

# Évolution des métaux lourds dans la sédimentation récente de la baie de Fort-de-France (Martinique)

Michel PUJOS \*, Jean-Claude PONS, Mario PARRA

Département de géologie et océanographie, UMR-CNRS 5805 « Epos », avenue des Facultés, 33405 Talence cedex, France

Reçu le 6 janvier 1999, reçu en forme révisée le 14 septembre 1999, accepté le 20 septembre 1999

**Abstract – Concentration and origin of heavy metals in the recent sediments of the Fort-de-France Bay (Martinique).** Mud progradation of eustatic and to a lesser extent of neotectonic origin began 2 000 years ago in the bay of Fort-de-France (Martinique). The terrigenous muds originate from erosion of rocks and soils and cover essentially the inner part of the bay. Recent muds (end of the nineteenth century to the present) are characterized by a sharp enrichment in heavy metals. High concentrations of Pb, Zn and Cu result from a) the rapid development of sugar cane and distilleries about 1880, and b) industrial activities of Fort-de-France region (after the second world war). © 2000 Ifremer / CNRS / IRD / Éditions scientifiques et médicales Elsevier SAS

**mud progradation / heavy metals / Late Quaternary / Fort-de-France bay** © 2000 Ifremer/CNRS/IRD/Éditions scientifiques et médicales Elsevier SAS

**Résumé – L'envasement de la baie de Fort-de-France (Martinique) débute vers 2 000 ans BP ; il est essentiellement localisé dans la partie interne de la baie et trouve son origine dans l'érosion des roches et des sols. Il en résulte un recouvrement partiel des récifs puis leur disparition. Cette progradation des vases est associée à l'eustatisme et, à un degré moindre, à la néotectonique. Les études sédimentologiques et géochimiques permettent d'individualiser une unité inférieure (2 000 ans BP–fin XIX<sup>e</sup> siècle) caractérisée par la mise en place des vases sur les récifs et une unité supérieure (fin du XIX<sup>e</sup> siècle à nos jours) dans laquelle les vases sont contaminées par des éléments métalliques. Les enrichissements en plomb, zinc et cuivre sont attribués à l'essor de la canne à sucre et des distilleries vers 1880 puis au développement des activités urbaines et industrielles de Fort-de-France depuis la Deuxième Guerre mondiale.** © 2000 Ifremer/CNRS/IRD/Éditions scientifiques et médicales Elsevier SAS

**envasement / métaux lourds / Quaternaire terminal / baie de Fort-de-France**

## 1. INTRODUCTION

La présente étude se place dans la lignée des travaux réalisés par le département de géologie et océanographie de l'université de Bordeaux-I dans les Petites Antilles françaises : baie de Pointe-à-Pitre, Guadeloupe [8, 9], baie de Fort-de-France, Martinique [9,

10], lagon de Simsonbaii, Saint-Martin [20]. La couverture sédimentaire de la Martinique, bien abritée des houles et des courants du large, est constituée de matériaux terrigènes argileux car le climat très humide de la partie centrale de l'île, d'où provient l'essentiel du matériel détritique, favorise l'altération et le lessivage intense des terrains [23]. Dans ces dépôts, les fortes teneurs en argile et en matière organique favorisent le piégeage d'éléments métalliques [27, 28], dont Pb, Zn, et Cu figurent parmi les

\* Correspondance et tirés à part :

Adresse E-mail: m.pujos@geocean.u-bordeaux.fr

plus toxiques et les plus mobilisables [12]. Les enrichissements en micropolluants métalliques se font comme dans les sédiments des lagunes soumises à une démographie, une industrialisation et un impact touristique croissants [21].

Le développement urbain et touristique de Fort-de-France a été prépondérant depuis le début du XX<sup>e</sup> siècle [1]: 30 % des entreprises industrielles ont été créées autour de la baie entre 1900 et 1944, 67 % de 1945 à 1965 alors que le trafic de l'aéroport du Lamentin augmentait considérablement avec le tourisme, passant de 20 000 passagers en 1960 à 194 000 en 1974. Cet essor économique justifie le choix du site pour tenter de mettre en évidence puis de comprendre l'évolution temporelle des micropolluants métalliques dans les dépôts vaseux les plus récents de la baie [10, 24].

Le présent travail porte sur les dépôts intertidaux de la partie interne de la baie, proche des mangroves. Dans cette zone la couverture sédimentaire meuble est la moins épaisse, permettant aux carottiers d'atteindre le substrat rocheux ou corallien plus facilement que dans le reste de la baie [26]. De plus, les courants de marée et de houle peu importants [10, 18] limitent la remise en suspension [25] des particules fines apportées par les rivières et le ruissellement. Dans ce contexte hydro-sédimentaire nous avons tenté de suivre l'évolution spatio-temporelle des polluants métalliques puis d'en déterminer l'origine.

Située au sud-ouest de la Martinique, la baie de Fort-de-France (figure 1) couvre une superficie de 40 km<sup>2</sup>. À l'entrée de la baie, par profondeurs inférieures à 10 m, le substrat est essentiellement constitué de formations récifales. Une passe en eau profonde

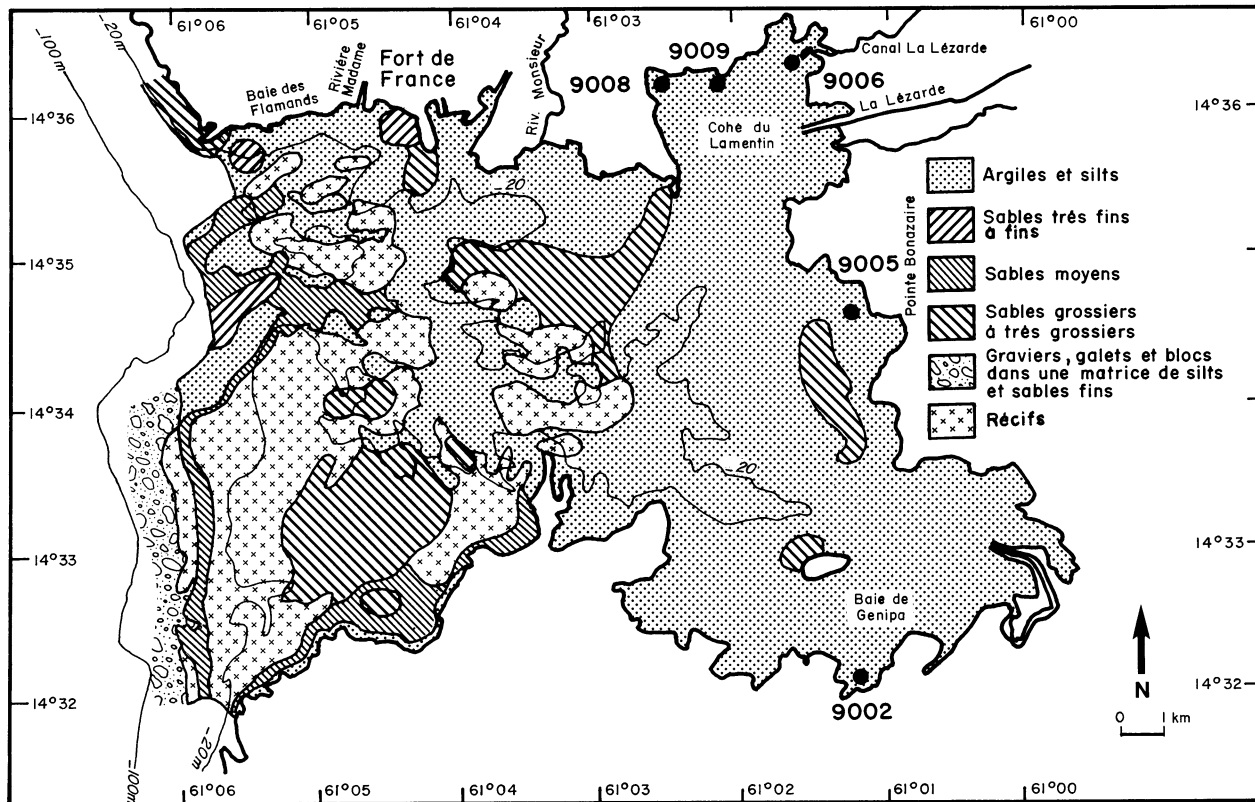


Figure 1. Cartographie simplifiée des formations superficielles en baie de Fort-de-France [11]. Situation des carottages.

