

TRANSFERT CONTINENT-OCÉAN : ÉTUDE DU  
COLMATAGE ET DE LA CONCENTRATION EN MÉTAUX LOURDS  
EN BAIE DU MARIN (MARTINIQUE)

Yves-François THOMAS<sup>1</sup>, Corinne FEISS<sup>1</sup> & Pascal SAFFACHE<sup>2</sup>

SUMMARY

The Cul-de-sac du Marin, with its 11 km<sup>2</sup> surface area, is the largest indentation along Martinique's southern coast. Bordered to the North by Pointe Borgnesse and to the South by Pointe Marin, this haven was formerly a real plant and wildlife sanctuary. By the end of the 1970s, and especially in the beginning of the 1980s, the creation of an irrigated perimeter enabled the development of market gardening on the adjacent watersheds; since these are quite steep, fragile and scarcely covered with vegetation, the kinetic energy of the raindrops had a direct effect on them. Substantial volumes of sediment were transferred from the watersheds towards the coast. Such considerable volumes of sediment consist mainly of granular and mineralogical clay, and for the most part, gather along the coastal fringe. Based on diachronic charting as well as on satellite imagery, accretion of the coastal outline has been estimated at 15 m, which corresponds to an increase of approximately 25 hectares. Despite heavy silting, this cul-de-sac is particularly polluted since readings reveal the presence of cadmium, copper and lead. Although these metals are present in the natural environment, the measured rates in the cul-de-sac greatly surpass traditionally admitted standards. The impact of the anthropogenic factor on land is all the more harmful on the marine environment since it is sustainable and highly polluting for the trophic chain.

RÉSUMÉ

D'une superficie de 11 km<sup>2</sup> environ, le Cul-de-sac du Marin est la plus grande échancre de la côte méridionale de la Martinique. Circonscrit au nord par la Pointe Borgnesse et au sud par la Pointe Marin, ce havre était jadis un véritable sanctuaire floristique et faunistique. A la fin des années 1970 mais surtout au début des années 1980, la mise en place d'un périmètre irrigué a permis le développement de cultures maraîchères sur les bassins versants adjacents ; ces derniers étant pentus, fragiles et peu couverts par la végétation, l'énergie cinétique des gouttes de pluie les a affectés directement. D'importants volumes sédimentaires ont été transférés des bassins versants vers le littoral. Ces importants volumes sédimentaires, prioritairement constitués d'argiles granulométriques et minéralogiques, s'accumulent essentiellement le long de la frange côtière. A partir d'analyses cartographiques et d'images satellitaires, la progradation du trait de côte a été estimée à 15 m, ce qui représente un gain de 25 ha environ. En liaison avec son important envasement, le cul-de-sac du Marin montre des zones de forte concentration en métaux lourds. Les analyses réalisées indiquent la présence de plomb, de cadmium et de cuivre. Si ces métaux sont présents dans la nature, les teneurs mesurées dans le cul-de-sac dépassent largement les normes traditionnellement admises. L'anthropisation du milieu terrestre a des répercussions d'autant plus nocives sur le milieu marin, qu'elles sont durables et polluantes pour la chaîne trophique.

---

<sup>1</sup> Laboratoire de Géographie Physique « Pierre Birot », UMR CNRS 8591, 1 Place Aristide-Briand, F-92190 Meudon Cedex, France.

<sup>2</sup> Université des Antilles et de la Guyane, Département de Géographie-Aménagement, BP 7207, F-97275 Schoelcher Cedex, Martinique.

## INTRODUCTION

S'il représentait jadis un véritable sanctuaire floristique et faunistique, le Cul-de-sac du Marin est aujourd'hui fortement dégradé, puisque les usagers (pêcheurs, plongeurs, touristes, etc.) ne cessent de se plaindre de la raréfaction des coraux et des herbiers. Ces éléments étant de nature à perturber l'activité économique du cul-de-sac, la municipalité du Marin envisageait de le draguer.

