

Géomorphologie et hydrologie de la lagune de la Manche-à-Eau (Guadeloupe, Antilles françaises)

Geomorphology and hydrology of the Manche-à-Eau lagoon (Guadeloupe, French West Indies)

Murielle Mantran*, Robert Hamparian**, Jean-Luc Bouchereau***

Résumé

La lagune de la Manche-à-Eau, écosystème d'eau saumâtre, est soumise non seulement quotidiennement à la marée et aux alizés, mais aussi régulièrement aux ouragans. On cherche à mettre en relation son évolution morphologique avec la fréquence des cyclones. Sur la photographie aérienne de l'Institut Géographique National de 2004, on a superposé un quadrillage selon une maille de 90 m dans un Système d'Information Géographique. Les 37 points géoréférencés ainsi obtenus ont été bornés sur le terrain avec un système de positionnement global. D'après les photographies aériennes, le dessin des contours rend possible le suivi morphologique depuis 1950. La profondeur est mesurée en 1 437 points avec une perche et une sonde bathymétrique. L'orientation des courants est établie au flot et au jusant avec des penons fixés aux 37 points et une boussole. On a mesuré le marnage moyen et calculé les volumes d'eau renouvelés à chaque marée. Le suivi cartographique montre une stabilisation des contours et de l'île de La Fourche due à l'effet de protection des palétuviers entre eux (effet « bouclier ») et au sol (tourbe racinaire) et une agrégation ou désagrégation des îlots selon le passage des ouragans. D'après la bathymétrie actuelle, le comblement de la lagune et le creusement des chenaux sont constatés. Les courants généraux sont gouvernés en surface par les alizés, vents de SSE-NNW, et par le va-et-vient de la marée. Les descentes et remontées d'eau obligent les courants à emprunter en profondeur les passages situés le long des berges et autour des dépressions et des hauts-fonds. Le volume d'eau de la lagune renouvelé à chaque marée (14,8 %) combiné à l'hydrodynamisme actif et varié tend à vivifier cet écosystème.

Mots clés : trait de côte, bathymétrie, courantologie, hydrodynamisme, renouvellement d'eau, ouragan, mangrove.

Abstract

The Manche-à-Eau lagoon, brackish water ecosystem is subject not only daily to tide, trade winds but regularly to hurricanes. Morphological evolution is connected with the occurrence frequency of hurricanes. On the 2004 Institut Géographique National aerial photo, a 90 m grid was superimposed in a geographical information system. The 37 georeferenced sampling spots thus obtained were marked out on the field with a global positioning system. From aerial photos, the outline drawing allows morphological follow up since 1950. Depth was measured at 1437 spots with bathymetric perch and prob. Stream direction was established during stream and ebb tide using ribbon fixed upon the 37 spots and a compass. Water volumes at low and high tide allowed the calculation of the water renewal rate at each tide. The mapping follow-up shows outline and island stabilization because of the protecting effect of the mangrove trees ('shield' effect) and soil (root peat), small island aggregation/disaggregation depending on hurricane passing. The present bathymetry shows the lagoon filling and the channels digging. General streams are subject to trade-winds (SSE-NNW) and the coming and going tide movements. The up and down water generates a stream channel situated along the lagoon sides and around dips and sandbanks. The water renewal volume (14.8 %) at each tide, combined to an active and varied hydrodynamics, tends to improve the water quality in this system.

Key words: coastal outline, bathymetry, stream structure, hydrodynamics, water renewal, hurricane, mangrove.

* Université des Antilles et de la Guyane, UFR-SEN, Département de Biologie, UMR 7138, Systématique, Adaptation, Évolution, Campus de Fouillole, BP 592, F-97159 Pointe-à-Pitre cedex, France. Courriel : murielle.mantran@wanadoo.fr

** Université des Antilles et de la Guyane, UFR-SEN, Département de Biologie, Laboratoire de Biologie Marine, Campus de Fouillole, BP 592, F-97159 Pointe-à-Pitre cedex, France. Courriel : robert.hamparian@univ-ag.fr

*** Université des Antilles et de la Guyane, UFR-SEN, Département de Biologie, UMR 7138, Systématique, Adaptation, Évolution, Campus de Fouillole, BP 592, F-97159 Pointe-à-Pitre cedex, France. Courriel : jean-luc.bouchereau@univ-ag.fr