Figure 1. Surface sediments in the Fort-de-France bay [11]. Location of the studied cores.

donne accès au port. Au centre, par profondeurs voisines de 30 m, des sables carbonatés issus du démantèlement des récifs sont partiellement recouverts de sédiments terrigènes (argiles et silts). Dans la partie interne, peu profonde, argiles et silts tapissent le plus souvent de vastes platiers récifaux [2, 3, 10, 11, 16, 25]. De nombreux petits cours d'eau, dont la rivière Lézarde est le plus important, se jettent dans la baie. De débit généralement faible, leurs crues sont violentes et dévastatrices en période cyclonique.

Les roches volcaniques en coulées et intrusions (basaltes, andésites et dacites) forment le substrat de la baie alors que les roches volcano-sédimentaires composent l'essentiel des affleurements de la partie sud [23].

L'étude minéralogique et géochimique des sédiments de surface a été réalisée pour l'ensemble de la baie [10, 24, 25] :

\* Les phases argileuses sont constituées de smectites dominantes (42 à 67 %) dans la partie sud et de kaolinite-halloysite (37 à 58 %) dans la partie nord. Cette répartition est en relation avec la nature des roches altérées qui va du pôle acide au pôle basique. Au fond de la baie, nous distinguons (*figure 1*) :

– au sud, la baie de Génipa où le cortège argileux est composé de smectite (Sm = 70 %) et de kaolinite (K = 30 %) ;

– au nord, la baie des Flamands (Sm = 60 % ; K = 28 %), la Cohé du Lamentin (Sm = 55 % ; K = 38 %) et la rivière Lézarde (Sm = 54 % ; K = 37 %). Dans ces trois sites, le complément de la phase argileuse est fourni par un interstratifié illite-chlorite (respectivement 2, 7 et 9 % du cortège), issu de l'altération hydrothermale des feldspaths et des biotites présents dans la dacite des Pitons du Carbet.

\* La composition chimique est homogène dans l'ensemble de la baie, proche de celle des altérites issues des formations dacitiques. La teneur en éléments majeurs, est la suivante (ordre décroissant) :  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{MgO}$  et  $\text{K}_2\text{O}$ .

\* Les éléments en traces les plus représentatifs du fond de la baie se répartissent de la manière suivante :

– dans la baie de Génipa, le zinc, le cuivre et le chrome sont abondants avec des teneurs de 118,77 et 112 ppm, soit 50 % plus élevées que celles reconnues dans les altérites terrestres.

La teneur cumulée  $\text{Zn} + \text{Cu} + \text{Cr} + \text{Pb} + \text{Co} + \text{Ni} + \text{As}$  est de 297 ppm, alors qu'elle n'est que de 118 ppm pour les altérites terrestres.

– dans la Cohé du Lamentin l'éventail des éléments en traces et leur teneur cumulée (279 ppm) sont identiques à ceux de la baie de Génipa. Comparativement aux altérites terrestres, les plus forts enrichissements concernent le zinc et le cuivre (38 %).

Dans ces deux régions, l'ordre décroissant des métaux est le suivant : Zn, Cu, Cr, Pb, Co, Ni et As. La teneur en cadmium y est toujours inférieure à 2 ppm, valeur considérée comme seuil de pollution.

– dans la zone centrale l'échelle des teneurs est légèrement différente avec, par ordre décroissant Zn, Cu, Cr, As, Ni, Pb et Co. La valeur cumulée de 182 ppm est proche de celle des roches terrestres.

## 2. MÉTHODES D'ÉTUDE

Les analyses sédimentologiques et géochimiques ont été réalisées sur cinq carottes provenant du fond de la baie de Fort-de-France (*figure 1*).

Pour chacun des échantillons prélevés tous les 2,5 cm, les teneurs en eau et en carbonates ont été mesurées. La granulométrie du sédiment est déduite des analyses au diffractomètre Malvern 2600 E et le carbone organique particulaire est dosé à l'aide du Leco CS 125.

Les minéraux argileux ont été analysés par diffractométrie de rayons X (diffractomètre Philips – radiation  $\text{K}\alpha$  du cuivre – filtre nickel – 35 kV et 25 mA). Les sédiments sont préalablement décarbonatés (0,1 N HCl) et rincés à l'eau déionisée. La fraction argileuse ( $< 2 \mu\text{m}$ ) est séparée par gravité puis étalée sur trois lames de verre pour l'analyse aux rayons X selon la méthode décrite par Holtzapffel [15]. Une lame est analysée sans traitement préalable, la deuxième est examinée après saturation à l'éthylène-glycol et la troisième est

observée après chauffage à 550 °C pendant 1 h. L'identification des minéraux argileux est fondée sur leur réaction spécifique à ces traitements [6, 29]. Leur quantité relative est calculée d'après la hauteur des réflexions caractéristiques sur les diagrammes des échantillons glycolés : 17 Å pour les smectites, 10 Å pour les illites, 7,1 Å et 3,57 Å pour les kaolinites, 14 Å ; 7 ; 1 Å ; 4, 7 et 3,55 Å pour les chlorites.

La composition chimique du sédiment décarbonaté et dépourvu de matière organique a été obtenue sur 116 échantillons à partir des analyses effectuées par spectrométrie de fluorescence X (Philips PW 1350–1540) ; les conditions opératoires sont celles décrites par Lapaquellerie [17]. Deux types d'analyses ont été réalisés :

– les éléments majeurs (Si, Al, Fe, Ti, Ca, Mg, K, Mn, P, Na et Cl) par la technique de dilution ; les échantillons broyés sont ensuite fondus à 1 050 °C. Les teneurs exprimées sont celles des oxydes.

– les éléments traces (Sr, Rb, Cr, Co, Zn, Cu, Nb, Ga, Sn, Pb, Zr, As et Br) sont analysés directement sur les échantillons finement broyés séchés à 105 °C. Des étalons artificiels (NBS) sont analysés en même temps que les échantillons, permettant ainsi d'établir des courbes d'étalonnage pour chaque élément. Les erreurs sur les teneurs sont estimées à  $\pm 10\%$ .

Les éléments traces, déterminants pour l'analyse de la qualité du milieu marin, font l'objet d'une étude plus approfondie. Parmi eux, Pb, Zn, Cu, Cr, Co, Ni et As doivent être considérés comme des indicateurs de pollution. La distinction entre éléments « normaux » et « polluants » résulte de la comparaison entre les valeurs relevées dans les sédiments de la baie et le bruit de fond géochimique fourni par les altérites [23, 25].

Des mesures de  $^{210}\text{Pb}$  ont été effectuées sur deux carottages (C 9008 et C 9009) à partir de sédiment sec (6–10 g) avec un spectromètre gamma à haute résolution (Intertechnique EGSP 2200–25–R). Le  $^{210}\text{Pb}$  mesuré comporte le  $^{210}\text{Pb}$  atmosphérique et le  $^{210}\text{Pb}$  détritique des particules qui est le résultat de la désintégration de  $^{238}\text{U}$  et qui demeure constant. Le  $^{210}\text{Pb}$  atmosphérique en excès piégé par les particules en suspension et/ou le sédiment de surface, est défini de la manière suivante :

$$A^{210}\text{Pb en excès} = A^{210}\text{Pb total} - A^{226}\text{Ra}$$

Les variations de  $\log(A^{210}\text{Pb en excès})$  en fonction de la profondeur de sédiment suivent une loi linéaire de pente L/S : à partir de la droite représentative, il est possible de calculer le taux de sédimentation sachant que :

$$Az = A_0 \exp(-\lambda.z/R)$$

avec :  $A_0$  = activité du  $^{210}\text{Pb}$  en excès à l'interface eau/sédiment

$\lambda$  = constante de décroissance radioactive de Pb

R = taux de sédimentation

z = profondeur de mesure

Trois datations au radiocarbone ont été effectuées sur des fragments de coraux.

Le degré de contamination du sédiment par les métaux lourds est indiqué par le facteur d'enrichissement EF [4] et l'indice de géoaccumulation I géo [19] définis par les rapports :

$$EF = \frac{[\text{teneur métal}/\text{teneur Al}_2\text{O}_3]_{\text{sédiment}}}{[\text{teneur métal}/\text{teneur Al}_2\text{O}_3]_{\text{roche mère ou altérites}}}$$

$$I \text{ géo} = \frac{\log [\text{teneur métal}]_{\text{sédiment}}}{1,5 [\text{teneur métal}]_{\text{roche mère ou altérites}}}$$

L'échelle de l'intensité de la pollution est comprise entre 0 (pollution nulle) et 6 (pollution très forte).

