
  - RI ( $r = - 0.98$ )
  - COT ( $r = - 0.80$ )
  - H ( $r = - 0.93$ )
  - Fe ( $r = - 0.95$ )
  - Al ( $r = - 0.97$ )
- COA covarie avec :
  - N ( $r = 0.91$ )
  - H ( $r = 0.87$ )

Si l'on laisse à part les sols et les sédiments terrestres, les teneurs en RI les plus élevées dans les sédiments marins sont :

- de 31% à 61% dans l'embouchure de Grande Rivière Sud Est (SE5A et SE6),
- de 14 à 51% dans la baie de Port-Louis (NW4A, 4B, 6, 7, 8, 9),
- 19.7% à l'embouchure de Grande Rivière Noire (SW3).

C'est aussi dans ces régions que l'on rencontre les teneurs en COT les plus élevées :

- dans l'embouchure de Grande Rivière Sud Est SE5A et SE6 : 2.58% et 4.22%,
- à Port-Louis, NW4A, NW6, NW7, NW8, NW9 : de 0.9 à 3%.

Grande Rivière Noire (SW3) fait exception avec 0.4%.

Ces résultats sont en accord avec ceux des études précédentes (Gendre, 1992).

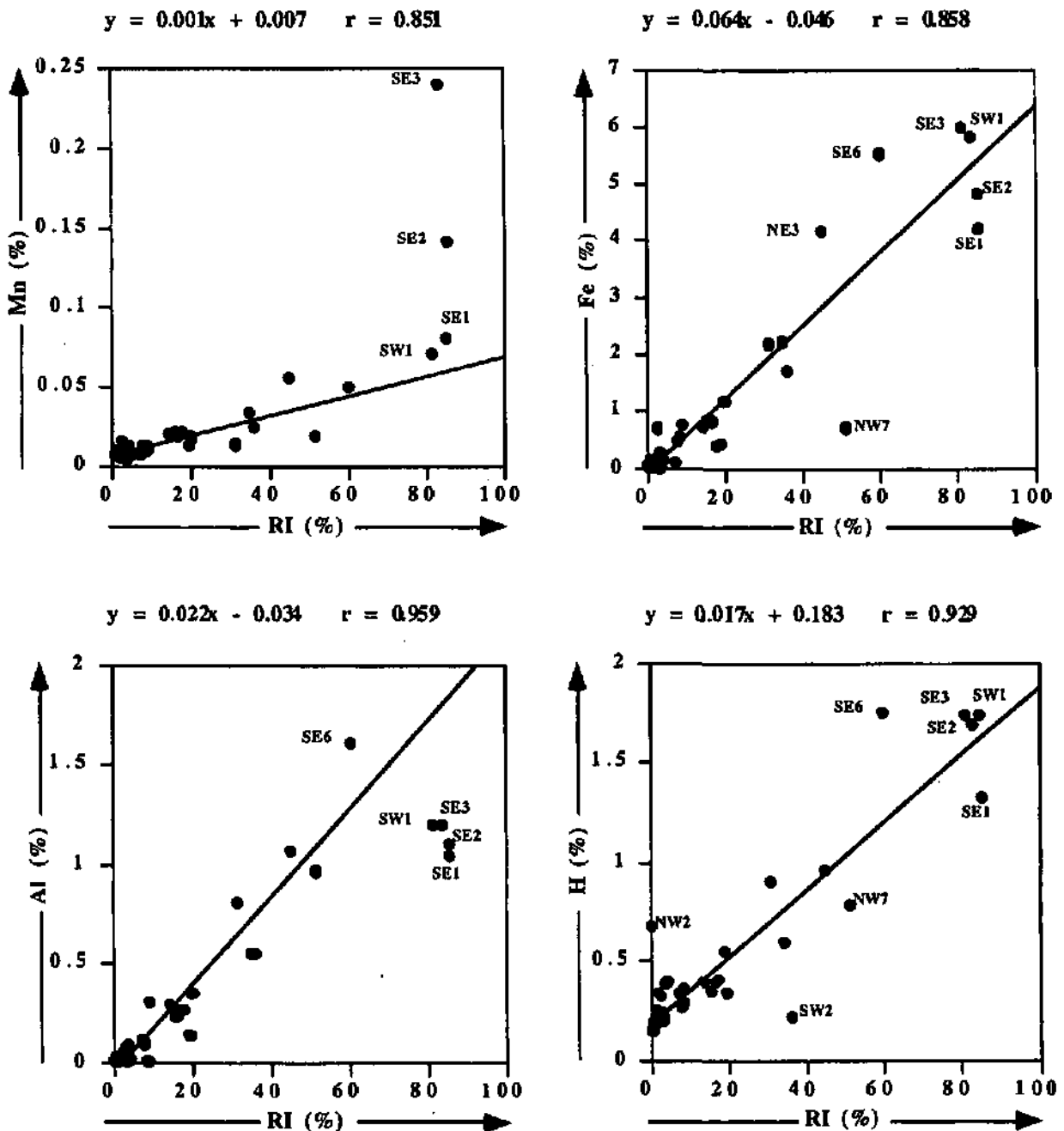


figure 5.1 : Coefficients de corrélation simples entre le RI et les majeurs détritiques Mn, Fe, Al et H

L'H covarie avec le RI (fig. 5.1). Il provient en grande partie des phyllosilicates, minéraux détritiques.

Le Mn, le Fe et l'Al covarient parce que les carbonates diluent les silico-clastiques. Ils sont principalement rattachés au RI, et donc d'origine terrigène.

La matière organique covarie avec le RI dans des zones où l'apport d'éléments terrigènes est important (embouchures des rivières).

Une analyse approfondie de la matière organique est présentée dans le chapitre 7.

Donc, H, Mn, Fe et Al sont les principaux éléments que l'on peut rattacher au RI sans hésitation. La corrélation de chacun de ces éléments avec le RI, pour les 45 échantillons, va de 0.85 à 0.95 (fig. 5.1); elle est hautement significative.

En revanche, le CMIN présente une excellente corrélation inverse avec le RI (fig 5.2), ce qui prouve que ces deux phases sont antagonistes.

Outre le CTOT, seul le Ca covarie avec le CMIN (fig 5.2). Le Mg et le Sr, éléments que l'on rattache généralement à la phase carbonatée des sédiments, ont également une origine terrigène à Maurice (basaltes). Ils ne peuvent donc pas ici se corréler au CMIN.

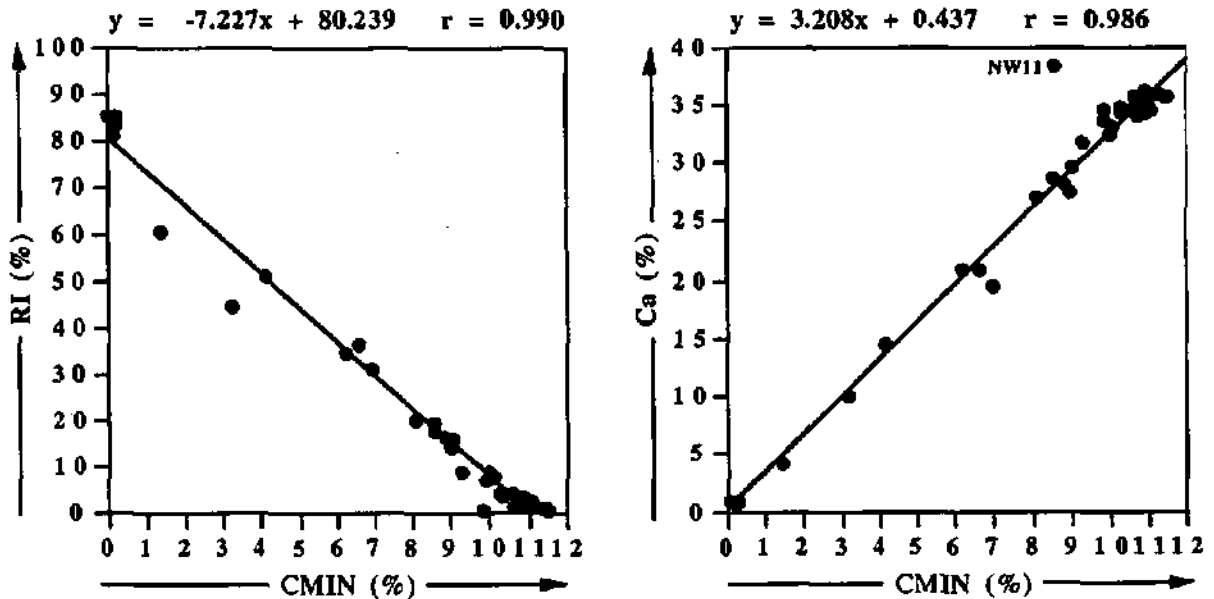


figure 5.2 : Coefficients de corrélation simples entre CMIN et RI, CMIN et Ca

Dans le but de réaliser une analyse comparative, L. Hottinger (Bâle) nous a donné 20 échantillons de sa collection privée provenant de divers environnements récifaux à travers le monde (Maurice, Aqaba, Seychelles, Nouvelle-Calédonie, Elbe).

La "spéciation des carbonates" effectuée sur cette série de sédiments (annexe 6) donne sensiblement les mêmes résultats que ceux de notre étude. Ces échantillons sont similaires à ceux dénommés "lagons" dans le tableau 5.1.

### 5.3 Analyse conjointe des résultats de la minéralogie (roche totale) et de la spéciation des carbonates

Les paramètres de la spéciation des carbonates sont intimement liés à la minéralogie des sédiments.

La corrélation entre le CMIN et la somme des minéraux carbonatés, calcite, calcite magnésienne et aragonite est excellente ( $r=0.95$ , fig. 5.3), ce qui prouve que des méthodes d'analyses aussi différentes que la géochimie et la minéralogie donnent des résultats cohérents et fiables.

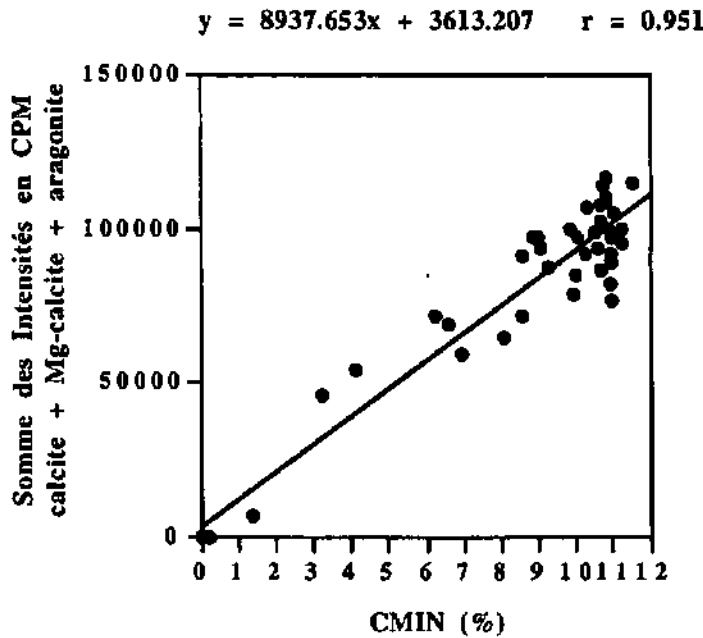


figure 5.3 : Coefficient de corrélation simple entre le CMIN et la somme des minéraux carbonatés

La présence des éléments majeurs dans les sédiments procède principalement de deux sources : l'environnement sédimentaire (lagonaire ou terrestre), et les rejets anthropiques. Les sédiments de Maurice recèlent chacune de ces sources.

Concernant la source d'apport naturelle, la relation entre le Mg et les intensités des pics de calcite magnésienne (fig 5.4) peut être pris comme exemple. Ils présentent un coefficient de corrélation très significatif ( $r=0.8$ ). La disparité du nuage de point lorsque le Mg augmente est significative de l'augmentation du détritisme.

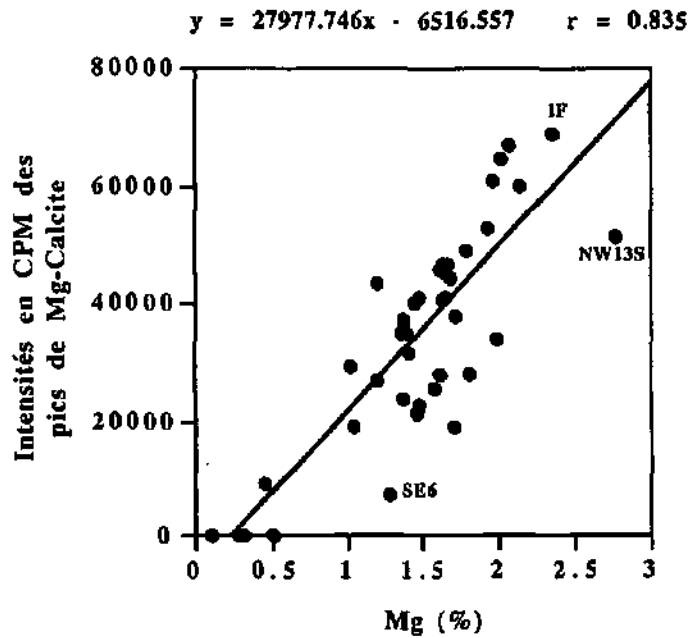


figure 5.4 : Coefficient de corrélation simple entre le Mg et la calcite magnésienne

L'apport d'éléments anthropiques a été mis en relief en comparant les taux d'Al avec l'abondance de gibbsite dans la roche totale (fig. 5.5). La gibbsite, hydroxyde d'Al, a pour formule chimique :  $Al(OH)_3$ .

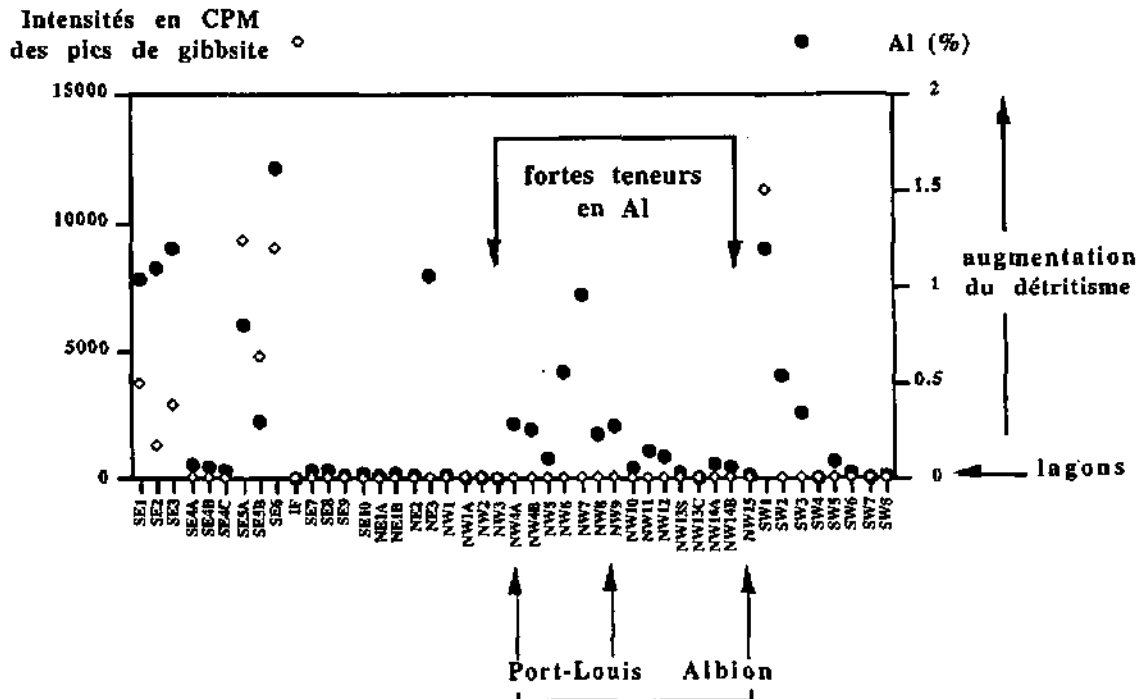


figure 5.5 : Mise en parallèle des teneurs en Al, et de la gibbsite dans la roche totale



Typiquement, dans les sols et sédiments terrestres, aux embouchures des rivières et dans les mangroves qui concentrent les éléments, la présence de gibbsite va de pair avec les teneurs d'Al. Les sédiments des lagons, ne contenant pas de gibbsite, ont des teneurs très faibles d'Al.

A l'ouest de l'île, entre Port-Louis et Albion, les sédiments marins ne contiennent pas de gibbsite, mais présentent des teneurs en Al singulièrement élevées.

Dans ce cas, la relation faite entre la minéralogie et le dosage des éléments majeurs montre clairement l'impact de l'activité humaine, par l'enrichissement des sédiments en Al. Cet enrichissement est particulièrement considérable autour de la capitale de l'île, Port-Louis.

## CHAPITRE 6

### GÉOCHIMIE MINÉRALE, DEUXIÈME PARTIE :

### DOSAGE DES ELÉMENTS TRACES

#### 6.1 Introduction

- Une dégradation du récif mauricien est observée depuis une décennie.
- Est-elle due à l'activité humaine?
- Les différentes "substances, agricoles ou industrielles" introduites par l'homme et qui, *in fine*, atteignent les lagons contribuent-elles à cette dégradation du récif?
- Si cette interaction existe, est-elle directe ou indirecte, c'est-à-dire est-ce que les sédiments des lagons jouent le rôle de filtre ou de réservoir : peut-on quantifier le pourcentage de ces "substances" arrivant dans les lagons et atteignant les coraux?

Ces questions sont à l'origine de l'étude de la géochimie des sédiments de lagons de l'île Maurice. Une part de cette étude est consacrée au dosage des éléments traces.

Nombre d'auteurs se sont penchés sur les effets spécifiques que peuvent avoir certains éléments traces sur les coraux.

Selon Harriss & Almy (1964), Livingston & Thompson (1971), Amiel *et al.* (1973), Barnard *et al.* (1974), St. John (1974), Goreau (1977 a,b), Buddemeier (1978), Howard & Brown (1984), le corail peut absorber les métaux lourds contenus dans son environnement de plusieurs façons :

- le zooplancton et en particulier les copépodes accumulent dans leur squelette chitineux du Cd, Co, Cu, Fe, Mg, Mn, Ni, Zn, Sr et du Pb. Lorsque le polype corallien se nourrit de ce zooplancton, il ingère ces métaux lourds;
- les particules fines sur lesquelles sont agrégés les métaux se collent sur le mucus du polype et sont aussi ingérées par le corail.

Dans ces deux cas, le polype transfère les métaux lourds au squelette aragonitique du corail. D'autres éléments, tel le Sr, se substituent au calcium et fragilisent ainsi la structure de l'aragonite.

Cependant la plus grande part des métaux incorporés au squelette corallien provient d'agréations particulières dans des cavités coralliennes.

Dans tous ces cas, les métaux ne sont pas à proprement parler toxiques pour le corail, mais ils fragilisent leur squelette.

La méthode d'absorption la plus nocive est celle réalisée par les zooxanthelles (algues microscopiques symbiotes du corail). Sr, U et As sont très toxiques car ils se substituent au phosphore et provoquent ainsi une inhibition de la croissance. Thompson *et al.* (1980), montrent les réactions du corail au chrome lignosulfate : le nombre de polypes épanouis est alors réduit, les zooxanthelles sont expulsées et une infection bactérienne est suivie d'une prolifération algale.

De la même manière que les organismes vivants, les sédiments enregistrent les variations de milieux. Lewis & Price (1975) parlent d'ingestion de métaux directement puisés dans le sédiment par des filaments du corail.

Les sédiments peuvent donc influencer directement la dégradation du récif.

## 6.2 Matériaux et méthodes

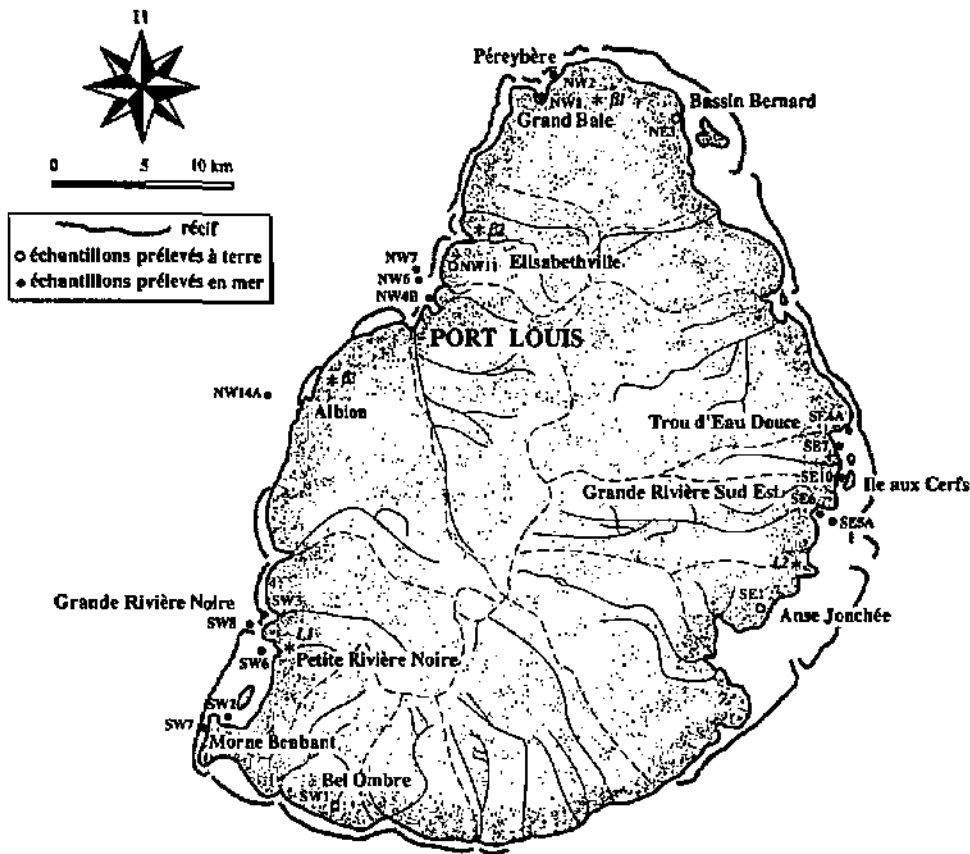


figure 6.1 : Localisation des 20 échantillons choisis pour le dosage des éléments traces

Pour l'extraction et le dosage des éléments traces Co, Ni, Cu, Zn, Pb, Cr, Cd, 20 échantillons de sédiments ont été sélectionnés, 16 provenant des lagons et 4 de l'île (fig. 6.1), plus cinq laves et basaltes pour contrôle d'origine.

Pour les traces dans les coraux, les auteurs utilisent, en général, l'acide nitrique pur concentré (Glynn *et al.*, 1989; Hanna & Muir, 1990; Shotyik *et al.*, 1993).

Pour préciser les résultats d'une telle méthode, quatre extractions de force croissante ont été réalisées dans le but méthodologique d'évaluer l'efficacité de chacune d'entre-elles :

- HNO<sub>3</sub> 2N,
- HNO<sub>3</sub> 6N,
- *aqua regia* (1 vol. d'HNO<sub>3</sub> + 3 vol. d'HCl),
- HCl 6N.

Les acides utilisés sont de l' $\text{HNO}_3$  et de l' $\text{HCl}$  Suprapur Merck.

Pour chaque analyse, 1 g. de sédiment est minéralisé dans un digesteur micro-ondes Prolabo A-300.

Le dosage des éléments traces sur la fraction acido-soluble des attaques chimiques a été effectué par ICP-AES Perkin Elmer Plasma 2000 (Boss & Fredeen, 1989).

Seul le Cd après extraction à l'*aqua regia* a été dosé par Graphite Furnace Atomic Absorption Spectrophotometer Perkin Elmer 5100 PC.

## 6.3 Résultats

### 6.3.1 Remarques

- Les attaques à l'*aqua regia* ont été réalisées sur 45 échantillons (annexe 9); cependant, pour l'interprétation des résultats, ne seront considérés que les 20 échantillons communs aux quatre attaques (fig. 6.1);
- les tableaux de résultats exhaustifs des quatre séries d'analyses sont présentés en annexe (annexes 10 à 13).
- Les teneurs en éléments traces obtenues après chaque extraction sont présentées dans les tableaux 6.1, 6.2, 6.3 et 6.4.
- Le Cd est un élément extrêmement difficile à doser. Pour des problèmes de "limite de détection" seuls les dosages effectués à partir de l'*aqua regia* par absorption atomique - four à graphite sont recevables; c'est pourquoi, bien que tous les résultats concernant cet élément soient présentés dans les tableaux et figures, seules les teneurs obtenues à partir de l'*aqua regia* seront prises en compte dans les interprétations.

### 6.3.2 Méthodologie

Les résultats montrent que chaque élément est soluble dans chacun de nos quatre acides. Les teneurs mesurées sont comparables; quand les teneurs en un élément augmentent (à Port-Louis par exemple), elles augmentent pour les quatre attaques.

L'extraction par l' $\text{HCl}$  6N est aussi efficace que par l'*aqua regia*.

Dans nos échantillons à minéralogie complexe, carbonates autochtones et détritiques allochtones, les extractions par  $\text{HNO}_3$  2N et 6N mettent moins d'éléments en solution que par  $\text{HCl}$  6N et *aqua regia*.

La fig. 6.2 montre pour chaque échantillon et pour chaque attaque, le pourcentage de Résidu Insoluble :

- plus le sédiment est terrigène détritique (minéralogie), plus le pourcentage de RI est élevé (autour de 50% alors qu'il est inférieur à 10% pour les sédiments carbonatés);
- plus la solution d'extraction est forte, plus le RI est faible car une fraction d'éléments plus grande est mise en solution.

Il y a donc une forte probabilité pour que les éléments ainsi extraits proviennent de la phase géogène des sédiments, et que les phases détritiques et anthropiques demeurent indifférenciées.

L'*aqua regia* et l' $\text{HCl}$  6N sont de toute évidence d'excellents extracteurs, mais pour dépister l'origine anthropique il est préférable de prendre en compte les teneurs mesurées à partir de l'extracteur le plus faible : l' $\text{HNO}_3$  2N.

	n° éch	RI %	Co	Cr	Ni	Cu	Zn	Pb	Cd
<i>socle basaltique</i>	Basalte 1	64.1	49.1	42.3	244.9	50.8	55.7	0.0	0
	Basalte 2	78.4	41.8	22.0	116.6	54.4	43.3	0.7	0
	Basalte 3	71.6	53.5	45.3	245.2	62.2	62.3	0.0	0
	Lave 1	87.5	11.5	25.2	51.1	50.5	24.7	0.0	0
	Lave 2	78.4	24.4	9.4	76.4	54.9	44.4	0.0	0
<i>sol et sédiments terrestres</i>	SE1	72.9	30.6	125.2	32.3	25.9	41.7	13.4	0.15
	SW1	75.5	63.6	143.4	79.8	141.7	97.4	66.8	0.15
	NE3	44.2	31.2	58.9	139.4	194.6	241.0	82.1	0.25
	NW11	15.6	7.4	19.5	32.4	18.2	108.4	20.6	0.15
<i>embouchures de rivières</i>	SE5A	23.9	13.8	45.4	27.3	11.3	41.3	7.7	0.40
	SE6	50.7	40.1	120.0	50.5	52.0	105.6	16.2	0.12
	SW3	18.3	8.6	21.6	35.8	4.2	20.9	0.0	0.25
<i>Port-Louis</i>	NW4B	14.3	6.1	29.8	23.2	16.1	43.4	23.5	0.20
	NW6	31.6	13.9	35.9	30.5	414.0	97.4	165.0	0.40
	NW7	44.8	18.6	44.1	37.1	168.8	129.0	136.5	0.45
<i>Atbion</i>	NW14A	1.6	1.5	10.7	7.0	1.4	8.9	1.9	0.10
<i>sédiments de lagons</i>	SE4A	2.5	0.4	9.6	2.8	4.2	6.5	1.4	0.10
	SE7	2.0	0.7	9.6	2.7	1.1	5.0	0.8	0.00
	SE10	1.4	1.1	10.1	11.5	1.4	6.0	0.0	0.10
	NW1	1.0	0.5	5.3	5.1	4.6	9.5	2.4	0.05
	NW2	0.3	0.0	3.8	290.3	0.0	2.5	0.0	0.00
	SW2	35.8	15.3	16.7	61.2	10.9	30.4	4.4	0.35
	SW6	0.6	0.4	9.7	2.3	0.3	3.0	0.0	0.15
	SW7	0.1	0.0	5.1	0.6	0.0	2.0	0.1	0.00
SW8	0.5	0.4	5.2	2.4	0.2	3.0	0.0	0.00	

tableau 6.1 : Dosage des éléments traces en mg/kg, après attaque à l'HNO<sub>3</sub> 2N

	n° éch	RI %	Co	Cr	Ni	Cu	Zn	Pb	Cd
<i>sol et sédiments terrestres</i>	SE1	61.0	50.1	382.3	87.0	63.8	102.2	14.0	0.50
	SW1	52.7	102.5	423.7	231.2	221.5	172.1	72.8	0.62
	NE3	37.5	38.3	82.1	174.5	209.8	266.3	85.1	0.03
	NW11	14.8	9.7	28.9	45.6	19.7	119.6	25.4	0.57
<i>embouchures de rivières</i>	SE5A	19.2	20.2	76.0	60.8	15.2	49.8	35.9	0.20
	SE6	40.4	49.9	180.7	97.2	70.5	122.1	12.7	0.57
	SW3	16.6	18.4	79.2	56.5	8.5	32.4	0.0	0.10
<i>Port-Louis</i>	NW4B	11.7	10.2	44.9	30.7	20.7	44.9	21.4	0.25
	NW6	27.0	21.4	62.4	49.7	492.1	111.8	178.4	0.32
	NW7	38.7	32.6	86.7	69.3	214.0	152.0	150.3	0.37
<i>Atbion</i>	NW14A	2.1	3.0	14.7	11.2	1.0	5.0	0.0	0.22
<i>sédiments de lagons</i>	SE4A	2.4	1.0	11.2	0.3	26.6	0.0	0.8	0.12
	SE7	2.3	1.0	12.5	3.7	1.0	2.5	0.0	0.12
	SE10	3.2	1.8	11.7	12.2	0.5	0.0	2.0	0.00
	NW1	0.8	1.0	5.7	4.2	1.3	0.0	2.7	0.10
	NW2	0.2	0.0	4.5	313.9	0.0	0.0	0.0	0.12
	SW2	32.3	24.7	50.6	80.8	16.5	44.9	0.0	0.10
	SW6	0.7	0.5	10.7	1.5	0.0	0.0	0.0	0.11
	SW7	0.3	0.5	6.0	0.0	0.0	0.0	3.2	0.09
SW8	0.6	0.3	6.5	1.7	0.0	0.0	0.0	0.09	