La Direction Régionale de l'Environnement (DIREN) souhaitant appréhender le problème dans sa globalité finança une étude d'expertise scientifique (Saffache *et al.*, 2000b, 2001) dont l'objectif était de répondre aux questions suivantes : y a-t-il un important envasement du Cul-de-sac du Marin et, si oui, quel en est le moteur ? Quels sont approximativement les volumes sédimentaires qui s'y déposent chaque année ? Enfin, le milieu est-il pollué ?

Des méthodes cartographiques et satellitaires diachroniques, ainsi que des analyses pédologiques et sédimentologiques ont été appliquées à la baie du Marin pour préciser les relations existant entre l'activité anthropique, l'érosion des sols, l'évolution du paysage maritime et plus généralement la pollution du milieu.

## MATÉRIELS ET MÉTHODES

### LOCALISATION DE LA ZONE D'ÉTUDE ET PRÉSENTATION DES TECHNIQUES D'ANALYSE

Localisé dans la partie méridionale de la Martinique, le Cul-de-sac du Marin s'étend sur une surface de 11 km<sup>2</sup>. Circonscrit au nord par la pointe Borgnesse et au sud par la pointe Marin, son trait de côte s'étire sur une dizaine de kilomètres environ. En dépit d'une passe centrale d'une profondeur de 70 m, ce cul-de-sac est peu profond puisqu'il oscille en moyenne de - 0,1 à - 3,1 m, le long du rivage. Cette baie, qui représente la seconde plus belle échancrure de l'île et qui était jadis considérée comme un véritable sanctuaire écologique, a une importance considérable, puisqu'elle concentre de nombreuses activités économiques (usine de fabrication de peinture, entreprises de réparation navale, marina, etc.).

Pour apprécier l'évolution de la frange côtière, les trois dernières couvertures topographiques IGN (1955, 1985 et 1994) ont été ramenées à la même échelle (1 : 10 000) puis superposées. Ces techniques traditionnelles ont été affinées par une analyse diachronique des images du satellite SPOT de 1986 et de 1995. Des mesures de terrain ont complété ces analyses techniques. L'évolution bathymétrique du cul-de-sac a été appréciée à partir de l'analyse diachronique des minutes de sonde de 1824 et de la carte marine SHOM de 1988. Les données courantologiques sont issues des rapports du Bureau Central pour les Equipements d'Outre-Mer (BCEOM, 1994).

Les concentrations en métaux lourds ont été appréhendées à partir de 65 prélèvements sédimentaires couvrant la quasi-totalité de la zone d'étude. Les métaux lourds recherchés furent l'arsenic, le cadmium, le cuivre, le plomb, le strontium, le vanadium et le zinc. Pour faciliter le traitement des échantillons et l'analyse des premiers résultats, seuls le plomb, le cuivre et le cadmium ont été étudiés. L'échantillonnage a été réalisé en plongée, à la verticale d'une bouée dont le positionnement était déterminé par GPS avec une précision de  $\pm 3$  m ; la collecte des sédiments a été effectuée par carottage sur une profondeur de 100 mm au moyen d'un tube PVC de 80 mm de diamètre. Chaque échantillon a été séché et séparé en cinq fractions destinées à l'analyse granulométrique (Coulter LS 230), la suscepti-

bilité magnétique (Bartington MS2 Meter avec capteur de laboratoire MS2B), l'analyse carbone – azote (Thermo Quest Flash 1112) et les métaux lourds. 4 carottes de 2 m destinées à l'analyse des teneurs en Cs137 ont également été prélevées.