### 3. ANALYSE DES CAROTTES

#### 3.1. La baie de Génipa (KC 9002)

La vase qui compose cette carotte (*figure 2*) est associée dans sa partie basale à des bioclastes et à de nombreux débris coralliens (de 140 cm à 100 cm). Elle devient silteuse à bioclastes (teneur en  $\text{CaCO}_3 = 10\%$ ) à partir de 55 cm puis s'enrichit en eau (Md = 51,5 %) et en débris végétaux ordonnés en fines passées noirâtres anoxiques dans sa partie sommitale.

Le cortège argileux est homogène, à smectites dominantes (85 %) et kaolinite subordonnée (15 %). Cette richesse en smectites est attribuée à la présence à l'affleurement de roches essentiellement basiques mises en place au moment de l'édification de l'arc ancien qui fournissent des altérites où ce

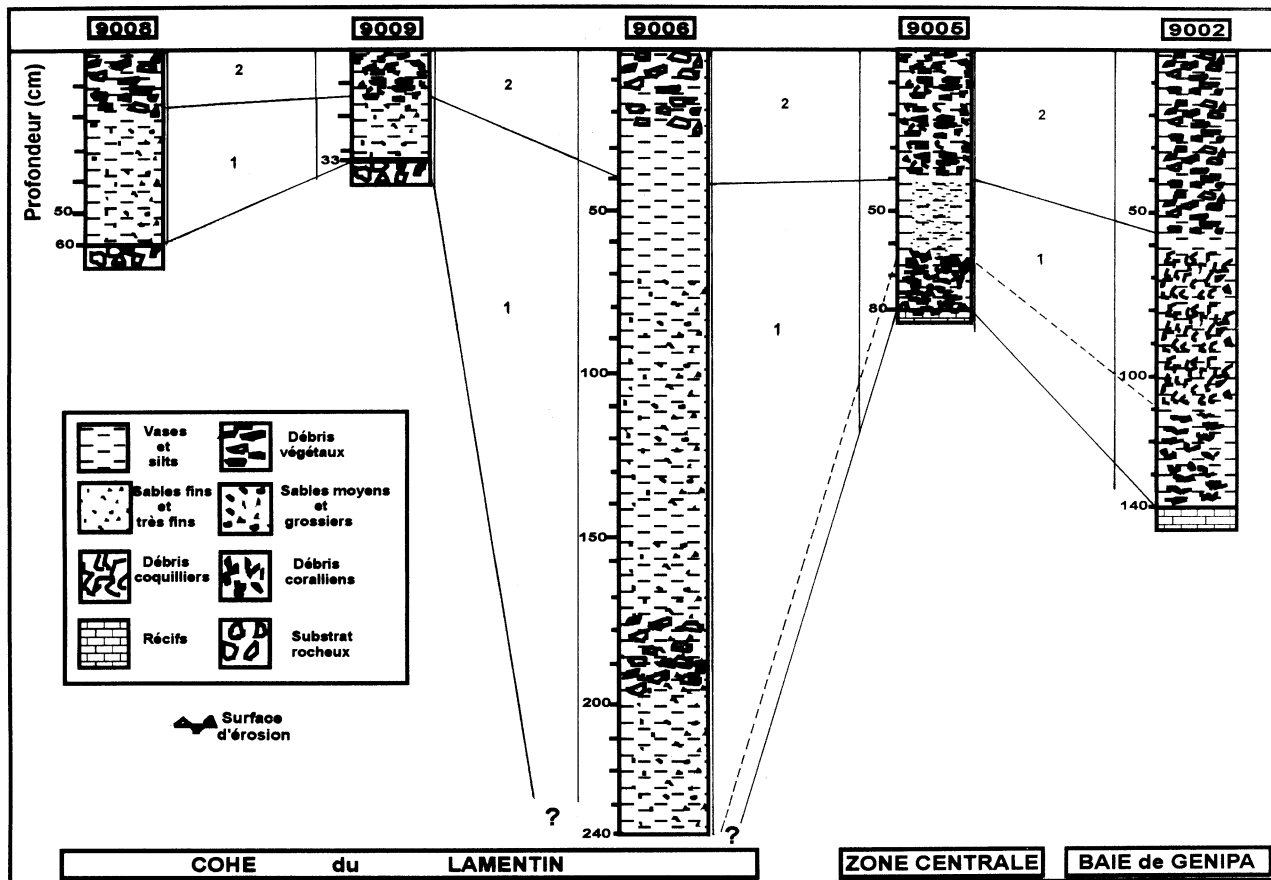


Figure 2. Lithologie des carottes KC 9002, 9005, 9006, 9008 et 9009. Unités lithologiques.

Figure 2. Lithologies of cores KC 9002, 9005, 9006, 9008 and 9009. Sedimentary units.

minéral constitue parfois 100 % de la phase argileuse [23].

La teneur moyenne en carbone organique est respectivement de 2,1 et 1,8 à la base et au sommet de la coupe. La teneur est maximale ( $Md = 2,76$ ) dans la zone médiane (de 80 à 30 cm).

Aux faibles teneurs en éléments majeurs ( $Al_2O_3 = 13\%$  et  $Fe_2O_3 = 7\%$ ) enregistrées de la partie basale à 40 cm succèdent, jusqu'au sommet de la coupe, des valeurs élevées voisines respectivement de 16 et 12 %. Un enrichissement en métaux lourds (Zn, Pb, Cu) se produit vers 50/40 cm (figure 3).

### 3.2. La pointe Bonzaire (KC 9005)

Le substratum corallien, atteint à 80 cm, est surmonté de sables carbonatés à fragments coralliens et bioclastes ( $CO_3Ca = 80\%$  de la base à 65 cm, 40 % jusqu'à 40 cm). À cette profondeur et jusqu'au sommet de la coupe, la vase est riche en eau ( $Md = 48$  à 61 %), en débris de mollusques et de végétaux ( $CO_3Ca = 2,5\%$ ).

Le cortège argileux, homogène, est composé de smectites ( $Md = 70\%$ ) et de kaolinite ( $Md = 30\%$ ).

La teneur en carbone organique augmente de la base au sommet. Jusqu'à 40 cm, les valeurs sont inférieures à 2,5 % (Md = 1,38 %) ; elles atteignent 4,5 % au sommet (Md = 3,5 %).

Les teneurs en éléments majeurs s'assemblent en deux groupes : aux faibles valeurs de  $Al_2O_3$  (< 10 %),  $Fe_2O_3$  (2–3 %),  $TiO_2$  (0,3–0,6 %) et  $K_2O$  (< 0,1 %) de la partie basale succèdent de fortes augmentations de 40 cm au sommet :  $Al_2O_3$  (17 %),  $Fe_2O_3$  (12–13 %),  $TiO_2$  (0,9 %) et  $K_2O$  (0,6–8 %).

Les teneurs en  $Fe_2O_3$  de la base des coupes KC 9002 (région centrale) et KC 9005 (région Sud) sont

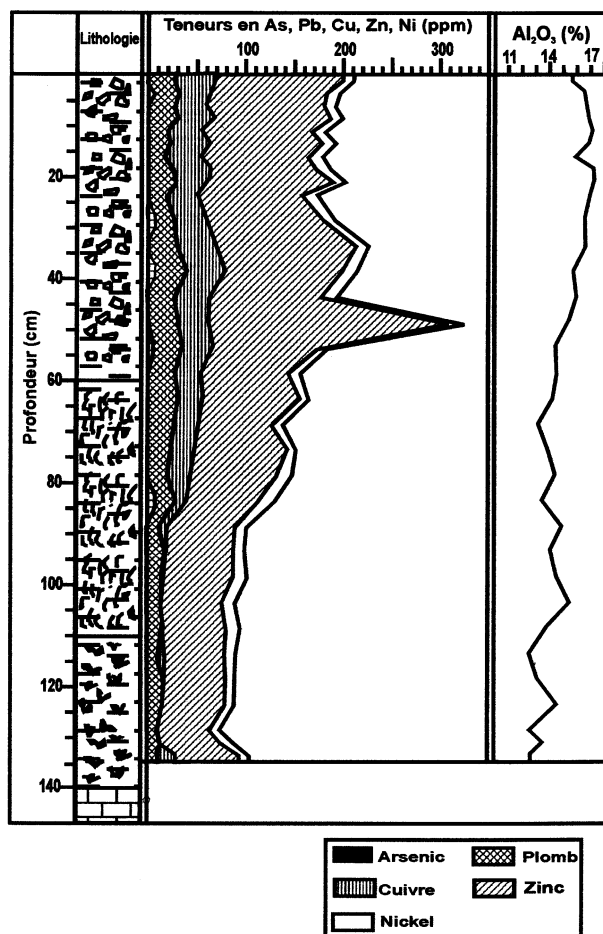


Figure 3. Carotte KC 9002. Variations des teneurs cumulées (en ppm) de As, Pb, Cu, Zn et Ni. Relations avec  $Al_2O_3$ .