tableau 6.3 : Dosage des éléments traces en mg/kg, après attaque à l'aqua regia

	n° éch	RI %	Co	Cr	Ni	Cu	Zn	Pb	Cd
<i>socle basaltique</i>	Basalte 1	70.2	50.8	45.5	252.2	69.2	64.8	0.0	0
	Basalte 2	73.3	48.5	27.8	141.7	70.3	58.3	0.0	0
	Basalte 3	71.3	57.3	68.1	264.8	71.6	77.2	0.0	0
	Lave 1	86.4	15.5	33.4	78.4	70.2	39.6	0.0	0
	Lave 2	79.7	24.5	14.1	77.3	52.3	40.5	0.0	0
<i>sol et sédiments terrestres</i>	SE1	64.6	38.3	284.5	65.0	49.0	85.2	16.1	0.25
	SW1	64.8	72.7	266.1	126.7	144.4	119.2	66.1	0.20
	NE3	37.1	30.9	64.8	145.0	201.5	246.4	77.1	0.10
	NW11	14.2	7.5	21.3	35.4	19.1	109.2	21.5	0.15
<i>embouchures de rivières</i>	SE5A	18.9	15.0	56.6	35.9	13.6	47.4	10.0	0.80
	SE6	44.4	36.2	129.2	56.2	54.2	101.2	13.5	0.35
	SW3	17.6	11.3	37.2	43.2	6.1	27.8	0.0	0.10
<i>Port-Louis</i>	NW4B	12.6	6.7	33.2	22.1	17.8	43.9	21.2	0.00
	NW6	27.4	13.9	39.7	35.3	411.4	97.4	151.6	0.25
	NW7	41.9	20.2	56.2	47.8	165.6	134.6	130.0	0.10
<i>Albion</i>	NW14A	1.8	1.5	10.9	9.3	1.7	10.5	1.5	0.10
<i>sédiments de lagons</i>	SE4A	2.9	0.3	8.4	2.9	8.2	5.5	0.0	0.05
	SE7	2.0	0.5	11.5	3.3	1.6	4.0	0.2	0.00
	SE10	1.2	1.2	8.8	10.6	1.4	3.0	0.1	0.00
	NW1	0.9	0.3	4.9	3.6	2.6	6.5	2.1	0.00
	NW2	0.1	0.1	3.6	292.3	0.2	2.5	0.0	0.00
	SW2	34.0	18.5	24.5	69.3	12.5	37.3	4.0	0.60
	SW6	1.1	0.4	8.7	2.1	0.4	3.5	0.1	0.00
	SW7	0.3	0.1	5.2	0.5	0.1	3.0	0.0	0.00
SW8	0.6	0.2	5.2	2.3	0.6	3.5	0.3	0.00	

tableau 6.2 : Dosage des éléments traces en mg/kg, après attaque à l'HNO<sub>3</sub> 6N

	n° éch	RI %	Co	Cr	Ni	Cu	Zn	Pb	Cd
<i>sol et sédiments terrestres</i>	SE1	59.5	57.0	523.8	101.3	71.6	121.7	19.2	0.25
	SW1	49.3	100.6	495.5	263.8	228.8	173.8	72.6	0.00
	NE3	35.4	36.0	86.4	159.1	195.6	255.8	78.0	0.00
	NW11	17.6	9.9	30.8	43.6	18.4	83.9	22.6	0.00
<i>embouchures de rivières</i>	SE5A	23.8	18.4	81.4	53.9	9.2	48.8	9.5	0.00
	SE6	42.3	47.2	181.1	93.9	65.6	105.9	13.4	0.05
	SW3	16.0	19.6	95.6	55.0	12.5	36.9	0.0	0.00
<i>Port-Louis</i>	NW4B	11.9	10.9	47.8	30.1	22.0	45.9	23.1	0.00
	NW6	27.9	22.7	72.3	49.3	453.5	113.3	163.4	0.05
	NW7	39.8	36.1	103.7	73.0	192.7	160.1	140.9	0.00
<i>Albion</i>	NW14A	2.2	1.8	12.8	8.1	2.4	3.0	1.8	0.00
<i>sédiments de lagons</i>	SE4A	3.5	1.0	15.2	3.5	1.4	0.0	2.6	0.00
	SE7	2.7	0.9	12.2	3.5	1.7	0.0	2.1	0.00
	SE10	3.1	1.4	11.4	12.2	1.5	0.0	1.2	0.00
	NW1	1.6	0.9	6.4	4.8	3.9	2.5	3.7	0.00
	NW2	0.2	0.3	4.6	298.7	1.9	0.0	0.4	0.00
	SW2	30.5	27.3	74.6	78.4	21.8	46.9	6.1	0.05
	SW6	1.3	0.8	11.5	2.5	1.1	0.0	0.4	0.00
	SW7	0.3	0.2	6.3	0.7	0.7	0.0	0.5	0.00
SW8	1.1	0.6	6.6	2.4	1.1	0.0	0.3	0.00	

tableau 6.4 : Dosage des éléments traces en mg/kg, après attaque à l'HCl 6N

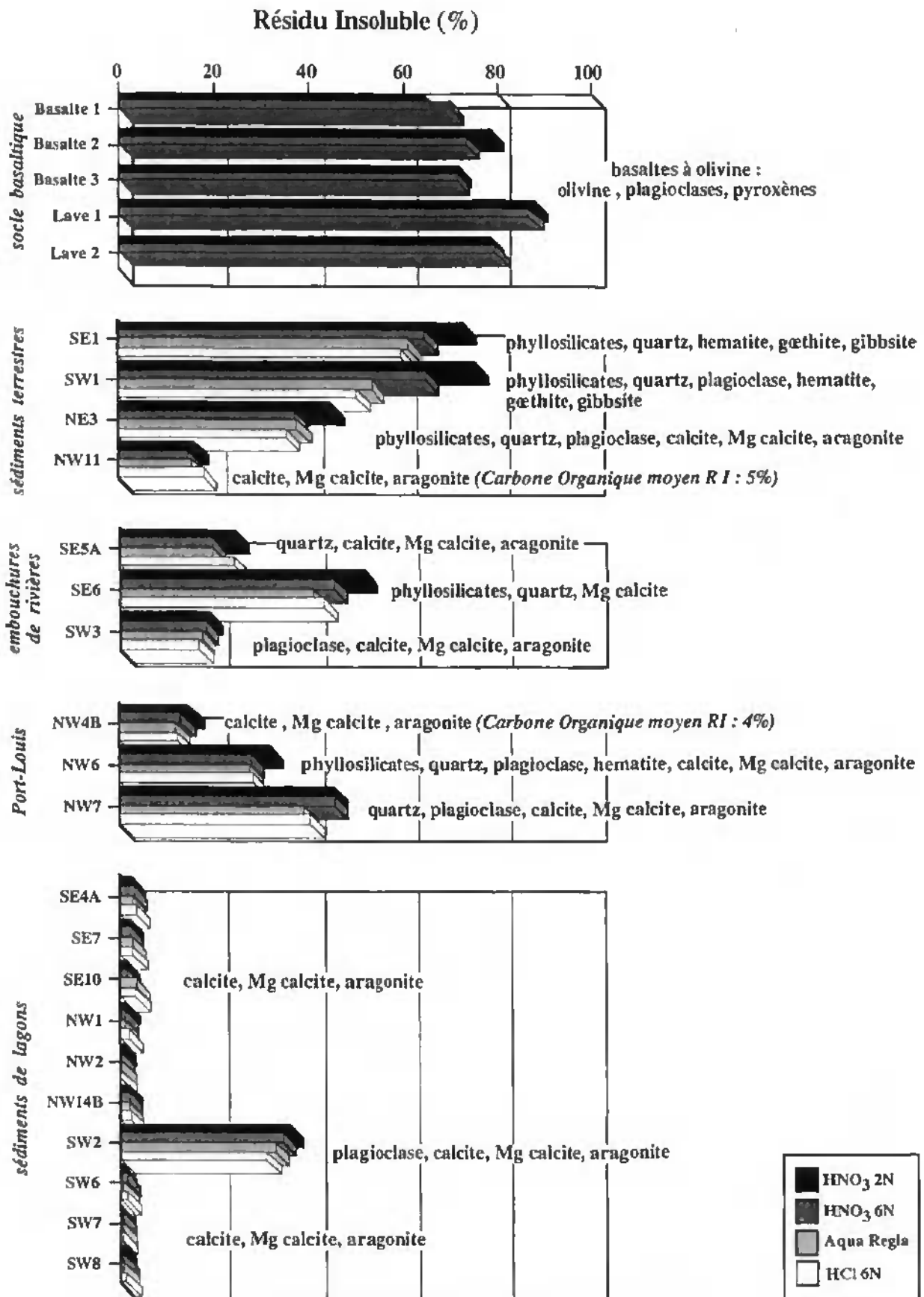


figure 6.2 : Pourcentages de RI après les quatre attaques et minéralogie des échantillons

Enfin, les laves et les basaltes constituant le socle de l'île peuvent être une source potentielle des traces.

Dans le but de comparer les teneurs de nos échantillons à celles d'une source naturelle d'apports, nous avons donc dosé les traces de 3 basaltes et deux laves après leur avoir fait subir les extractions qui se sont révélées les "plus douces", à l' $\text{HNO}_3$  2N et 6N.

### 6.3.3 Eléments traces

L'analyse statistique des teneurs en traces montre que, pour les quatre attaques :

- le Co est toujours corrélé au RI (coefficient de corrélation  $r=0.98$ ). Ceci indique que le Co provient de la phase clastique des sédiments;
- le Cr est toujours corrélé au RI ( $r=0.86$ ); le Cr provient également de la phase clastique des sédiments; de plus Co et Cr sont toujours corrélés ( $r=0.94$ ), ce qui confirme l'origine commune de ces deux éléments;
- Pb et Cu sont toujours corrélés ( $r=0.94$ );
- Zn, Ni et Cd ne sont corrélés à aucun élément.

*Remarque* : l'analyse statistique ne donne aucune indication quant à la source du Ni. Cependant, les basaltes en contiennent de fortes teneurs (jusqu'à 264 mg/kg), ce qui laisse présager qu'il est d'origine détritique; cette hypothèse s'est vue confirmée par les résultats d'Immenhauser-Potthast (1994) (cf. § 6.4).

La fig. 6.3 illustre les teneurs des 7 éléments traces dans chaque échantillon, mises en regard afin de mieux visualiser leurs variations.

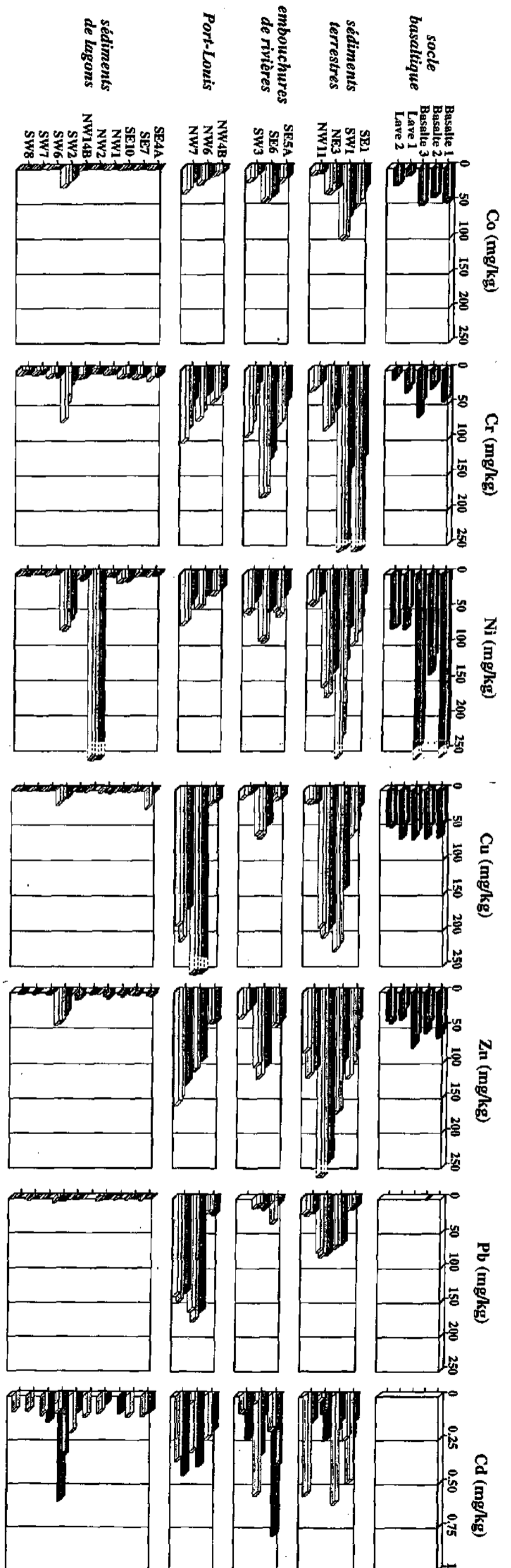
Les teneurs les plus hautes sont en général localisées :

- au large de Port-Louis, NW6 et NW7, capitale et principal pôle industriel de l'île;
- dans l'échantillon de mangrove NE3, près de l'élevage bovin de Bassin Bernard;
- dans les sédiments terrestres SE1 (sol) et SW1 (ruisseau, derrière l'usine sucrière de Bel Ombre). Ceux-ci ne contiennent que des minéraux détritiques où d'altération; pour ces sédiments, il est donc difficile de distinguer l'apport anthropique. Cependant SW1 présente des teneurs de Ni, Cu, Zn et Pb particulièrement élevées;
- au débouché de la Grande Rivière Sud Est, SE6, où les teneurs de Cu, Zn et Cd augmentent.
- L'échantillon NW2, dans la baie de Péreybère, montre des teneurs de Ni extrêmement élevées (jusqu'à 313,9 mg/kg), et des teneurs très faibles pour les 6 autres éléments. C'est un sable corallien à minéralogie carbonatée. Compte tenu de tous les paramètres caractérisant cet échantillon, les causes de ce pic de Ni restent inexplicables (on peut facilement envisager la présence d'un déchet, par exemple une batterie, à proximité).

Lorsqu'on compare les échantillons aux basaltes (tabl. 6.5), il ressort que :

- les teneurs de Cu, Zn, Pb et Cd sont largement plus élevées que celles des basaltes :
  - dans les sédiments marins de Port-Louis (NW6, NW7),
  - dans la mangrove de Bassin Bernard (NE3),
  - dans le ruisseau de Bel Ombre (SW1).
- Grande Rivière Sud Est (SE6) présente de fortes teneurs de Cu, Zn et Cd par rapport aux basaltes.





■ HNO<sub>3</sub> 2N  
 □ HNO<sub>3</sub> 6N  
 ▨ Aqua Regia  
 □ HCl 6N

Figure 6.3 : Teneurs des 7 éléments traces après les quatre attaques mises en regard

Enfin, les laves et les basaltes constituant le socle de l'île peuvent être une source potentielle des traces.

Dans le but de comparer les teneurs de nos échantillons à celles d'une source naturelle d'apports, nous avons donc dosé les traces de 3 basaltes et deux laves après leur avoir fait subir les extractions qui se sont révélées les "plus douces", à l'HNO<sub>3</sub> 2N et 6N.

### 6.3.3 Eléments traces

L'analyse statistique des teneurs en traces montre que, pour les quatre attaques :

- le Co est toujours corrélé au RI (coefficient de corrélation  $r=0.98$ ). Ceci indique que le Co provient de la phase élastique des sédiments;
- le Cr est toujours corrélé au RI ( $r=0.86$ ); le Cr provient également de la phase élastique des sédiments; de plus Co et Cr sont toujours corrélés ( $r=0.94$ ), ce qui confirme l'origine commune de ces deux éléments;
- Pb et Cu sont toujours corrélés ( $r=0.94$ );
- Zn, Ni et Cd ne sont corrélés à aucun élément.

*Remarque* : l'analyse statistique ne donne aucune indication quant à la source du Ni. Cependant, les basaltes en contiennent de fortes teneurs (jusqu'à 264 mg/kg), ce qui laisse présager qu'il est d'origine détritique; cette hypothèse s'est vue confirmée par les résultats d'Immenhauser-Pothast (1994) (cf. § 6.4).

La fig. 6.3 illustre les teneurs des 7 éléments traces dans chaque échantillon, mises en regard afin de mieux visualiser leurs variations.

Les teneurs les plus hautes sont en général localisées :

- au large de Port-Louis, NW6 et NW7, capitale et principal pôle industriel de l'île;
- dans l'échantillon de mangrove NE3, près de l'élevage bovin de Bassin Bernard;
- dans les sédiments terrestres SE1 (sol) et SW1 (ruisseau, derrière l'usine sucrière de Bel Ombre). Ceux-ci ne contiennent que des minéraux détritiques où d'altération; pour ces sédiments, il est donc difficile de distinguer l'apport anthropique. Cependant SW1 présente des teneurs de Ni, Cu, Zn et Pb particulièrement élevées;
- au débouché de la Grande Rivière Sud Est, SE6, où les teneurs de Cu, Zn et Cd augmentent.
- L'échantillon NW2, dans la baie de Péreybère, montre des teneurs de Ni extrêmement élevées (jusqu'à 313,9 mg/kg), et des teneurs très faibles pour les 6 autres éléments. C'est un sable corallien à minéralogie carbonatée. Compte tenu de tous les paramètres caractérisant cet échantillon, les causes de ce pic de Ni restent inexplicables (on peut facilement envisager la présence d'un déchet, par exemple une batterie, à proximité).

Lorsqu'on compare les échantillons aux basaltes (tabl. 6.5), il ressort que :

- les teneurs de Cu, Zn, Pb et Cd sont largement plus élevées que celles des basaltes :
- dans les sédiments marins de Port-Louis (NW6, NW7),
- dans la mangrove de Bassin Bernard (NE3),
- dans le ruisseau de Bel Ombre (SW1).
- Grande Rivière Sud Est (SE6) présente de fortes teneurs de Cu, Zn et Cd par rapport aux basaltes.

	Basaltes	sédiments terrestres			sédiments marins		lagon
		NE3	SW1	SE1	NW6	NW7	SE6
		mangrove	ruisseau	sol	Port-Louis	Port-Louis	GRSE
Cu	62	195	142	26	414	169	52
Zn	62	241	97	42	97	129	106
Pb	0.70	82	67	13	165	137	16
Cd	0.00	0.03	0.62	0.50	0.32	0.37	0.57

tableau 6.5 : Teneurs de Cu, Zn, Pb, Cd en mg/kg; Cu, Zn, Pb : attaque HNO<sub>3</sub> 2N; Cd : attaque *aqua regia*. Pour les basaltes, seule la teneur maximale est mentionnée (HNO<sub>3</sub> 2N ou 6N)

## 6.4 Discussion

Concernant la géochimie globale des océans, Chester (1993) dit que "...les sédiments marins représentent le principal réceptacle pour les éléments qui quittent le réservoir des eaux marines...", et que "...la nature des sédiments côtiers est fortement influencée par l'environnement terrestre adjacent...".

Cependant, proportionnellement au nombre considérable de travaux sur le dosage des éléments traces effectués sur les coraux, assez peu d'études ont décrit les concentrations des traces dans les sédiments des écosystèmes récifaux (Johannes, 1975; Brown, 1987).

Les travaux sur les sédiments concernent généralement :

- des zones d'exploitation minière, comme par exemple "the Exclusive Economic Zone of Mauritius" où sont exploités les nodules de manganèse (Cronan & Tooms, 1968; Nath & Prasad, 1991), ou encore l'île de Phuket en Thaïlande où l'on drague et l'on fond l'étain (Brown & Holley, 1982), La Mer Rouge où l'on exploite les sédiments métallifères dans le but d'en extraire du Zn, Cu, Ag, Cd, Pb, et autres sulfures (Howard & Brown, 1984), etc. ... Howard & Brown ont dressé en 1984 une liste exhaustive des études portant sur ce sujet.

- Les travaux sur les sédiments portent, en second lieu, sur la pollution des sédiments aux alentours de mégapoles telles Los Angeles (Bruland *et al.*, 1974), Hawaï (Smith, 1977), Athènes (Angelidis & Grimanis, 1989) ... et nombre d'autres localités de l'hémisphère Nord, où les concentrations urbaines et les activités industrielles multiples perturbent l'équilibre naturel des environnements côtiers.

Dans les zones où les écosystèmes étudiés pourraient être similaires et comparables à l'écosystème récifal de l'île Maurice, le dosage des traces en tant qu'indicateur de pollution a été effectué presque exclusivement sur les coraux.

La comparaison des teneurs en traces des sédiments de Maurice avec celles d'autres environnements récifaux devient, de ce fait, un exercice de style peu aisé à réaliser.

Pour comprendre les résultats obtenus dans les sédiments de Maurice, il nous faut reprendre la leçon de Chester (1993, début de ce paragraphe), et regarder en amont, sur l'île, ce qui peut avoir influencé les hautes teneurs enregistrées dans les 6 échantillons répertoriés dans le tableau 6.5.

1) En tout premier lieu, il faut tenir compte de la composition minéralogique des échantillons. Il est clair que les concentrations en éléments traces sont généralement plus faibles dans les sédiments carbonatés que dans les sédiments détritiques, où les traces sont fortement adsorbées par les particules argileuses (Brown, 1987). Or les 6 sédiments

sont soit terrestres (SE1 et SW1), soit à minéralogie mixte carbonatée et détritique (les 4 autres).

2) L'échantillon NE3, dans une mangrove.

Une mangrove peut être définie comme un type de système côtier intertropical caractérisé par une intime interpénétration du milieu marin et du milieu terrestre et présentant divers faciès allant du lagon purement maritime aux estrans partiellement inondés.

De nombreuses études ont été effectuées sur l'écologie des mangroves, mais relativement peu ont trait à sa chimie (Martinet *et al.*, 1982). Pourtant les caractéristiques chimiques d'une mangrove sont bien spécifiques. D'une manière générale, les éléments majeurs ou traces sont fortement concentrés dans ce milieu.

Lors de la spéciation des carbonates (cf. chapitre 5), nous avons pu noter que NE3 était l'échantillon le plus riche en Mg (4.1%) et PO<sub>4</sub> (0.35%), et un des plus riches en Fe, Mn, K, Al, ce qui n'a rien d'exceptionnel d'après Martinet *et al.* (1982), et J. Lucas (Professeur à l'Université de Strasbourg, communication orale).

Dans les mangroves, la MO fixe en particulier les quatre éléments Va, Cr, Ni et Zn (J. Lucas, communication orale). NE3 a un des COT les plus hauts (3.52%). Pour ce qui concerne les traces, Cr (58.9 mg/kg) et Ni (139.4 mg/kg) procèdent de la phase détritique, et Cu (195 mg/kg) et Zn (241 mg/kg) sont en fortes proportions mais ne peuvent être considérés de manière absolue comme des éléments anthropiques vu les propriétés géochimique spécifiques inhérentes aux mangroves. On peut enfin noter que cet échantillon présente une teneur de Cd (0.03 mg/kg) bien inférieure à celles des autres échantillons.

NE3 est donc un échantillon bien particulier, qui ne peut être pris en compte dans les interprétations globales concernant l'apport anthropique de substances polluantes.

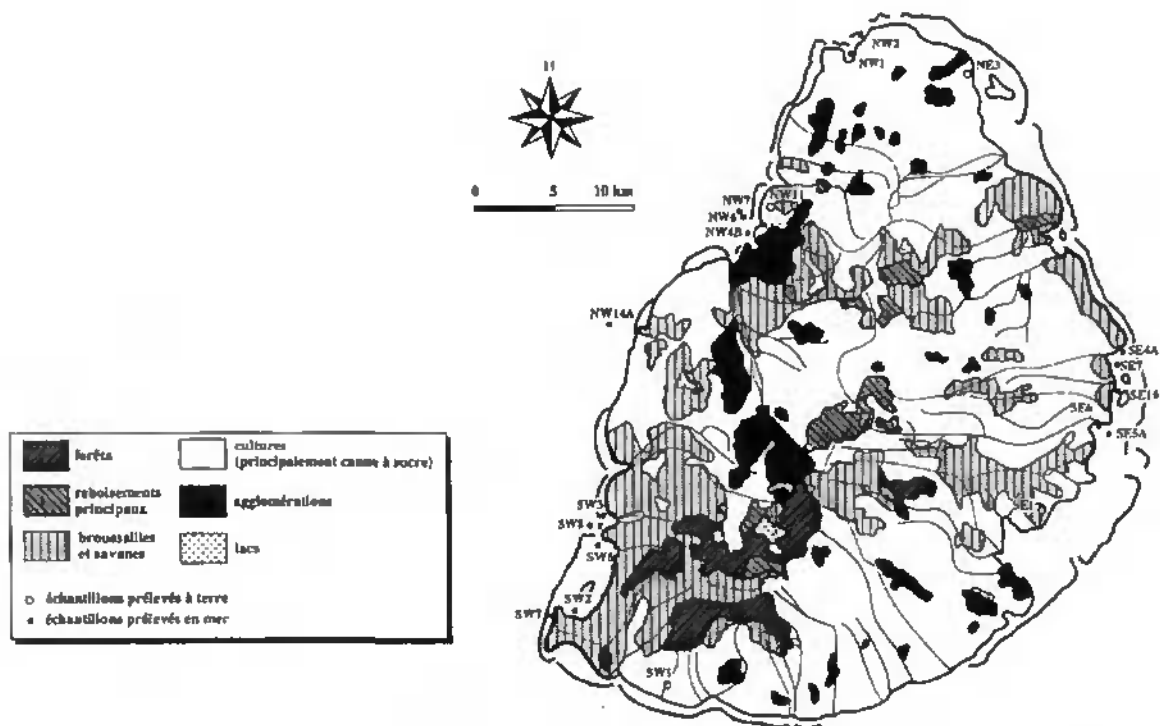


figure 6.4 : Echantillonnage pour le dosage des traces et carte d'utilisation des terres, d'après Sussmann & Tattersall (1986)

3) L'échantillon SE6, à l'embouchure de la Grande Rivière Sud Est.

On trouve dans ce sédiment des teneurs élevées en Zn (106 mg/kg) et en Cd (0.57 mg/kg), et en plus faibles proportions du Cu (52 mg/kg) et du Pb (16 mg/kg).

La GRSE draine la grande plaine de l'Est de l'île, sous culture principalement de canne à sucre (fig. 6.4).

Selon Ahn (1993), les éléments traces sont nécessaires, en très faibles quantités, au développement des plantes cultivées, mais les plantations de canne à sucre manquent en général de Cu, Fe, Mn et Zn. Or les engrais vont permettre de pallier à ces déficits.

D'après une étude menée par l'OFEFP suisse (1991) sur la pollution par "Les métaux lourds et le fluor dans les engrais minéraux", les engrais minéraux contiennent les éléments suivants : As, Cd, Co, Cr, Cu, Hg, Mo, Ni, Pb, Se, Sn, Ti, V, Zn. Or les engrais répertoriés dans cette étude et ceux que nous savons être utilisés à Maurice (Dinan, 1989; P. Ruch, communication orale) se trouvent être les mêmes. Il est évident qu'ils sont dosés en fonction du sol et des plantations sur lesquels ils seront épandus, mais leur composition de base reste la même.

- Le Cd, élément écotoxicologique, rentre dans la composition des engrais phosphatés.
- Le Zn est épandu sous forme de sulfate de Zn :  $ZnSO_4 \cdot 7H_2O$ .
- Le Cu peut venir à manquer si les applications de phosphates sont trop importantes. On le retrouve également dans les fongicides, sous forme de sulfate de Cu :  $CuSO_4 \cdot 7H_2O$  (25% Cu), ou  $CuSO_4 \cdot H_2O$  (36% Cu) (Ahn, 1993).

Remarque : Cu et Zn rentrent également dans la composition des aliments pour les porcs d'élevages, et peuvent être épandus au sol par l'intermédiaire du lisier.

Si l'on considère que les fortes teneurs de Cu, et surtout de Zn et Cd trouvées dans ce lagon sont induites par l'activité agricole sur l'île, on peut comparer SE6 aux deux échantillons terrestres SE1 et SW1.

4) Les teneurs en traces mesurées dans les échantillons terrestres SE1 et SW1 sont dissemblables.

- SE1, dans un champ de canne à sucre, a pour tous les éléments des teneurs plus faibles que SW1 et SE6. Les exploitations agricoles dans cette zone sont de petite taille et entourées de forêt primaire. L'échantillon, ramassé en surface, ne contient probablement pas d'accumulation significative des éléments traces.

- SW1 en revanche a été récolté dans le ruisseau qui longe l'usine sucrière du grand domaine de Bel Ombre. Les teneurs de Cu (142 mg/kg) et surtout de Cd (0.62 mg/kg) y sont importantes; les concentrations de Zn (97 mg/kg) et de Pb (67 mg/kg) sont également élevées.

Pour conclure, il apparaît que dans le lagon où se jette la GRSE comme à Bel Ombre, les mêmes causes aient les mêmes effets, à savoir que l'impact de l'activité agricole est enregistré dans l'environnement.

5) Les échantillons NW6 et NW7, dans la Baie de Port-Louis.

Ils ont les teneurs les plus élevées en Cu (NW6 : 414 mg/kg; NW7 : 169 mg/kg), Zn (NW6 : 97 mg/kg; NW7 : 129 mg/kg), Pb (NW6 : 165 mg/kg; NW7 : 137 mg/kg) et de fortes teneurs de Cd (NW6 : 0.32 mg/kg; NW7 : 0.37 mg/kg).

Port-Louis est la capitale de l'île Maurice; elle représente à la fois la plus grande concentration urbaine de l'île, son principal pôle industriel et maritime.

Depuis quelques années, Maurice a élaboré une politique de croissance économique et industrielle orientée sur une production d'exportation (principalement des produits manufacturés). Face à cette croissance, on peut s'attendre à une augmentation des rejets polluants dans ce périmètre. L'industrie textile (entre autres) a une part importante dans l'activité mauricienne; or les éléments traces tel le Pb sont utilisés pour la fixation des teintures (fig. 6.5).



figure 6.5 : Étiquette d'un vêtement fabriqué à Maurice, "prenant soin de l'environnement"

Outre les diverses industries, la forte activité portuaire peut également être mise en cause dans l'augmentation des teneurs des quatre éléments traces.

D'une manière générale, les activités émettant les polluants dosés dans les sédiments sont les suivantes :

- Zn : industrie métallurgique,
- Pb : trafic,
- Cu, Zn, Pb, Cd : trafic maritime, boues d'épuration, industries, incinérations d'ordures, chauffages, ménages, eaux usées..., plus les engrais, pesticides, et autres effluents agricoles drainés par la Grande Rivière du Nord Ouest...

La figure 6.6 présente une synthèse de toutes les corrélations mises en relief dans ce paragraphe, avec comme support la carte d'utilisation des terres de Sussmann et Tattersall (1986).

Parmi les nombreux travaux effectués sur le dosage d'éléments traces dans des sédiments côtiers, nous pouvons prendre pour comparaison ceux de Lyons *et al.* (1983) dans les Bermudes. Ils ont dosé les traces dans les sédiments de surface de Hamilton Harbour, ville portuaire et industrielle. Ces sédiments qui ont des caractéristiques minéralogiques semblables à celles de Port-Louis présentent de la même manière un enrichissement local anthropique. A Hamilton Harbour, les teneurs de Pb : 229 ppm et de Cd : 0.47 ppm sont plus élevées que celles de Port-Louis, alors que celles de Zn : 65 ppm et de Cu : 129 ppm sont plus faibles. Tout comme à Maurice, cet enrichissement local porte atteinte à l'écosystème environnant.