Abridged English Version

The *Manche-à-Eau* lagoon, surrounded mostly by red *Rhizophora mangle* mangrove, is periodically affected by paroxysms of cyclonic activity: Inès (1966), Hugo (1989), Marilyn (1995), Lenny (1999). The passage of hurricane Hugo over Guadeloupe in 1989 actually modified the physical aspect of the lagoon, greatly impacting the development (Imbert, 2002) of the partially destroyed mangrove. No bathymetric or current studies of the region have been performed since that of Assor (1987). To better understand the organization and functioning of the *Manche-à-Eau* lagoon, the present paper has three goals: (i) Using a diachronic analysis, verify whether a morphological evolution of this ecosystem has taken place between the period ante Inès to post Lenny; (ii) Study the bathymetry and currents of the region, comparing the general circulation regime in 2007 with the literature; and (iii) Describe the impact of morphogenetic events since on the lagoon outline.

Located in the French West Indies, in Guadeloupe (16°16'36"N; 61°33'24"W), the *Manche-à-Eau* lagoon lies in a depression originally formed by a rill running all the way to the Rivière Salée, itself a tributary of the regressive period underwater valley that culminates in the Grand Cul-de-Sac Marin. The lagoon is greatly influenced by the sea due to its low altitude (-1.3 m to +10 m). The two factors influencing its daily movements are the tide and the wind (Assor, 1987). The general regime of the tides in Pointe-à-Pitre is semi-diurnal. The tide and southeast surface winds together cause water to circulate on the surface and at the bottom.

The bottom of the lagoon is mapped using the coastline observed in a 2004 aerial photograph from the Institut Géographique National. The coastline is traced at the *R. mangle* colonization limit, and analyzed using the geographical information system Mapinfo 7.5. We then selected 37 sampling points based on a 90-meter gridding of the map. The lagoon's morphology and surface conditions can be compared before and after Hugo by visual examination of geometrically rectified aerial photographs. Specifically, we inspect Institut Géographique National photographs taken in 1950, 1968-69, 1984, 1999 and 2004; Société Cartographique d'Informatique Acrophotogrammme photographs taken in 1995; and Google Earth® photographs taken in 2003.

To obtain a precise bathymetric map, we considered the hydrographic zero and spatio-temporal delays between tidal data obtained by the Service Hydrographique et Océanographique de la Marine in Pointe-à-Pitre. We geo-referenced data on-site using a global positioning system MAP168 depth sounder, measuring the topography of the lagoon's bottom at all 37 points, as well as along the sides and diagonals of the grid when in motion for each depth variation of 10 cm read. Among the mangrove roots along the lagoon's edge, the depth was measured using a scaled pole. In order to establish a map of the bottom currents, their direction and orientation was measured by placing fixed vanes at the 37 points during the flood and ebb maximums of a complete spring tide cycle. The angle read on the compass indicates the orientation of the vane to within 10°.

Diachronic analysis of the seven aerial photographs between 1950 and 2004 reveals the morphological evolution of the lagoon. The bathymetric data were spatialized by nearest-neighbor interpolation using the Vertical Mapper software from Mapinfo®. To eliminate artifacts, contours were chosen with a 50 cm interval. We then used Mapinfo to calculate the water volumes in the lagoon at high and low tide. A 3D bathymetric representation of the *Manche-à-Eau* lagoon was obtained by creating a digital elevation model of the data with the Surfer® software and the bathymetric data. The mean rate of water renewal was calculated using the mean volumes of entering and exiting water during flood and ebb. We took into account the mean value of the tidal range during the study period (January to June 2007), calculated from the Service Hydrographique et Océanographique de la Marine data.

The lagoon measures 970 m by 620 m, has a circumference of 4661 m, and covers an area of 281.7×10^3 m². Its outline has not changed between 1950 and 2004. An island located at the entrance of the lagoon has an area of 155 m², and was also stable from 1950 to 2004. Morphological evolution of the *Manche-à-Eau* lagoon from 1950 to 2004 is mainly characterized by alternating periods of aggregation and disintegration among the islets. Bathymetric interpolation at the 1427 geographical reference points resulted in a contour map with 20 cm intervals. This map reveals two large regions of shallow water to the northwest and south, as well as three depressions with depths greater than 2 m. The maximum depth (3 m) is found in the western depression. All four major depressions are still present, but the one located to the north has fragmented. They have also grown shallower by about 50 cm. The region number of shallow waters has increased from 2 to 3, whereas the mean depth of shallow regions has decreased from 1.5 m to 1 m. In the main channel, the maximum depth has evolved from 2.75 m to 3 m.