Figure 3. Core KC 9002. Profiles of cumulated contents (ppm) As, Pb, Cu, Zn and Ni. Relationship to  $Al_2O_3$ .

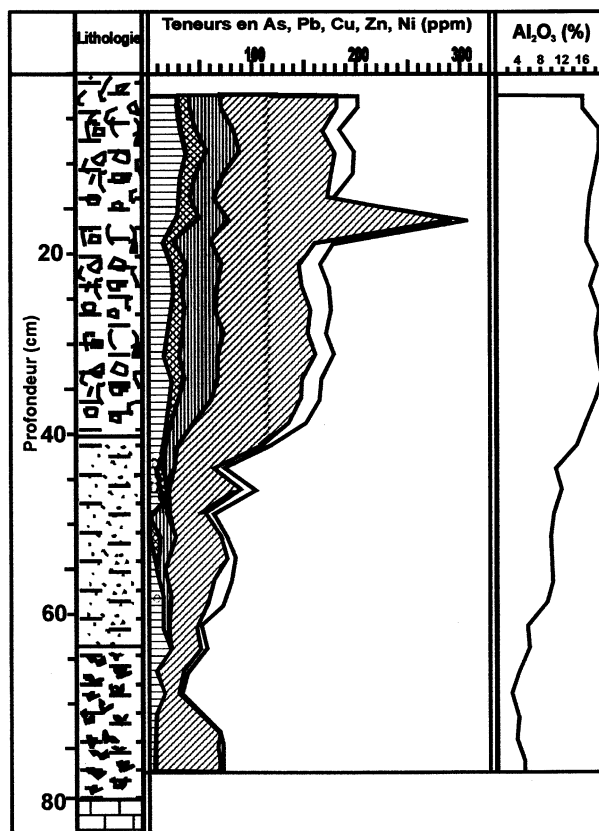


Figure 4. Carotte KC 9005. Variations des teneurs cumulées (en ppm) de As, Pb, Cu, Zn et Ni. Relations avec  $Al_2O_3$ .

Figure 4. Core KC 9005. Profiles cumulated contents (ppm) As, Pb, Cu, Zn and Ni. Relationship to  $Al_2O_3$ .

proches de celles reconnues dans les dacites et les andésites ; elles sont beaucoup plus élevées dans la partie supérieure, passant respectivement de 7,6 à 12 % dans la KC 9002 et de 3 à 11,7 % dans la KC 9005.

L'évolution verticale de la teneur en métaux lourds s'ordonne, comme pour les éléments majeurs, de part et d'autre de 40 cm. Aux faibles teneurs en As, Pb, Cu, Zn et Ni de l'ensemble basal s'opposent les fortes teneurs de l'ensemble supérieur (figure 4).

### 3.3. La Cohé du Lamentin (KC 9006, KC 9008 et KC 9009)

KC 9006 : les dépôts vaseux qui constituent l'ensemble de la coupe sont parfois accompagnés de

débris végétaux dispersés ou finement lités (200–170 cm ; 60–0 cm). La teneur en eau est homogène (40 %).

Le cortège argileux est composé de smectites (Md = 51 %), kaolinite associée à des métahalloysites (Md = 39 %) et à un interstratifié illite-chlorite (Md = 10 %). Il est comparable à celui identifié dans les dépôts et les suspensions de la rivière Lézarde qui se jette dans la Cohé du Lamentin (Sm = 52–56 % ; K = 36–38 % ; I-Cl = 8–10 %) [25].

La teneur moyenne en carbone organique est de 2 % avec des valeurs maximales (3,5 %) entre 200 et 170 cm.

Les teneurs en éléments majeurs varient peu de la base à 40 cm :  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (20–24 %),  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  (16–17 %),  $\text{TiO}_2$  (1,5 %) et  $\text{K}_2\text{O}$  (0,4–0,5 %). Elles diminuent de 40 cm au sommet :  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (18 %),  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  (14 %) et  $\text{TiO}_2$  (1,1–1,2 %), alors que la teneur en  $\text{K}_2\text{O}$  (0,7–0,8 %) augmente.

Les métaux lourds (As, Pb, Cu, Zn et Ni) ne présentent pas de variation significative [30]. Ce phénomène pourrait être lié à une hypersédimentation locale qui entraîne une dilution (le carottage n'atteint pas le substratum) et/ou à l'existence d'une zone abritée des courants susceptibles de disperser les apports anthropiques.

KC 9008 et KC 9009 : ces carottages au contact du substratum rocheux à 60 et 33 cm présentent une lithologie comparable.

Dans la carotte KC 9008 se succèdent des vases grises (60–35 cm) devenant silteuses (35–30 cm) puis sableuses (30–18 cm), et des vases noires à débris végétaux (18–0 cm).

Dans la carotte KC 9009, les vases grises sont silteuses (33–30 cm) puis sableuses (30–17 cm), surmontées de vases noires à débris végétaux et fragments coquilliers (17–0 cm).

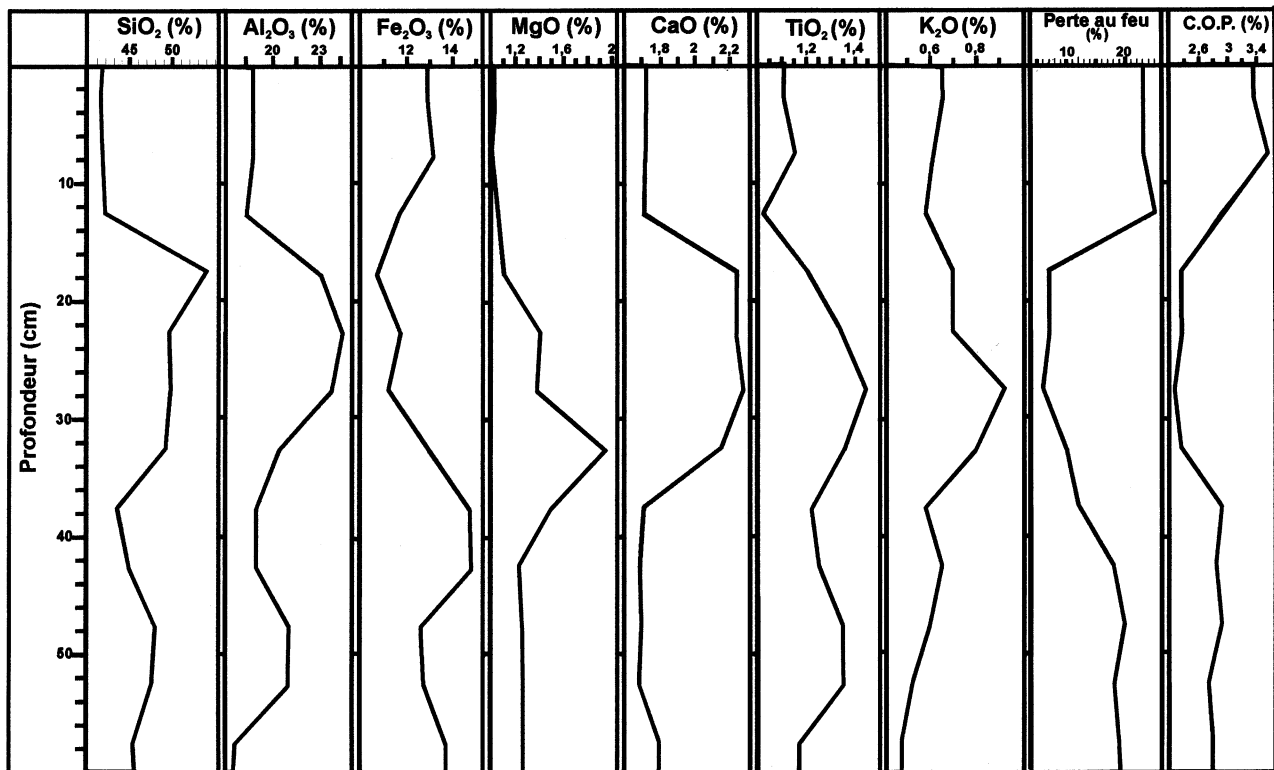


Figure 5. Carotte KC 9008. Répartition des teneurs des principaux éléments majeurs.