Les échantillons destinés à la détermination des métaux lourds ont été analysés par ICP-MS (*Inductively Coupled Plasma – Mass Spectrometry*) à l'Université de Montpellier II. Les échantillons comme les standards de référence géochimiques (Basalt BR) ont été dissous par mélange HF-HNO<sub>3</sub>-HClO<sub>4</sub>, évaporés à sec puis dissous dans 2 ml de HNO<sub>3</sub> concentré. Après transfert dans des flacons de polypropylène de 30 ml, la préparation finale témoin a été amenée par dilution avec de l'eau ultra-pure à un rapport de poids échantillon/solution donné et addition d'un poids connu de solution étalon interne. Cette solution ultra-pure utilisée par étalonnage interne est enrichie en In et Bi. Lors du passage en ICP-MS deux solutions de calibrage sont analysées tous les 8 échantillons puis utilisées pour calculer les concentrations moyennes pour les échantillons analysés. Les précisions analytiques atteintes par cette technique sont généralement de 2-4 %. L'exactitude a été évaluée par analyse d'une base de données de référence. Les résultats obtenus montrent une bonne corrélation avec les valeurs de référence.

#### CARACTÉRISTIQUES DES BASSINS VERSANTS ET SENSIBILITÉ DU SOL À L'ÉROSION

Le Cul-de-sac du Marin est circonscrit par cinq bassins versants qui couvrent une surface totale de 20 km<sup>2</sup> : 11 km<sup>2</sup> sont pâturés, 1,3 km<sup>2</sup> sont couverts de forêts, 1,1 km<sup>2</sup> sont cultivés (maraîchage) et un peu moins de 7 km<sup>2</sup> sont urbanisés. Ces bassins versants sont constitués de vertisols (Albrecht *et al.*, 1991, 1992), c'est-à-dire de sols argileux (60 à 70 % environ), constitués de particules de très petite taille (< 2 µm), faiblement agrégées entre elles en raison de leur couverture cationique saturée en sodium (Colmet Daage, 1969). Quand l'énergie cinétique des gouttes de pluie et l'eau de ruissellement les affectent, les particules fines qui les composent (les argiles) se mettent en suspension et sont vulnérables car facilement mobilisables.

Sous forêt et pâturage, le couvert végétal protège le substratum pédologique de l'énergie cinétique des gouttes de pluie et les teneurs élevées en matières organiques augmentent la résistance des vertisols à l'érosion ; la mise en culture provoque une disparition des couverts végétaux, une diminution rapide des teneurs en matières organiques et une augmentation de la sensibilité du sol à l'érosion. Selon leur mode d'occupation, ces sols sont plus ou moins protégés et résistants.

L'érodibilité des vertisols a été mesurée grâce à un simulateur de pluie (Valentin & Asseline, 1978) sur des placettes expérimentales de 1 m<sup>2</sup>. Trois intensités ont été utilisées : 55, 80 et 150 mm.h<sup>-1</sup>. Après simulations, l'eau de ruissellement a été recueillie aux exutoires des placettes dans le but de quantifier sa charge sédimentaire. L'érodibilité des vertisols est exprimée en kg.ha<sup>-1</sup> ou en t.ha<sup>-1</sup>.

#### ÉVALUATION DES PERTES EN TERRE À L'ÉCHELLE ANNUELLE ET À CELLE DES BASSINS VERSANTS

Pour passer des pertes en terre obtenues au mètre carré durant des pluies standardisées (55, 80 et 150 mm.h<sup>-1</sup>), aux pertes en terre annuelles, certaines estimations ont été nécessaires. À partir des modèles de Météo France, l'intensité

moyenne journalière des pluies au Marin a été estimée à  $20 \text{ mm.h}^{-1}$  pour une durée moyenne annuelle de 100 h.

Les pluies étant simulées sur des parcelles dont l'inclinaison moyenne correspond globalement à celle des bassins versants, le passage du mètre carré à l'hectare puis à la surface du bassin versant, s'est fait par simple extrapolation. Bien que délicate, cette procédure permet d'obtenir des ordres de grandeur raisonnables.