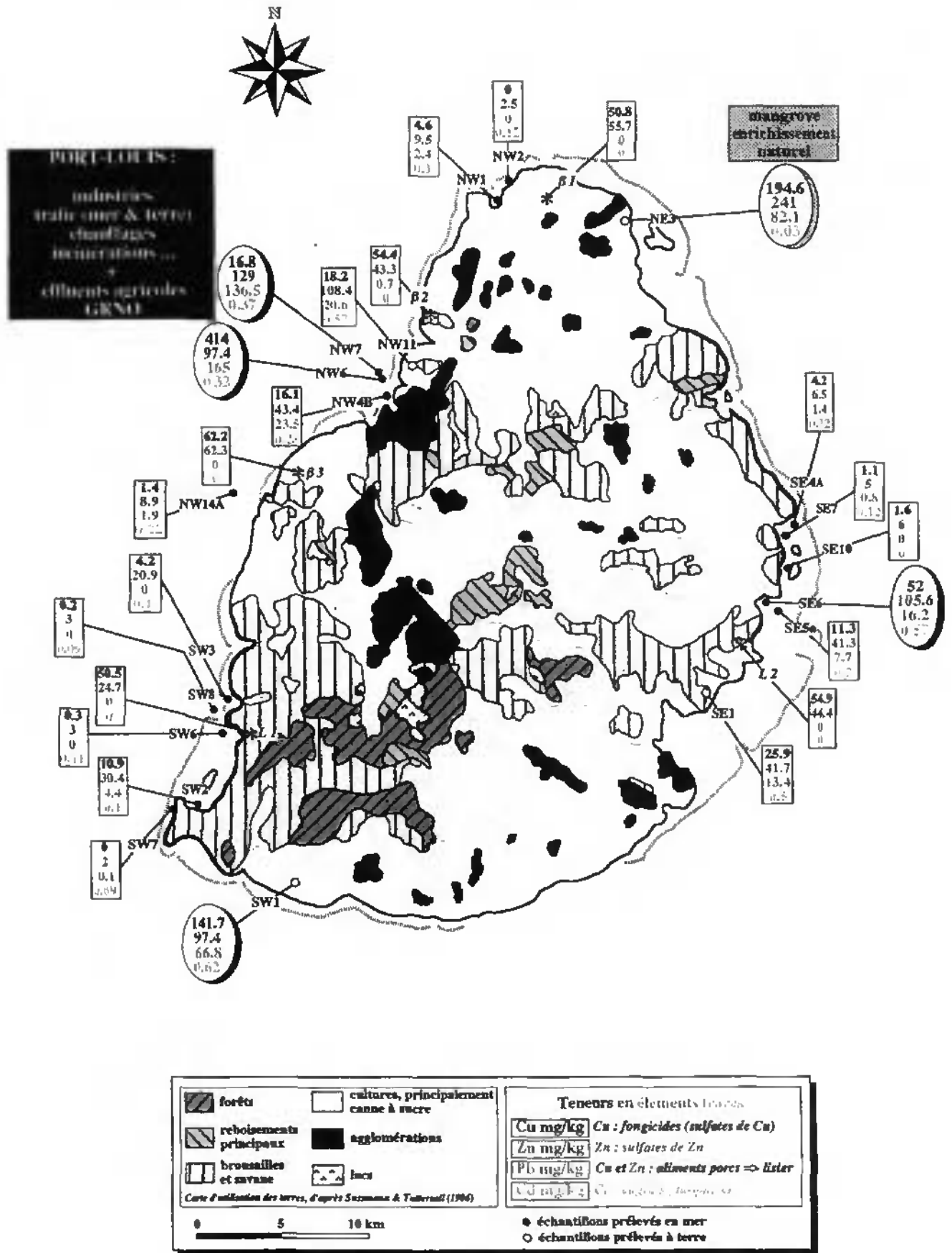


figure 6.6 : Carte synoptique du paragraphe 6.4

A Maurice, les éléments traces ont également été dosés dans les coraux.

Selon Immenhauser-Potthast (1994) qui a analysé le Ni, Cu, Co et Zn dans les squelettes de *Porites* sp. de Maurice, les coraux prélevés dans les estuaires et les baies proches des zones urbanisées ont, en moyennes pluriannuelles, des teneurs en traces plus élevées que les autres coraux.

Les variations d'incorporation de ces traces dans les *Porites* sp. ne correspondent pas aux alternances saisonnières.

Seules les variations des teneurs de Ni (en moyenne  $123 \pm 23$   $\mu\text{g}/\text{kg}$ ) coïncident avec les pluies annuelles; le Ni provient donc du lessivage des sols.

Les teneurs moyennes de Co ( $85 \pm 18$   $\mu\text{g}/\text{kg}$ ) et Cu ( $680 \pm 52$   $\mu\text{g}/\text{kg}$ ) sont élevées dans les zones de résurgences d'eaux douces. Pour l'auteur, le Co proviendrait du lessivage du substratum de l'île et le Cu des zones cultivées, en conformité avec nos résultats.

En revanche, l'augmentation des teneurs de Zn dans les coraux, à Port-Louis en particulier, où la teneur maximale en Zn enregistrée est de  $22\ 240$   $\mu\text{g}/\text{kg}$  alors que la moyenne enregistrée dans tous les échantillons est de  $790 \pm 193$   $\mu\text{g}/\text{kg}$  est typique de la pollution.

Bien que les sédiments et les coraux stockent les éléments traces dans des proportions différentes, de l'ordre du mg/kg pour les sédiments et du  $\mu\text{g}/\text{kg}$  pour les coraux, les teneurs anormalement élevées pour les deux types de matériaux sont observées sur les mêmes lieux d'échantillonnage. A Port-Louis par exemple, il est donc démontré que l'activité urbaine, industrielle et portuaire induit une pollution par les éléments traces.

6. Enfin, il faut relever que les sédiments des lagons du sud-ouest de l'île n'enregistrent pas d'augmentation en éléments traces polluants. Dans cette partie de l'île, les agglomérations sont de petites tailles, et le sol est occupé par la grande forêt primaire de Maurice.

Immenhauser-Potthast (1994) a pu réaliser les mêmes observations dans les coraux.

## 6.5 Conclusion

Les sédiments enregistrent les variations des teneurs en éléments traces. Toutes proportions gardées, les taux élevés en traces dans les sédiments et les coraux des zones agricoles, industrialisées et urbanisées par rapport aux teneurs extrêmement faibles enregistrées dans les zones vierges d'activité humaine montrent clairement que ces éléments ont une origine anthropique.



## CHAPITRE 7

### GÉOCHIMIE ORGANIQUE :

#### ANALYSES QUANTITATIVE ET QUALITATIVE DE LA MATIÈRE ORGANIQUE DANS LES SÉDIMENTS

### 7.1 Introduction

Chaque sédiment a une composition en matière organique qui est caractéristique de son environnement (Poutanen, 1985). Cette composition est inféodée à deux sources d'apport:

- 1 • la matière organique autochtone, provenant de tous les organismes bactériens, végétaux ou animaux vivant dans le lagon.

En milieu récifo-lagonaire, la production primaire de matière organique dépend étroitement des réseaux trophiques (qui comprennent différents niveaux, allant de cette même production primaire assurée par les végétaux jusqu'aux consommateurs supérieurs, carnivores stricts). Elle est effectuée par les organismes capables de fixer le carbone par photosynthèse. Ce sont surtout les algues, le phytoplancton et les coraux via leurs zooxanthelles. Une partie de cette production primaire est consommée directement par les herbivores : poissons, mollusques brouteurs, échinodermes, macrofaune (>1mm) et méiofaune (<1mm) benthique de substrats meubles. Ces derniers sont à leur tour consommés par les niveaux supérieurs carnivores (Bablet *et al.*, 1995).

- 2 • la matière organique allochtone, découlant d'apports extérieurs en provenance de l'île.

Dans le but de caractériser ces composés organique et les matières humiques, cette étude est scindée en deux pôles :

- analyse quantitative de la matière organique (quantification des substances humiques et du coprostanol dans les sédiments),
- analyse qualitative des acides humiques (dosage élémentaire CHNOS et RMN H<sup>+</sup>).

Une analyse optique de la matière organique (lames de palynofaciès) a également été réalisée; elle ne peut cependant pas être intégrée dans un des deux pôles sus-cités car lors du traitement des échantillons une partie des composants organiques a été éliminée (cf. § 7.2).

## 7.2 Analyse optique de la matière organique : détermination des palynofaciès

Cette analyse se pose en préambule à l'étude des matières humiques.

L'objectif était de pouvoir observer *de visu* la matière organique présente dans les échantillons afin d'en déterminer le type génétique et d'appréhender l'origine de la sédimentation organique dans les lagons.

Nous avons, pour ce faire, choisi 29 échantillons (tabl. 7.1) : 24 échantillons de lagons, plus 2 sols (SE1 et SE3) et 3 échantillons terrestres (NE3, NW11 et SW1) pouvant servir de référence pour la matière organique d'origine terrestre.

n° éch.	prof (m)	COT (%)	Localisation	Description
SE1	0	3.51	Domaine du Chasseur, ch. canne	Sol
SE3	0	2.85	Domaine du Chasseur, ch. ananas	Sol
SE5B	20	0.76	Face à l'embouchure GRSE	Vase vert de gris à passées gris sombre
SE6	5	4.22	Embouchure GRSE	Vase vert sombre à noire
IF	0.3	0.13	Îlot Flamants	Sable corallien
SE9	8	0.46	Débarcadère Ile aux Cerfs	Vase vert de gris claire à grise
SE10	0.3	1.88	Ile aux Cerfs, mangliers	Vase noire
NE1A	2	0.61	Anse la raie	Sable clair
NE2	0.4	0.74	Bassin Bernard, bord de plage	Sable moyen grisâtre
NE3	0	3.52	Bassin Bernard, près élevage bovin	Vase vert foncée à noire
NW1	3,5	0.50	Baie de Gd Baie, face hôtel Pullman	Sable gris et Halimeda velasquezii
NW2	4	0.13	Baie de Péreybère	Sable corallien grossier beige
NW3	0.4	0.23	Aquarium de Trou aux aux Biches	Sable grossier beige-gris
NW4A	20	0.96	Devant la Baie de Port-Louis	Vase très fine vert pâle
NW5	25	0.47	Sortie du port	Sable très fin, 6, org. vivants et détrit
NW6	10	2.18	Sortie du port	Vase et sable vert sombre à noir
NW8	15	1.00	Rade de Port-Louis	Vase très fine vert pâle
NW10	1	0.15	Embouchure Rivière du Tombeau	Sable fin couleur fauve
NW11	0.3	2.52	Elisabethville, bras d'égout	Vase très fine noire
NW12	0	1.17	Elisabethville, bras de mer	Sable vaseux vert sombre
NW14 A	105	0.24	Sud pointe d'Albion, Sud égout	Sable et coraux
SW1	0	2.40	Bel Ombre, ruisseau	Vase marron
SW2	0.2	0.37	Lagon au nord du Mome Brabant	Sable gris, nb débris org.; très peu vase
SW3	5	0.38	Rivière Noire, face Centre de Pêche	Sable noir un peu vaseux; nb. algues
SW4	20	0.36	idem, 800 m de la côte	Sable fin gris sombre à passées noires
SW5	30	0.23	idem, 1.5 à 2 km de la côte	Sable idem, un peu plus grossier
SW6	22	0.22	Chen. Case Noyale, face Baie Petite RN	Sable grossier, nb. débris coquillers
SW7	10	0.10	Passé de l'Ambulante, 1km de la côte	Sable fin clair corallien
SW8	18	0.24	Face Tour Martello, 800 m de la côte	Sable ocre, nb. débris Ax et coralliens

tableau 7.1 : Liste d'échantillonnage pour les lames de palynofaciès

### 7.2.2 Méthodologie

Les lames de palynofaciès ont été réalisées dans les laboratoires de l'Unité de Recherche en Pétrologie Organique d'Orléans (France). La méthode utilisée (fig. 7.1) est adaptée d'après celle de l'Institut Français du Pétrole et du Bureau de Recherche Géologique et Minière (France).

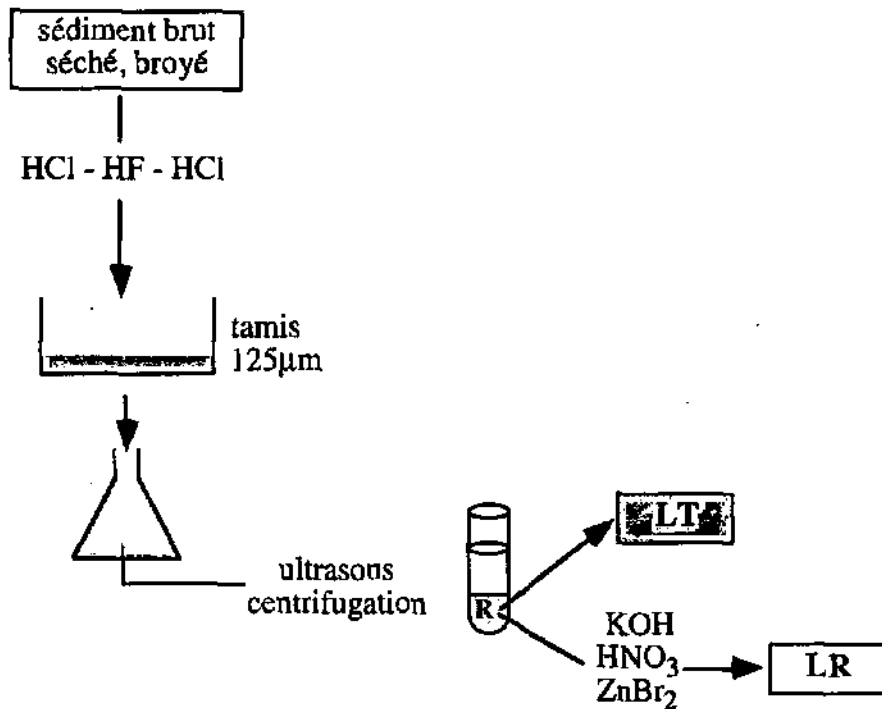


figure 7.1 : Protocole d'isolation des palynofaciès

La préparation des lames de palynofaciès consiste à isoler la matière organique de la phase minérale. Ceci se réalise en deux temps :

1. Quelques grammes de sédiment sec broyé subissent trois attaques successives:
  - acide chlorhydrique (HCl) qui dissout les carbonates,
  - acide fluorhydrique (HF), afin d'éliminer la silice et les silicates en formant des fluorosilicates,
  - acide chlorhydrique (HCl) à nouveau, qui va dissoudre les fluorosilicates résiduels précipités.

La solution est ensuite tamisée (tamis de maille 125 µm), le filtrat est passé aux ultrasons afin de fractionner les particules organiques les plus fines et de décaper certaines particules minérales de leur gangue. Ce filtrat est centrifugé, une partie du résidu (R) monté entre lame et lamelle, et nous obtenons une lame dite totale (LT).

2. Puis il faut désagglutiner et nettoyer les constituants organiques, et dissoudre la pyrite éventuellement présente. Pour cela, deux nouvelles attaques sur R sont respectivement nécessaires :

- une attaque à la potasse (KOH), qui met en solution les matières humiques,
- une attaque à l'acide nitrique (HNO<sub>3</sub>), qui dissout la pyrite et les sels formés avec la potasse.

Après une séparation densimétrique au bromure de zinc (ZnBr<sub>2</sub>, densité=2,2), le résidu est monté entre lame et lamelle et nous obtenons la lame dite résiduelle, LR, sur laquelle est déterminée la composition du palynofaciès.

## 7.2.3 Observation des lames au microscope

### 7.2.3.a Protocole d'observation

L'étude des palynofaciès est effectuée par observation optique en lumière transmise avec un objectif 50x à huile (le grandissement réel étant de 625x).

La méthode d'étude des palynofaciès consiste à reconnaître et regrouper l'ensemble des constituants organiques des sédiments en familles dont les fréquences relatives sont appréciées (Caratini *et al.*, 1975). Les constituants des palynofaciès sont de deux types : une fraction amorphe et une fraction figurée (Combaz, 1980). Différentes familles ont été retenues (tabl. 7.2) :

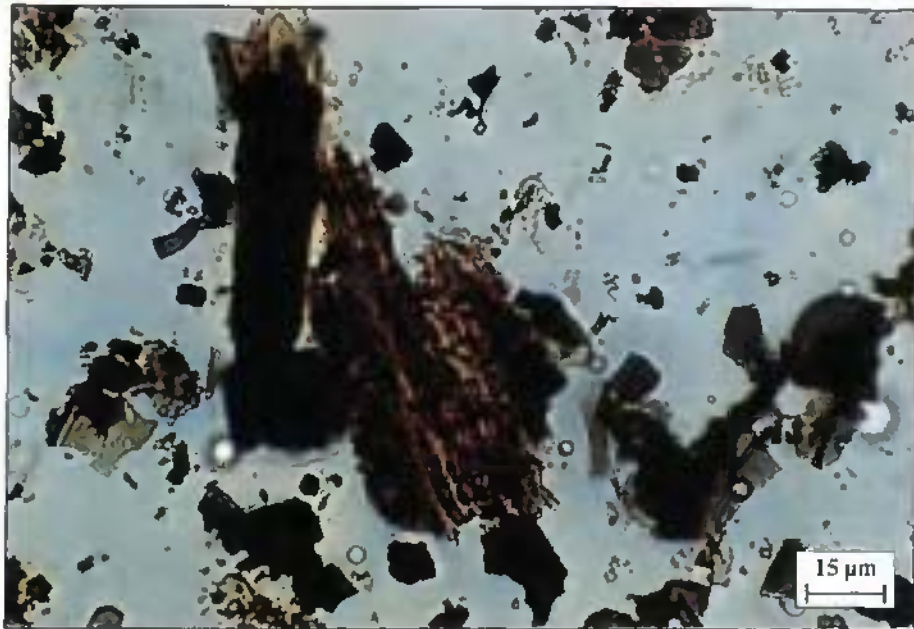
- la matière organique amorphe (MOA), claire et de type grumeleuse d'après la définition de Combaz (1980).
  
- les débris végétaux parmi lesquels nous avons différencié :
  - les fragments ligno-cellulosiques translucides (cellules végétales jaunes à rousses pâles),
  - les fragments ligno-cellulosiques opaques (fragments végétaux géométriques noirs opaques),
  - les fragments gélifiés (fragments végétaux géométriques roux sombres translucides),
  - les cuticules,
  - les spores,
  - les pollens,
  - les filaments mycéliens.
  
- les microfossiles organiques :
  - diatomées,
  - dinoflagellés.

Pour l'estimation des proportions relatives de chacun des éléments contenus dans les lames nous avons observé l'échelle suivante :

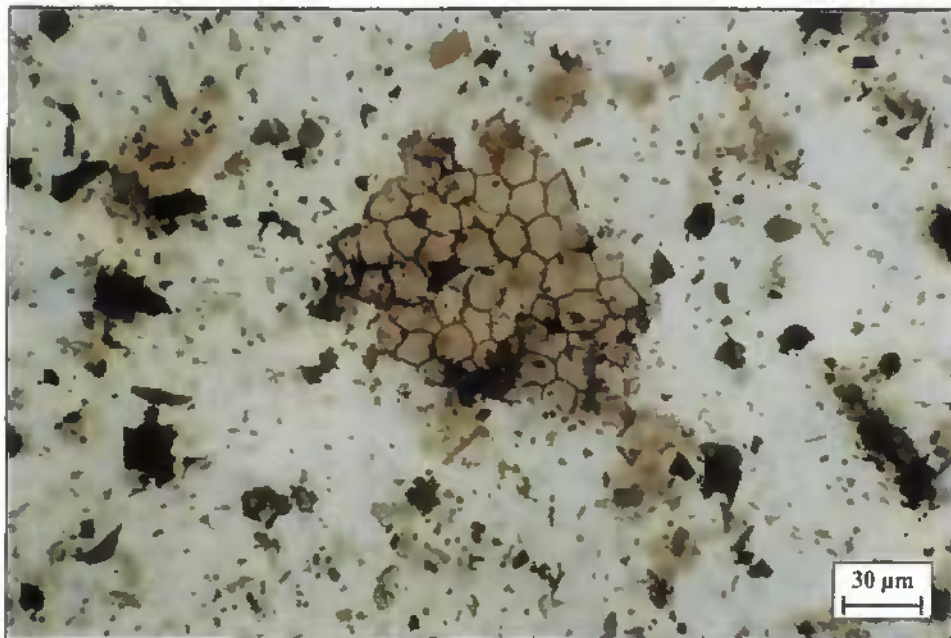
- majoritaire = 50% de la lame
- abondant = 20% de la lame
- très fréquent = 10% de la lame
- fréquent = plusieurs éléments par champs d'observation
- peu fréquent = 1 élément par champs d'observation
- rare = quelques éléments dans la lame
- très rare = 1 ou 2 éléments dans la lame

Il faut noter que cette estimation a été compliquée par le fait que la plupart des lames ne contiennent que quelques éléments par champs d'observation : une dizaine au grand maximum pour les sédiments de lagons, et une quarantaine au maximum pour les lames de sédiments terrestres, les plus riches. Nous n'avons de ce fait presque jamais d'éléments en proportion "majoritaire" ou "abondant".

## PHOTOS DES LAMES DE PALYNOFACIES

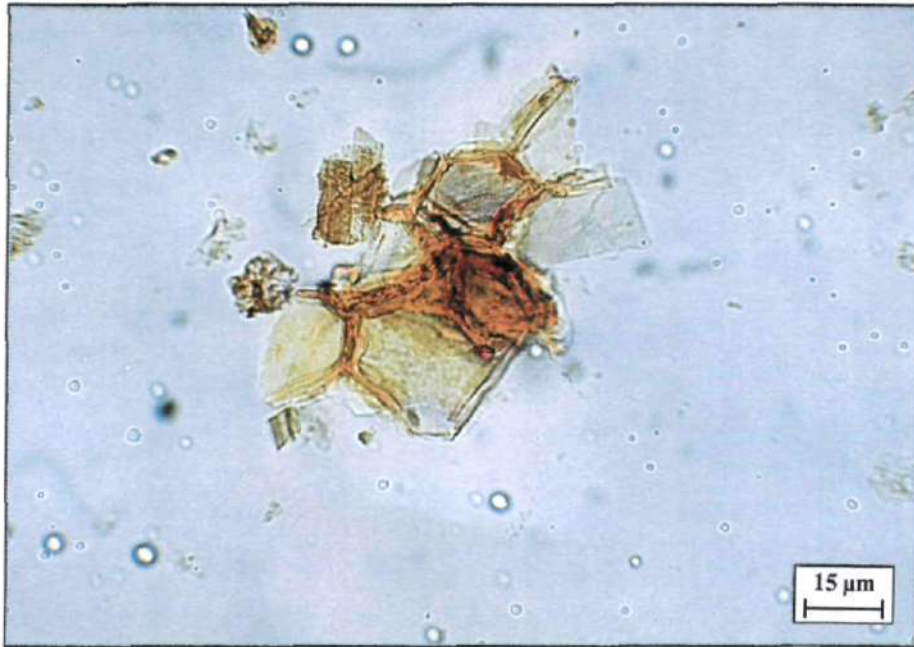


**SE3 LR : fragments ligno-cellulosiques translucides sombres et opaques, fragments gélifiés (grossissement x625)**



**SE3 LT : cuticule, fragments ligno-cellulosiques translucides et opaques, fragments gélifiés, MOA (grossissement x312,5)**

## PHOTOS DES LAMES DE PALYNOFACIES



SE10 LR : fragment ligno-cellulosique translucide (grossissement x625)



NW4a LR : MOA, fragments ligno-cellulosiques translucides, spore (grossissement x625)

n° éch.	prof (m)	COT (%)	MOA	ligno-cel. translucides	opaques	gâtifiés	pollens	spores	cuticules	filaments mycéliens	diatomées	dinoflagellés
SE1	0	3.51	fréquent	fréquent	fréquent	fréquent	très rare	très fréquent	très rare	peu fréquent		
SE3	0	2.85	rare	peu fréquent	abondants	abondants	très rare	rare	très rare			
SE5b	20	0.76	très rare		très rare							
SE6	5	4.22	fréquent	fréquent	fréquent		rare	peu fréquent		rare	très rare	
IF	0.3	0.13										
SE9	8	0.46										
SE10	0.3	1.88	rare	fréquent								très rare
NE1a	2	0.61	rare		rare	rare						
NE2	0.4	0.74	peu fréquent	rare	rare							
NE3	0	3.52	peu fréquent	fréquent	très fréquent	rare	très rare	rare				
NW1	3.5	2.23	peu fréquent	rare	rare							
NW2	4	0.23	rare									
NW3	0.4	0.96	rare	très rare								
NW4a	20	1.05	rare	fréquent	peu fréquent							
NW5	25	2.18	peu fréquent	fréquent	fréquent		très rare					
NW6	10	3.08	rare	peu fréquent	rare	rare						
NW8	15	1.05	fréquent	peu fréquent	fréquent			très rare				
NW10	1	2.52		très rare	très rare							
NW11	0.3	1.17	fréquent	fréquent	rare		très rare	très rare				
NW12	0	0.60	rare	rare	très rare							
NW14A	105	0.26	peu fréquent		rare							
SW1	0	0.38	rare	fréquent	fréquent	fréquent	rare			très rare		
SW2	0.2	0.23		rare	peu fréquent							
SW3	5	0.22	très rare		très rare							
SW4	20	0.10	rare		rare							
SW5	30	0.24	très rare	très rare	très rare							
SW6	22	0.50										
SW7	10	2.40										
SW8	18	0.36	peu fréquent		très rare	très rare						

tableau 7.2 : Description des lames de palynofaciès

### 7.2.3.b Résultats des observations

- Les lames d'échantillons terrestres sont celles qui contiennent le plus d'éléments, et en particulier les lames de sols SE1 et SE3. La matière organique observée est terrestre, et constituée de l'assemblage de très peu de MOA, avec de nombreux éléments figurés de tailles variables mais plutôt grands : cuticules, pollens, spores, filaments mycéliens, fragments ligno-cellulosiques roux clairs translucides, ainsi que des fragments ligno-cellulosiques opaques de grande taille issus probablement du brûlage des champs de canne avant récolte (Planches photos).

- Par comparaison avec ces deux échantillons de sols, on constate qu'en fait, dans toutes les lames, les éléments observés sont d'origine terrestre.

- Toutes les autres lames ne contiennent que très peu d'éléments. Si on regroupe les observations faites dans les lames de sédiments de lagons par régions, il ressort que :

- Région sud-ouest, lagon des Bénitiers et Rivière Noire (SW2 à SW8) : les lames sont pratiquement dépourvues de matière organique.
- Région nord-ouest : les lames sont pratiquement vides, sauf autour de Port-Louis où l'on observe un peu plus de MOA et de fragments ligno-cellulosiques translucides et opaques que dans les autres échantillons de cette région.

*Remarque : nous pouvons noter également que dans la Lame Totale de NW6 se trouve de la pyrite, signe d'un environnement réducteur confiné.*

- Région nord-est : les lames contiennent également une proportion très faible d'éléments.
- Région sud-est : très peu d'éléments dans les lames également. Seul l'échantillon SE6, débouché de la Grande Rivière Sud Est contient une proportion plus grande de fragments organiques de petite taille mais encore assez bien préservés.

### 7.2.4 Conclusions

L'analyse qualitative des lames de palynofaciès montre que dans les lagons, l'accumulation de matière organique est faible. Cette matière organique est d'origine terrestre et se trouve en proportions plus grandes au large de Port-Louis et au débouché de la Grande Rivière Sud Est. En revanche, au nord-est de l'île et au débouché de la Grande Rivière Noire les apports terrestres sont faibles. Ces résultats confirment ce qui avait été observé dans les études précédentes (Muller *et al.*, 1991; Gendre, 1992), à savoir qu'il existe des zones (NW, SE) où l'influence insulaire est plus marquée, et des zones où elle est minimale (SW).

Il faut cependant noter le fait suivant : certains échantillons de lagons ont un pourcentage de COT élevé mais leurs lames de palynofaciès sont pratiquement vides.

C'est le cas pour les échantillons suivants : SE6 (COT=4.22%), SE10 (COT=1.88%), NW5 (COT=2.18%), NW6 (COT=3.08%), NW10 (COT=2.52%) et SW7 (COT=2.40%).



L'accumulation de matière organique est réelle dans ces sédiments, mais elle n'est pas révélée par les lames de palynofaciès. Vu que seule subsiste la matière organique d'origine terrestre, on peut penser que la matière organique d'origine marine a été éliminée par la nature agressive des traitements chimiques que nécessite la préparation des échantillons pour les lames de palynofaciès. Cette supposition se verra confirmée par la suite de l'étude.

## 7.3 Définition et isolation des substances humiques

### 7.3.1 Introduction et définition

Les notions d'ordre général concernant les substances humiques énoncées dans cette introduction sont largement inspirées du premier chapitre de la thèse de J. Peuravuori (1992), intitulée *"Isolation, fractionation and characterisation of aquatic humic substances. Does a distinct humic molecule exist?"*, et qui résume très clairement la situation.

Dans un contexte global, les substances humiques sont les produits naturels les plus largement distribués à la surface de la terre, ubiquistes dans les sols, tourbes, eaux naturelles, sédiments marins et lacustres (figure 7.2).

Par exemple, plus de 70% du COT d'un sol se trouverait dans les substances humiques (Griffith & Schnitzer, 1975; Schnitzer & Khan, 1978).

Les substances humiques forment également en général la fraction majeure de la matière organique dissoute (MOD) dans les eaux naturelles, contenant plus de 90% du carbone organique dissout (COD).

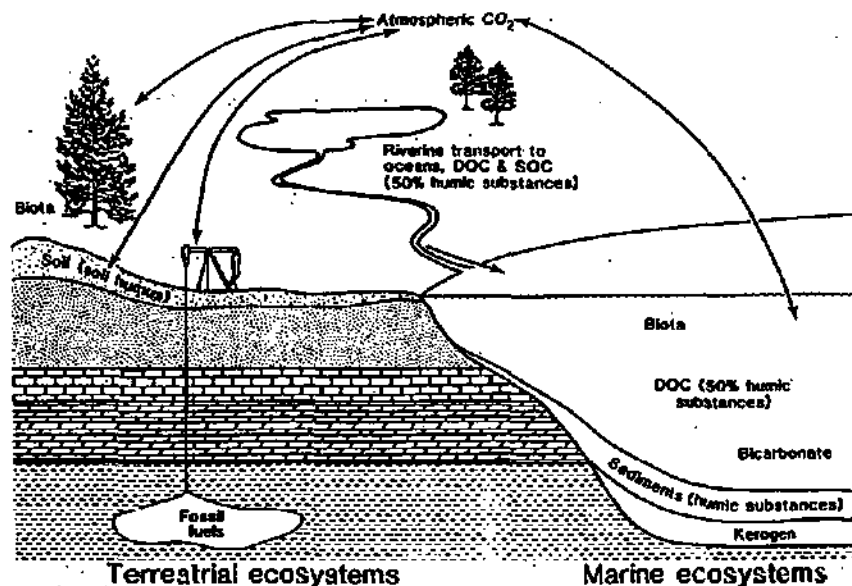


figure 7.2 : Diagramme du cycle du carbone global, montrant l'importance des substances humiques (in Aiken et al., 1985)

La définition des substances humiques est un peu énigmatique.

Selon Aiken *et al.*, (1985), les substances humiques sont définies comme "*une catégorie générale de substances naturelles organiques biogéniques et hétérogènes qui peuvent être caractérisées par leur couleur allant du jaune au noir, par un poids moléculaire élevé et un caractère réfractaire (difficilement dégradable)*", alors que l'humus est défini comme "*la fraction organique du sol, de couleur brune ou noire, constituée partiellement ou entièrement de matières animales ou végétales dégradées, et qui fournit des nutriments aux plantes et augmente la capacité de rétention d'eau du sol. Ce terme ne correspond pas exactement à celui de substances humiques, bien qu'il soit souvent utilisé comme synonyme*". De la même manière, "*l'humification (signifiant en général la décomposition de matériaux organiques) correspond au processus de formation des substances humiques*".

Le terme humus est employé occasionnellement pour désigner la matière organique dans son ensemble. Cela pourrait toutefois prêter à confusion même si, et les substances humiques, et la matière organique du sol incluent un large spectre de constituants organiques, dont un grand nombre ont leur équivalent dans les tissus biologiques.