Figure 5. Core KC 9008. Major element contents.

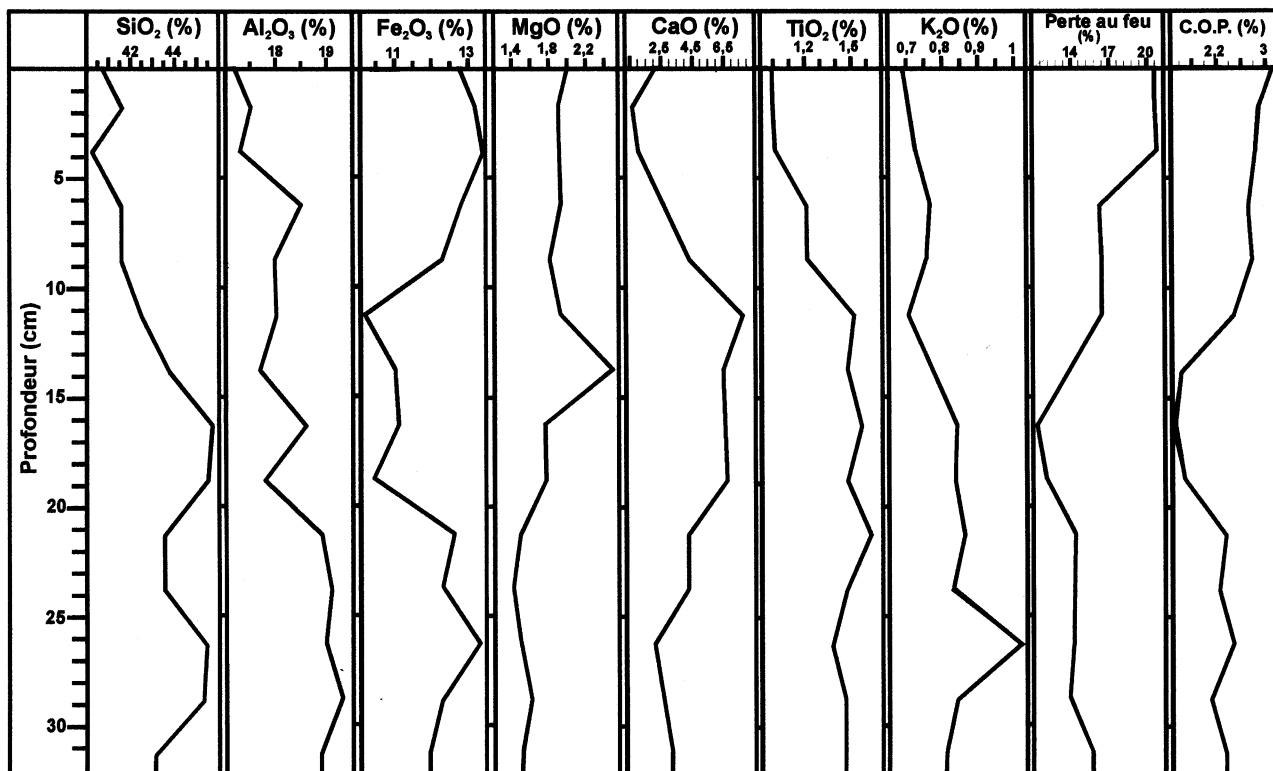


Figure 6. Carotte KC 9009. Répartition des teneurs des principaux éléments majeurs.

Figure 6. Core KC 9009. Major element contents.

Le cortège argileux de ces deux carottes est homogène, à smectites (Md = 55 %), kaolinite (Md = 34 %) et interstratifiés (Md = 11 %). Il est identique à ceux précédemment décrits dans la carotte KC 9006 et dans les dépôts et suspensions de la rivière Lézarde.

Les teneurs en éléments majeurs (SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, MgO, CaO, TiO<sub>2</sub> et K<sub>2</sub>O) présentent des variations significatives. Dans les deux coupes, les teneurs minimales sont synchrones des fortes valeurs relevées pour la perte au feu et le carbone organique particulaire (COP) : c'est le cas de la carotte KC 9008 de la base à 35 cm et de 15 cm au sommet et de la carotte KC 9009 de 12,5 cm au sommet (*figures 5,6*).

Le rapport SiO<sub>2</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> est pratiquement constant (1,9 à 2,1 pour KC 9008 et 2,3 à 2,5 pour KC 9009), valeurs proches de celles relevées pour les

sols (1,9) et les dépôts de surface de la Cohé du Lamentin (1,4 à 2,3) [25].

Les teneurs en métaux lourds varient parallèlement dans les deux coupes. Pb, Zn, As et Cu présentent des enrichissements importants au sommet de KC 9008 (15 à 0 cm) et KC 9009 (10 à 0 cm) (*figures 7,8*). C'est ainsi que les teneurs en Zn des niveaux supérieurs de ces deux carottes (200 ppm dans la KC 9008 et 250–400 ppm dans la KC 9009) sont plus élevées que celles mesurées dans les sols (56–63 ppm), les sédiments (40 ppm) et les suspensions (55 ppm) du proche bassin de la rivière Lézarde.

L'absence de corrélation entre ces métaux lourds et Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> pourrait indiquer que les vases (dans le cas présent les aluminosilicates) ne sont pas responsables du piégeage des métaux lourds. Les fortes teneurs enregistrées doivent être plutôt rapprochées de la matière organique qui est un constituant es-



sentiel des vases dans la partie sommitale des deux coupes.

En conclusion, les vases qui recouvrent la zone d'étude témoignent d'une sédimentation terrigène littorale de fond de baie en milieu calme, protégé des fortes houles cycloniques. Cela suppose que le potentiel de préservation de ces dépôts est élevé et sensiblement constant.

Quatre des cinq carottes étudiées atteignent le substratum, qu'il soit rocheux (KC 9008 et KC 9009) ou de nature récifale (KC 9005 et KC 9002). Parfois il n'est pas atteint lorsque la sédimentation est importante ( $p = 2,40$  m dans la KC 9006). Les vases qui couvrent ce substratum révèlent la présence de deux unités (figure 2).

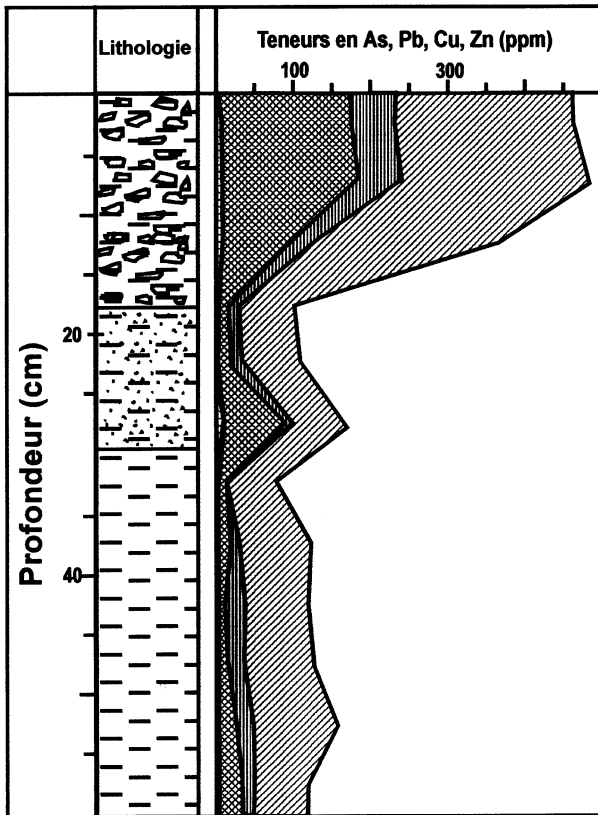


Figure 7. Carotte KC 9008. Variations des teneurs cumulées (ppm) de As, Cu, Pb et Zn.