## RÉSULTATS

### ÉVOLUTION DU TRAIT DE CÔTE, DES FONDS MARINS ET POLLUTION DU MILIEU

Durant ces cinq dernières décennies le trait de côte a subi d'importantes modifications, puisqu'en de nombreux secteurs il s'est déplacé vers la mer. Cette progradation moyenne a été estimée à 15 m, ce qui représente un gain d'une surface de 25 ha environ. Dans le fond de la baie et particulièrement aux exutoires des rivières (Trou Manuel et O'Neil) la progradation est beaucoup plus importante, puisqu'elle oscille entre 35 et 55 m. Parallèlement, un exhaussement des fonds marins a été constaté, puisqu'en 1824 la profondeur avoisinait 4 m dans la baie des Cyclones contre 2 m environ en 1988 ; les mêmes ordres de grandeur se retrouvent vers le canal O'Neil.

La carte des concentrations montrent que le plomb ( $\text{Pb}_{208}$ ) se localise prioritairement dans le fond du cul-de-sac – et particulièrement à l'embouchure de la ravine Trou Manuel – et voit sa teneur varier de 32 à 96 ppm (Fig. 1). Le cuivre ( $\text{Cu}_{63}$ ) qui n'est présent que sous la forme d'un panache ondulé – du quartier de la Dupré à l'embouchure du canal O'Neil – présente des teneurs plus élevées, puisqu'elles oscillent entre 66 et 114 ppm (Fig. 2). Enfin, le cadmium ( $\text{Cd}_{111}$ ) qui n'est présent que sous forme de taches isolées – à l'embouchure de la rivière Trou Manuel et à l'ouest de la Pointe Cailloux – voit sa teneur osciller entre 0,3 et 0,5 ppm (Fig. 3). Toutes ces teneurs sont toutefois 4 à 12 fois plus importantes que celles présentes à l'état naturel dans le milieu (Pons, 1988).

### COURANTOLOGIE

Les courants qui affectent le Cul-de-sac du Marin sont faibles, puisqu'ils oscillent entre  $0,2$  et  $2 \text{ cm.s}^{-1}$  (BCEOM, 1994-a). Même lorsque leur vitesse est plus importante [lors des phases paroxysmales (tempêtes tropicales, ouragans) ils peuvent atteindre  $3$  à  $8 \text{ cm.s}^{-1}$  (BCEOM, 1994-b)], ils ne sont jamais convenablement orientés pour évacuer massivement des sédiments hors de la baie.

### ESTIMATION DES PERTES EN TERRE ANNUELLES

Les mesures de simulation de pluie indiquent que, pour une même pluie de récurrence centennale ( $150 \text{ mm.h}^{-1}$ ), la perte en terre d'un sol est de  $0,09 \text{ t.ha.h}^{-1}$  sous forêt, de  $0,1 \text{ t.ha.h}^{-1}$  pour les pâturages et de  $1,1 \text{ t.ha.h}^{-1}$  pour une culture maraîchère. En se basant sur une valeur moyenne d'intensité de pluie de  $20 \text{ mm.h}^{-1}$  pour une durée moyenne annuelle de 100h, les pertes en terre sont de  $1,2 \text{ t.ha}^{-1}.\text{an}^{-1}$  sous forêt,  $2 \text{ t.ha}^{-1}.\text{an}^{-1}$  sous pâturage et  $6 \text{ t.ha}^{-1}.\text{an}^{-1}$  sous maraîchage.

### ESTIMATION DES PERTES EN TERRE À L'ÉCHELLE DU BASSIN VERSANT

Sachant que les bassins versants du Marin sont constitués de  $1,3 \text{ km}^2$  de forêts, de  $11 \text{ km}^2$  de pâturages et de  $1,1 \text{ km}^2$  de surfaces cultivées, les pertes en terre

annuelles sont de 156 t pour les forêts, 1 600 t pour les pâturages et 660 t pour les surfaces cultivées.