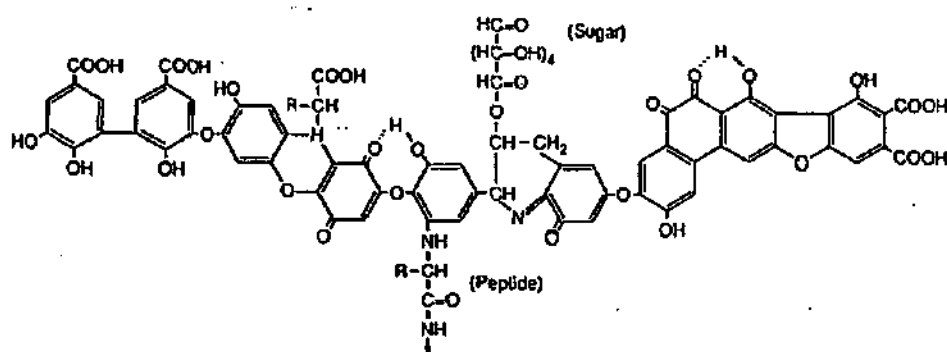
La matière organique, par exemple dans le sol, peut être en gros séparée en 2 groupes :

- 1 • les substances non humiques, consistant en des composés découlant de groupes bien connus en chimie organique tels que les acides aminés, les hydrates de carbone, les graisses, les cires, les résines, les acides organiques, etc.;
- 2 • les substances humiques.

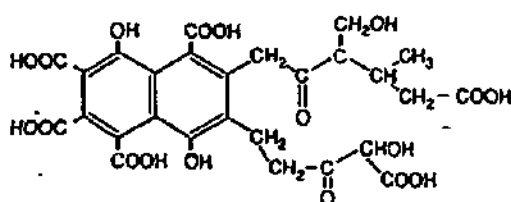
Ces deux groupes ne se distinguent pas facilement l'un de l'autre, car certaines substances non humiques, telles que les hydrates de carbone, ont un lien covalent avec les substances humiques. Apparemment il n'y a pas de frontières chimique stricte entre les substances humiques et non humiques. Les substances humiques ne découlent pas de quelque unique catégorie chimique et elles ne peuvent pas être définies en des termes structuraux qui ne sont pas ambigus (Aiken *et al.*, 1985). Elles ne peuvent non plus être définies sous un terme fonctionnel unique, et ainsi elles ne semblent pas avoir quelque rôle géochimique spécifique. Ceci est assez déroutant et n'offre certainement pas beaucoup d'aide pour comprendre la nature des substances humiques.

Aujourd'hui les définitions de base des substances humiques sont encore opérationnelles, en particulier celles basées sur les procédés d'isolation. Les substances humiques, une fois isolées de leur environnement, sont définies en fonction de leur solubilité dans des solutions acides ou basiques indépendamment de leur origine (Aiken *et al.*, 1985; Drever & Vance, 1994; ...).

- Les acides humiques sont la fraction des substances humiques soluble dans les solutions alcalines; ils précipitent à pH 2.
- Les acides fulviques sont la fraction des substances humiques qui est toujours soluble, quelles que soient les conditions de pH.
- L'humine (obtenue uniquement à partir d'échantillons solides) est la fraction des substances humiques qui n'est jamais soluble quelles que soient les conditions de pH.



(1) Humic Acid



(2) Fulvic Acid

figure 7.3 : Structures proposées pour les acides humiques (1) et fulviques (2) (in Drever & Vance, 1994)

### 7.3.2 Isolation et fractionnement des substances humiques

La méthode d'extraction des substances humiques qui a été utilisée (fig. 7.4) est inspirée de celle de Kononova (1966).

Chaque échantillon de sédiment (300 g) est décarbonaté avec de l'HCl 2N durant 16 heures, à  $t^{\circ} = 4^{\circ}\text{C}$  et pH 2.

Les extractions ont été effectuées avec du pyrophosphate de soude 1% additionné de soude 0.1N à pH 13 ( $\text{Na}_4\text{P}_2\text{O}_7 \cdot 10 \text{H}_2\text{O} + \text{NaOH}$ ). Les sédiments devaient subir deux extractions successives de 4 heures et 12 heures plus n extractions d'une heure jusqu'à ce que le surnageant soit clair. Certains échantillons (en particulier ceux de Port-Louis) ont nécessité 16 extractions successives. Ensuite les extraits sont centrifugés à 10 000G : le culot contenant l'Humine, et le surnageant les acides humiques et fulviques.

Le surnageant est isolé et les acides humiques, en solution, sont précipités avec de l'HCl à pH 2, redissous dans du NaOH 1N, dialysés, passés sur une colonne de résine échangeuse d'ions  $\text{H}^+$  Amberlite IR 120, lyophilisés, et enfin déminéralisés (élimination des "cendres") avec une solution de 50% d'HF à 40% + 50% d'HCl 4N.

La solution contenant les acides fulviques (solubles à pH 2) est ramenée à pH 8 avec du NaOH 1N, concentrée, dialysée, passée sur résine et lyophilisée.

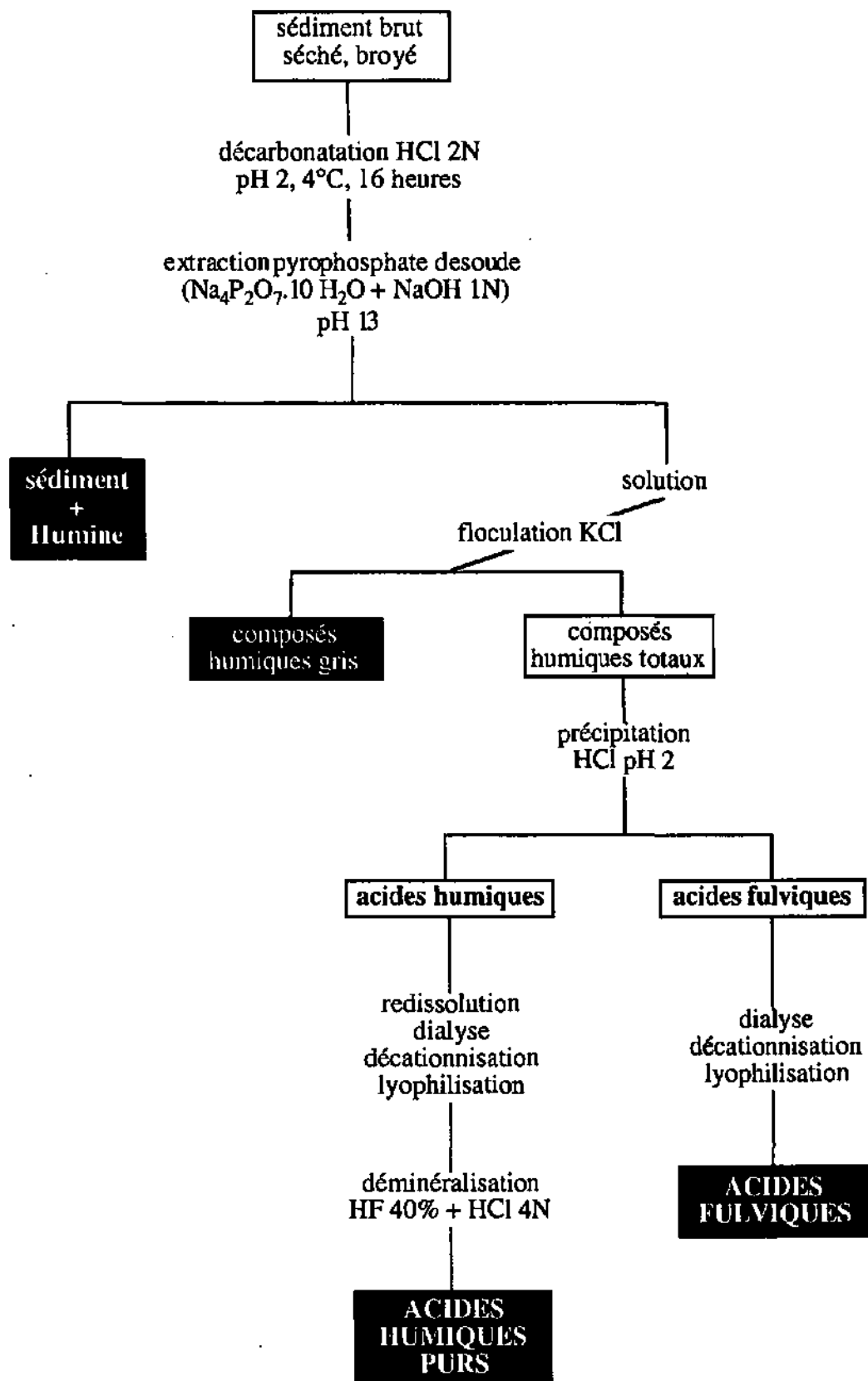


Figure 7.4 : Procédé d'isolement des fractions organiques

Ce protocole d'extraction a été appliqué à deux séries d'échantillons :

- une première série de 10 échantillons; les poids d'acides humiques et fulviques purs obtenus en fin de parcours étaient si faibles qu'il était impossible d'effectuer les analyses prévues pour leur caractérisation; les acides fulviques, dégradés, se sont avérés inutilisables;

- une seconde série de 20 échantillons; le protocole a été légèrement modifié sur deux points :

- l'HCl a été remplacé par de l'H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>,
- les acides humiques gris ont été précipités avec du KCl.

Encore une fois les poids de produits purs obtenus étaient extrêmement faibles et seuls 9 échantillons d'acides humiques ont pu être utilisés pour les analyses ultérieures (tabl. 7.3).

	n° éch	précipitation AH	précipitation AH gris	poids AH (g)	poids AH gris (g)
sol terrestre	SE1	bon	bon	0.1166	0.0907
	SW1	bon	bon	0.0284	0.0051
sol terrestre mangrove	NW11	bon	bon	0.0313	0.0227
sol mangrove	SE10	pas d'AH			
	NE3	bon	bon	0.0029	0.0251
zone de Port-Louis	NW4B	bon	pas d'AH gris	0	
	NW5	pas d'AH			
	NW6	bon	bon	0.0002	0.0151
	NW7	bon	bon	0.0225	0.0186
	NW8	bon	pas d'AH gris	0.0008	
	NW9	bon	pas d'AH gris	0.0004	
Elisabethville	NW12	bon	bon	0.0007	0.0131
Albion	NW14A	pas d'AH			
lagons	SE4A	pas d'AH			
	SE5B	pas d'AH			
	SE7	pas d'AH			
	NW1	pas d'AH			
	NW2	pas d'AH			
	SW3	pas d'AH			
	SW6	pas d'AH			

tableau 7.3 : Poids d'acides humiques restant après les extractions

Pour mener à bien les analyses qualitatives CHNOS et RMN <sup>1</sup>H nous avons donc utilisé les acides humiques issus des deux séries d'extractions.

**Remarque :** selon Hayes (1985), Bremner et Lees ont démontré déjà depuis 1949 que parmi une vingtaine d'extracteurs testés sur des sédiments d'origines diverses, le pyrophosphate de soude est toujours le meilleur pour la séparation des substances humiques. Il agit en formant des complexes avec les cations polyvalents (Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, ...) ce qui a pour effet de neutraliser les charges dans les substances humiques et de les lier aux colloïdes inorganiques. Ces cations polyvalents sont remplacés par les ions Na de l'extracteur. Par la suite, lors de la filtration des produits humiques sur résine échangeuse d'ions H<sup>+</sup>, les Na sont remplacés par des H<sup>+</sup> et nous obtenons des molécules d'acides humiques (ou fulviques) sans plus d'impuretés.

## 7.4 Analyse quantitative de la matière organique

### 7.4.1 Evaluation des pourcentages en composés organiques des sédiments

#### 7.4.1.a Méthodologie

En premier lieu, on dose sur le *TOC Dohrmann Xertex* le taux de **Carbone Organique Acidosoluble (COA)** sur la phase acidosoluble obtenue après décarbonatation des échantillons, en début de protocole d'extraction (tabl. 7.4).

n° éch	RI%	COA%	Tex (AH+ AF) %	AF %	AH %	Humine %	COA+ AH+AF+ H = COT %	
<i>sol</i>	SE1	85.35	0.21	0.83	0.64	0.19	2.47	3.51
<i>terrestre</i>	SW1	81.21	0.12	0.39	0.29	0.10	1.89	2.40
<i>terrestre</i>	NW11	19.09	0.12	0.45	0.24	0.21	1.95	2.52
<i>mangrove</i>	NE3	44.72	0.11	0.23	0.20	0.03	3.18	3.52
<i>mangrove</i>	SE10	4.19	0.11	0.26	0.23	0.03	1.51	1.88
<i>zone de Port-Louis</i>	NW4B	16.51	0.05	0.06	0.05	0.01	0.94	1.05
	NW5	7.67	0.04	0.04	0.03	0.01	0.39	0.47
	NW6	34.60	0.05	0.24	0.18	0.06	1.89	2.18
	NW7	51.21	0.11	0.40	0.24	0.16	2.57	3.08
	NW8	15.53	0.08	0.10	0.08	0.02	0.82	1.00
	NW9	17.37	0.07	0.07	0.07	0.00	0.91	1.05
<i>Elisabethville</i>	NW12	7.06	0.06	0.10	0.05	0.05	1.01	1.17
<i>Albion</i>	NW14A	2.90	0.03	0.02	0.01	0.01	0.19	0.24
<i>lagons</i>	NW1	1.36	0.05	0.04	0.03	0.01	0.41	0.50
	NW2	0.35	0.03	0.00	0.01	0.00	0.10	0.13
	SE4A	3.06	0.05	0.03	0.03	0.00	0.35	0.43
	SE5B	8.37	0.04	0.02	0.02	0.00	0.70	0.76
	SE7	2.52	0.04	0.02	0.03	0.00	0.44	0.50
	SW3	19.70	0.03	0.02	0.02	0.00	0.33	0.38
	SW6	0.91	0.04	0.02	0.02	0.00	0.16	0.22

tableau 7.4 : Pourcentages du C des composés organiques dans la roche totale (COA : carbone organique acidosoluble; Tex : taux d'extraction des composés humiques; AH : acides humiques; AF : acides fulviques)

Les extractions achevées, les pourcentages en **Acides Humiques (AH)**, **Acides Fulviques (AF)**, et **Humine (H)** sont obtenus en effectuant deux analyses successives sur le *TOC Dohrmann Xertex*. Ces deux analyses consistent à déterminer le taux de carbone organique dans les fractions humiques (tabl. 7.4); Il suffit de doser ce carbone organique sur une aliquote des extraits humiques (AH + AF, en cours de protocole d'extraction) et des AF (après séparation des AH et des AF). Le carbone des AH est obtenu par différence.

Le principe de fonctionnement du *TOC Dohrmann Xertex* est le suivant : le carbone organique (des composés humiques et des AF) est oxydé avec du peroxydisulfate de potassium ( $K_2S_2O_8$ ) dans un réacteur UV (ultra-violet), et le  $CO_2$  dégagé est mesuré par un détecteur infra-rouge.

Les résultats obtenus, rapportés au pourcentage de carbone organique du sédiment permettent d'obtenir (tabl. 7.4) :

- le taux d'extraction des composés humiques (Tex %),
- le taux d'AH et d'AF, ainsi que le rapport AF/AH indiquant le degré d'humification de la matière organique,
- le taux d'Humine qui est obtenu par le calcul suivant :  $COA + Tex + H = COT$ .

#### 7.4.1.b Résultats

Les taux des différents composés organiques ont été rapportés au pourcentage de COT des sédiments afin que les résultats soient interprétés par rapport à l'ensemble de la matière organique contenue dans les sédiments.

n° éch	R1%	COA / COT %	Tex (AH+AF)/COT %	AH / COT %	AF / COT %	Humine /COT %	AF/AH	
<i>sol</i>	SE1	85.35	5.98	23.65	5.41	18.23	70.37	3.4
<i>terrestre</i>	SW1	81.21	5.00	16.25	4.17	12.08	78.75	2.9
<i>terrestre</i>	NW11	19.09	4.76	17.86	8.33	9.52	77.38	1.1
<i>mangrove</i>	NE3	44.72	3.13	6.53	0.85	5.68	90.34	6.7
<i>mangrove</i>	SE10	4.19	5.85	13.83	1.60	12.23	80.32	7.7
<i>zone de Port-Louis</i>	NW4B	16.51	4.76	5.71	0.95	4.76	89.52	5
	NW5	7.67	8.51	8.51	2.13	6.38	82.98	3
	NW6	34.60	2.29	11.01	2.75	8.26	86.70	3
	NW7	51.21	3.57	12.99	5.19	7.79	83.44	1.5
	NW8	15.53	8.00	10.00	2.00	8.00	82.00	4
	NW9	17.37	6.67	6.67	0	6.67	86.67	0
<i>Elisabethville</i>	NW12	7.06	5.13	8.55	4.27	4.27	86.32	1
<i>Albion</i>	NW14A	2.90	12.50	8.33	4.17	4.17	79.17	1
<i>lagons</i>	NW1	1.36	10.00	8.00	2.00	6.00	82.00	3
	NW2	0.35	23.08	7.69	0	7.69	76.92	0
	SE4A	3.06	11.63	6.98	0	6.98	81.40	0
	SE5B	8.37	5.26	2.63	0	2.63	92.11	0
	SE7	2.52	8.00	6.00	0	6.00	88.00	0
	SW3	19.70	7.89	5.26	0	5.26	86.84	0
	SW6	0.91	18.18	9.09	0	9.09	72.73	0

tableau 7.5 : Pourcentages de C des composés organiques rapportés au COT (carbone organique total; pour les autres abréviations : cf. tabl. 7.4)

En se rapportant au tableau 7.5 et aux figures 7.5a et 7.5b nous constatons que :

- l'Humine est de loin le constituant organique majeur dans chacun des échantillons. D'après Pelet (1978), concernant l'origine de la matière organique, "l'humine est d'autant

plus abondante que l'origine est marine autochtone".

- Le pourcentage d'AF est toujours plus élevé que celui d'AH.

Ceci est particulièrement visible dans les sols (SE1) et sédiments terrestres (SW1, NW11), et également dans les sédiments subissant une influence terrigène : la zone de Port-Louis de NW4B à NW9, NW12 et NW14A, et également dans les mangroves NE3 et SE10.

- Les échantillons restant provenant des lagons contiennent peu ou pas d'AH.

**Globalement, le taux d'extraction est faible.**

Les taux largement majoritaires d'Humine dans les échantillons indiquent que les substances humiques sont d'origine marine autochtone.

Dans les lagons, le fait qu'il n'y ait pas d'AH indique que la matière organique soluble présente à l'interface eau-sédiment est récente.

Lorsque les AH existent, les rapports AF/AH sont forts ce qui indique que la matière organique des sédiments de Maurice est très peu condensée, très peu mature.

Seuls les échantillons de mangroves SE10 et NE3 font exception avec des rapports AF/AH de 7.7 et 6.7 respectivement, qui sont plus élevés que celui du sol SE1 à 3.37.

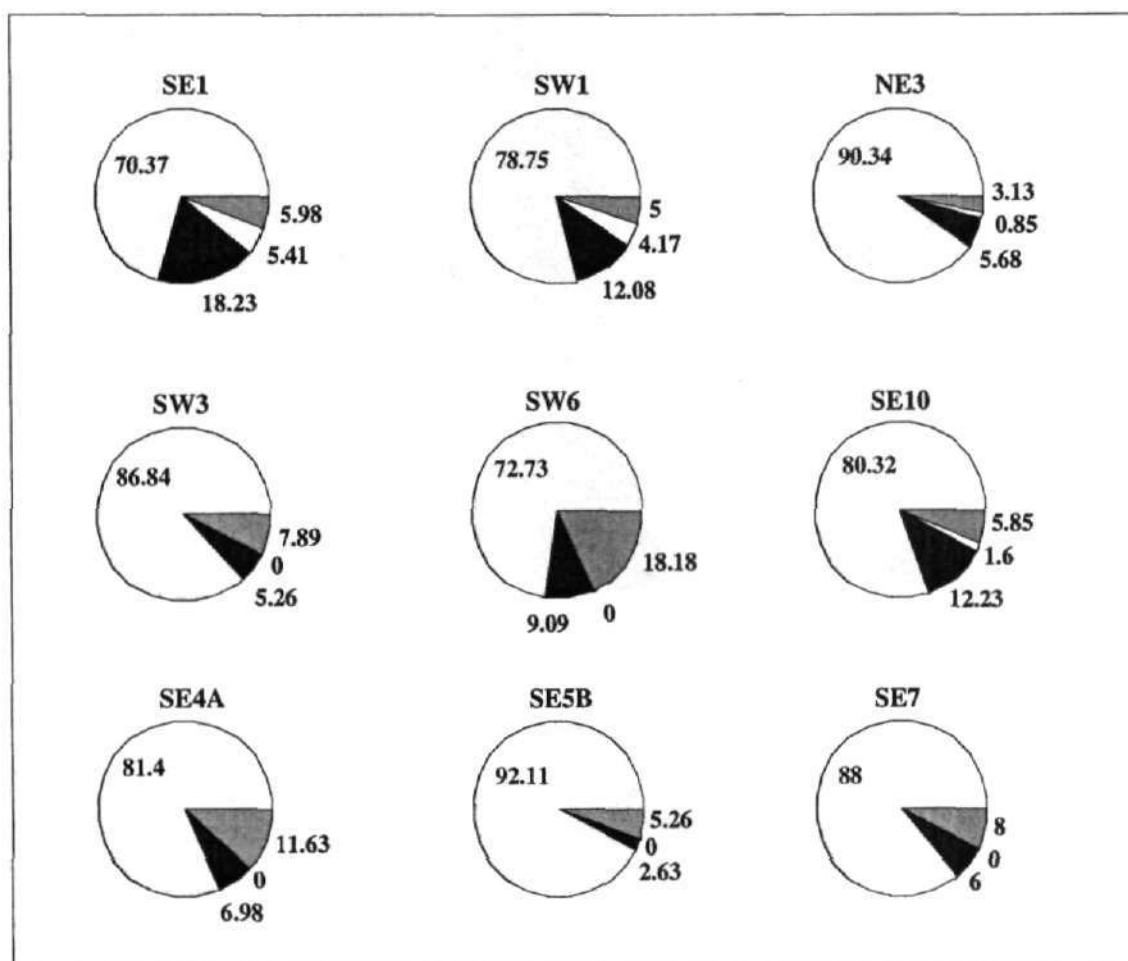


figure 7.5a : Pourcentages de composés humiques dans les échantillons (légende : voir fig. 7.5b)



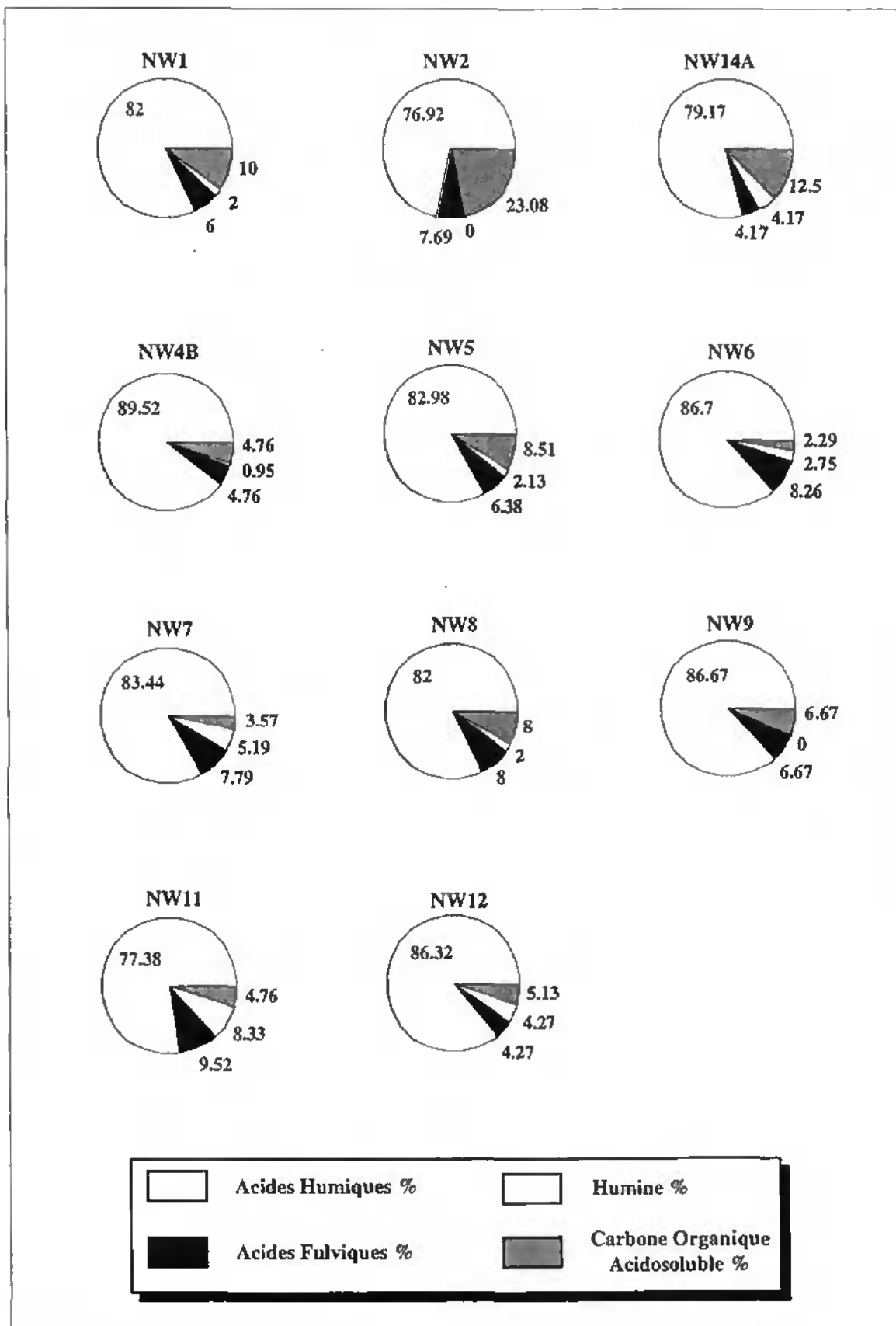


figure 7.5b : Pourcentages de composés humiques dans les échantillons

## 7.4.2 Le coprostanol, biomarqueur de pollution fécale

### 7.4.2.a Introduction

Les sédiments des lagons peuvent recevoir une quantité non négligeable de polluants organiques qui sont soit sciemment épandus sur les sols 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 (Senesi, 1993).

L'écosystème récifal étant déjà perturbé par différents facteurs (entre autres, excès de nutriments dans les eaux lagunaires (Gendre, 1992), développements côtiers entraînant une augmentation de la turbidité des eaux (Muller *et al.*, 1991), ...), les coraux deviennent sensibles à certaines maladies (Antonius, 1981) qui peuvent être dues à des éléments pathogènes transportés dans les eaux usées.

Le coprostanol (5  $\beta$ -cholestan-3  $\beta$ -ol, fig. 7.6) 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. Un grand nombre d'auteurs ont étudié ce marqueur fécal extrêmement stable en milieu marin (Brown *et al.*, 1982). Murtaugh & Bunch ont, dès 1967, défini le coprostanol comme étant un biomarqueur de pollution fécale.

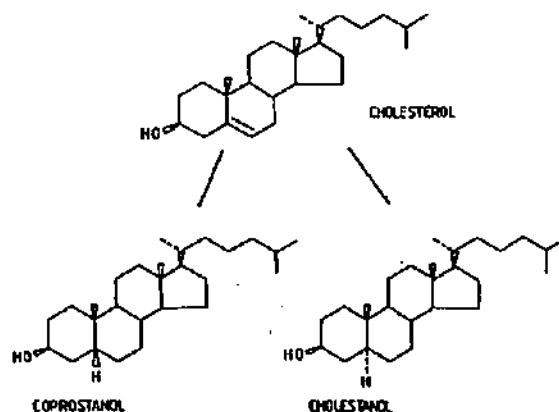


figure 7.6 : "Le cholestérol peut être réduit par des micro-organismes en deux isomères : le coprostanol et le cholestanol. La transformation du cholestérol en stanols est fonction de la population microbienne, du potentiel Redox, de l'acidité, de la température, etc...", in Pittet, 1990.

Il a déjà été dosé par Gendre (1992; Gendre *et al.*, 1994), à l'est et l'ouest de l'île. Des nouveaux dosages sur six échantillons de lagons ont été effectués au nord de l'île pour compléter ces premiers résultats.

### 7.4.2.b Protocole

Le coprostanol a été extrait du sédiment par la méthode suivante :

- extraction avec un mélange de solvants organiques (méthanol / toluène);
- ajout de prégnénolone comme étalon interne;
- saponification des esters avec KOH dans du méthanol;

- extraction avec du dichlorométhane;
- élution sur colonne de verre et récupération de la fraction alcoolique;
- silanisation des alcools par addition de triméthylchlorosilane et d'hexaméthylidisilazane;
- chromatographie en phase gazeuse (Perkin Elmer 8500 Gas Chromotograph).

Le seuil de quantification en mg/kg de sédiment sec est de 0.2; l'erreur de mesure se situe autour de 20%.