Figure 7. Core KC 9008. Profiles of cumulated contents (ppm) As, Pb, Cu and Zn.

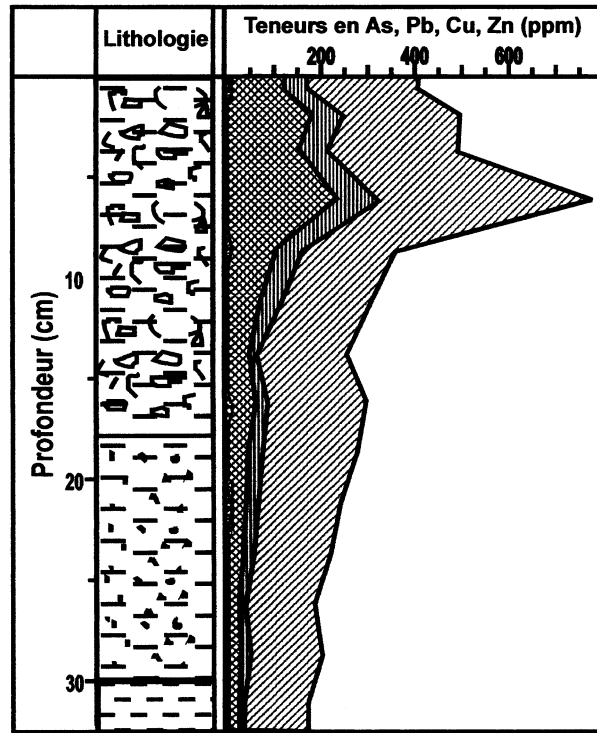


Figure 8. Carotte KC 9009. Variations des teneurs cumulées (ppm) de As, Cu, Pb et Zn.

Figure 8. Core KC 9009. Profiles of cumulated contents (ppm) As, Pb, Cu and Zn.

### 1) L'unité inférieure

Les dépôts vaseux y sont homogènes mais, au sud et dans la zone centrale une surface d'érosion apparaît au toit des récifs. Surmontant cette discontinuité, une sédimentation fine s'installe où les nombreux débris récifaux et les bioclastes présents dans la vase traduisent l'importance des remaniements.

Les cortèges argileux montrent une constance temporelle et une variabilité géographique.

Au nord, les formations volcaniques intermédiaires et basiques de l'arc récent [23, 25] libèrent, compte tenu de l'altération intense provoquée par une très forte pluviosité, un cortège à smectites (53 %) et kaolinite (37 %). L'interstratifié illite-chlorite (10 %) est fourni par une roche à quartz et biotite, la dacite des pitons du Carbet.

**Tableau I.** Répartition moyenne des teneurs en éléments majeurs.**Table I.** Average contents of major elements.

Carotte	Unités lithologiques	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	TiO <sub>2</sub> (%)	K <sub>2</sub> O (%)
9002	U <sub>2</sub>	16,5	12,1	0,9	0,85
	U <sub>1</sub>	13,9	8	0,6	0,6
9005	U <sub>2</sub>	17,6	12	0,9	0,6
	U <sub>1</sub>	7,7	2,8	0,2	0,04
9006	U <sub>2</sub>	18,45	14,7	1,2	0,7
	U <sub>1</sub>	22	15,8	1,5	0,5
9008	U <sub>2</sub>	18,5	11,8	1,1	0,6
	U <sub>1</sub>	21,3	13,6	1,3	0,7
9009	U <sub>2</sub>	17,75	11,85	1,1	0,75
	U <sub>1</sub>	18,75	12,3	1,5	0,9
Md-9008/09	U <sub>2</sub>	18,1	11,8	1,1	0,7
	U <sub>1</sub>	20	12,9	1,4	0,8
Md-9006/08/09	U <sub>2</sub>	18,2	12,8	1,1	0,7
	U <sub>1</sub>	21,1	13,9	1,45	0,7

Au sud, les formations volcano-sédimentaires renferment un cortège à smectites très dominantes et parfois exclusives [23] qui, après érosion, sont transportées dans le milieu marin (85 %).

La répartition des teneurs en éléments majeurs est variable. Le centre et le sud sont caractérisés par de faibles teneurs en Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, TiO<sub>2</sub>, K<sub>2</sub>O. Les teneurs y sont proches de celles des roches mères [25] et les fortes valeurs du rapport SiO<sub>2</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> soulignent la faiblesse de l'altération. Les bons coefficients de corrélation (> 93 %) entre SiO<sub>2</sub>/Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, TiO<sub>2</sub>/Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> et TiO<sub>2</sub>/SiO<sub>2</sub> [25, 30] confirment les résultats obtenus pour les cortèges argileux et suggèrent une origine unique des éléments chimiques pour l'ensemble de ces dépôts. Au nord, les teneurs en Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> et TiO<sub>2</sub> sont maximales.

Les éléments traces, et plus particulièrement les polluants métalliques, présentent de faibles teneurs en As, Pb, Cu et Zn, souvent inférieures aux teneurs naturelles.

## 2) L'unité supérieure

La vase, toujours faiblement compactée, est riche en bioclastes et débris végétaux sur l'ensemble de la région, probablement à la suite des déboisements et de la destruction des mangroves.

Les cortèges argileux sont identiques à ceux reconnus dans l'unité inférieure.

Les teneurs en éléments majeurs (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, TiO<sub>2</sub>, K<sub>2</sub>O) sont maximales et proches de celles des altérites (*tableau I*). Ceci paraît corroboré d'une part, par les valeurs minimales de SiO<sub>2</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> qui soulignent l'importance de l'altération et d'autre part, par les fortes valeurs de Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> qui attestent de l'érosion d'altérites riches en fer exposées aux altérations physique et chimique à la suite des déboisements. Les bons coefficients de corrélation entre SiO<sub>2</sub>/Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, TiO<sub>2</sub>/Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, TiO<sub>2</sub>/SiO<sub>2</sub> suggèrent, comme pour l'unité inférieure, une origine unique des composés chimiques.

**Tableau II.** Enrichissements en métaux lourds des vases de fond de baie (zone centrale, Cohé du Lamentin et baie de Génipa) par rapport aux roches mères de référence.**Table II.** Enrichment of heavy metals in bottom muds (central area; Cohé du Lamentin, Genipa bay) compared to the reference bedrocks.

Localisation	Andésite	Dacite
Zone centrale	14 %	72 %
Cohé du Lamentin	32 %	163 %
Baie de Génipa	87 %	183 %

**Tableau III.** Facteur d'enrichissement (EF) et indice de géoaccumulation (I géo) des carottes KC 9008 et KC 9009.**Table III.** KC 9008 and KS 9009. Enrichment factor (EF) and geoaccumulation index (I geo).

Carottes		Pb		Zn		Cu		As	
		EF	Igeo	EF	Igeo	EF	Igeo	EF	Igeo
9008	(I) Unité supérieure	44	1,4	3,9	2,2	1,8	<0,1	48	1,2
	(II) Unité inférieure	25	1,1	4,1	2,2	0	<0,1	33	1,2
9009	(I) Unité supérieure	32	1,2	4,6	0,3	1,15	<0,1	90	0,7
	(II) Unité inférieure	9,3	0,8	2,7	0,15	0	< 0,1	0	< 0,1

**Tableau IV.** Teneurs comparées et cumulées des métaux lourds dans les sédiments de la baie de Fort-de-France et dans les altérites.**Table IV.** Heavy metals in the sediments of Fort-de-France bay and in the weathered and decayed rocks.

Éléments traces (ppm)	As	Pb	Cu	Zn	Ni	Co	Cr	Total
Zone géographique								
Baie des Flamands	1	141	88	298	17	16	30	591
Cohé du Lamentin	7	26	69	107	16	21	33	279
Zone centrale	15	13	42	67	14	9	22	182
Baie de Génipa	9	25	77	120	13	21	34	299
Altérites terrestres	0	16	50	78	13	14	16	187

**Tableau V.** Teneurs comparées en Zn, Pb, Cu et Ni (ppm) de sites littoraux en climat intertropical et tempéré.**Table V.** Zn, Pb, Cu and Ni contents (ppm) of littoral stations in temperate and intertropical zones.