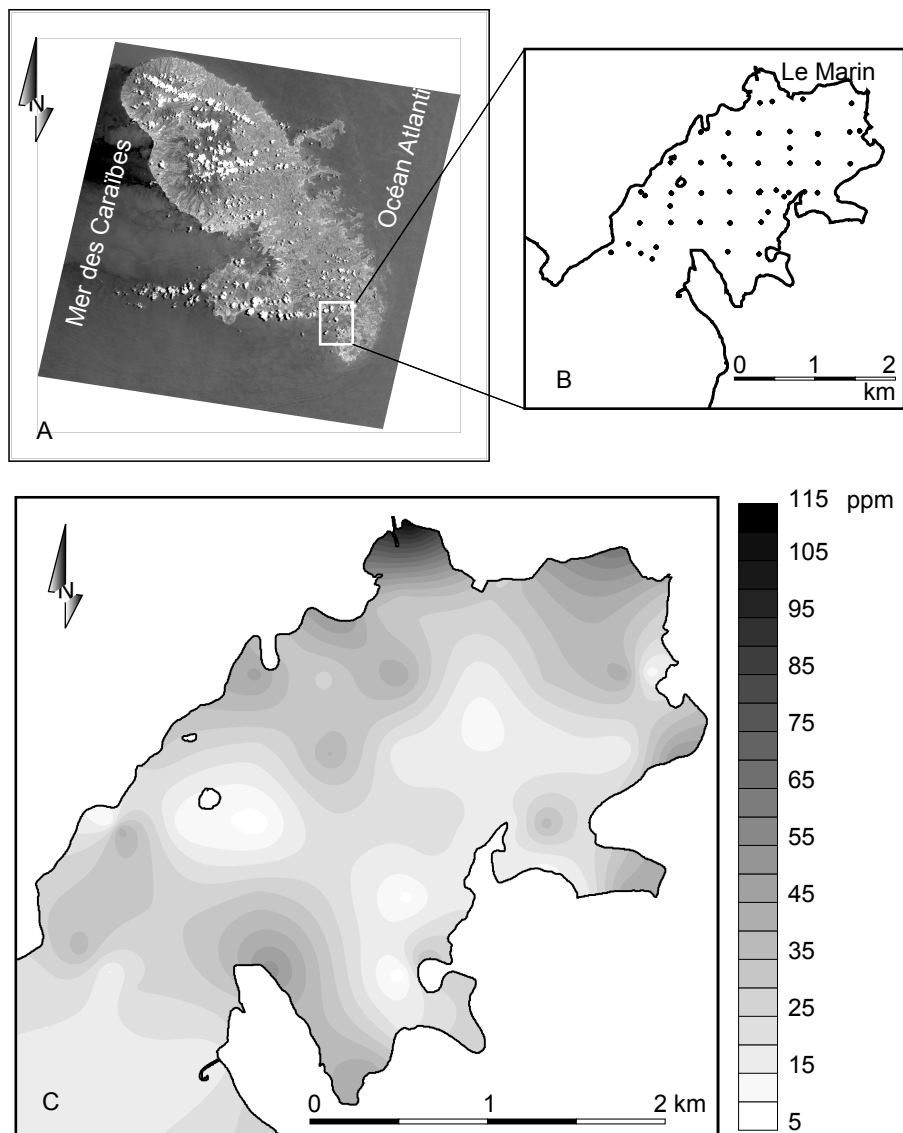


Figure 1. — A - Localisation de la baie du Marin sur le littoral sud-est de la Martinique. B - Plan d'échantillonnage. C - Représentation des teneurs en  $Pb_{208}$  des sédiments de surface.