### 7.4.2.c Résultats

*Dosage du coprostanol au nord de l'île*

n° éch	COT %	Copro mg/kg	%C-Copro/COT
NE1a	0.61	3.05	0.0416
NE3	3.52	1.45	0.0034
NW1	0.50	0.51	0.0316
NW2	0.13	1.19	0.032
NW11	2.52	0.78	0.00257
NW12	1.17	2.44	0.0173

*Dosages effectués par Gendre (1992)*

n° éch	COT %	Copro mg/kg	%C-Copro/COT
1-ED7	0.10	2.34	0.195
2-IC1	0.18	2.40	0.111
3-IC2	0.25	0.40	0.013
4-GS12	1.35	3.00	0.019
5-M1	3.53	6.00	0.014
6-M23	0.14	1.10	0.065
7-T17	0.20	0.38	0.016
8-A6	0.17	0.63	0.031
9-A9	1.80	2.70	0.012

tableau 7.6 : Teneurs de coprostanol dans les sédiments (mg/kg), et pourcentages de C du coprostanol rapportés au COT (%C-Copro/COT)

Pour avoir une valeur de coprostanol représentative par rapport au teneurs de COT contenu dans les sédiments, les teneurs en coprostanol sont exprimées en % de C et rapportées aux teneurs de COT. Le calcul de conversion est le suivant :

- formule du coprostanol :  $C_{27}H_{48}O$
- poids moléculaire du coprostanol : 388,7g
- poids de C :  $12 \times 27 = 324g$
- facteur de conversion du coprostanol en C :  $388.7 / 324 = 1.2$
- le coprostanol est dosé en mg/kg; il faut le diviser par  $10^4$  pour qu'il soit exprimé en %

Donc on a :

$$(\text{Copro mg/kg} \times 100) / (10000 \times 1.2 \times \text{COT}) = \%C\text{-Copro} / \text{COT}$$

soit :

$$\%C - \text{Copro} / \text{COT} = \frac{\text{Copro mg / kg} \times 0.01}{1.2 \times \text{COT}}$$

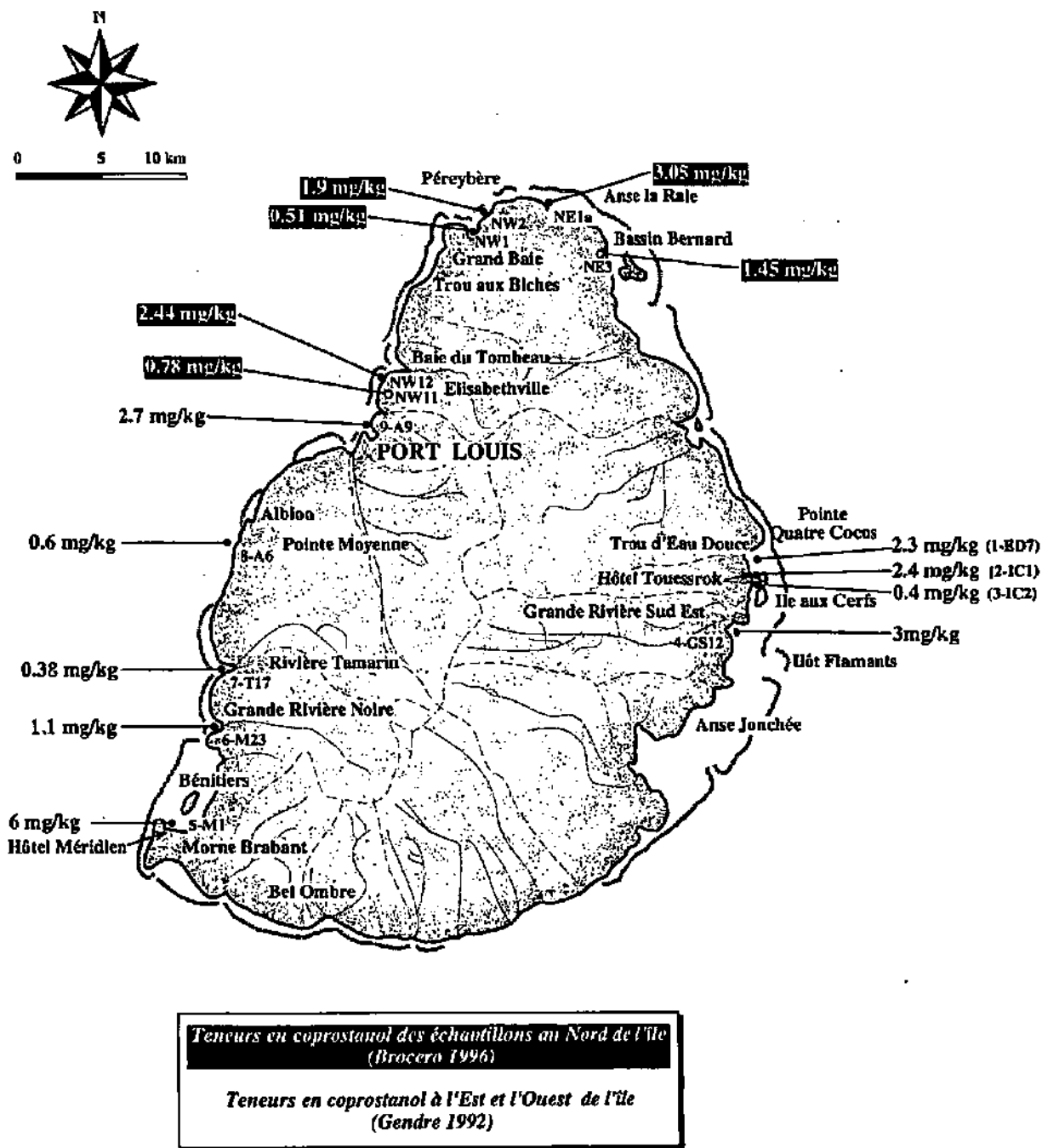


figure 7.7 : Teneurs en coprostanol dans les sédiments de Maurice

- Les %C du coprostanol rapportés au COT

Dans les deux séries d'analyses ils sont faibles. Ils sont cependant un indicateur précieux quant à la réelle signification des teneurs de coprostanol exprimées en mg/kg. On constate

en effet que les fortes teneurs de coprostanol sont ainsi atténuées quand les teneurs en matière organique sont élevées comme dans la mangrove NE3, ou dans les vasières (échantillon 5-M1 de Gendre, au nord du Morne Brabant).

- *Les teneurs de coprostanol en mg/kg*

Elles rentrent dans l'intervalle des teneurs généralement considérées comme "pollution" par les auteurs (Brown *et al.*, 1982).

Pour citer quelques chiffres de référence :

- selon Pierce & Brown (1984), une concentration en coprostanol dans les sédiments marins supérieure à 0.01 mg/kg suffit pour être révélatrice d'une contamination. Ils ont par ailleurs relevé des teneurs de 2,5 mg/kg de coprostanol dans les sédiments de la baie de Sarasota (Floride), à l'exutoire d'une usine de traitement de déchets.
- L'Homme excrète en moyenne de 0.2 g à 1 g de coprostanol par jour et par personne (Brown *et al.*, 1982).
- Pittet (1990) a mesuré, dans le lac de Neuchâtel (eau douce), 50 mg/kg de coprostanol à 40 m. de l'exutoire de la Station d'Épuration, et 1.6 mg/kg dans les sédiments de surface prélevés au milieu du lac.
- Hatcher & McGillivray (1979), utilisant le coprostanol comme indicateur de contamination par les égouts de la baie de New York ont relevé des teneurs allant jusqu'à 5800 mg/kg.

Dans tous nos échantillons (fig. 7.7) les teneurs sont largement au dessus de la limite définie par Pierce & Brown (1984) :

- à la sortie des grands hôtels (sauf aux abords de l'Hôtel Méridien où l'accumulation de matière organique est un phénomène naturel (Gendre, 1992)),
- dans les zones urbanisées (Trou d'Eau Douce, Port-Louis),
- à proximité des zones d'élevage (Anse la raie).

Gendre (1992) a déterminé que pour l'île Maurice, les teneurs en coprostanol supérieures à 1.5 mg/kg sont caractéristiques des milieux les plus contaminés. Au nord de l'île, les zones d'Elisabethville (2.44 mg/kg), Péreybère (1.9 mg/kg) et Anse la Raie (3.05 mg/kg) entrent donc dans cette catégorie.

### 7.4.3 Conclusions de l'analyse quantitative

Le pourcentage de COT est relativement faible dans les sédiments de l'île Maurice.

Par l'analyse quantitative de la matière organique, nous avons déterminé la part de chacun des constituants organiques par rapport à ce COT (tabl. 7.7) :

- l'Humine est le principal constituant de l'ensemble de la matière organique; dans les sédiments marins, son taux élevé par rapport à celui des autres substances humiques signifie que ces substances humiques sont d'origine marine;
- le COA et les acides humiques et fulviques restent assez faiblement représentés;
- les teneurs de coprostanol sont, en proportion, de  $10^3$  à  $10^4$  fois inférieures à celles des composés humiques. Le coprostanol ne représente donc qu'une infime part du cortège organique global; il est d'origine allochtone et ses teneurs dans les sédiments sont démonstratives d'une pollution anthropique.

	n° éch	COA /COT %	Tex (AH+AF) /COT %	Tex/COT + Humine /COT %	% C- Copro/COT
<i>sol</i>	SE1	5.98	23.65	94.02	
	<i>terrestre</i> SW1	5.00	16.25	95.00	
	<i>terrestre</i> NW11	4.76	17.86	95.24	0.00257
	<i>mangrove</i> NE3	3.13	6.53	96.88	0.0034
	<i>mangrove</i> SE10	5.85	13.83	94.15	
<i>zone de Port-Louis</i>	NW4B	4.76	5.71	95.24	
	NW5	8.51	8.51	91.49	
	NW6	2.29	11.01	97.71	
	NW7	3.57	12.99	96.43	
	NW8	8.00	10.00	92.00	
	NW9	6.67	6.67	93.33	
<i>Elisabethville</i>	NW12	5.13	8.55	94.87	0.0173
<i>Alélon</i>	NW14A	12.50	8.33	87.50	
<i>lagons</i>	NE1a				0.0416
	NW1	10.00	8.00	90.00	0.0316
	NW2	23.08	7.69	84.61	0.032
	SE4A	11.63	6.98	88.37	
	SE5B	5.26	2.63	94.74	
	SE7	8.00	6.00	94.00	
	SW3	7.89	5.26	92.11	
	SW6	18.18	9.09	81.82	

tableau 7.7 : Comparaison des teneurs des substances humiques et de coprostanol dans les sédiments

## 7.5 Analyse qualitative des substances humiques

### 7.5.1 Analyse élémentaire CHNOS des Acides Humiques

#### 7.5.1.a Introduction

D'après Huffman & Stuber (1985), l'analyse élémentaire est probablement l'outil le plus utilisé pour la caractérisation des substances humiques. Elle est très utile pour évaluer l'efficacité des méthodes d'isolation et de fractionnement des différentes substances humiques, et confirmer la pureté des acides humiques ou fulviques obtenus (tabl.7.8).

Elément %	Acide Humique
C	50-60
H	4-6
N	2-6
O	30-35
S	0-2

tableau 7.8 : Teneurs élémentaires des AH admises comme références (Schnitzer & Khan, 1972)

Souvent les teneurs élémentaires et les rapports de ces éléments entre-eux (H/C, O/C, N/C) sont l'unique indicateur de l'origine d'un acide humique ou fulvique (Steelink, 1985). Elles permettent de distinguer différentes classes de substances humiques (aquatique continentale, marine ou terrestre).

### 7.5.1.b Analyses

Il a été possible de doser les éléments CHNOS sur 7 échantillons d'AH (acides humiques) (tabl. 7.9).

- Le dosage des C, H et N a été effectué au LASUR de Neuchâtel sur un *CHN Carlo-Erba Elemental Analyser*.
- Le dosage de l'O et du S a été effectué dans le service Micro-Analyses ATX des Laboratoires Wolff à Clichy, France. Ils ont également effectué plusieurs dosages CHN pour contrôle de méthodes inter-laboratoires; leur résultats et les notres concordent parfaitement.

#### Pourcentages des éléments CHNOS dans les AH

Valeurs théoriques C : 50-60 % H : 4-6 % N : 2-6 % O : 30-35 % S : 0-2 %					
n° éch	C (%)	H (%)	N (%)	O (%)	S (%)
SE6 AH	49.32	4.55	2.97	33.82	1.46
SE7 AH	54.21	6.53	5.99	26.74	2.07
SE10 AH	51.82	5.88	3.43	33.21	2.55
NE3 AH	55.61	6.62	4.59	31.8	0.97
NW4B AH	54.71	6.43	4.31	30.29	1.54
NW11AH	51.2	6.26	6.47	31.56	1.95
NW12 AH	57.2	7.04	5.68	27.78	2.1

#### Composition élémentaire des AH

n° éch	C élém.	H élém.	N élém.	O élém.	S élém.
SE6 AH	4.11	4.55	0.21	2.11	0.05
SE7 AH	4.52	6.53	0.43	1.67	0.06
SE10 AH	4.32	5.88	0.25	2.08	0.08
NE3 AH	4.63	6.62	0.33	1.99	0.03
NW4B AH	4.56	6.43	0.31	1.89	0.05
NW11AH	4.27	6.26	0.46	1.97	0.06
NW12 AH	4.77	7.04	0.41	1.74	0.07

#### Rapports élémentaires

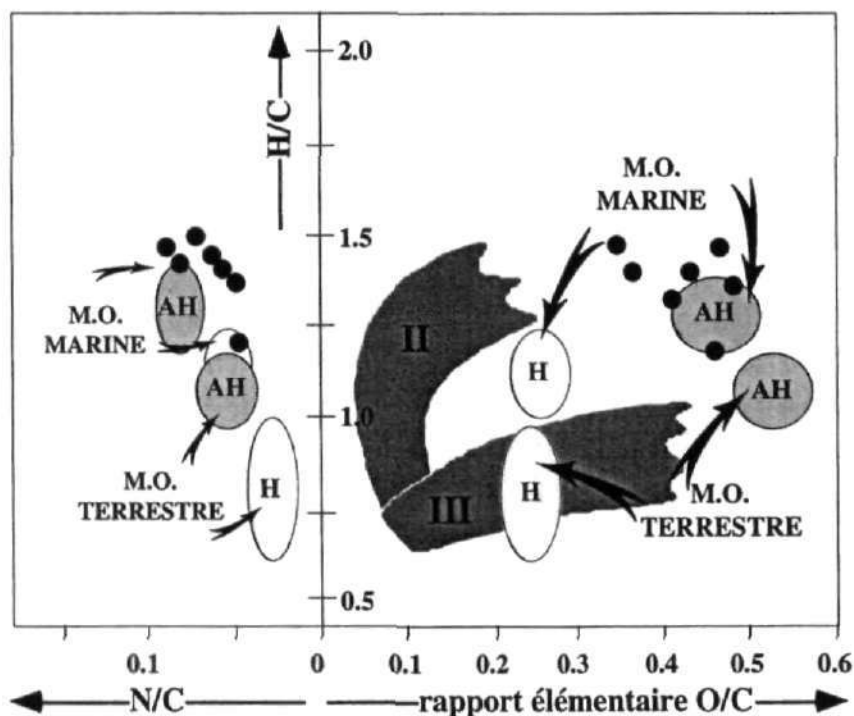
n° éch	H/C	O/C	N/C	S/C
SE6 AH	1.11	0.51	0.05	0.01
SE7 AH	1.45	0.37	0.09	0.01
SE10 AH	1.36	0.48	0.06	0.02
NE3 AH	1.43	0.43	0.07	0.01
NW4B AH	1.41	0.42	0.07	0.01
NW11AH	1.47	0.46	0.11	0.01
NW12 AH	1.48	0.36	0.09	0.01

tableau 7.9 : Pourcentages, teneurs et rapports élémentaires des AH

### 7.5.1.c Résultats

Pour la recherche pétrolière, de nombreux scientifiques se sont penchés sur la signification des rapports atomiques en terme d'origine de la matière organique.

Des schémas de référence ont été établis (fig. 7.8), qui montrent que les AH d'origine marine ont des rapports O/C, H/C et N/C relativement élevés par rapport aux AH d'origine terrestre.



**figure 7.8** : "Average elemental composition of humic acids and stable residues from marine and terrestrial organic matter, compared to average elemental composition of some biopolymers (after Pelet, 1981)", in Vandembroucke *et al.*, 1985. Ce schéma a été modifié d'après Vandembroucke *et al.*, 1985. Les échantillons de Maurice (●) y sont insérés.

Les rapports élémentaires des AH des échantillons de Maurice (fig. 7.8) montrent que tous les échantillons sont d'origine marine; leurs rapports H/C se trouvent en effet bien au dessus de la limite définie par Debyser & Gadel (1978) entre la matière organique d'origine marine et la matière organique d'origine terrestre, à  $H/C \approx 1$ .

L'échantillon SE6 montre un enrichissement en matière organique plus terrigène; il est situé à l'embouchure de la Grande Rivière Sud Est, ce qui explique cette tendance.

Le rapport S/C est trop faible pour avoir une réelle signification.

Les analyses élémentaire, démontrent que les AH sont d'origine marine; la principale source de la matière organique dans les lagons est donc autochtone.



## 7.5.2 Analyses RMN $^1\text{H}$ sur les Acides Humiques

### 7.5.2.a Notions générales et méthodologie

L'analyse par résonance magnétique nucléaire (RMN) est basée sur le fait que le noyau d'un atome tourne autour de son axe, c'est à dire qu'il a un moment angulaire et se comporte comme un dipôle aimanté.

Le moment angulaire est donné par :  $\mu = [h/2\pi] [I(I+1)]^{1/2}$ , où  $h$  est la constante de Planck et  $I$  le nombre de spin.

Le nombre de spin peut avoir les valeurs suivantes : 0, 1/2, 1, 3/2, 2... et dépend du noyau de l'atome étudié; il est nul pour les noyaux ayant un nombre de masse et un nombre de charge pairs comme He ou C, et égal à 1/2 pour les noyaux à nombre de masse impair comme  $^1\text{H}$ ,  $^{13}\text{C}$  ou  $^{15}\text{N}$ .

Si un noyau est placé dans un champ magnétique  $H_0$ , il peut prendre  $2I+1$  orientations par rapport à la direction du champ.

Pour l'hydrogène  $^1\text{H}$  ( $I = 1/2$ ), il peut prendre  $[(2I+1) = 2]$  deux orientations possibles. Chaque orientation a un niveau d'énergie différent et il est possible de provoquer la transition entre chaque état d'énergie en utilisant une radiation électromagnétique dont le champ magnétique est perpendiculaire au champ  $H_0$  et dont la fréquence est :  $\nu = \gamma(H_0/2\pi)$ , où ( $\gamma$ ) est le moment gyromagnétique caractéristique de chaque type de noyau.

Les différentes fréquences de résonance (maximum de noyau passant à l'état d'énergie supérieur, soit  $I = 1/2$ ) sont caractéristiques de l'environnement électromagnétique des noyaux et permettent donc de caractériser les liaisons chimiques contractées par ces noyaux.

La méthode utilisée pour mettre les noyaux en résonance consiste à exciter tous les noyaux par une impulsion très rapide du champ électromagnétique, produisant un ensemble de fréquences; on utilise la transformée de Fourier des signaux des noyaux en fonction du temps pour enregistrer le spectre en fréquence. Cette méthode permet d'obtenir des spectres de bonne qualité car les impulsions peuvent être répétées un grand nombre de fois, et les spectres accumulés de manière à augmenter les rapport signal/bruit (Wilson, 1981).

Les fréquences de résonance sont généralement transformées en déplacements chimiques par rapport à un étalon, le tétraméthylsilane (TMS); ces déplacements chimiques étant faibles ( $10^{-3}$  à  $10^{-6}$ ), ils sont exprimés en ppm (fig.7.9, fig. 7.10, et tabl.7.10).

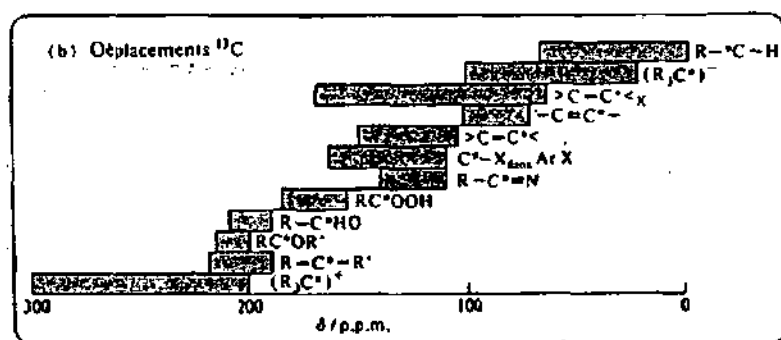


figure 7.9 : Gamme de déplacements chimiques pour la RMN  $^{13}\text{C}$  (Atkins, 1982)

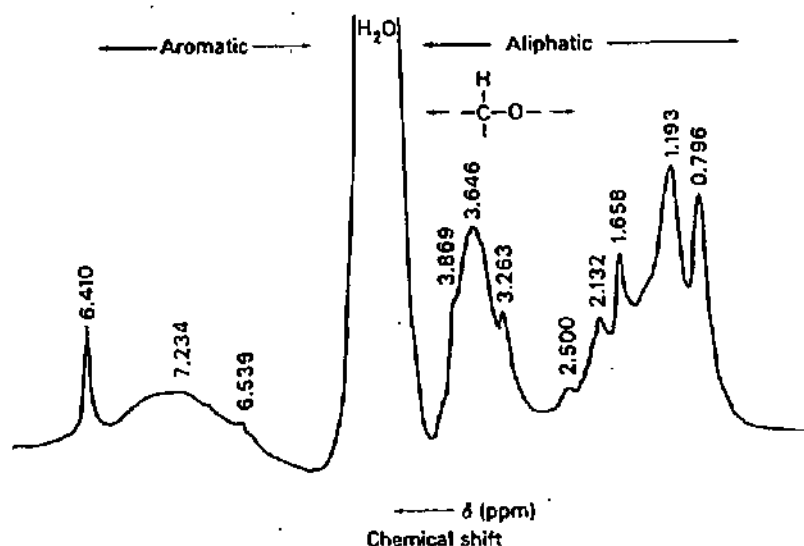


figure 7.10 :  $^1\text{H}$  NMR spectrum of humic acid from Wakanui silt loam", in Wilson, 1981

Chemical shift ( $\delta$ ) ppm	Assignment	Observed resonance
0.8 → 1.0	terminal methyl groups of methylene chains	0.9, 0.85, 0.8, 0.87-1.0
1.0 → 1.4	methylene of methylene chains ( $\delta = 1.25$ ); $\text{CH}_2\text{CH}$ at least two carbons or further from aromatic rings, or polar functional groups	1.31, 1.3, 1.26, 1.25, 1.2, 1.19, 1.12, 1.06
1.4 → 1.7	methylene of alicyclic compounds	1.4-1.7, 1.5
1.7 → 2.0	protons of methyl and methylene groups $\alpha$ to aromatic rings; $\beta$ protons of indanes and tetralins	1.86, 1.84, 1.7-2.0
2.0 → 3.3	protons of methyl groups and methylene groups $\alpha$ to aromatic rings; protons $\alpha$ to carboxylic acid groups; $\alpha$ protons of indanes and tetralins	3.2, 3.1, 2.9, 2.5, 2.4-2.0
3.3 → 5.0	protons $\alpha$ to carbon attached to oxygen groups; sugars of carbohydrates	3.2-4.9, 3.2-4.4, 4.1, 3.9, 3.7, 3.6
5.0 → 6.5	olefins	—
6.5 → 8.1	aromatic protons including quinones, phenols, oxygen containing heteroaromatics aromatics	8.8-8.0, 8.0, 7.1, 7.0, 6.8-7.2, 6.8, 6.6-6.9, 6.5
8.1 → 9.0	sterically hindered protons of aromatics; nitrogen heteroaromatics; formate	8.4( $\text{HCOO}^-$ ), 8.0-8.8
Variable	acidic protons of phenols and carboxylic acids, confirmed by $\text{O}_2\text{O}$ exchange	9.4-7.0

tableau 7.10 :  $^1\text{H}$ -Resonances from humic materials", in Wilson, 1981

Les analyses ont été effectuées à l'Institut de Chimie de l'Université de Neuchâtel, et en Italie au Dipartimento di Chimica Generale ed Organica Applicata, Torino, par le Professeur E. Montoneri.

### 7.5.2.b Résultats

Les spectres ont été réalisés sur 6 échantillons d'AH :

- 4 à Neuchâtel : SE7, SE10, NE3, NW12;
- 2 à Torino : SE1, SE6.

Les spectres (annexe 14) peuvent être divisés en trois régions :

- la région allant de 0.5 à 2.5 ppm caractérise les protons aliphatiques (alkyl dans le tabl. 7.11),
- la région allant de 3 à 4.7 ppm caractérise les protons en position ( $\alpha$ ) d'un oxygène, par exemple sur les fonctions méthoxyl, ester, alcool et éther (méthoxy dans le tabl. 7.11),
- et la région allant de 6.4 à 8.5 caractérise les protons aromatiques.

Le dosage semi-quantitatif (tabl. 7.11) a été effectué sur les spectres en intégrant les surfaces des pics et en les normant à 100%.

	n° éch	%	% aliphatiques		Lieu d'analyse :
			aromatiques	méthoxy	
<i>sol</i>	SE1	21.7	17.1	61.3	Torino
<i>mangrove</i>	SE10	12.8	56.7	30.5	Neuchâtel
<i>mangrove</i>	NE3	11.9	31.9	56.2	Neuchâtel
<i>GRSE</i>	SE6	9.9	29.0	61.1	Torino
<i>Port-Louis</i>	NW4B	6.7	71.2	22.1	Neuchâtel
<i>TED</i>	SE7	6.2	57.5	36.3	Neuchâtel
<i>Elisabethville</i>	NW12	4.8	79.6	15.6	Neuchâtel

tableau 7.11 : Analyses RMN  $^1\text{H}$ . Taux d'aromaticité des AH

Le taux d'aromaticité est utilisé pour caractériser les échantillons, sachant que, d'après Hatcher (1980), les AH d'origine terrestre ont un pourcentage plus élevé de composés aromatiques (17-35%), du à la présence de lignine dans les végétaux supérieurs.

Dans le tableau 7.11, les échantillons sont classés en fonction d'un taux d'aromaticité décroissant :

- SE1 est le seul échantillon d'AH que l'on puisse ranger dans la fourchette des AH d'origine terrestre définie par Hatcher (1980), avec 21.7% d'aromatiques. SE1 est un sol : ce résultat nous permet de confirmer la validité de l'ensemble des résultats.
- Les 6 autres échantillons se classent dans les AH d'origine marine.
- SE10 et NE3, dans les mangroves, sont d'origine marine, mais ils portent l'empreinte des végétaux supérieurs avec des pourcentages d'aromatiques de 12.8% et 11.9% respectivement.
- SE6, au débouché de la Grande Rivière Sud Est, est également marqué par des apports terrigènes; cependant le taux d'aromaticité des AH (9.9%) montre qu'ils sont d'origine marine.
- NW4B, SE7 et NW12, avec des pourcentages d'aromatiques allant de 6.7 à 4.8, montrent que quelque soit l'environnement considéré (lagon ou large), les AH sont

essentiellement d'origine autochtone, d'origine marine.

### 7.5.3 Conclusions de l'analyse qualitative

Les deux types d'analyses qualitatives, par quantification des rapports élémentaires H/C, O/C, N/C, et par RMN <sup>1</sup>H, effectuées sur les AH extraits des échantillons de Maurice prouvent qu'une partie de la matière organique dans les sédiments est d'origine marine, et donc lagonaire.

### 7.6 Conclusion

Présentée ci-dessous, la figure 7.11 résume quatre années de laboratoire, et expose l'ensemble des constituants organiques extraits des sédiments de l'île Maurice.

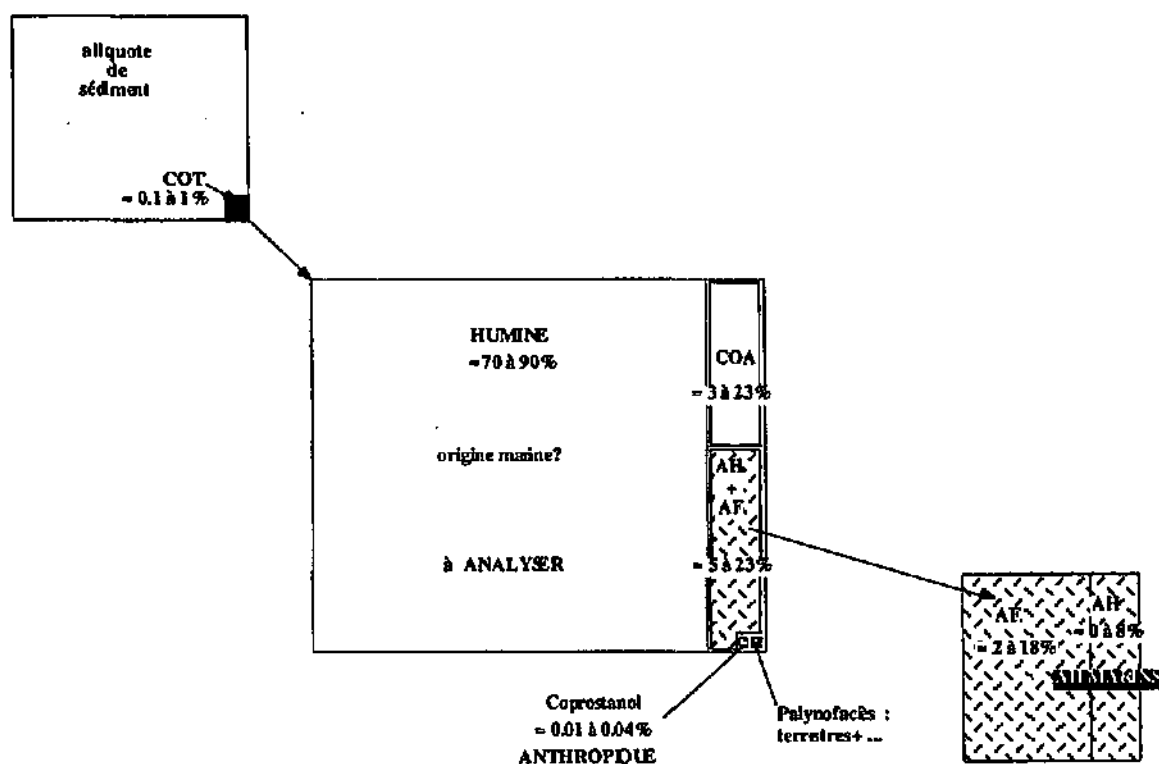


figure 7.11 : Graphique synoptique des différents constituants organiques isolés

Dans les sédiments des lagons de l'île Maurice, la matière organique est jeune et autochtone.

L'analyse des palynofaciès n'a permis d'observer que de la matière organique d'origine

terrestre car les traitements chimiques qu'elle nécessite sont extrêmement agressifs et ont éliminé la matière organique d'origine marine révélée par l'analyse qualitative.

L'analyse quantitative a montré que le taux d'extraction des substances humiques est faible, et que **la matière organique présente à l'interface eau-sédiment dans les lagons est très peu évoluée**. Le fort pourcentage d'Humine par rapport aux autres composés organiques démontre une **origine marine des substances humiques**. De plus, les teneurs de coprostanol montrent une pollution anthropique sur les sites où elles ont été dosées, mais ce biomarqueur de pollution fécale n'occupe qu'une place infime dans le cortège organique.

Enfin, l'analyse qualitative effectuée sur les AH a permis de confirmer que **la matière organique dans les lagons est très majoritairement produite *in-situ*, et donc d'origine marine**.

## CHAPITRE 8

### CONCLUSIONS GÉNÉRALES

Les sédiments des lagons de l'île Maurice sont des sédiments carbonatés, principalement constitués de calcite, calcite magnésienne et d'aragonite. L'apport de minéraux détritiques découlant de l'altération du socle basaltique de l'île est perçu au déboucher des rivières.

Dans la phase carbonatée des sédiments, les taux d'aragonite et de calcite magnésienne sont toujours supérieurs à celui de la calcite.

Le taux de substitution de  $MgCO_3$  dans les calcites magnésiennes est remarquablement constant avec une moyenne de  $13.8 \pm 0.5$  moles%. Les calcites magnésiennes des sédiments de lagons sont d'origine biologique pure, provenant des tests de foraminifères et des échinodermes. La constance du taux de  $MgCO_3$  dans les calcites magnésiennes des sédiments de Maurice est extraordinaire si l'on tient compte du fait que les taux de solutions solides sont généralement variables suivant les classes, les familles, les genres d'organismes et la température des eaux.

Dans les lagons de Maurice, le taux de carbone organique total est globalement faible (de 0.1% à 1%). Les sédiments des lagons contiennent peu de matière organique. L'extraction des substances humiques, présentes en très faibles quantités, a posé de réels problèmes lors de la phase analytique.

Le travail a été orienté pour l'obtention d'une quantité suffisante d'acides humiques en vue de leur étude approfondie. Le manque de matériel a constitué un handicap car, dans des lagons, pour obtenir quelques milligrammes d'acides humiques, il faut avoir à disposition plusieurs kilos de sédiments ...

Après deux séries d'extractions alcalines, la part de chacun des constituants des substances humiques a pu être quantifiée. Le carbone organique acidosoluble, les acides humiques (AH) et les acides fulviques (AF) sont faiblement représentés. L'humine est de loin le constituant majeur du cortège organique, avec un taux toujours supérieur à 80% par rapport à l'ensemble des constituants.

Globalement, le taux d'extraction est faible.

Dans les lagons, l'absence d'AH signifie que la matière organique à l'interface eau-sédiments est récente. Lorsqu'on trouve des AH, les rapports AF/AH sont forts ce qui est synonyme d'une matière organique très peu condensée, très peu mature.

Les taux élevés d'humine indiquent une origine marine des substances humiques.

La caractérisation des AH par quantification des rapports élémentaires O/C, H/C et N/C a prouvé qu'ils sont d'origine marine.