	Baie de Fort de France *		Baie de Pointe à Pitre **	Lagon de St Martin ***	Bassin d'Arcachon ****	
	Md	Baie des Flamands			Md	Zone portuaire
Zn	148	298	87	144	141	381
Pb	51	141	37	43	61	134
Cu	69	88	67	94	34	157
Ni	15	17	15	–	–	–

Md : teneur moyenne – \* Pons et al. [24] – \*\* Castaing et al. [10] – \*\*\* Parra et al. [20] – \*\*\*\* Carruesco et al. [7].

Les teneurs en éléments traces sont maximales (figures 3,4,7,8). Les carottes KC 9002, KC 9005, KC 9008 et KC 9009 montrent une très forte augmentation des teneurs en Pb, Zn et Cu. Cet enrichissement des vases en métaux lourds, par rapport aux roches mères de référence, est très important (tableau II).

Les facteurs d'enrichissement [4] et l'indice de géoaccumulation [19] permettent d'évaluer la pollution

métallique des dépôts. À titre d'exemple, le facteur d'enrichissement de l'unité supérieure (KC 9008 et KC 9009) est élevé pour Pb et As, plus faible pour Zn et Cu, alors que l'indice de géoaccumulation présente de faibles augmentations pour Pb (tableau III).

L'arsenic identifié dans le secteur méridional provient vraisemblablement d'argiles hydrothermales [23]. Le net enrichissement enregistré au nord (KC 9008 et

KC 9009) est concomitant d'autres micropolluants tels que Pb, Zn et Cu.

Les teneurs cumulées des métaux lourds en surface dans le fond de la baie (Cohé du Lamentin, pointe Bonzaire et baie de Génipa) ont été comparées à celles enregistrées près de la ville de Fort-de-France (baie des Flamands) ainsi qu'aux altérites terrestres (*tableau IV*). Les valeurs de Pb, Cu et Zn dans la partie interne de la baie confirment la tendance observée dans l'unité supérieure des coupes : les teneurs y sont importantes, bien supérieures à celles des altérites terrestres, sans toutefois atteindre les valeurs de la baie des Flamands.

La comparaison de ces résultats avec ceux de la baie des Flamands (Martinique) et d'autres régions tropicales (Guadeloupe, baie de Pointe-à-Pitre ; Saint-Martin, lagon de Simsonbai) et avec ceux d'une région de climat tempéré (bassin d'Arcachon) montre que les teneurs moyennes en Zn, Pb, Cu sont semblables dans la baie de Fort-de-France et dans les autres sites (*tableau V*). Les teneurs en Pb et en Zn y sont plus fortes qu'en baie de Pointe-à-

Pitre et comparables à celles du lagon de Simsonbai, alors que ce dernier se distingue par de fortes teneurs en Cu. La teneur en Ni est constante en baie de Pointe-à-Pitre (Guadeloupe) et en baie de Fort-de-France, confirmant ainsi son origine lithogénique.

Ainsi, en baie de Fort-de-France, est mise en évidence une augmentation en micropolluants métalliques analogue à celle d'autres milieux littoraux intertropicaux plus ou moins isolés de la mer ouverte. Seules les zones portuaires présentent des augmentations considérables en Pb et en Zn.

### 3.4. Chronologie et évolution des dépôts

Dans la carotte KC 9002 de la zone sud, les coraux du niveau 122 cm ont un âge de  $645 \pm 110$  ans BP ; dans la zone centrale (KC 9005), les datations à 75 et 60 cm ont livré des âges respectifs de  $1715 \pm 60$  ans BP et  $1450 \pm 100$  ans BP. L'envasement du fond de la baie pourrait donc avoir débuté vers 2000 ans BP (estimation comparable à celle donnée

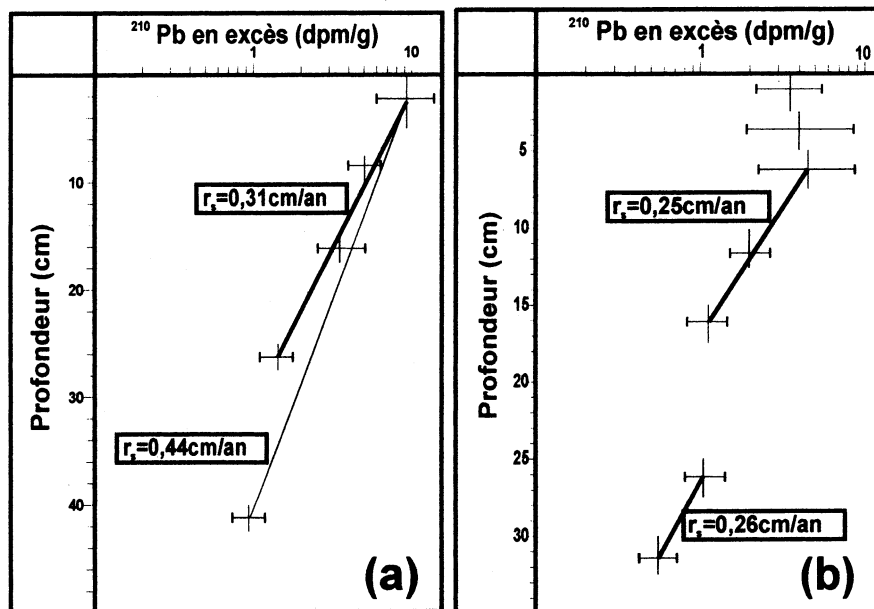


Figure 9. Carottes KC 9005 (a) et 9009 (b).  $^{210}\text{Pb}$  en excès et taux de sédimentation.

Figure 9. Cores KC 9005 (a) and 9009 (b). Excess  $^{210}\text{Pb}$  and sedimentation rate.

par [11]) : a) lors de la progradation des vases, de l'extension des mangroves et des tourbes observées à terre par Brossard (comm. pers.) succédant à une forte activité érosive des bassins versants ; b) avec la baisse du niveau marin, depuis 3 000 ans, dans les régions intertropicales [5, 22] ; et c) lors de la manifestation de phénomènes néotectoniques qui affectent l'île. La Martinique qui fait partie de l'arc insulaire des Petites Antilles, né de la subduction de la plaque atlantique sous la plaque caraïbe [31] est une région de néotectonique active : les *beach-rocks* soulevés de la côte est, sont un exemple récent du soulèvement de la façade atlantique et de l'affaissement concomitant de la côte caraïbe. Cette néotectonique contribuerait alors à la baisse du niveau de base dans la baie de Fort-de-France [14] et à l'augmentation de l'apport terrigène par une reprise de l'érosion.

Les mesures au  $^{210}\text{Pb}$  permettent de suivre les conditions de sédimentation depuis environ un siècle. Les taux de sédimentation ont été calculés dans l'unité supérieure des deux carottes qui offrent le moins de dépôts remaniés (*figure 9*) : ils sont respectivement de  $0,31 \text{ cm}\cdot\text{an}^{-1}$  (KC 9005) et  $0,25 \text{ cm}\cdot\text{an}^{-1}$  (KC 9009). L'arrivée des teneurs maximales des polluants métalliques aux profondeurs de 40 cm (KC 9005) et 17–20 cm (KC 9009), correspondrait approximativement aux années 1880 et 1940.

À la fin du XIX<sup>e</sup> siècle l'industrie du rhum, suite à la crise phylloxérique du vignoble européen prend son essor pour répondre aux besoins de la métropole. Dès 1880, s'établit la prépondérance des grandes exploitations sucrières et rhumières où les usines succèdent aux méthodes archaïques de production [1]. Les terres les plus propices étant situées autour de la baie de Fort-de-France, de très nombreuses distilleries s'installent à proximité, utilisant des matériaux à base de métaux tels que le cuivre.

Avec la Deuxième Guerre mondiale, le peuplement de la Martinique augmente ; plus d'un tiers de la population vit autour de la baie [1]. Avec l'essor de Fort-de-France (18 000 habitants en 1880, 66 000 en 1946, 95 000 en 1967) et de toute la région côtière, naissent des besoins considérables : des industries agro-alimentaires et de transformation s'installent autour de la baie (zones industrielles de la Lézarde

et du Lamentin), amenant une pression anthropique de plus en plus forte sur un littoral fragile.

Ainsi, l'augmentation des éléments métalliques polluants dans les sédiments du fond de la baie est consécutive à l'industrialisation de la Martinique. Cette pollution s'effectue en deux étapes : l'essor du rhum et la création de nombreuses plantations de canne à sucre et distilleries (vers 1880), puis l'expansion démographique associée à l'industrialisation (vers 1940–1945).