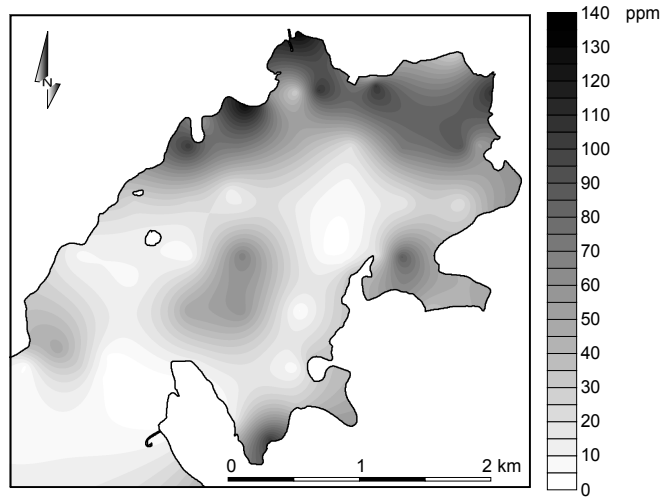


Figure 2. — Représentation des teneurs en  $\text{Cu}_{63}$  des sédiments de surface de la baie du Marin (Martinique).

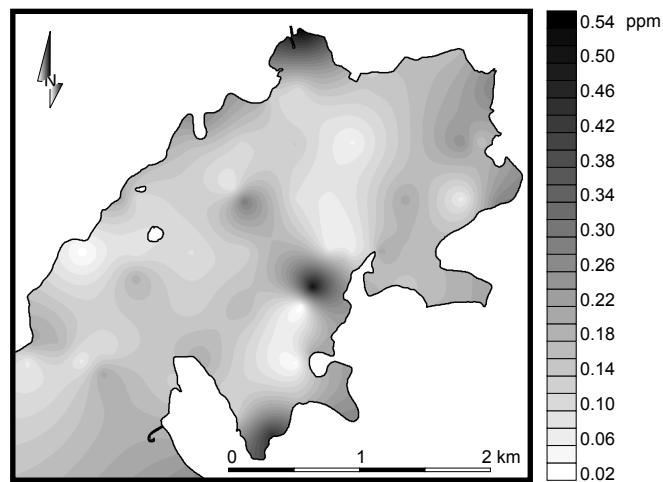


Figure 3. — Représentation des teneurs en  $\text{Cd}_{111}$  des sédiments de surface de la baie du Marin (Martinique).

## DISCUSSION

Au début des années 1980, la mise en place d'un périmètre irrigué a permis le développement de cultures maraîchères dans la partie méridionale de la Martinique. Ainsi, des surfaces qui jusqu'alors étaient recouvertes d'une végétation naturelle furent défrichées et plantées en canne à sucre, en banane, en melon, etc. Dans la

commune du Marin, c'est une surface moyenne de 1,1 km<sup>2</sup> qui a ainsi été mobilisée. Cette surface n'étant plus protégée par un couvert végétal, elle a été affectée par l'énergie cinétique des gouttes de pluie. L'agrégation du sol étant naturellement faible (Albrecht *et al.*, 1991, 1992), les eaux de ruissellement exportent, chaque année, un important volume sédimentaire en direction du littoral ; les sédiments ainsi exportés s'accumulent le long du trait de côte et favorisent ainsi la progradation du rivage et l'exhaussement des fonds marins.

Il n'a pas été possible de quantifier avec précision le volume sédimentaire qui se dépose chaque année dans la baie puisque les données pluviométriques utilisées sont approximatives : 20 mm.h<sup>-1</sup> pendant 100 h. Ces mesures permettent cependant de comparer l'érodibilité des sols en fonction de leur mode d'occupation. Il est constaté que les 11 km<sup>2</sup> de surfaces pâturées ne libèrent que 1 600 tonnes de sédiments alors que, sur des surfaces dix fois plus petites (1,1 km<sup>2</sup>), le volume sédimentaire exporté n'est que deux à trois fois moins important (660 t.an<sup>-1</sup>). Même si l'intensité utilisée pour les calculs était plus proche de la réalité, cela ne changerait rien au fait que c'est sur moins de 6 % de la surface occupée par les cinq bassins versants (1,1 km<sup>2</sup>) que partent près de la moitié des particules terrigènes qui s'accumulent ensuite dans la baie. La progradation du trait de côte et l'exhaussement des fonds marins résultent de l'importante érodibilité des surfaces verticales anthropisées.