Les analyses RMN  $H^+$  effectuées sur les AH ont confirmé les résultats de l'analyse élémentaire : leurs faibles taux d'aromaticité prouvent leur origine marine.

Autre constituant du cortège organique mais d'origine insulaire, le coprostanol,

biomarqueur de pollution fécale, dosé dans les sédiments des lagons montre des teneurs largement supérieures aux limites de pollution généralement admises.

Le coprostanol est à Maurice un témoin de la pollution anthropique; son dosage a permis de déterminer des périmètres de pollution dans les lagons, autour des grandes concentrations urbaines et des zones d'élevages de mammifères supérieurs.

Pour doser les éléments trace (Co, Cr, Ni, Cu, Zn, Pb et Cd) dans les sédiments carbonatés des lagons, il n'existe aucun extracteur spécifique qui permette de différencier les parts naturelles, détritiques et anthropiques de ces éléments dans les sédiments analysés.

Quatre acides ont été testés : l' $\text{HNO}_3$  2N, l' $\text{HNO}_3$  6N, l' $\text{HCl}$  6N et l'*aqua regia*. Ils se sont révélés particulièrement efficaces pour les 7 éléments dosés.

Leur force d'extraction n'est pas la même :  $\text{HCl}$  6N  $\geq$  *aqua regia* >  $\text{HNO}_3$  6N >  $\text{HNO}_3$  2N.

Compte-tenu de leur puissance, et de l'interférence causée par la présence de matériel géogène en certaines zones d'échantillonnage, seuls les résultats obtenus à partir de l'extracteur le plus faible, l' $\text{HNO}_3$  2N, ont été pris en compte pour l'interprétation des teneurs en traces dans les sédiments des lagons.

Le dosage des éléments trace a révélé deux sources d'apport distinctes : géogène et anthropique.

Les trois éléments Co, Cr et Ni, rattachés au résidu insoluble (RI) des analyses géochimiques, sont d'origine détritiques; ils procèdent de l'altération du socle basaltique de l'île.

Par contre le Cu, le Zn, le Pb et le Cd ne sont pas rattachés au RI, ni à aucune autre phase des analyses géochimiques. Ils sont donc d'origine anthropique.

Les plus fortes teneurs en ces éléments ont été mesurées principalement en deux endroits : dans les sédiments du sud-est de l'île; face à la Grande Rivière Sud Est, et dans les sédiments de la Baie de Port-Louis.

Face à la Grande Rivière Sud Est, les teneurs les plus élevées sont celle de Zn (106 mg/kg) et de Cd (0.57 mg/kg); le Cu (52 mg/kg) et le Pb (16 mg/kg) sont en plus faibles quantités. La Grande Rivière Sud Est draine de grandes plaines cultivées; l'utilisation des engrais phosphatés (Cd), sulfates de Zn, et fongicides (sulfates de Cu) est nettement mise en relief par ces résultats, d'autant que dans le reste du lagon les sédiments sont vierges de traces.

La Baie de Port-Louis est la zone la plus critique de l'île, avec les teneurs les plus hautes en Cu (414 mg/kg), Zn (129 mg/kg), Pb (165 mg/kg) enregistrées dans les sédiments marins de l'île. Le Cd (0.37 mg/kg) est en proportions plus faible que face aux zones cultivées. Port Louis représente à la fois une grande concentration urbaine, ainsi que le principal pôle industriel et maritime de l'île. Ici, l'activité industrielle est nettement mise en cause pour les fortes teneurs en traces.

Concernant la pollution des sédiments de Port-Louis, il est bon de souligner qu'à Maurice, la part des produits manufacturés (surtout textile et électronique) voués à

l'exportation est passée de moins de 1% en 1970, à 70.5% en 1995. Cette augmentation est liée à la croissance du secteur tertiaire (services), et surtout du secondaire dont le potentiel s'est considérablement accru et diversifié.

Face à une telle croissance, on peut s'attendre à une augmentation des rejets polluants dans ce périmètre, surtout si certaines mesures de protections élémentaires font défaut.

En revanche, au nord et nord-est de l'île, au sud-est entre Trou d'Eau-Douce et l'île aux Cerfs et dans tout le lagon des Bénitiers, les teneurs des traces sont quasiment nulles.

Pourtant, le bilan de santé du complexe récifal de la région de Rivière Noire (lagon des Bénitiers) montre que depuis 15 ans l'écosystème récifal s'est globalement dégradé (Gendre, 1992). La cause de cette dégradation n'est pas enregistrée dans les sédiments en termes d'augmentation de teneurs d'éléments traces.

*En résumé, et au sujet de la conclusion principale de cette recherche, un impact anthropique est significativement enregistré dans les sédiments des lagons de l'île Maurice au travers des fortes teneurs en coprostanol et en éléments trace Cu, Zn, Pb, Cd aux abords des zones d'activités humaines.*

*Cependant, les conclusions des analyses et des observations laissent à penser que la dégradation de l'écosystème littoral de l'île Maurice, outre les méfaits reconnus de la pollution, s'inscrit dans un cycle plus global de dégradation des écosystèmes récifaux non encore expliquée par la communauté scientifique.*

Si le projet qui s'achève ici trouve une suite dans l'avenir, les travaux concernant la matière organique devraient être poursuivis.

La caractérisation des substances humiques n'ayant, pour ainsi-dire, jamais été réalisée dans des lagons, il serait fort intéressant de compléter les résultats déjà obtenus, en se concentrant sur l'analyse de l'humine, composé humique en proportion plus que majoritaire puisque constituant plus de 80% du carbone organique total dans les sédiments marins de Maurice.

Enfin, faute de matériel, la relation de complexation des éléments traces avec les substances humiques n'a pu être réalisée. Cette dernière analyse, si elle avait pu être faite, n'aurait peut-être pas résolu le problème de la dégradation de l'écosystème récifal, mais elle aurait permis de "boucler la boucle" de l'analyse géochimique approfondie des sédiments des lagons de Maurice.



## BIBLIOGRAPHIE

AHN P. M. (1993) - *Tropical soils and fertilizer use*. Intermediate Tropical Agriculture Series, Longman Scientific & Technical, 264p.

AIKEN G. R., McKNIGHT D. M., WERSHAW R. L., & MacCARTHY P. (1985) - *Humic substances in soil, sediment and water*. John Wiley and Sons Ed., 692 p.

AMIEL A. J., FRIEDMAN G. M. & MILLER D. S. (1973) - Distribution and nature of incorporation of trace elements in modern aragonitic corals. *Sedimentology*, **20**, 47-64.

ANGELIDIS M. & GRIMANIS A. P. (1989) - Geochemical partitioning of Co, Cr, Fe, Sc and Zn in polluted and non-polluted marine sediments. *Environmental Pollution*, vol. 62, pp. 31-46.

ANTONIUS A. (1981) - (a) The "band" diseases in coral reefs. (b) Coral reef pathology : a review. *Proc. Fourth Internat. Coral Reef Symposium*, Univ. Philippines, Manila, Vol. 2, 7-14 and 3-6.

ATKINS P. W. (1982) - *Physical chemistry*. Oxford University Press, Second Edition. Vol. 2, ch. 19, pp 745-777.

BABLET J. P., GOUT B. & GOUTIERE G. (1995) - *Les atolls de Mururoa et de Fangataufa (Polynésie Française) III. Le milieu vivant et son évolution*. Ed. Masson, 306p.

BARNARD L. A., MacINTYRE f. G. & PIERCE I. W. (1974) - Possible environmental index in tropical reef corals. *Nature, Lond.*, **252**, pp.219-220.

BARNES R. D. (1980) - *Invertebrate zoology*. Fourth edition, Saunders College, Philadelphia, 1089p.

BATHURST R. G. C. (1975) - *Carbonate sediments and their diagenesis*. Developments in sedimentology 12, 2nd enlarged edition, Elsevier Scientific Publishing Company, 658p.

BECK C. J. (1987) - Etude des composés humiques et essais de caractérisation de la matière organique dans les sédiments récents (post-glaciaires) du lac de Neuchâtel. *Thèse de doctorat, Université de Neuchâtel*.

BOSS C. B. & FREDEEN K. J. (1989) - Concepts, Instrumentation and Techniques in Inductively Coupled Plasma Atomic Emission Spectrometry. *The Perkin Elmer Corporation, U.S.A., 1989*.

BRINDLEY G.W. & BROWN G. (1980) - *Crystal structures of clay minerals and their X-ray identification*. Mineralogical Society, London.

BROWN B. E. (1987) - Heavy metals pollution on coral reefs. in *Human impacts on coral reefs : facts and recommendations*. 1987. B. Salvat ed., Antenne Museum E.P.H.E., French Polynesia, chap. 10, pp. 119-134.

BROWN B. E. & HOLLEY M. C. (1982) - Metal levels associated with tin dredging and smelting and their effect upon intertidal reef flats at Ko Phuket, Thailand. *Coral Reefs*, 1, pp. 131-137.

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.

BRULAND K. W. BERTINE K. , KOIDE M. & GOLDBERG E. D. (1974) - History of metal pollution in southern California coastal zone. *Environmental Science and Technology*, vol. 8, n°5, pp. 425-432.

BUDDEMEIER R. W. (1978) - Sclerochronology : a data source for reef systems models. *Atoll. Res. Bull.* , N°220, 25-33.

CARATINI C., BELLET J. & TISSOT C. (1975) - Etude microscopique de la matière organique : palynologie et palynofaciès. *ORGON II. Atlantique - N.-E. Brésil*. CEPM-CNEXO, Editions du Centre National de la Recherche Scientifique, France.

CHESTER R. (1993) - *Marine Geochemistry*. Unwin Hyman Ltd, 698p.

COLLET L. W. (1912) - L'océan Indien d'après Sir John Murray. *La Géographie*.-T. XXIV, pp. 117-123.

COMBAZ A. (1980) - Les kérogènes vus au microscope. In *Kerogen : insoluble organic matter from sedimentary rocks*. Durand B. ed., Ed. Technip, pp. 55-87.

CRONAN D. S. & TOOMS J. S. (1968) - A microscopic and electron probe investigation of manganese nodules from the northwest Indian Ocean. *Deep-Sea Research*, Vol. 15, pp. 215-233.

DEBYSER Y. & GADEL F. (1978) - Géochimie des kérogènes dans les sédiments. *ORGON IV. Golfe d'Aden, mer d'Oman* . CEPM-CNEXO, Editions du Centre National de la Recherche Scientifique, France.

DICKSON T. (1990) - Carbonate mineralogy and chemistry, in TUCKER M. E. and WRIGHT V. P. (1990) - *Carbonate Sedimentology* - Blackwell Scientific Publications.

DINAN J. (1989) - *L'industrie sucrière de l'île Maurice*. Publié par le bureau des

relations publiques de l'industrie sucrière. Quatrième édition, 164 p.

DREVER J. I. & VANCE G. F. (1994) - Role of soil organic acids in mineral weathering processes. in PITTMAN E. D. & LEWAN M. D. (Eds.) *Organic acids in geological processes*. Springer-Verlag, 1994. 6, 138-161.

FAURE G. (1975) - Etude comparative des récifs coralliens de l'archipel des Mascareignes (Océan Indien). *The Mauritius Institute Bulletin*, vol VIII, Part 1, pp. 1-25.

FERRERO J. (1965) - Dosage des principaux minéraux des roches par diffraction de Rayon X. *Rapport C.F.P. (Bordeaux)*, inédit.

FERRERO J. (1966) - Nouvelle méthode empirique pour le dosage des minéraux par diffraction R.X. *Rapport C.F.P. (Bordeaux)*, inédit.

FRANK T. D. & LOHMANN K. C. (1996) - Diagenesis of fibrous magnesian calcite marine cement : implications for the interpretation of  $\delta^{18}\text{O}$  et  $\delta^{13}\text{C}$  values of ancient equivalents. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, vol. 60, n° 13, pp.2427-2436.

GALZIN R. & HARMELIN-VIVIEN M. (1993) - Les peuplements de poissons des récifs et des lagons. in Orstom, Paris (Ed.), "*Atlas de la Polynésie française*", pp. 51-53.

GENDRE F. (1992) - Physico-chimie des eaux insulaires et lagonaires de l'île Maurice, de Mars 1989 à mars 1991. Géochimie, minéralogie et dosage du coprostanol des sédiments de surface. Relations avec l'écosystème récifal. *Thèse présentée à la Faculté des Sciences de Neuchâtel*.

GENDRE F., BECK C., RUCH P. & KÜBLER B. (1994) - Human impacts on coral ecosystems at Mauritius island : Coprostanol in surface sediments. *Eclage geol. Helv.* 87/2 : 357-367.

GERASIMOV I. P. (1964) - *Physico-Geographical Atlas of the world*. Glavnoe Upravlenie Geodez. Kartograph. GSK, Akad. Nauk, SSSR, Moskova, 298p. (in Russian).

GLYNN P. W., SZMANT A. M., CORCORAN E. F. & COFER-SHABICA S. V. (1989) - Condition of coral reef cnidarians from the northern Florida reef tract : pesticides, heavy metals, and histopathological examination. *Marine Pollution Bulletin*, Volume 20, N°11, pp. 568-576.

GOREAU T. J. (1977 a) - Seasonal variations of trace metals and stable isotopes in coral skeleton : physiological and environmental controls. *Proc. 3rd Int. Coral Reef Symp.* . Rosenstiel School of Marine and Atmospheric Science, University of Miami, 1, 425-430.

GOREAU T. J. (1977 b) - Coral skeletal chemistry : physiological and environmental regulation of stable isotopes and trace metals in *Monastrea annularis*. *Proc. R. Soc. Lond. B.* 196, 291-315.

GRAF D. L. (1960) - Geochemistry of carbonate sediments and sedimentary carbonate rocks. *Illinois State Geol. Survey Circ.*, 297, 298, 301, 308, 309.

GRIFFITH S. M. & SCHNITZER M. (1975) - Humic and fulvic acids extracted from tropical volcanic soils. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 39, 861-867.

HANNA R. G. and MUIR G. L. (1989) - Red Sea corals as biomonitors of trace metal pollution. *Environmental Monitoring and Assessment*, 14 : 211-222, 1990.

HARRISS R. C. & ALMY C. C. (1964) - *Bull. mar. Sci. Gulf Caribb.*, 14, 418-423.

HATCHER P. G. (1980) -  $^1\text{H}$  and  $^{13}\text{C}$  NMR of marine humic acids. *Organic geochemistry*, 2, 77-85, Pergamon Press LTD.

HATCHER P. G. & MCGILLIVARY P. A. (1979) - Sewage contamination in the New York Bight. Coprostanol as an indicator. *Environmental Science & Technology*. Vol. 13, n°10, pp. 1225-1229.

HAYES M. H. B. (1985) - Extraction of humic substances from soil. in AIKEN G. R., McKNIGHT D. M., WERSHAW R. L., & MacCARTHY P. (1985) - *Humic substances in soil, sediment and water*. John Wiley and Sons Ed., chap. 13, pp 329-362.

HOTTINGER Lukas, MULLER Natacha, MULLER Jacques & VASSEUR Pierre, et la collaboration des équipes de recherches des Universités de Bâle, Beme, Marseille et Vienne, juillet 1990 . Etude des écosystèmes littoraux de Maurice. Projet 946/89 : accélération du programme. Rapport n°1 : Les écosystèmes littoraux de la zone test n°1 entre le Morne Brabant et Flic en Flac. Leurs modifications entre 1974 et 1989.

HOWARD L. S. & BROWN B. E. (1984) - Heavy metals and reef corals. *Oceanogr. Mar. Biol. Ann. Rev.* , 22, pp.195-210.

HUFFMAN Jr. E. W. D. & STUBER H. A. (1985) - Elemental analysis of humic substances. in AIKEN G. R., McKNIGHT D. M., WERSHAW R. L., & MacCARTHY P. (1985) - *Humic substances in soil, sediment and water*. John Wiley and Sons Ed., chap. 17, pp. 433-455.

IMMENHAUSER-POTTHAST I. (1994) - Geochemie von rezenten, massigen scleractinen Korallen und umweltgeologische Untersuchungen im Riffökosystem der Insel Mauritius (Indischer Ozean). *Inauguraldissertation der Universität Bern*, 141 p.

JOHANNES R. E. (1975) - Pollution and degradation of coral reef communities. *Tropical Marine Pollution*. Ed. by F. E. J. Wood and R. E. Johannes, Elsevier Scientific Publishing, chap. 2, pp. 13-51.

KETTIGER C. (1981) - Microfaciès, pétrographie, minéralogie et évolution des milieux de dépôts de l'Oxfordien de la Vraconnaz et du Malm supérieur des Gorges de Noirvaux. *Travail de Diplôme de l'Institut de Géologie de Neuchâtel*, inédit.

KOLLA V. & KIDD R. B. (1982) - Sedimentation and sedimentary processes in the Indian Ocean. in NAIRN A. E. M. & STEHLI F. G. (1982) - *The ocean basins and margins*. Vol. 6 : *The Indian Ocean*, Plenum Press, New York, chap. 1, pp. 1-50.

KONONOVA M. (1966) - *Soil organic matter*. Pergamon Press. Second edition.

KÜBLER B. (1987) - Cristallinité de l'illite. Méthodes normalisées de préparation. Méthode de mesure et méthode automatique normalisée de mesure. *Cahiers de l'Institut de Géologie de Neuchâtel*.

KÜBLER B. (1992) - Calcites magnésiennes. Identification et dosage par diffraction X de  $MgCO_3$  dans la solution solide. *Cahiers de l'Institut de Géologie de Neuchâtel*, 10p.

KUBLER, B., BETRIX, M.A., & FAUGEL, PH. (1979) - Répartition de quelques éléments dans les sédiments de surface du Lac de Neuchâtel, modèle sédimentologique et géochimique. *Bull. Soc. Neuch. Sci. Nat.*, t. 102, pp. 129-148.

KÜBLER B., GENDRE F. & BROCCO S. (-) *L'importance des calcites magnésiennes*. Inédit.

LACOSTE Y. (1993) - *Dictionnaire de géopolitique*. Editions Flammarion, Paris, p.989.

LEWIS J. B. & PRICE W. S. (1975) - *J. Zool. Lond.*, 176, 527-544.

LIPPMANN, F. (1973) - *Sedimentary Carbonate Minerals*. Ed. Springer-Verlag, New York.

LISITZIN A. P. (1972) - Sedimentation in the World Ocean. *Soc. Econ. Paleontol. Mineral.*, *Spec. Publ.*, 17, pp. 135-148.

LIVINGSTON H. D. & THOMPSON G. (1971) - Trace element concentrations in some modern corals. *Limnol. Oceanogr.*, 16, 786-796.

LUTZ W. (1994) - *Population - Development - Environment. Understanding their interactions in Mauritius*. Springer-Verlag. 52 figures, 400 p.

LYONS W. B., ARMSTRONG P. B. & GAUDETTE H. E. (1983) - Trace metal concentrations and fluxes in Bermuda sediments. *Marine Pollution Bulletin*, Vol. 14, n°2, pp. 65-68.

MARTINET J., BOURGEOIS P. & PASCALINE H. (1982) - Connaissance de la mangrove de Guadeloupe : constitution chimique des eaux d'imprégnation de la mangrove du Grand-Cul-De-Sac marin. *Ann. Inst. océanogr.*, Paris, 58 (2), pp. 159-176.

MILLOT G. (1964) - *Géologie des argiles. Altérations, sédimentologie, géochimie*.

Masson et Cie, éditeurs, 499p.

MONTAGGIONI L. & NATIVEL P. (1988) - La Réunion. Ile Maurice. Géologie et aperçus biologiques. *Guides géologiques régionaux*. Editions Masson, Paris. 192 p.

MOORE D. M. and REYNOLDS R. C., Jr. (1989) - *X-ray diffraction and the identification and analysis of clay minerals*. Oxford University Press, 332p.

MULLER J., ANTONIUS A., BALLESTEROS E., BECK C., CORNEE J-J., DROBNE K., GEISTER J., GENDRE F., GROBE H., HUBERT B., HOTTINGER L., KÜBLER B., LANGER M., MEYER C., MULLER N., PECHEUX J-F., PEERALLY A., PORCHER M., RUCH P., VASSEUR P. & VICENTE N. (1991) - Etude des écosystèmes littoraux de Maurice. Accélération du programme. Synthèse. Projet CEE 946/89. Universités d'Aix-Marseille I et III et de Maurice. Rapport n° 5 (II-5), juin 1991, 260 p., 284 fig., 23 pl., 9 annexes. Archives : Instituts de géologie des Universités de Neuchâtel, Bâle, Berne, URA 1208 CNRS, Université de Provence à Marseille, Université de Maurice à Réduit et Direction du développement CCE à Bruxelles.

MURTAUGH J. J. & BUNCH R. L. (1967) - Sterols as a measure of fecal pollution. *J. Water Pollut. Control Fed.* 39, pp. 404-409.

NATH B. N. & PRASAD M. S. (1991) - Manganese nodule in the Exclusive Economic Zone of Mauritius. *Marine Mining*, vol. 10, pp. 303-335.

OFEFP : Office fédéral de l'environnement, des forêts et du paysage (1991) - *Les métaux lourds et le fluor dans les engrais minéraux*. Cahier de l'environnement n°162, Berne (CH), novembre 1991, 47p.

PELET R. (1978) - Géochimie organique des sédiments marins profonds du golfe d'Aden et de la mer d'Oman : vue d'ensemble. *ORGON IV. Golfe d'Aden, mer d'Oman* CEPM-CNEXO, Editions du Centre National de la Recherche Scientifique, France.

PELET R. (1980) - Evolution géochimique de la matière organique. *in Kerogen, insoluble organic matter from sedimentary rocks*, DURAND B. ed., Ed. Technip, pp. 475-499.

PEPPER J. E. & EVERHART G. M. (1963) - The Indian Ocean. The Geology of its bordering lands and configuration of its floor. *Washington, D.C., U.S. Geol.Surv.* , 33p.

PERROUD B. (1982) - Etude volcanostructurale des îles Maurice et Rodrigues (Océan Indien occidental). Origine du volcanisme. *Thèse, Univ. Sci. et Méd. Grenoble*, 218 p. , 197 fig. , 3 annexes.

PERSOZ F. (1969) - Fidélité de l'analyse quantitative des poudres de roches par diffraction X. *Bull. Centre Rech. Pau-SNPA*, 3, 2, pp. 329-355.

- PETRON C. (1990) - *Récifs. Le monde du corail*. Ed. Denoël, Paris, 1990.
- PEURAVUORI J. (1992) - Isolation, fractionation and characterisation of aquatic humic substances. Does a distinct humic molecule exist? *Academic Dissertation, University of Turku, Finland*. 99p.
- PIERCE R. H. & BROWN R. C. (1984) - Coprostanol distribution from sewage discharge into Sarasota bay. *Florida. Bull. Environm. Toxicol.* Vol.32, pp. 75-79.
- PITTET A. (1990) - Caractérisation et signification géochimique des alcools libres, esterifiés et non esterifiés, dans le sédiment du lac de Neuchâtel. Comparaison avec des traceurs organiques d'origine synthétique et des traceurs inorganiques. *Thèse de doctorat, Université de Neuchâtel*, 129p.
- POUTANEN E. L. (1985) - Humic and fulvic acids in marine sediments. *Finnish Marine Research*. N° 251, 38p.
- RAMJEAWON T. (1994) - Water resources and water management. in LUTZ W. (1994) - *Population - Development - Environment. Understanding their interactions in Mauritius*. Springer-Verlag. Chap. 6, pp. 121-138.
- RIGHI D. & MEUNIER A. (1995) - Origin of clays by rock weathering and soil formation. in VELDE B. (1995) - *Origin and mineralogy of clays. Clays and the environment*. Springer-Verlag, pp.43-157.
- ROLLI M. (1991) - Programme de dosage semi-quantitatif de roches totales par diffraction X. *Cahiers de l'Institut de Géologie de Neuchâtel, Série A.X. N°20*, 49p., 1 disquette.
- RUMLEY G. & ADATTE T. (1983) - Méthode rapide de séparation des fractions 2 et 16µm pour analyse par diffraction X. *Cahiers de l'Institut de Géologie de Neuchâtel, Série A.G. N°5*, 4p.
- SCHLICH R. (1982) - The Indian ocean : aseismic ridges, spreading centers, and oceanic basins. in NAIRN A. E. M. & STEHLI F.G. (1982) - *The ocean basins and margins*. Vol. 6 : *The Indian Ocean*. Plenum Press, New York, chap. 2, p. 53.
- SCHNITZER M. & KHAN S. U. (1972) - *Humic substances in the environment*. Ed. Marcel Dekker, inc, New York, 372p.
- SCHNITZER M. & KHAN S. U. (1978) - *Soil organic matter*, Elsevier, 319 p.
- SELVON S. (1991) - Historical dictionary of Mauritius. *African Historical Dictionaries*, N° 49, second edition, The Scarecrow Press, Inc. , 253p.
- 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.

SHOTYK W., POTTHAST I. & GEISTER J. (1993) - Determination of Cd, Co, Cu, Fe, Mn, Ni, Pb and Zn in the skeletons of the reef-building scleractinian coral *Porites* from Mauritius Island (Indian Ocean) using Chelation Ion Chromatography. *Int. Conf. Heavy Metals in the Environment, Toronto, Sept. 1993*, Vol 2 : 37-40, 1 Abb.; Toronto.

SMITH K. L., MILNES A. R. & EGGLETON R. A. (1987) - Weathering of basalt : formation of iddingsite. *Clays and Clay Minerals* 35, pp. 418-428.

SMITH S. V. (1977) - Kaneohe Bay : a preliminary report on the response of a coral reef / estuary ecosystem to relaxation of sewage stress. *Proceedings, Third International Coral Reef Symposium Rosenstiel School of Marine and Atmospheric Science, University of Miami, Miami, Florida, may 1977*, pp. 577-583.

St JOHN B. E. (1974) - Heavy metals in the skeletal carbonate of scleractinian corals. *Proceedings of the Second Intentional Coral Reef Symposium*, 2, pp. 461-469.

STEELINK C. (1985) - Implication of elemental characteristics of humic substances. in AIKEN G. R., McKNIGHT D. M., WERSHAW R. L., & MacCARTHY P. (1985) - *Humic substances in soil, sediment and water*. John Wiley and Sons Ed., chap. 18, pp. 457-476.

SUSSMAN R. W. & TATTERSALL I. (1986) - Distribution, abundance, and putative ecological strategy of *Macaca fascicularis* on the island of Mauritius, South Western Indian Ocean. *Folia primatol.* 46, 28-43.

THOMPSON Jr, J. H. , SHINN E. A. & BRIGHT T. J. (1980) - in *Marine Environmental Pollution. I. Hydrocarbons*, ed. by R. A. Geyer, Elsevier Oceanography series 27A, Elsevier, Amsterdam, pp.433-453.

UPTON B. G. J. (1982) - Oceanic Islands. in NAIRN A. E. M. & STEHLI F. G. (1982) - *The ocean basins and margins*. Vol. 6 : *The Indian Ocean*,. Plenum Press, New York, chap. 13, pp. 585-648.

VANDENBROUCKE M., PELET R. & DEBYSER Y. (1985) - Geochemistry of humic substances in marine sediments. in AIKEN G. R., McKNIGHT D. M., WERSHAW R. L., & MacCARTHY P. (1985) - *Humic substances in soil, sediment and water*. John Wiley and Sons Ed., chap. 10, pp. 249-273.

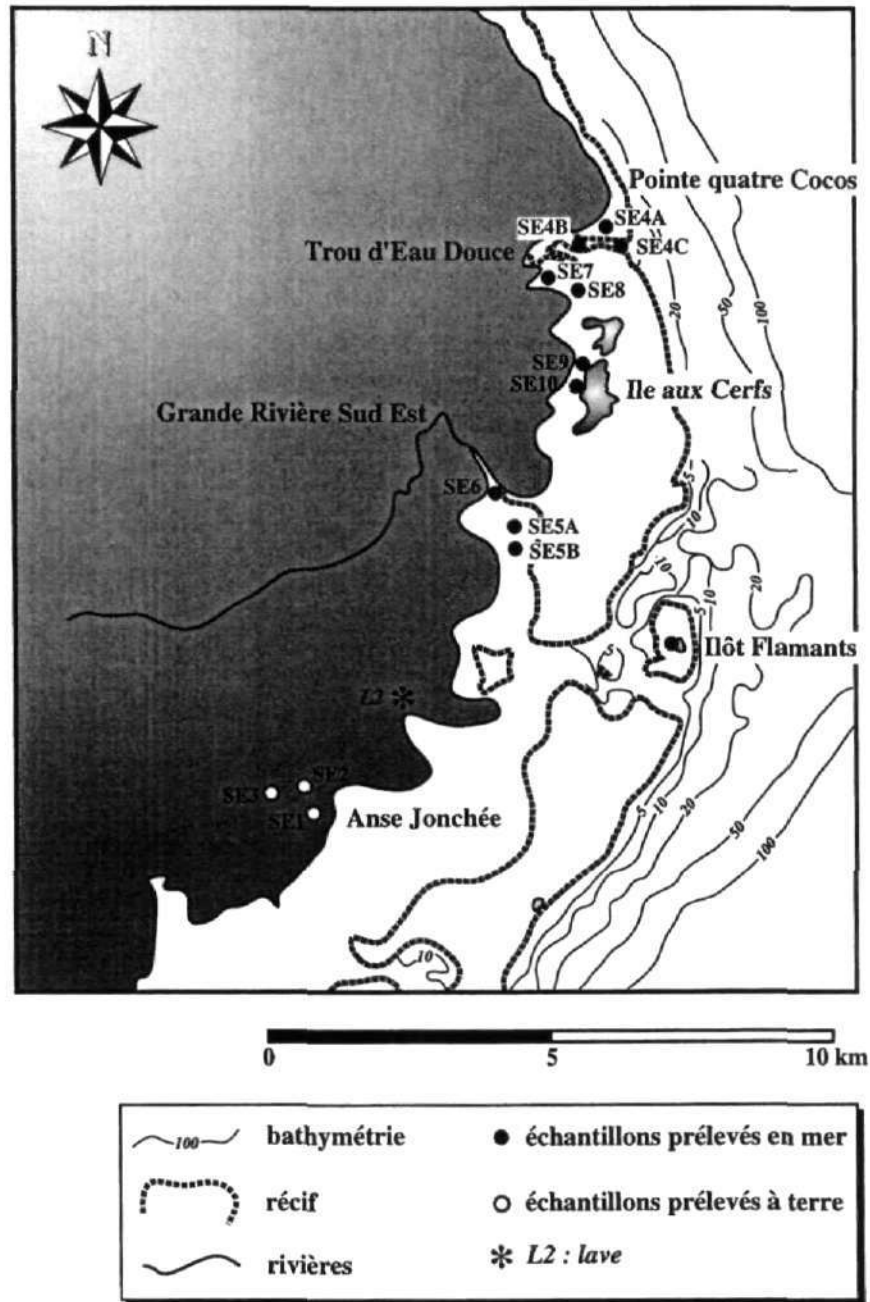
VERON J. E. (1993) - *Corals of Australia and the Indo-Pacific*. Univ. of Hawaii Press (Ed. ), Honolulu, 644p.

WILLAIME P. (1984) - Carte pédologique de l'île Maurice. *O.R.S.T.O.M., France & Mauritius Sugar Industry Research Institute*.