#### 4. CONCLUSION

L'étude des caractères de l'envasement récent de la baie de Fort-de-France contribue à évaluer la nature et les conditions de sédimentation.

Durant la période qui précède l'envasement, la prolifération des récifs correspondrait à l'Holocène terminal (vers 6 000 ans BP [13]). La partie interne de la baie où vivaient les récifs est aujourd'hui recouverte de dépôts vaseux de plusieurs mètres d'épaisseur (depuis 2 000 ans BP).

Cet envasement trouve son origine dans l'érosion des roches et dans les altérites des bassins versants. C'est pourquoi les cortèges argileux, montrent des différences entre les secteurs nord et centre-sud : les smectites et kaolinites de la baie de Génipa et de la zone centrale sont issues des roches volcano-sédimentaires de la partie sud-est de l'île, alors que les smectites-kaolinites et illites-chlorites de la Cohé du Lamentin proviennent des roches volcaniques situées au nord de la baie de Fort-de-France.

À partir de l'ensemble des résultats obtenus sur les vases et en particulier sur les concentrations en éléments métalliques des sédiments, il est possible de distinguer :

L'unité inférieure (1) : 2 000 ans BP–fin XIX<sup>e</sup> siècle caractérisée par une mise en place des vases sur les récifs nécrosés ;

L'unité supérieure (2) : fin XIX<sup>e</sup> siècle–Actuel où les vases sont contaminées par des éléments métalliques, et notamment le plomb et l'arsenic. De telles concentrations, courantes dans les baies et lagunes exposées aux pollutions anthropiques, paraissent

liées à l'industrialisation et à l'urbanisation de Fort-de-France et de sa région.

L'augmentation de ces polluants métalliques est associée à l'essor des plantations agricoles de canne à sucre et aux distilleries (vers 1880) puis aux activités industrielles et urbaines croissantes (vers 1940).

Si l'état actuel de contamination n'est pas inquiétant, l'essor touristique et industriel nécessite une étude plus approfondie et un suivi régulier des conditions sédimentologiques et géochimiques de l'environnement côtier.

## RÉFÉRENCES

- [1] Atlas des départements français d'Outre mer II, la Martinique, CNRS et IGN, 1977.
- [2] Battistini, R., 1978. Les récifs coralliens de la Martinique, comparaison avec ceux du Sud-Ouest de l'océan. Indien, Cah. Orstom, sér. océanogr. XVI (2), 157–177.
- [3] Bouchon, C., Laborel, J., 1986. Les peuplements coralliens des côtes de la Martinique (mission Corantilles). Ann. Inst. Océanogr. Monaco 62 (2), 199–237.
- [4] Buat-Ménard P., 1979. Influence de la retombée atmosphérique sur la chimie des métaux en trace dans la matière en suspension de l'Atlantique nord, thèse État, univ. Paris-VII, 434 p.
- [5] Bloom A., 1977. Atlas of sea-level curves, Inter. Geol., Correlation Programme Project, 61, Sea-level Project.
- [6] Brown, G., 1961. The X-Ray identification and Crystal Structures of Clay minerals. Mineral Soc. (Clay Minerals Group), Londres, p. 544.
- [7] Carruesco C., Jouanneau J.M., Lapaquellerie Y., 1982. Source et diffusion des oligo-éléments métalliques dans le bassin d'Arcachon (côte atlantique française), *Oceanol. Acta*, no. SP, 87–93.
- [8] Castaing P., Assor R., Severac J., Weber O., 1985. Qualité des eaux et des sédiments dans la baie de Pointe-à-Pitre (Guadeloupe), rapp. Cordet, DGO, univ. Bordeaux, A 75, 80 p.
- [9] Castaing, P., Assor, R., Jouanneau, J.M., Weber, O., 1986. Heavy metal origin and concentration in the sediments of the Pointe-à-Pitre Bay (Guadeloupe, Lesser Antilles). *Environ. Geol. Water Sci.* 8 (4), 154–175.
- [10] Castaing P., De Resseguier A., Julius C., Parra M., Pons J.C., Pujos M., Weber O., 1986. Qualité des eaux et des sédiments dans la baie de Fort-de-France (Martinique), rapp. Cordet, DGO, univ. Bordeaux, 84, L 0896, 93 p.
- [11] Durand F., 1996. Hydrodynamique sédimentaire sur le plateau insulaire de la Martinique, thèse univ. Bordeaux-I, 214 p.
- [12] Forstner, U., Wittman, G.T.W., 1979. Metal pollution in the Aquatic environment. Springer-Verlag.
- [13] Geister J., 1980. Morphologie et distribution des coraux dans les récifs de la mer des Caraïbes, Ann. Univ. Ferrara (N.S.) IV, (suppl.) VI, 15–37.
- [14] Henocq, C., Pujos, M., Pons, J.C., Odin, G.S., 1990. Sédimentologie du plateau insulaire nord-est de la Martinique, impact du volcanisme en région récifale ; comparaison avec la baie de Fort-de-France. *Bull. Sci. Géol.* 43 (1), 15–28.
- [15] Holtzapffel, T., 1985. Les minéraux argileux, préparations, analyses diffractométriques et détermination. *Soc. Géol. Nord* 12, 136.
- [16] Laborel, J., 1982. Formations coralliennes des Antilles françaises. *Oceanis* 8 (4), 339–354.
- [17] Lapaquellerie Y., 1975. Applications de la spectrométrie de fluorescence X en géologie marine, thèse univ. Bordeaux-I, 96, 98 p.
- [18] Lazure P., Salomon J.C., Breton M., 1995. Subtidal circulations in the Fort-de-France bay, in: Small island Marine Science and Sustainable Development, Coast. Estuar. Studies, AGU (éd.) 51, 71–82.
- [19] Müller, G., 1979. Schwermetalle in den Sedimenten, des Rheins-Veränderungen seit 1971. *Umschau* 79 (24), 778–783.
- [20] Parra M., Pujos M., De Resseguier A., Guichard S., Laborde P., Pons J.C., 1997. Qualité des eaux et des sédiments du lagon de Simsonbaai (Saint-Martin), rapp. DGO, univ. Bordeaux-I, 59 p.
- [21] Pena, G., Picot, B., 1991. Métaux traces dans les sédiments d'une lagune méditerranéenne : l'étang de Thau. *Oceanol. Acta* 14 (5), 459–472.
- [22] Pirazolli P., 1991. World atlas of Holocene sea-level changes, Elsevier, *Oceanogr. Ser.*, 58, 300 p.
- [23] Pons, J.C., 1988. Genèse et répartition des produits détritiques dans un contexte volcano-sédimentaire tropical : exemple de la Martinique et de ses bassins adjacents. *Bull. IGBA, Univ. Bordeaux-I* 43, 5–151.
- [24] Pons, J.C., Parra, M., Julius, C., 1988. Teneur en métaux lourds des sédiments fins de la baie de Fort-de-France. *Oceanol. Acta* 11 (1), 47–55.
- [25] Pons J.C., Parra M., Maillet N., 1991. Étude minéralogique et géochimique des sources terrestres et des sédiments superficiels, in : la sédimentation fine dans la baie de Fort-de-France, Influence de la minéralogie et de la géochimie des vases actuelles et sub-actuelles sur la qualité du milieu, rapp. Cons. Rég. Martinique, 109 p.
- [26] Pujos M., 1985. Compte rendu de la campagne Caracolante 2, rapp. IGBA, univ. Bordeaux-I, 33 p.
- [27] Robbe, D., 1997. Évaluation de la pollution métallique des sédiments dans les ports du littoral de Loire Atlantique. *Bull. Lab. Ponts Chaussées* 210, 77–85.

- [28] Robbe, D., Marchandise, P., Thomas, A., 1983. Détermination de l'origine des pollutions métalliques par datation des carottes de sédiments. Bull. Lab. Ponts Chaussées 127, 91–92.
- [29] Thorez J., 1976. Phyllosilicates and clay minerals, A laboratory handbook for teachers and students in clay mineralogy, Dison, Belgique, Lelotte (éd.), 90 p.
- [30] Van Impe A., 1991. Nature et conséquences de l'hypersédimentation fine dans la baie de Fort-de-France : mortalité des coraux et piégeage des métaux lourds, DES, univ. Bordeaux-I, 197 p.
- [31] Westercamp D., Tazieff H., 1980. Martinique, Guadeloupe, Saint-Martin et la Désirade, Guide géologique des Petites Antilles, Masson, Paris, 135 p.