The water surface area of the *Manche-à-Eau* lagoon is 265 140 m². Its mean depth is 1.2 m, and its capacity is 318 170 m³. The total surface of the lagoon and the contained volume are 260 400 m² and 316 300 m³ respectively. The mean volumes of entering (at high tide) and exiting (at low tide) water are 47 725 m³ and 46 872 m³ respectively. The mean rate of water renewal is 14.8%. As the ecosystem is poorly confined (Guélorget and Perthuisot, 1983), the frequent inflow of seawater greatly benefits local organisms by bringing in various oligoelements.

The coast and island together comprise 155.1 m² of vegetation, rendering the lagoon less sensitive to hurricanes. The high density of trees brings mutual protection, the so-called 'shield effect' (Imbert, 1996). Observed changes in the morphology of islets can be attributed to major weather events of the cyclonic type during the past 50 years. Such changes are only possible under paroxysmal conditions. The alternating aggregation/disintegration of mangrove islets can be correlated with the passage of hurricanes over Guadeloupe, a cycle revealing the destruction and re-colonization of mangroves. Violent winds combined with intense precipitation could destroy the mangrove. Cyclonic swell and tide could empty the lagoon and wash sediment from the channels.

Comparing the bathymetric conditions of 1987 and 2007, it appears that the lagoon has undergone a filling process. The four major depressions are shrinking, the four zones of shallow water have widened, and the two channels have grown deeper. The lagoon is characterized by three types of mass circulation: surface, tidal and internal bottom currents.

Introduction

La Manche-à-Eau est une lagune située en Guadeloupe dans les Antilles françaises (fig. 1a). Elle fait partie de celles appartenant à la mangrove bordant le Grand Cul-de-Sac Marin (fig. 1b). Celui-ci est un lagon de la côte nord de l'Archipel de la Guadeloupe, de plus de 10 km de long dans sa partie médiane, entouré par une barrière récifale de 29 km de long. Il se situe entre les deux îles, la Grande-Terre calcaire d'origine récifale à l'est et la Basse-Terre volcanique à l'ouest (Guilcher et Marec, 1978), séparées par un chenal marin dénommé la Rivière Salée qui s'ouvre au sud sur le Petit Cul-de-Sac Marin (fig. 1b). La formation du lagon Grand Cul-de-Sac Marin remonte au Pléistocène et s'est poursuivie au cours de la transgression holocène. Ce lagon serait un compartiment affaissé, séparant les deux îles (Camprasse, 1972). Sa profondeur varie entre 20 cm et 20 m et son marnage entre 30 et 40 cm. La lagune de la Manche-à-Eau communique, par la Rivière Salée, avec la côte occidentale « vaseuse, protégée, ennoyée et à mangrove » (Camprasse, 1972) de ce lagon du Grand Cul-de-Sac Marin, dont les sédiments sont formés de vases très fines renfermant moins de 45 % de carbonat de calcium et plus de 55 % d'éléments terrigènes (Guilcher et Marec, 1978). Cet écosystème à mangrove composé uniquement de palétuviers rouges, *Rhizophora mangle*, et en permanence inondé, se caractérise par des eaux saumâtres chaudes, une faible oxygénation du sédiment et un sol instable. La mangrove est un milieu stabilisateur assurant une excellente protection et augmentant la résilience écologique des écosystèmes après le passage des ouragans, mais qui reste fragile à l'action des forçages naturels (Imbert, 2002). Elle est périodiquement affectée par des événements climatiques extrêmes, cyclones et tempêtes tropicales : Inès (1966), Hugo (1989), Marylin (1995), Lenny (1999). Une étude bathymétrique et courantologique a été menée par R. Assor (1987). Toutefois, depuis, aucune autre étude du même type n'a été conduite sur ce milieu lagunaire. En revanche, cet écosystème est considéré par beaucoup de biologistes comme lieu privilégié de leurs suivis d'études.