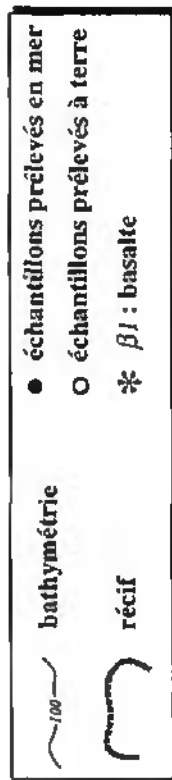
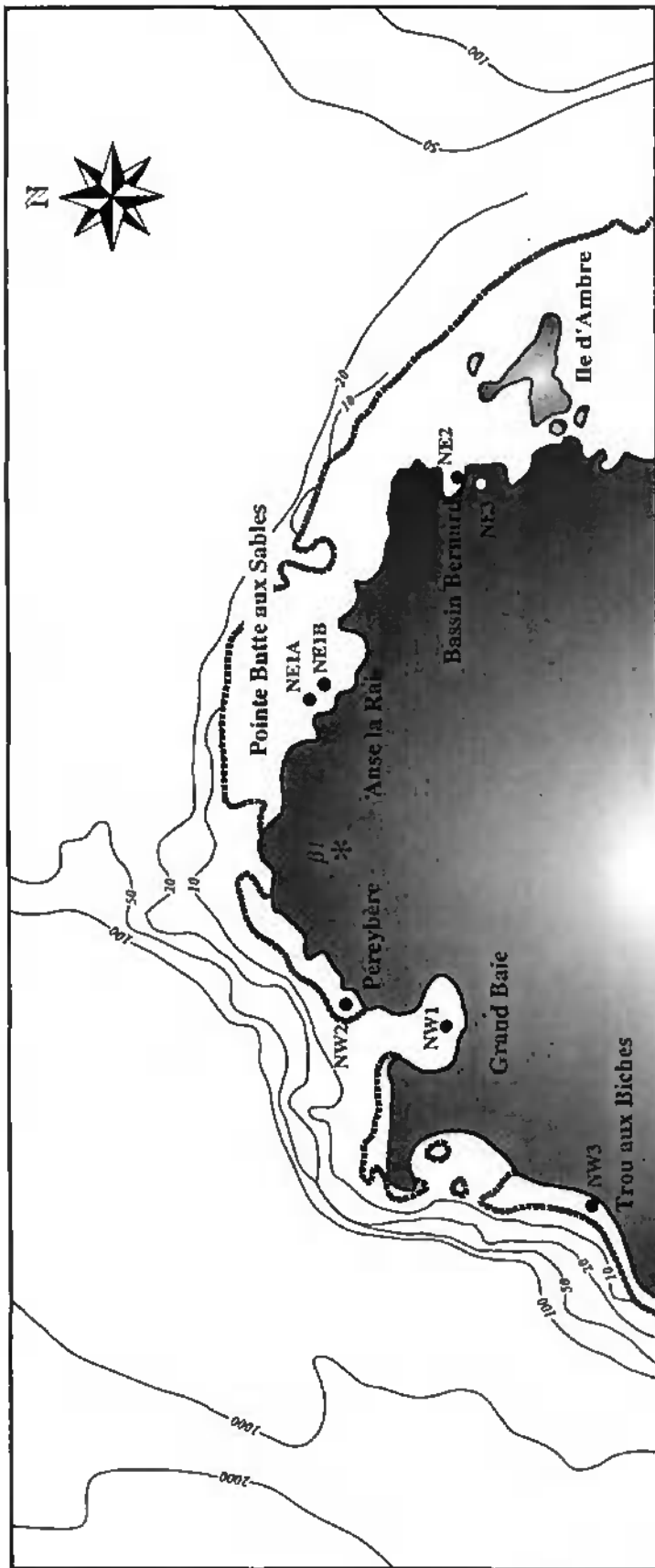
WILSON M. A. (1981) - Application of nuclear magnetic resonance spectroscopy to the study of the structure of soil organic matter. *Journal of Soil Science*, 32, pp. 167-186.



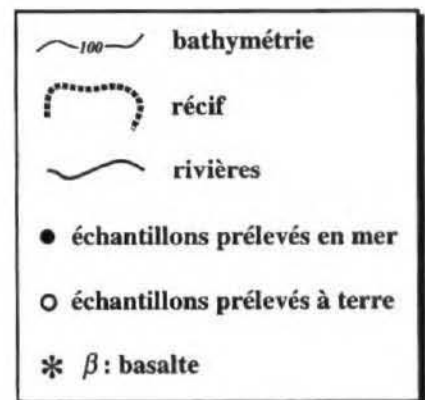
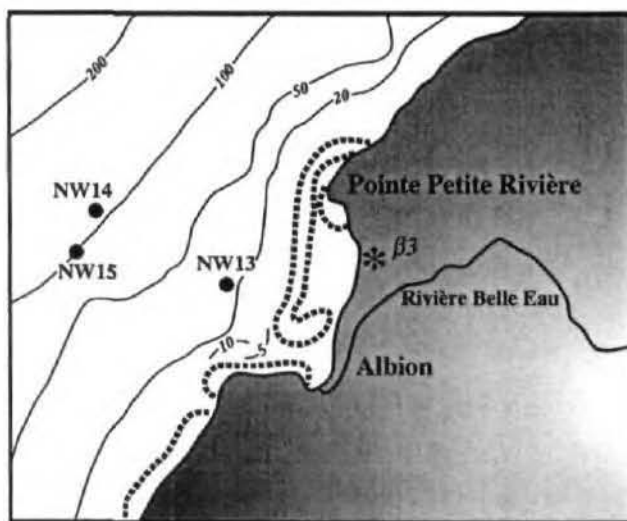
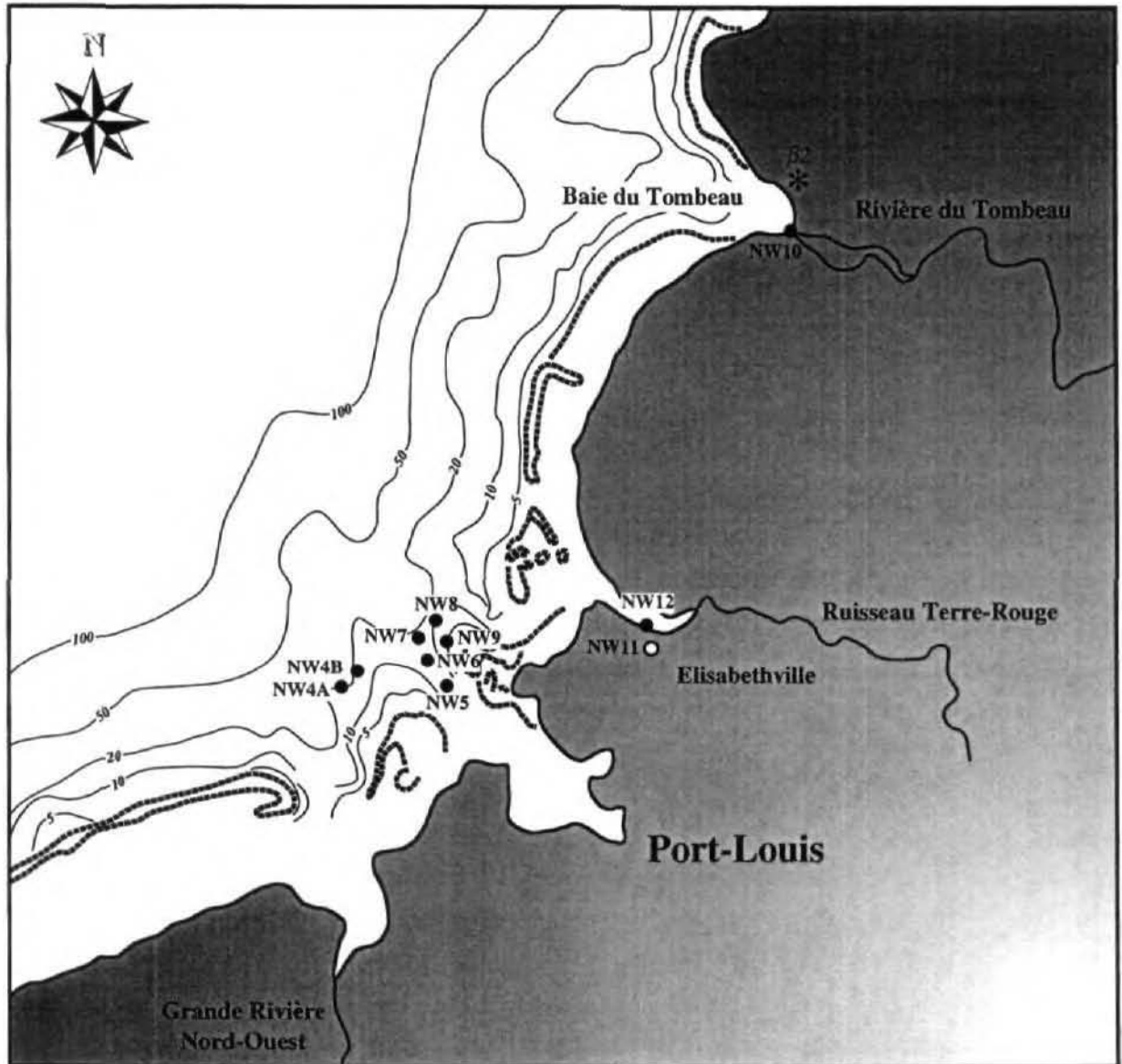
# ANNEXES



Annexe 1 : Carte de localisation des échantillons; zoom sur le sud-est de l'île



Annexc 2 : Carte de localisation des échantillons; zoom sur le nord de l'île



Annexe 3 : Carte de localisation des échantillons; zoom sur le nord-ouest et l'ouest de l'île



	bathymétrie		échantillons prélevés en mer
	récif		échantillons prélevés à terre
	rivières		* LI : lave

Annexe 4 : Carte de localisation des échantillons; zoom sur le sud-ouest de l'île

	1	2	3	4	5	6	7	8
n° éch	Calcite 104	Calcite Mg	Aragonite 111	Arago - Arago Std	Correction Calcite (1-4)	moles% MgCO <sub>3</sub> dans Calcite	Correction CaMg (2-4)	moles% MgCO <sub>3</sub> dans CaMg
SE1								
SE2								
SE3								
SE4A	26.7009	30.0379	26.4497	0.2293	29.4716	2.1394	29.8086	13.13
SE4B	29.4493	29.8003	28.2080	-0.0144	29.4637	1.8818	29.8147	13.33
SE4C	29.3941	29.7458	26.1527	-0.0677	29.4616	1.6196	29.6135	13.29
SE5A	29.5301	29.6642	26.2665	0.0661	29.4640	1.8916	29.6161	13.44
SE6								
F	29.5141	29.6742	26.2312	0.0106	29.5033	3.1731	29.8634	14.92
SE7	29.5657	29.9260	26.3365	0.1161	29.4896	2.0742	29.8119	13.24
SE8	26.5789	29.9393	26.3457	0.1253	26.4546	1.5651	29.6140	13.30
SE9	28.7893	30.1369	26.5455	0.3251	29.4642	1.8961	29.8138	13.30
SE10	29.4136	29.8051	26.1758	-0.0448	29.4588	1.7155	29.6499	14.48
NE1A	29.4429	29.8048	26.1897	-0.0307	29.4736	2.2046	29.6355	14.01
NE1B	29.4457	29.6020	26.1859	-0.0345	29.4602	2.4199	29.6365	14.04
NE2	29.5060	29.9315	26.2916	0.0712	29.4386	1.0046	29.6603	14.61
NE3	29.4656	29.7992	26.2190	-0.0014	29.4670	1.8694	29.6006	12.87
NW1	29.4762	29.6444	26.2412	0.0208	29.4574	1.6764	29.8236	13.62
NW2	29.6965	30.0729	26.4515	0.2311	29.4654	1.9372	29.6416	14.21
NW3	29.5832	29.9444	26.3160	0.0956	29.4876	2.6611	29.8468	14.44
NW4A	29.4065	29.7793	26.1735	-0.0489	29.4534	1.5459	29.8262	13.70
NW4B	29.5041	29.8791	26.2750	0.0546	29.4495	1.4167	29.6245	13.65
NW5	29.3929	29.7843	26.1569	-0.0635	29.4564	1.6437	29.6276	13.75
NW6	29.4518	29.6451	26.2377	0.0173	29.4345	0.9296	29.6276	13.75
NW7	29.4616	29.6367	26.2388	0.0184	29.4454	1.2850	29.8203	13.51
NW8	29.5411	29.9182	26.3060	0.0678	29.4535	1.5492	29.8308	13.85
NW9	29.4706	29.6426	26.2345	0.0141	29.4567	1.6535	29.6264	13.77
NW10	29.5852	29.9524	26.3450	0.1246	29.4606	1.7607	29.6276	13.75
NW11	29.4655	29.6565	26.2267	0.0063	29.4592	1.7351	29.8522	14.55
NW12	29.6623	30.0712	26.4577	0.2373	29.4450	1.2720	29.6339	13.95
NW13S	29.8773	30.0281	28.4122	0.1918	29.4855	2.5927	29.6373	14.06
NW14A	29.8054	29.9466	26.3591	0.1387	29.4667	1.9798	29.8078	13.11
NW14B	29.5630	29.9220	26.3370	0.1166	29.4664	1.9696	29.8054	13.02
NW15	29.6206	29.9826	26.3616	0.1412	29.4794	2.3936	29.6514	14.52
SW1								
SW2	29.4866	29.6426	26.2396	0.0192	29.4874	2.0024	29.8234	13.61
SW3	29.5881	29.9491	26.3486	0.1284	29.4697	2.0774	29.8207	13.52
SW4	29.4578	29.8275	28.2200	-0.0004	29.4582	1.7024	29.8279	13.75
SW5	29.5066	29.6751	26.2693	0.0469	29.4597	1.7514	29.8262	13.70
SW6	29.5112	29.9158	26.2796	0.0592	29.4520	1.5003	29.6566	14.69
SW7	29.3122	29.6337	26.0183	-0.2011	29.5133	3.4992	29.8348	13.86
SW8	29.5539	29.9486	26.3048	0.0944	29.4695	2.0709	29.6644	14.85

moyenne = 13.83  
écart-type = 0.55

**Annexe 5 : Calcul du taux de substitution de MgCO<sub>3</sub> dans les calcites magnésiennes**  
(pour effectuer les calculs, les échantillons NW1 algues et NW13C qui ne sont pas des sédiments ont été retirés)

n° éch	CTOT	CMNC	CORI	CURT	RI	N	H	PO4	SiO2	Ca	Mg	Sr	Mn	Fe	K	Al	Calde	Arago- nite	CaMg	MgCO	Somme Carb.
1 Agaba	6.92	6.89	0.14	0.03	21.41	0.00	0.06	0.04	0.66	26.57	0.926	0.717	0.003	0.074	0.039	0.637	7	45	10	13.90	62
2 Agaba	12.31	12.31	0.00	0.00	0.60	0.00	0.09	0.05	0.13	37.41	2.853	0.366	0.001	0.018	0.015	0.023	0	22	42	13.60	84
3 Agaba	5.04	5.04	0.00	0.00	56.01	0.02	0.08	0.05	0.94	15.39	0.450	0.496	0.003	0.169	0.054	0.887	4	38	5	13.30	47
4 Seychelles	9.94	9.94	0.00	0.00	1.37	0.10	0.36	10.98	9.73	41.19	0.874	0.799	0.002	0.015	0.014	0.011	2	38	11	14.70	51
5 Seychelles	8.22	5.91	4.73	2.31	48.75	0.12	0.58	0.06	0.06	18.63	0.280	0.391	0.000	0.001	0.005	0.008	3	35	5	14.80	43
6 Nalc-Cahd.	5.71	4.34	6.04	1.38	22.58	0.00	2.16	0.00	0.09	11.85	19.864	0.427	0.001	0.002	0.007	0.008	0	58	0	0.00	56
7 Maurice-CBL	12.51	12.51	0.00	0.00	0.87	0.04	0.10	0.08	0.21	37.15	0.525	1.278	0.002	0.028	0.007	0.011	1	98	2	14.60	99
8 Maurice-CBN	12.64	12.21	42.17	0.44	1.04	0.03	0.13	0.05	0.31	37.34	0.099	1.078	0.001	0.024	0.008	0.012	0	88	1	14.70	69
9 Maurice-CED	14.39	12.91	43.38	1.48	3.41	0.27	0.79	0.03	0.10	28.33	4.872	0.378	0.001	0.008	0.335	0.004	0	4	45	17.80	49
10 Agaba	12.66	12.50	30.05	0.36	1.20	0.06	0.13	0.04	0.22	38.60	3.097	0.270	0.005	0.066	0.018	0.084	0	1	73	13.10	74
11 Maurice	12.41	12.41	0.00	0.00	0.38	0.00	0.08	0.02	0.08	40.65	0.875	0.354	0.001	0.012	0.012	0.017	0	2	84	3.90	86
12 Maurice	11.98	11.79	6.13	0.20	2.41	0.00	0.24	0.04	0.75	38.63	3.362	0.345	0.003	0.223	0.015	1.299	0	8	78	12.00	82
13 Agaba	12.34	10.75	12.51	1.59	12.74	0.04	0.16	0.01	0.05	34.52	3.024	0.370	0.002	0.008	0.027	0.016	0	14	62	13.80	78
14 Maurice Cornill	12.28	11.89	16.88	0.39	2.08	0.08	0.25	0.02	0.16	38.58	0.300	1.108	0.003	0.034	0.034	0.002	0	82	4	13.40	86
15 Maurice Coral2	12.03	12.03	0.00	0.00	0.47	0.01	0.20	0.01	0.10	39.19	0.198	1.077	0.001	0.018	0.018	0.029	0	100	1	18.00	101
16 Maurice Coral3	12.17	12.17	0.00	0.00	0.64	0.00	0.20	0.02	0.14	39.53	0.130	1.158	0.001	0.042	0.013	0.052	0	88	5	14.70	91
17 Elbe	12.20	11.97	16.86	0.24	1.41	0.08	0.26	0.02	0.15	38.46	2.828	0.405	0.012	0.032	0.023	0.020	0	3	85	9.20	86
18 Elbe	13.35	11.66	46.20	1.48	3.17	0.29	0.45	0.06	0.15	37.66	0.588	0.768	0.004	0.014	0.027	0.011	0	51	24	8.80	75
19 Maurice Zahidell	12.18	12.18	0.00	0.00	0.32	0.03	0.35	0.01	0.05	39.29	3.845	0.319	0.001	0.005	0.017	0.007	0	1	144	15.50	145
20 Maurice Echidell	12.24	12.24	0.00	0.00	0.37	0.00	0.31	0.00	0.05	40.01	2.776	0.337	0.001	0.006	0.018	0.006	0	1	131	10.40	132

Annexe 6 : Spéciation des carbonates et minéralogie, collection privée de L. Hottinger (Bâle; résultats en %)

n° 4ch	prof (m)	Saenectites 001	Micas 001	Chlorite 002	Kaolinite 001	Halloysite 001	Micas 002	Cillite 002	Chl 003	Qz 001	Goethite 110	Halloysite 000	Kaol 002	CM 004	Qz 101	Pagros 002	Pyrite 311
SE1	0	0	0	0	53	50	0	418	0	134	39	31	48	0	241	32	0
SE2	0	0	0	0	65	58	0	142	0	58	0	23	58	0	41	25	0
SE3	0	0	0	64	74	0	0	110	0	58	0	50	58	0	85	35	0
SE4A	12	0	0	28	28	0	0	261	0	0	0	0	22	0	0	54	102
SE4B	12	0	0	41	36	0	0	336	0	0	19	27	33	0	33	141	314
SE4C	12	0	0	34	34	0	0	588	0	0	0	0	29	0	0	195	139
SE5A	20	0	0	60	61	0	0	298	0	26	0	38	36	0	100	228	147
SE5B	20	0	0	34	45	0	0	828	0	23	25	0	30	0	28	55	67
SE6	5	0	0	79	88	0	0	887	109	0	0	0	78	0	83	85	35
F	0.3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
SE7	5	0	28	0	48	38	0	532	0	29	0	38	39	0	38	102	262
SE9	14.6	0	0	27	30	0	0	476	0	0	0	0	28	0	0	143	104
SE9	8	0	0	30	30	0	0	221	0	0	0	0	24	0	0	41	83
SE10	0.3	0	28	0	20	0	17	143	0	0	0	0	0	0	0	140	265
NE1A	2	0	0	0	31	26	0	117	0	0	0	18	28	0	0	84	70
NE1B	2	0	0	0	24	0	0	75	0	0	0	0	0	0	0	72	38
NE2	0.4	28	0	0	35	28	0	88	0	0	0	28	28	0	0	92	48
NE3	0	55	0	0	28	37	0	84	0	0	28	53	38	0	0	1974	0
NW1	3.5	0	0	0	21	0	0	0	0	0	0	0	21	0	0	75	0
NW2	4	0	153	0	48	21	0	24	0	48	0	22	24	0	154	98	0
NW3	0.4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	288	0
NW4A	20	0	0	0	0	0	0	38	0	0	0	0	0	0	0	108	0
NW4B	20	0	0	0	0	0	0	28	0	0	0	0	0	0	0	58	0
NW5	25	0	0	0	17	0	0	62	0	0	0	0	0	0	0	223	0
NW6	10	39	0	0	44	0	0	28	0	0	0	29	25	0	0	578	0
NW7	18	0	0	0	23	31	0	0	0	0	0	37	31	0	0	832	0
NW8	15	0	0	0	20	20	0	0	0	0	0	40	15	0	0	173	0
NW8	14	0	0	0	25	33	0	0	0	0	0	0	0	0	0	122	0
NW10	1	0	0	0	28	22	0	78	0	0	0	27	29	0	0	158	31
NW11	0.3	24	0	24	23	28	0	32	0	0	28	38	28	31	31	421	122
NW12	0	41	0	0	28	33	0	31	28	0	0	37	27	0	0	181	74
NW13S	20	0	0	0	25	0	0	82	0	0	0	0	0	0	0	858	0
NW14A	105	35	0	0	20	20	0	204	0	0	24	0	24	0	0	295	0
NW14B	105	0	0	0	25	0	0	188	0	0	0	0	0	0	0	642	30
NW15	105	0	0	0	0	0	0	84	0	0	0	0	0	0	0	195	0
SW1	0	0	0	0	31	67	0	432	0	0	38	74	35	0	0	36	0
SW2	0.2	45	0	0	28	25	0	33	0	0	81	0	31	0	0	818	0
SW3	5	37	0	0	30	30	0	78	0	0	0	33	21	0	0	362	140
SW4	20	32	0	0	20	20	0	71	0	0	0	26	10	0	0	218	102
SW5	30	59	0	0	25	33	0	78	0	0	0	28	21	0	0	378	88
SW6	22	0	0	0	0	0	0	40	0	0	0	25	0	0	0	248	83
SW7	10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
SW8	18	0	0	0	0	0	0	102	0	0	0	0	0	0	0	59	0

Annexe 7 : Intensité des pics des minéraux de la fraction argileuse 2-16µm, en CPS (coops par secondes)



n° éch	prof (m)	Smectites 001	Chlorite 001	Micas 001	Chl 002	Kaolinite 001	Halloysite 001	Micas 002	Gibbsite 002	Chl 003	Geschite 110	Halloysite 001	Ksoil 002	Chl 004	Pragite 002	Pyrite 311
SE1	0	0	0	22	0	36	24	26	67	0	0	23	30	0	0	0
SE2	0	0	28	0	0	25	27	0	29	0	0	27	38	0	0	0
SE3	0	0	0	0	0	32	40	0	29	0	0	22	38	0	0	0
SE4A	12	0	29	0	0	45	0	0	149	0	0	0	56	0	0	40
SE4B	12	0	37	0	0	50	33	0	307	0	0	15	35	0	20	83
SE4C	12	0	0	0	0	45	42	0	279	0	0	45	37	0	0	71
SE5A	20	0	0	0	0	44	0	0	241	0	0	0	55	0	22	22
SE5B	20	0	38	0	0	47	0	0	292	0	26	0	34	0	30	26
F	0.3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
SE7	5	0	31	21	49	49	44	19	256	18	24	32	54	54	27	84
SE8	14.8	29	0	19	39	38	31	15	192	0	29	24	32	32	24	59
SE9	8	0	0	0	0	23	0	0	78	0	29	0	23	0	0	27
SE10	0.3	0	0	0	0	28	0	0	55	0	31	0	28	0	0	125
NE1A	2	0	0	0	0	28	22	0	25	0	27	23	23	0	24	0
NE1B	2	0	0	0	0	27	0	0	38	0	20	0	25	0	0	0
NE2	0.4	24	0	0	0	41	38	0	44	0	24	25	35	0	0	41
NE3	0	33	25	0	0	21	0	0	23	0	0	0	20	0	22	0
NW1	3.5	0	0	0	0	25	0	0	18	0	25	0	20	0	0	0
NW3	0.4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	83	0	0	0	0	0
NW4A	20	40	32	0	28	27	0	0	24	0	0	0	22	0	0	0
NW4B	20	51	47	0	34	30	34	0	43	0	0	0	23	0	0	0
NW5	25	45	47	0	40	40	44	0	45	18	20	24	29	35	0	20
NW6	10	89	89	30	0	60	0	0	30	0	0	0	44	0	0	48
NW7	18	74	0	0	0	49	38	0	28	0	0	28	38	0	65	154
NW8	15	52	0	0	0	45	48	0	35	0	48	27	30	0	0	0
NW9	14	34	33	0	0	30	33	0	24	22	0	0	25	0	0	0
NW10	1	0	0	0	0	25	0	0	33	0	30	0	18	0	0	0
NW11	0.3	22	0	0	30	21	31	0	33	23	0	32	28	33	0	87
NW12	0	50	0	0	0	50	40	0	37	30	0	28	43	0	0	31
NW13S	20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
NW14A	105	53	0	0	24	28	25	0	114	20	20	21	20	0	0	0
NW14B	105	19	0	0	0	21	74	0	74	0	38	0	21	0	60	0
NW15	105	0	0	0	0	20	0	0	65	0	0	0	19	0	0	0
SW1	0	0	0	0	0	81	0	0	430	0	18	0	41	0	0	0
SW2	0.2	54	0	0	0	43	0	0	0	0	77	0	0	0	71	0
SW3	5	45	0	0	0	23	0	0	70	0	27	0	30	0	44	0
SW4	20	41	0	0	0	21	0	0	41	0	0	0	20	0	20	0
SW5	30	52	0	0	0	28	0	0	82	0	20	0	32	0	41	0
SW6	22	74	0	0	0	44	0	0	28	0	54	0	39	0	66	0
SW7	10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
SW8	18	19	0	0	0	19	0	0	75	0	0	0	21	0	0	0

Annexe 8 : Intensité des pics de la fraction argileuse <2µm, en CPS (coups par secondes)





N° échant	Crôm %	CHIN %	COBALT %	RI %	Mn %	Si %	Pb %	Sr %	Mg %	Fe %	K %	Al %	Co %	Ni %	Cu %	Zn %	Pb %	Cr %	Ca %
SE1	3,56	2,80	1,23	0,75	50,25	0,22	1,12	0,91	1,74	11,93	623,39	0,06	60,05	62,90	62,90	102,18	13,06	282,31	0,50
SE2A	11,13	11,07	2,84	0,08	2,42	0,24	0,24	0,50	38,21	0,40	343,67	0,02	1,00	0,28	28,64	0,00	0,73	11,21	0,12
SE3A	9,53	6,96	2,86	0,63	18,17	0,08	0,90	0,31	24,53	1,85	331,23	0,08	20,18	60,12	15,20	48,52	35,88	75,99	0,20
SE8	6,88	4,58	2,51	1,01	49,38	0,27	1,75	0,08	4,87	10,20	252,40	0,06	48,65	37,21	70,34	122,13	12,71	180,71	0,87
SE7	11,35	11,35	0,00	0,00	3,34	0,05	0,19	0,50	38,80	1,46	404,15	0,04	1,00	3,74	1,00	2,49	0,00	12,57	0,12
SE10	12,48	11,82	20,41	0,04	3,15	0,06	0,20	0,13	37,87	0,33	444,36	0,01	1,78	12,22	0,50	2,00	2,00	11,73	0,00
NE3	6,72	5,78	3,84	1,44	37,61	0,22	0,88	0,64	11,20	8,05	2140,56	0,05	38,33	174,48	206,83	288,33	85,13	82,14	0,03
NW1	11,46	11,46	0,00	0,00	0,93	0,21	0,81	0,01	37,59	0,91	308,47	0,00	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	4,50	0,12
NW2	9,97	9,97	0,00	0,00	0,18	0,01	0,88	0,01	37,54	0,68	844,73	0,06	10,22	30,68	20,68	44,58	21,63	44,88	0,25
NW4B	9,68	9,48	3,48	0,40	11,85	0,07	0,28	0,44	30,98	1,84	1081,71	0,08	21,37	49,70	42,05	111,63	176,43	82,36	0,22
NW6	6,40	7,12	4,78	1,28	37,01	0,08	0,56	0,33	29,44	4,09	1883,70	0,06	32,64	69,27	214,04	182,00	180,28	86,71	0,37
NW7	7,21	5,60	4,00	0,83	36,72	0,10	0,78	0,18	15,08	6,28	2821,35	0,06	9,74	18,89	19,89	118,02	26,42	88,51	0,57
NW11A	11,01	10,85	3,10	0,08	2,08	0,02	0,19	0,01	37,94	0,90	386,29	0,06	2,86	11,20	1,00	4,58	0,00	14,68	0,22
SW1	2,97	1,98	1,10	0,53	52,74	0,17	1,74	0,01	1,39	13,69	733,17	0,06	192,60	231,17	221,45	172,07	78,82	423,69	0,82
SW2	6,97	8,09	0,25	0,08	32,32	0,03	0,22	0,03	24,67	3,39	978,16	0,05	24,65	60,77	16,46	44,87	0,00	50,69	0,10
SW3	8,45	8,38	0,44	0,07	16,62	0,02	0,34	0,01	29,88	3,04	846,31	0,05	18,43	58,53	8,47	32,37	0,00	79,19	0,10
SW5	11,49	11,49	0,00	0,00	0,88	0,01	0,17	0,01	3,89	0,24	274,78	0,00	0,60	1,50	0,00	0,00	0,00	10,74	0,11
SW7	11,53	11,53	0,00	0,00	0,28	0,02	0,19	0,01	40,47	1,51	323,71	0,00	0,50	0,00	0,00	0,00	0,00	3,24	0,03
SW8	11,48	11,48	0,00	0,00	0,63	0,02	0,20	0,01	39,28	1,52	348,88	0,01	0,28	1,74	0,69	0,00	0,00	5,48	0,03