Ces sédiments se déposent durablement dans la baie, car les espèces végétales qui colonisent le rivage (*Rhizophora mangle* et *Avicennia germinans*) freinent leur transit grâce à leurs racines échasses et leurs pneumatophores ; le long du rivage les faibles profondeurs (-0,1 à - 3,1 m) favorisent l'atterrissement des particules sédimentaires. Enfin, les courants étant peu marqués (0,1 à 2 cm.s<sup>-1</sup>) et prioritairement orientés vers le fond de la baie, ils maintiennent les sédiments le long du trait de côte. Les récifs barrières jouent aussi un rôle déterminant, car en brisant les houles ils génèrent des étendues marines relativement calmes.

Les fortes teneurs en plomb se localisent prioritairement à l'embouchure de la ravine Trou Manuel, cette dernière a longtemps servi de collecteur aux eaux usées urbaines. Depuis, la situation s'est améliorée, puisqu'une station d'épuration de grande capacité a été construite sur le territoire de la commune du Marin. Il n'empêche que, pendant plusieurs décennies, les particules de plomb se sont accumulées dans le milieu, le polluant fortement.

Les fortes teneurs en cuivre se localisent dans la partie la plus confinée de la baie et particulièrement à l'emplacement de la Marina (600 places à quai et autant de bateaux qui mouillent au large), les peintures antifouling des bateaux qui libèrent des micro-particules polluantes en sont peut-être responsables.

Enfin, la présence du cadmium (présent en grande quantité dans les huiles de vidange) à l'embouchure de la ravine Trou Manuel semble s'expliquer par la proximité d'une zone artisanale au sein de laquelle se trouvent des entreprises de mécanique automobile et navale. A proximité de la Pointe Cailloux, l'existence d'une décharge sauvage, au sein de laquelle s'accumulent des moteurs de bateaux et de voitures, semble expliquer les fortes teneurs en cadmium. Le caractère isolé des taches de cadmium résulte aussi de la faible courantologie.

## CONCLUSION

L'évolution récente de la baie du Marin est à mettre en parallèle avec l'anthropisation générale du milieu (culture intensive et urbanisation anarchique) qui

est à l'origine du caractère érosif des sols et de la pollution. Pour tenter de pallier ces dynamiques, ne serait-il pas nécessaire de développer de nouvelles procédures de gestion et d'aménagement de l'espace, particulièrement dans les secteurs qui induisent des transferts terre-mer importants ? Cela s'avère d'autant plus nécessaire que toutes les baies de l'île fonctionnent selon le même modèle (Saffache, 2000b). Développer de nouvelles procédures d'aménagement respectueuses de l'environnement constitue l'une de nos futures pistes de recherche.