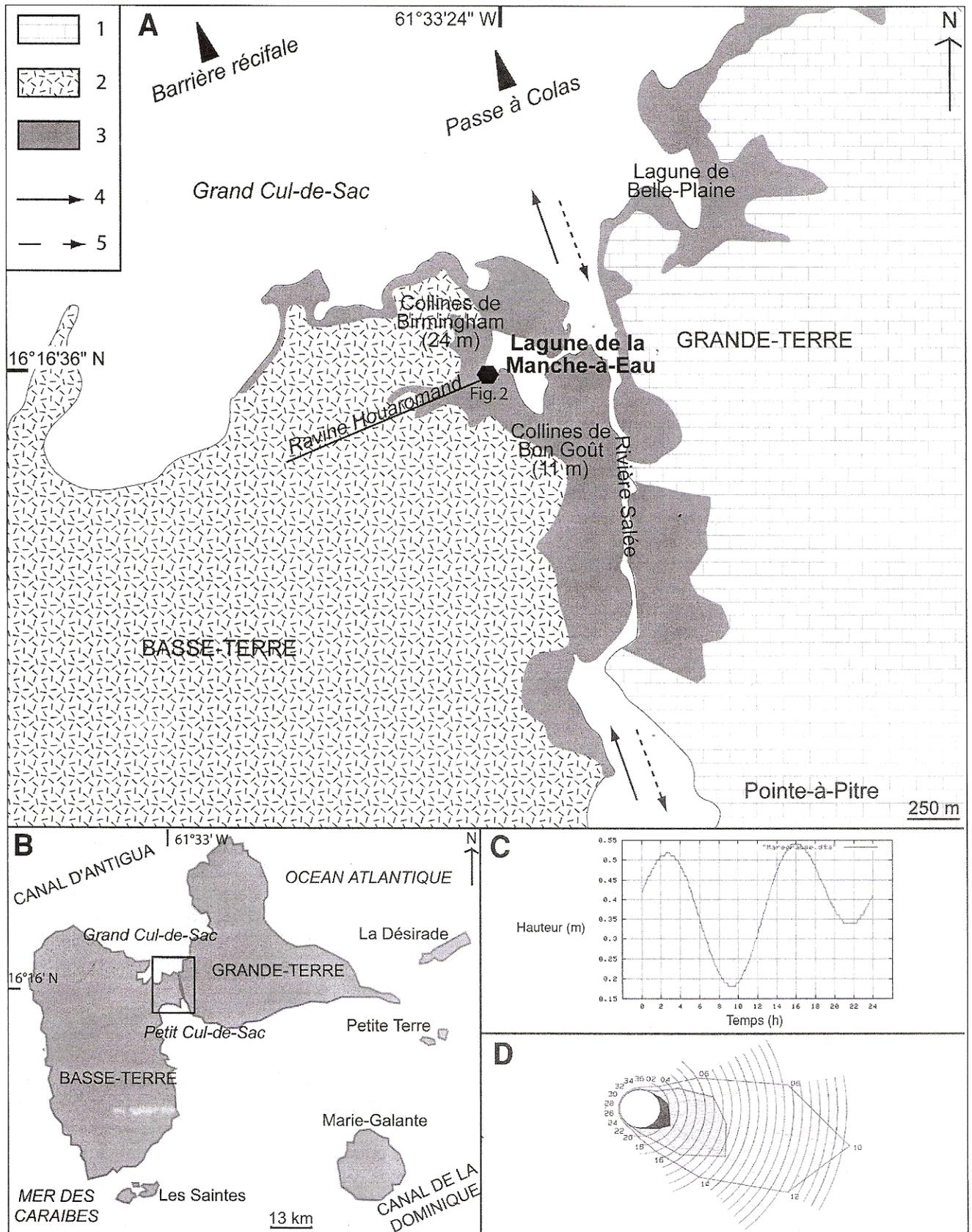
Ce travail a pour objectifs de mieux comprendre le régime hydrologique général actuel de l'écosystème lagunaire avec sa bathymétrie et sa courantologie, et de déterminer si son évolution morphologique peut être couplée avec le passage des cyclones depuis la période antérieure à Inès jusqu'à celle postérieure à Lenny.