Annexe 12 : Dosage des majeurs et des traces après attaque à l'aqua regia

N° échant	Crôm %	CHIN %	COBALT %	RI %	Mn %	Si %	Pb %	Sr %	Mg %	Fe %	K %	Al %	Co %	Ni %	Cu %	Zn %	Pb %	Cr %	Ca %
SE1	3,56	2,74	1,81	0,77	59,49	0,22	1,32	0,91	1,28	12,81	2,97	0,06	67,00	101,39	71,60	121,70	19,20	529,80	0,35
SE2A	11,13	11,01	3,43	0,12	3,43	0,24	0,24	0,50	37,90	0,31	349	0,02	1,00	0,28	1,40	0,00	0,00	15,80	0,02
SE3A	9,53	7,43	6,80	2,10	23,63	0,28	0,90	0,23	23,60	3,84	473,1	0,08	18,40	63,90	9,20	48,60	6,60	81,40	0,00
SE8	5,59	2,44	7,46	3,16	42,27	0,27	1,78	0,23	4,89	9,77	2,44	0,16	47,32	81,80	85,80	105,90	15,40	181,10	0,06
SE7	11,35	11,24	3,97	0,11	2,71	0,05	0,18	0,17	37,34	1,82	480,1	0,08	0,90	3,90	1,70	0,00	2,10	12,20	0,02
SE10	12,48	11,42	31,83	1,04	3,09	0,06	0,23	0,01	35,27	0,29	423	0,18	1,40	12,20	1,00	0,00	1,20	11,40	0,00
NE3	6,72	4,65	3,64	2,07	36,42	0,23	0,98	0,37	1,48	8,32	2046	0,08	38,00	158,10	195,60	355,80	78,00	98,40	0,00
NW1	11,49	11,39	4,43	0,07	1,80	0,06	0,21	0,18	38,68	0,44	631	0,01	0,90	4,80	1,90	2,80	3,70	8,40	0,00
NW2	8,87	8,97	0,00	0,00	0,18	0,01	0,88	0,12	31,94	0,62	5174	0,06	0,30	296,70	1,90	0,00	0,46	4,60	0,00
NW4B	9,86	9,16	4,09	0,72	11,84	0,08	0,28	0,44	38,22	2,04	1019	0,04	10,60	30,10	32,00	45,90	23,10	47,90	0,00
NW5	8,40	8,70	8,11	1,70	27,88	0,07	0,52	0,30	28,90	3,57	1761	0,02	22,70	45,30	113,30	183,40	183,40	73,30	0,05
NW7	7,81	4,58	6,58	2,62	38,78	0,10	0,78	0,31	29,53	4,85	2519	0,08	38,10	73,00	192,70	180,10	140,90	103,70	0,00
NW11	11,09	10,21	6,00	0,66	17,57	0,25	0,55	0,28	34,81	1,87	3839	0,08	9,80	43,50	16,40	63,80	82,80	30,80	0,00
NW11A	11,08	11,05	1,20	0,03	2,82	0,02	0,30	0,17	34,81	0,48	379	1,68	1,80	6,10	2,40	3,00	1,80	13,90	0,00
SW1	2,67	1,48	2,26	1,11	49,29	0,17	1,74	0,35	1,18	10,83	1,65	0,04	9,28	100,60	283,80	328,60	173,80	72,60	0,06
SW2	6,87	6,88	0,38	0,11	30,46	0,03	0,22	0,45	37,68	3,88	944	1,76	27,30	78,40	21,90	48,90	6,10	74,80	0,05
SW3	3,45	8,29	0,98	0,16	16,85	0,03	0,34	0,21	30,89	2,66	3,08	1,43	19,60	55,00	12,50	38,90	0,00	85,80	0,00
SW6	11,49	11,46	3,04	0,04	1,27	0,01	0,17	0,18	39,07	1,25	4413	0,08	0,20	0,70	0,70	0,00	0,40	11,80	0,00
SW7	11,53	11,53	0,00	0,00	0,31	0,02	0,19	0,14	39,18	1,68	473,1	0,01	0,50	0,00	0,00	0,00	0,50	6,30	0,00
SW8	11,48	11,48	0,00	0,00	1,08	0,02	0,20	0,18	38,71	1,58	384	0,11	0,60	2,40	1,10	0,60	0,30	8,80	0,00

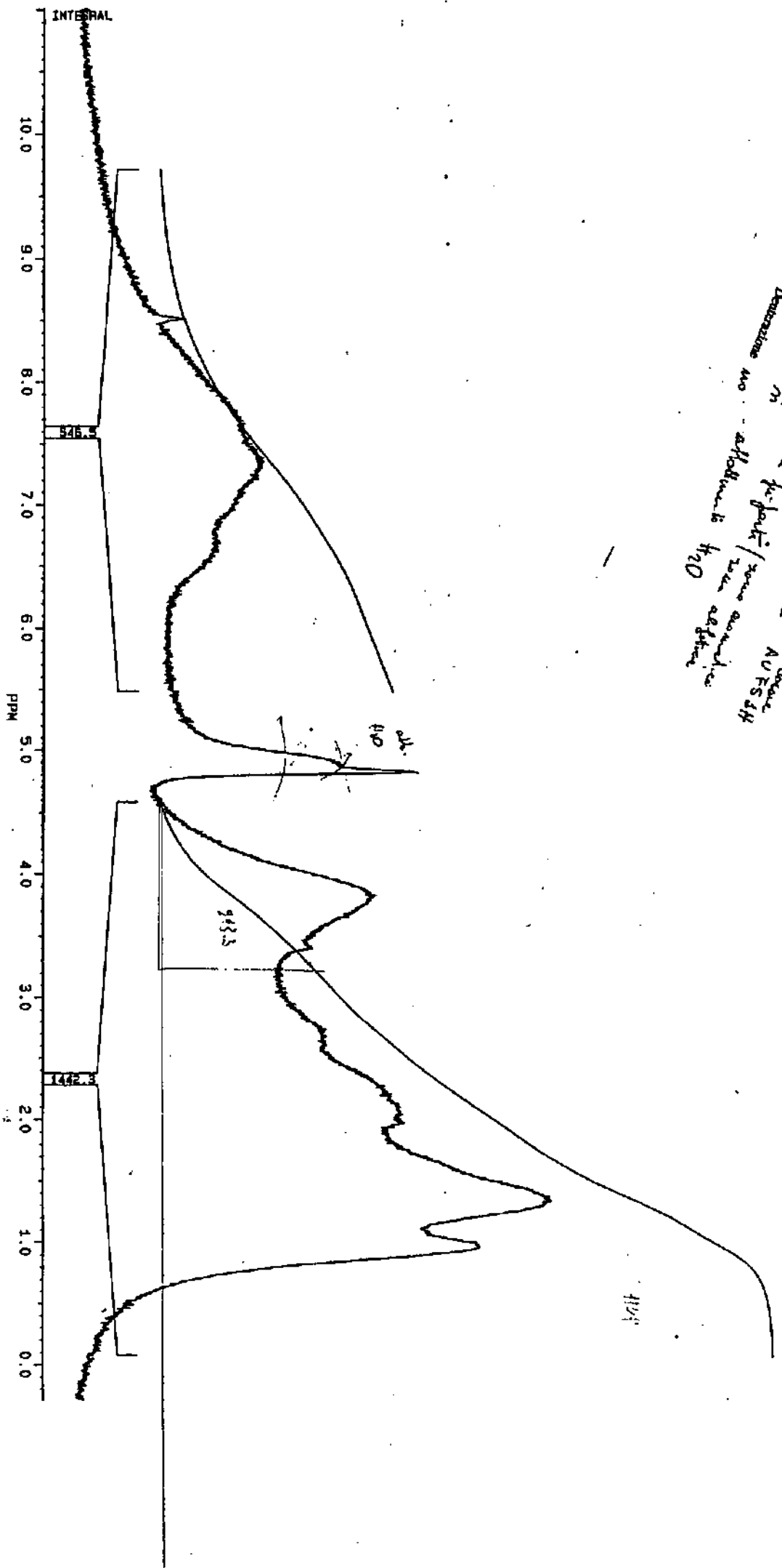
Annexe 13 : Dosage des majeurs et des traces après attaque à l'HCl 6N

## **ANNEXE 14**

### **Spectres RMN $^1\text{H}$**

Formula ? SE 1  
 mg ~ 10 mg  
 Date 26/10/95  
 Firma R

Resistenza di ANALISI MAR  
 Prof. Leo Ricci  
 Solvente  
 Integratore NMR 05M  
 Diluizione m  
 Densitometria no  
 Condizioni di acquisizione  
 7.8  
 AUFS 319  
 affollamento H<sub>2</sub>O



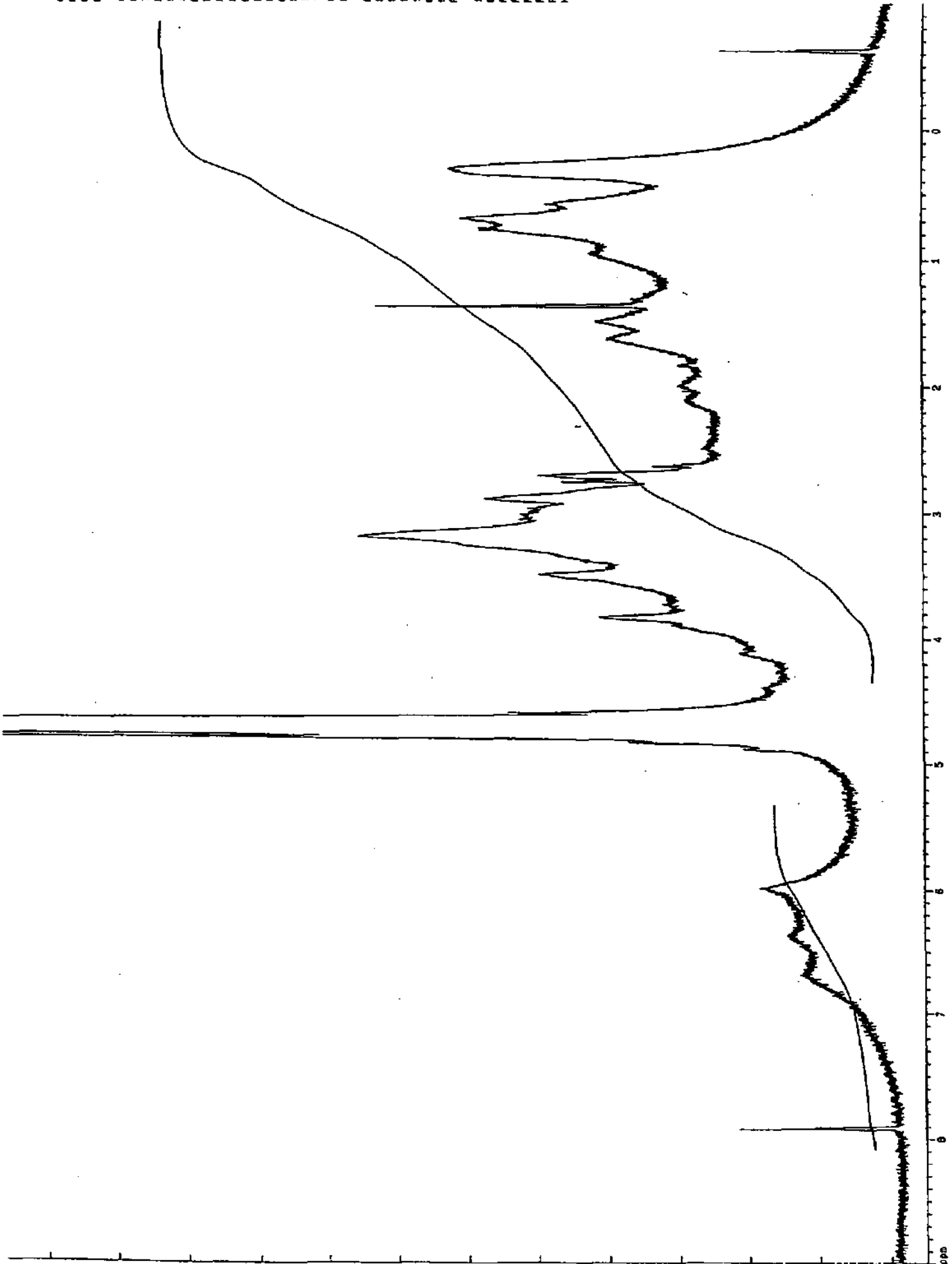
[020]  
 2601

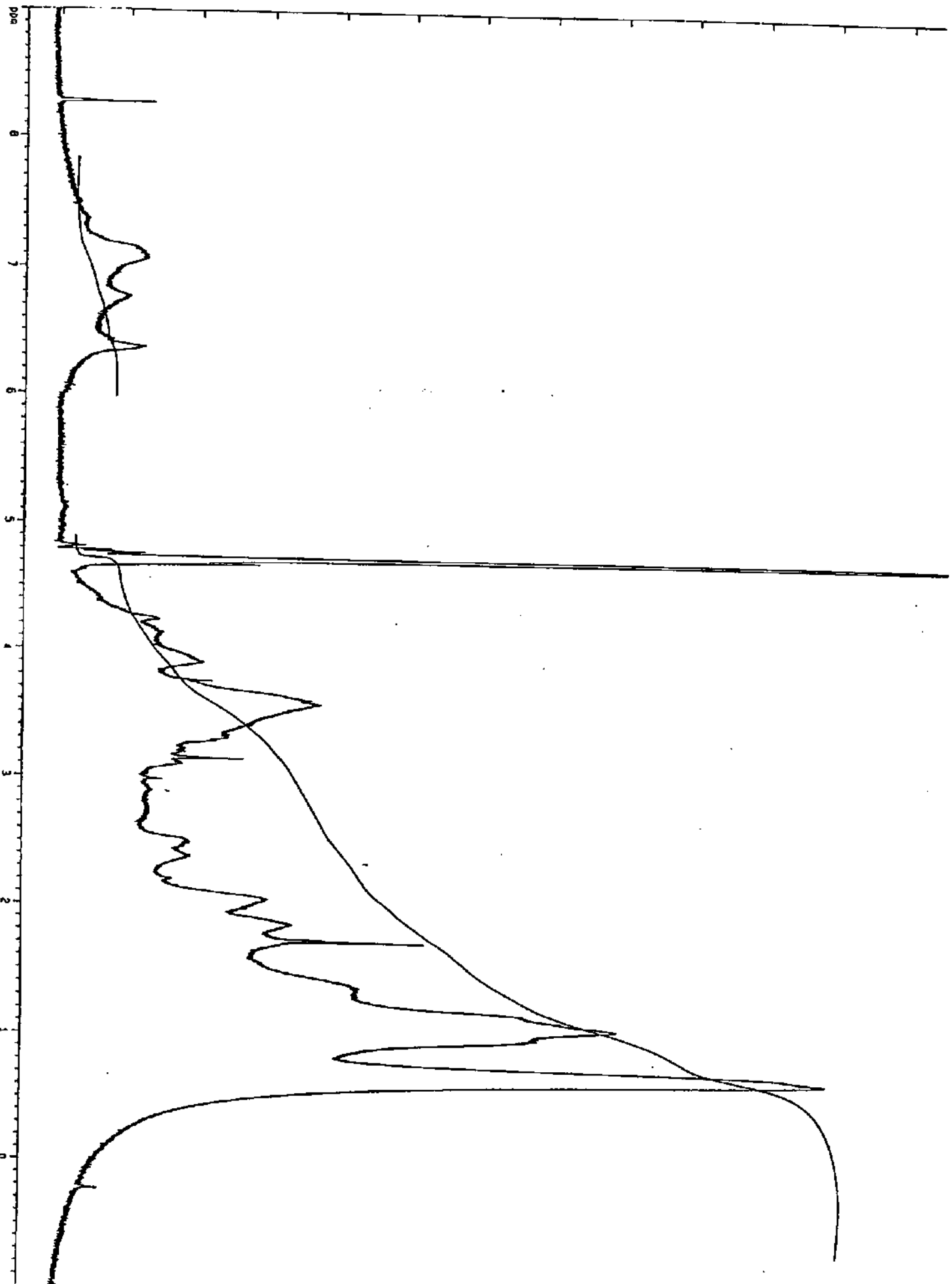
Current Data Parameters  
 MAKE SE10  
 EXPNO 1  
 PROCNO 1

F2 - Acquisition Parameters  
 Date 951121  
 Time 14.21  
 PULPROG zgpg  
 SOLVENT CDCl3  
 NS 3.0666059 s1  
 DS 0.125312 Hz  
 FIDRES 39.0 Hz  
 AQ 1024  
 NUCLEUS 1H  
 H1 2 21  
 D1 0.5000000 s1  
 P1 14.3 us  
 OE 23.0 us  
 SF01 400.1375627 Mc  
 SWH 6474.56 Hz  
 TD 65536  
 NS 600  
 DS 0

F2 - Processing parameters  
 SI 65536  
 SF 400.1354690 MHz  
 WH EN  
 SSB 0  
 LB 0.20 Hz  
 SB 0  
 PC 1.00

1D NMR plot parameters  
 CX 36.00 ca  
 FIP 9.005 ppm  
 F1 3691.22 Hz  
 F2P -1.000 ppm  
 F2 -400.14 Hz  
 PPMCH 0.27778 ppm  
 HZCH 133.14874 Hz





Current Data Parameters  
 NAME F23  
 EXPNO 2  
 PROCNO 1

F2 - Acquisition Parameters  
 Date 03/11/7  
 Time 10.37  
 PULPROG zgpg  
 SOLVENT WATER  
 AQ 0.204850  
 FIDRES 0.246310  
 DR 0.2  
 RG 236  
 NUCLEUS 1H

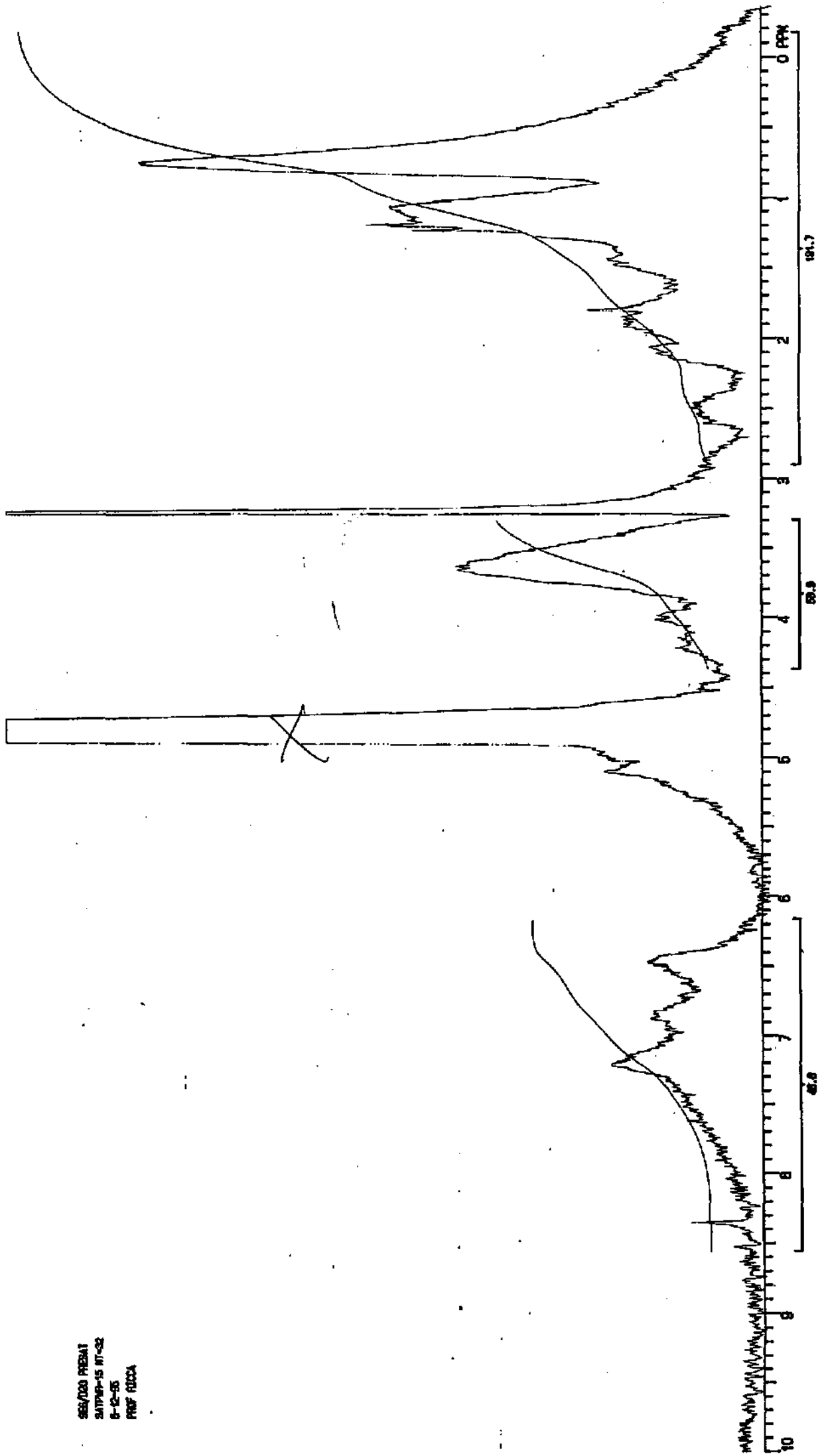
CH1 0.600250  
 CH2 60.0  
 P10 2000000.0  
 D13 0.0000200  
 P0 4.8  
 DE 77.3  
 SF01 400.1472805  
 SFO1 8064.52  
 TD 32768  
 NS 400  
 DS 2

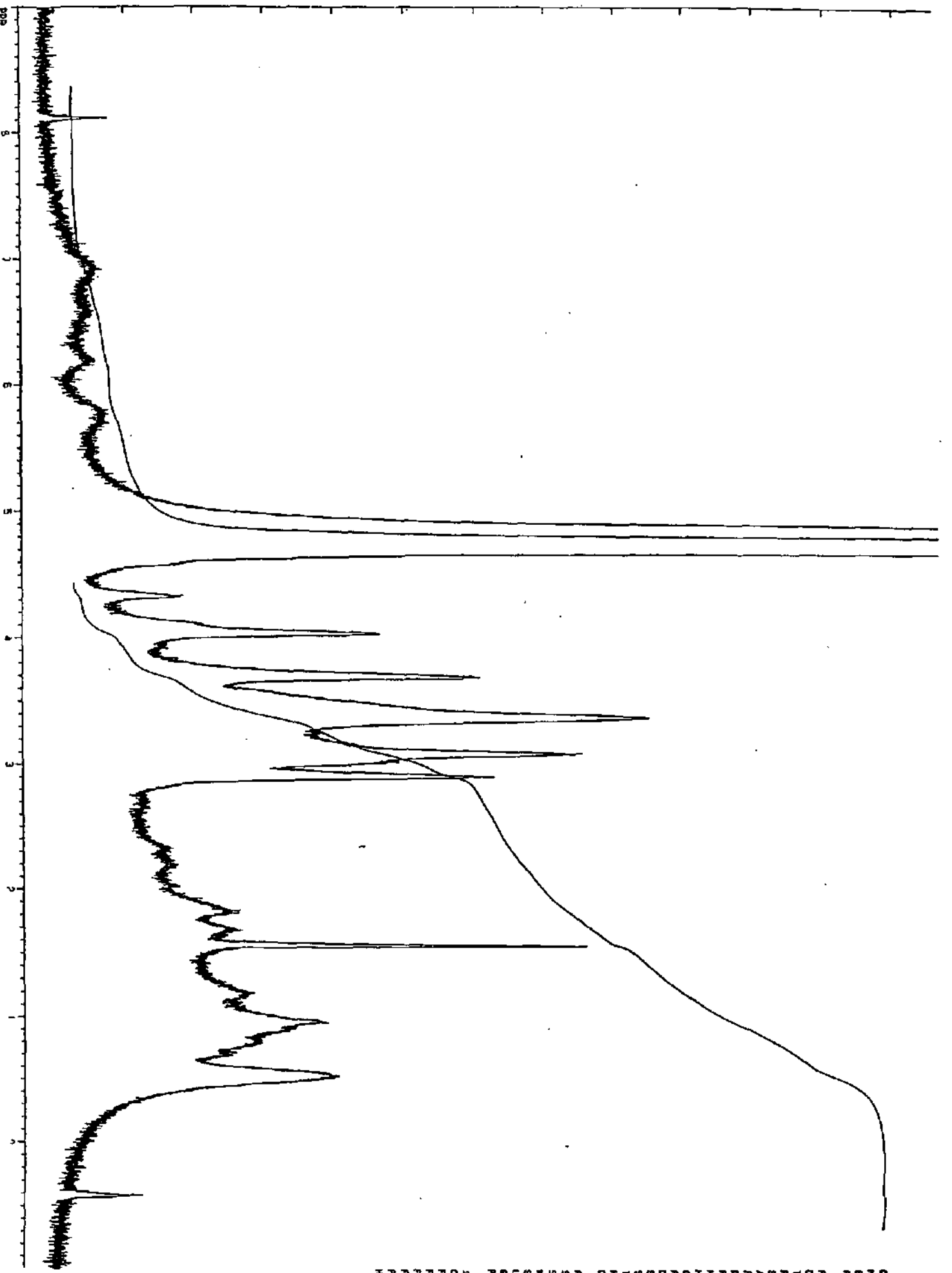
F2 - Processing parameters  
 SI 32768  
 SF 400.1454005  
 WDW EM  
 SSB 0  
 LB 0.10  
 GB 0  
 PC 1.00

ID Non Dist Parameters  
 CX 26.00  
 F1P 9.000  
 F1 3501.22  
 F2P -1.000  
 F2 -400.14  
 PRNCH 0.27778  
 HZCH 111.14073



866/000 PREBUT  
SATMAY-15 INT-02  
8-12-95  
PROF RUCCA





Experiment Parameters  
 NAME: MMS  
 EXPNO: 1  
 PROCNO: 1

F2 - Acquisition Parameters  
 Date: 8/11/77  
 Time: 13.23  
 PULPROG: zgpg  
 SOLVENT: CDCl3  
 AQ: 1.00000000  
 FIDRES: 0.229674 Hz  
 DN: 59.0 us  
 RB: 1024  
 MDELTA: 1H  
 NL: 2 dB  
 P1: 0.50000000  
 DE: 14.3 us  
 SF: 400.1378257 MHz  
 SWH: 8474.58 Hz  
 TD: 32768  
 GB: 0  
 DS: 0

F2 - Processing parameters  
 SI: 32768  
 SF: 400.1354080 MHz  
 KHZ: EN  
 SFO: 0  
 LB: 0.10 Hz  
 GB: 0  
 PC: 1.00

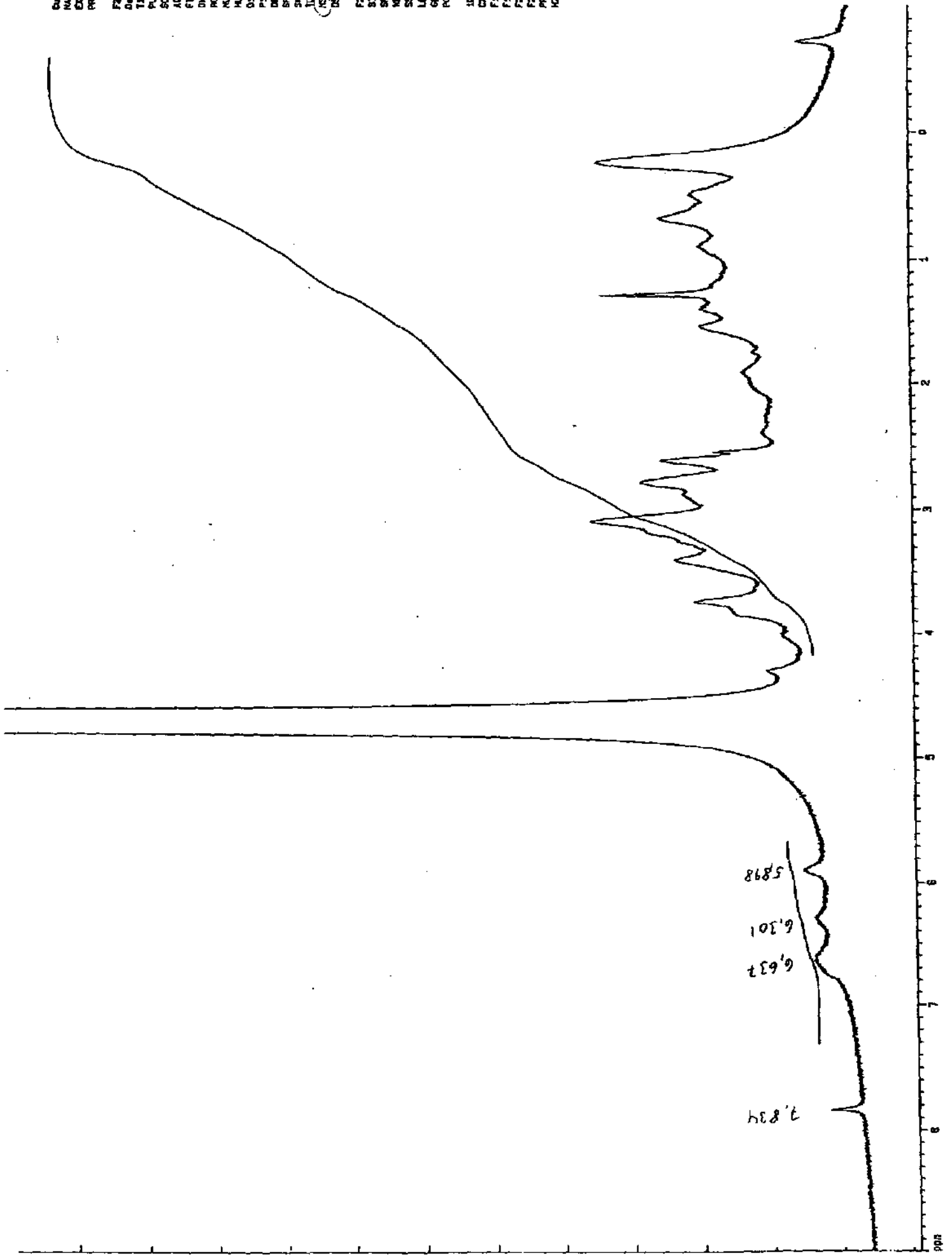
1D Plot Parameters  
 CX: 36.00 cm  
 FXP: 0.000 ppr  
 F1: 3801.32 Hz  
 F2P: -1.000 dB  
 F2: -400.14 Hz  
 FREQ: 0.27778 001  
 HZCM: 111.98873 1

Current Data Parameters  
 NAME SE7  
 EXPNO 1  
 PROCNO 1

F2 - Acquisition Parameters  
 Date 081130  
 Time 14:30  
 PULPROG zgpg30  
 SOLVENT CDCl3  
 AD 1.6533320 sec  
 FIDRES 0.228624 Hz  
 DR 89.0 us  
 RG 1024  
 NUC1 1H  
 CH1 2 dB  
 O1 0.3000000 sec  
 DE 14.5 cm  
 SFO1 79.8 MHz  
 SWH 8474.58 Hz  
 FID 32718  
 SFO2 2817

F2 - Processing parameters  
 SI 32718  
 SF 400.1354763 MHz  
 NQ 0  
 SS 0  
 LB 0.20 Hz  
 GB 0  
 PC 1.00

ID: Not plot parameters  
 C1 36.00 cm  
 F1P 8.000 MHz  
 F1 3691.22 MHz  
 F2P -1.000 MHz  
 F2 -400.14 MHz  
 PRACH 0.27778 sec  
 AQCN 111.14874 MHz



Current Data Parameters  
 NAME: NM18  
 EXPNO: 1  
 PROCNO: 1

F2 - Acquisition Parameters

Date: 201121  
 Time: 17:17  
 PALPROG: zgpg  
 SOLVENT: CDCl3  
 AQ: 1.000000 sec  
 FIDRES: 0.256674 Hz  
 QW: 39.0 Hz  
 RG: 512  
 NUC1: 1H

NUC2: 13C  
 P1: 0.500000 sec  
 P2: 14.8 Hz  
 DE: 72.8 Hz  
 SF01: 400.132827 MHz  
 SFO2: 8474.50 Hz  
 TD: 32768  
 NS: 915  
 DS: 0

F2 - Processing parameters

SI: 32768  
 SF: 400.132827 MHz  
 KHZ: 400  
 MDW: 0 Hz  
 SSB: 0 Hz  
 LB: 0.20 Hz  
 BA: 0  
 PC: 1.00

1D NMR plot parameters

GR: 32.00 cm  
 F1P: 8.000 ppi  
 F1: 3501.22 Hz  
 F2P: -1.000 dppm  
 F2: -400.14 Hz  
 PRNCH: 0.27065 dppm  
 NDCR: 141.42834 Hz