## RÉFÉRENCES

- ALBRECHT, A., RANGON, L. & BARRET, P. (1991). — *Matière organique et propriétés des sols cultivés à la Martinique*. S.L. : S.N. (rapport ORSTOM).
- ALBRECHT, A., RANGON, L. & BARRET, P. (1992). — Effet de la matière organique sur la stabilité structurale et la détachabilité d'un vertisol et d'un ferrisol (Martinique). *Cahiers ORSTOM (série Pédologie)*, volume XXVII, 1: 121-133.
- BUREAU CENTRAL POUR LES ÉQUIPEMENTS D'OUTRE-MER. (1994a). — *Schéma d'aménagement de la Baie du Marin, 1<sup>ère</sup> phase : Etude diagnostique*. S.L. : B.C.E.O.M.
- BUREAU CENTRAL POUR LES ÉQUIPEMENTS D'OUTRE-MER. (1994b). — *Etude des courants et de la qualité des eaux dans le Cul-de-sac du Marin*. S.L. : B.C.E.O.M.
- COLMET DAAGE, A. (1969). — *Carte des sols des Antilles*, 1 : 20.000, Paris : ORSTOM.
- FEISS, C., THOMAS, Y.-F., BONTE, PH., ANDRIEU, P. & SAFFACHE, P. (2002). — La géochimie, un traçage des transferts continent-océan : l'exemple de trois traceurs environnementaux dans la baie du Marin. *Geomorphology: from expert opinion to modelling*, Université de Strasbourg, poster.
- HARTMANN, C. (1997). — *Influence de la profondeur de travail du sol sur la dégradation des vertisols calco-magnésio-sodiques de la Martinique et conséquences sur la production de melon*. Rapport final d'un projet CORDET, IRD Martinique-Caraïbes.
- HARTMANN, C., BLANCHART, E., ALBRECHT, A., BONNETON, A., PARFAIT, F., MAHIEU, M., GAULLIER, C. & NDANDOU, J.F. (1998). — Nouvelles techniques de préparation des vertisols en culture maraîchère à la Martinique. incidences pédologiques et agro-économiques. *Agriculture et Développement*, 18: 81-89.
- 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. *Bulletin de l'Institut de Géologie du Bassin d'Aquitaine*, 43: 5-151.
- SAFFACHE, P., BLANCHART, E. & HARTMANN, C. (1998). — De l'érodibilité des sols cultivés à l'engraissement des côtes (exemple du Cul-de-sac du Marin). Pp. 93-104, in: *Les petits systèmes isolés face aux risques naturels*. Actes du 123<sup>ème</sup> Congrès des Sociétés Historiques et Scientifiques.
- SAFFACHE, P., BLANCHART, E., HARTMANN, C. & ALBRECHT, A. (1999). — L'avancée du trait de côte de la baie du Marin (Martinique) : conséquence de l'activité anthropique sur les bassins versants alentour. *C. R. Acad. Sc. Paris*, 328: 739-744.
- SAFFACHE, P. (2000a). — *Le littoral martiniquais : milieux, dynamiques et gestion des risques*. Villeneuve d'Ascq : Presses Universitaires du Septentrion.
- SAFFACHE, P. (2000b). — Un engraissement côtier résultant de l'érosion des bassins versants cultivés : exemple de la baie du Galion à la Martinique, *Oceanologica Acta*, 23: 159-166.
- SAFFACHE, P., THOMAS, Y.-F. & BRITHMER, R. (2000a). — Evolution des mangroves et des herbiers de la baie du Marin (Martinique) entre 1950 et 1994, *Actes du XXVI<sup>ème</sup> Colloque de l'Union des Océanographes de France*, in: *Journal de Recherche Océanographique*, 26, fascicule 3: 197-201.
- SAFFACHE, P., THOMAS, Y.-F., VANKATAPEN, C. & DURANTY, J. (2000b). — *Etude de l'envasement de la baie du Marin (Martinique)*. Rapport commandé par le Ministère de l'Environnement et de l'Aménagement du Territoire, multigraphié.
- SAFFACHE, P., THOMAS, Y.-F., VANKATAPEN, C. & DURANTY, J. (2001). — *Le Cul-de-Sac du Marin (Martinique) : éléments pour une gestion et un aménagement raisonnés*. Paris : Editions Naturellement (Collection Sciences).
- SERVICE HYDROGRAPHIQUE ET OCÉANOGRAPHIQUE DE LA MARINE. (1988). — *Carte bathymétrique de l'île de la Martinique*, 1 : 35.000, Paris : SHOM.
- VALENTIN, C. & ASSELINE, J. (1978). — Construction et mise au point d'un infiltromètre à aspersion. *Cahiers ORSTOM (série Hydrologie)*, XV: 321-348.