Description générale de la lagune

La lagune de la Manche-à-Eau (fig. 1a) se situe sous la latitude de 16°16'36"N et la longitude de 61°33'24"W. La

Rivière Salée est un bras de mer qui relie le Grand Cul-de-Sac Marin au Petit Cul-de-Sac Marin et sépare les îles de la Basse-Terre et de la Grande-Terre. Elle communique avec le chenal principal de la lagune orienté NE-SW (fig. 1b). D'après R. Assor (1987), cette lagune occupe une zone déprimée entourée par les petites collines de Bon-Goût (11 m) et de Birmingham (25 m). Elle s'est formée à partir d'une « ravine » qui s'écoulait entre les deux collines citées jusqu'à la Rivière Salée : la ravine Houaromand (fig. 1b et fig. 2). Cette dernière est l'un des six tributaires de la Passe à Colas, vallée sous-marine formée lors d'une période régressive correspondant à une phase froide du Maximum glaciaire ou du Dryas récent, qui se jette dans le Grand Cul-de-Sac Marin via la Rivière Salée (Guilcher et Marec, 1978). La lagune est apparue dans une zone située à faible altitude, entre -1,3 m et +10 m, d'après le Service Hydrographique et Océanographique de la Marine (SHOM). De ce fait, elle est soumise à l'influence de la mer avec la présence actuelle d'un chenal de marée et d'un drain alimentant sporadiquement la lagune. Cette dernière est née dans un méandre de cette ravine selon le processus classique de méandrage (Derruau, 2001). Ceci explique la morphologie allongée de la lagune qui s'étire du SSE vers le NNW. Ses dimensions sont réduites : 910 m de longueur, 425 m de largeur, entre 1,5 m et 2 m de profondeur, et une surface totale de 260 000 m² (Assor, 1987).

La marée et le vent influencent le fonctionnement de la lagune. D'après nos observations préalables à marée descendante, la Mer des Caraïbes se vide dans l'Atlantique plus vite par le Canal de la Dominique que par celui d'Antigua puisque le Grand Cul-de-Sac Marin est plus enclavé que le Petit Cul-de-Sac Marin (fig. 1b). De ce fait, la Rivière Salée s'écoule du nord vers le sud. À marée montante, le processus s'inverse. Cette dynamique explique la présence d'un faible marnage dû à la rencontre des deux ondes océaniques en provenance de l'Atlantique Nord et de la Mer des Caraïbes. La marée opère une influence quotidienne dans la lagune. Les prévisions marégraphiques sont disponibles via le SHOM pour le Petit Cul-de-Sac Marin (fig. 1b). D'après R. Assor (1987), le régime général des marées à Pointe-à-Pitre est semi-diurne. J.-R. Vanney (1991) évoque deux types de régimes : un bimodal, dit semi-diurne et un quasi-unimodal, dit diurne. Les conséquences de ces mouvements généraux de marée dans la Rivière Salée sont un décalage temporel des étales de basse mer et de haute mer et de l'amplitude du marnage, tant pour des marées de vive-eau que de morte-eau dans la lagune. L'étale de marée basse est retardé tandis que celui de marée haute est avancé par rapport aux marégrammes prévisionnels du SHOM (fig. 1c). À marée descendante, le Petit Cul-de-Sac Marin se vide avant la lagune alors qu'à marée montante, la lagune se remplit avant ce dernier, certainement en raison d'apports d'eau du Grand Cul-de-Sac Marin à travers la frange de mangrove et non pas directement par ceux de la Rivière Salée via les chenaux. Les étales de marée dans la lagune par rapport à ceux du chenal sont également décalés. La lagune ajuste son niveau par rapport à celui du chenal lors des étales de marée haute et basse. À marée montante, le chenal se remplit et il



est à l'étale de marée haute avant la lagune. Lorsque le chenal est à l'étale, la lagune n'a pas tout à fait eu le temps de se remplir complètement. Le chenal et la lagune ajustent alors leur niveau. Le même phénomène se produit à marée

basse. D'après R. Assor (1987), il existe des différences d'amplitude maximales de marnage de l'ordre de 50 à 60 cm entre les données du Grand Cul-de-Sac Marin et celles du Petit Cul-de-Sac Marin (SHOM). Dans la lagune, le marna-

Fig. 1 – La lagune de la Manche-à-Eau en Guadeloupe (Antilles Françaises). A, B : Localisation de la lagune (1 : calcaire d'origine récifale de l'île de la Grande-Terre ; 2 : sols volcaniques de l'île de la Basse-Terre ; 3 : mangrove littorale ; 4 : courant de marée montante ; 5 : courant de marée descendante ; 6 : direction générale des alizés) ; C : Marégramme à Pointe-à-Pitre du 16 avril 2007 (Extrait du site internet du SHOM, www.shom.fr, autorisation de reproduction n° 318/2008) ; D : Rose des vents observée à la station météorologique de l'aéroport du Raizet (Pointe-à-Pitre) de 1981 à 2000 (C/Météo France).

Fig. 1 – *The Manche-à-Eau lagoon in Guadeloupe (French West Indies)*. A and B: Location of the lagoon (1: Grande-Terre island Reef limestone; 2: Basse-Terre island volcanic soil; 3: coastal mangrove; 4: up-tide stream; 5: down-tide stream; 6: trade winds); C: Tide graph at Pointe-à-Pitre on April 16th 2007 (authorized by Service Hydrographique et Océanographique de la Marine); D: Compass card observed at Le Raizet airport meteorological station (Pointe-à-Pitre) from 1981 to 2000 (C/Météo France).

ge ne dépasse pas 40 cm en période normale. Les vents dominants dans la Caraïbe sont les alizés de secteur NE, avec une moyenne de 107° et des variations du SE au NE. La station météorologique du Raizet, la plus proche de la Manche-à-Eau, donne une moyenne des vents, entre 1981 et 2000, de 107° environ, soit des vents d'est (fig. 1d) alors que dans la lagune, les vents dominants sont de secteur SE, soit une direction de 340° . Ceci s'explique par la morphologie allongée de la Manche-à-Eau. L'action combinée de la marée et

du vent de surface de SE entraîne une circulation d'eau en surface et au fond.

L'influence de la pluviométrie et des cyclones est également forte. Ainsi, l'influence des alizés et le décalage de la zone de convergence intertropicale sont à l'origine de fortes précipitations avec des variations annuelles traduites par une saison sèche de janvier à mars : la période anticyclonique, et une saison humide de juillet à octobre : l'hivernage ou saison cyclonique (Bleuse et Mandar, 1996). Cette alternance favorise l'érosion du sol puis l'apparition du lessivage aboutissant au transport de sédiments fins dans la lagune, à faciès de boue silteuse, après les épisodes de fortes pluies ou d'importantes marées (Assor, 1988). La pluviométrie annuelle moyenne calculée de 1961 à 1990 est de 1 791 mm à la station du Raizet (Météo France, 2003). Par ailleurs, la Guadeloupe se situe directement sur la trajectoire des cyclones et des tempêtes tropicales. Ces derniers constituent un forçage naturel provoquant des changements morphologiques plus marqués que lors des pluies périodiques. Le relief volcanique de la Basse-Terre est accusé. Il subsiste toutefois une frange littorale étroite où l'implantation de la mangrove est possible seulement sur une bande de quelques mètres, en raison du faible marnage. Parmi les quatre espèces de palétuviers présents en Guadeloupe, à savoir le palétuvier noir *Avicenia germinans*, blanc *Laguncularia racemosa*, gris *Conocarpus erectus* et rouge *Rhizophora mangle*, c'est ce der-



Fig. 2 – Ravine Houaromand (localisée en figure 1).

Fig. 2 – *Houaromand gully* (located in figure 1).

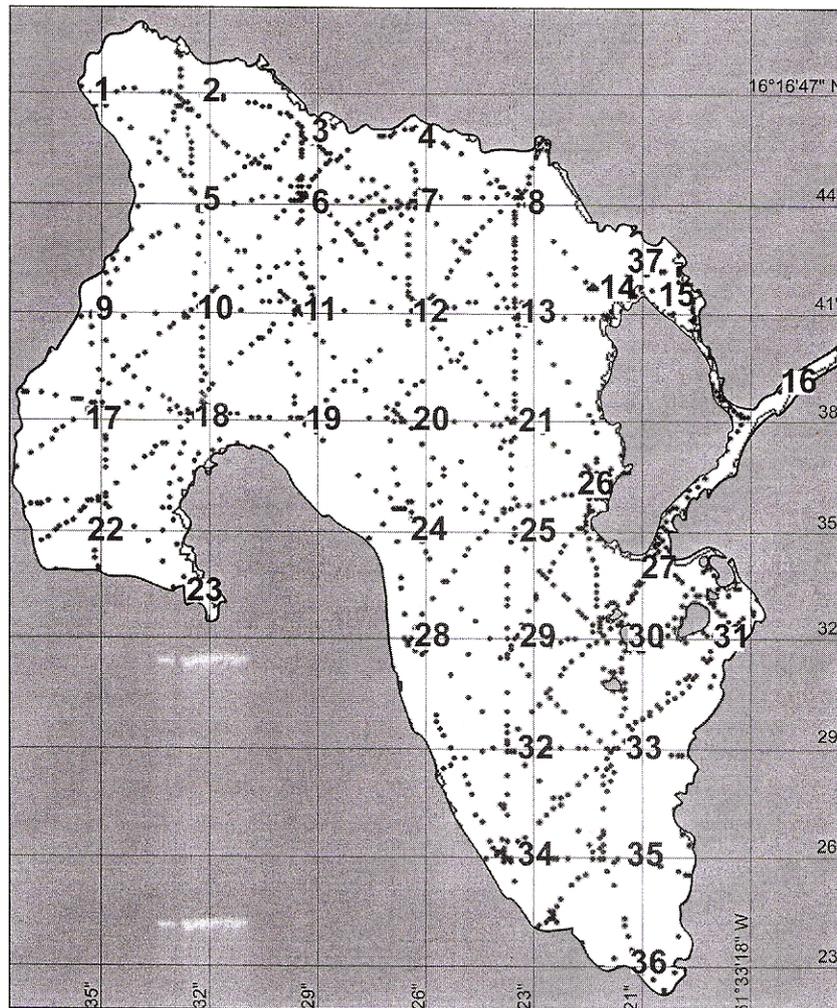


Fig. 3 – Répartition des 37 points remarquables et localisation des points bathymétriques mesurés dans la lagune de la Manche-à-Eau.

Fig. 3 – Distribution of the 37 sampling spots and location of the bathymetric spots measured in Manche-à-Eau lagoon.

nier qui est prédominant sur le pourtour de la lagune. D'après D. Imbert (2002), ce type de végétation est fragile, notamment sous l'action des cyclones qui affectent la lagune en détruisant périodiquement la mangrove. De plus, c'est le palétuvier rouge qui est l'espèce la plus sensible au fort vent puisqu'elle occupe la zone littorale de front.

Matériels et méthodes

Fond cartographique et stations de mesures : on utilise la limite de colonisation des *Rhizophora mangle* comme trait de côte, observé sur la photographie aérienne de l'Institut Géographique National datant de 2004, pour réaliser le fond cartographique de la lagune qui est géoréférencé dans un Système d'Information Géographique (Mapinfo 7.5®). Une fois la lagune cartographiée, des points remarquables peuvent être sélectionnés à partir d'un quadrillage de 90 m de côté, soit 0°0'3" pour mesurer la bathymétrie et observer l'orientation des courants (Mantran, 2007). Cette distance, arbitrairement

choisie, offre la possibilité de couvrir la lagune avec un nombre suffisant de points d'échantillonnages répartis de façon homogène, tout en tenant compte des temps d'intervention selon les contraintes liées au rythme des marées. On aboutit ainsi, à un total de 37 points numérotés de 1 à 37 (fig. 3).

Suivi morphologique, bathymétrie, courantologie : par comparaison visuelle des photographies de l'Institut Géographique National en 1950 (première prise de vue disponible), 1968-69, 1984, 1999, 2004 (dernière prise de vue disponible) et de la Société Cartographie Informatique Aérophoto Carib pour 1995, il est possible de considérer une éventuelle modification morphologique. Les comparaisons des situations, à chacune des dates précédentes, se font à partir de l'analyse diachronique de ces photographies aériennes orthorectifiées avec le logiciel ER Mapper®. Le sondeur GPS MAP168 permet de géoréférencer des données sur le terrain, comme un système de positionnement global classique, et de connaître la topographie des fonds marins à 10 cm près avec une sonde bathymétrique. Une perche, graduée à la même précision que la sonde bathymétrique, permet également la mesure de la profondeur. Celle-ci est mesurée aux 37 points, sur la bordure de la lagune et sur des transects correspondant aux côtés et diagonales du quadrillage. Les mesures ont été prises à chaque variation de 10 cm de profondeur et tiennent compte des variations du plan d'eau liées à la marée. Le but étant d'obtenir une carte bathymétrique précise, il faut considérer le décalage temporel et spatial, respective-

ment par rapport aux données marégraphiques de Pointe-à-Pitre (SHOM) et au zéro hydrographique. Pour évaluer ce décalage temporel de marée, il faut tenir compte des données obtenues par R. Assor (1987), lesquelles expriment un retard d'une heure à une heure trente au maximum. À marteau, le décalage considéré est d'une heure, tandis qu'il se réduit à trente minutes à vive-eau. Le zéro topographique se situe à 15 cm au-dessus du zéro hydrographique. Cette différence de 15 cm correspond à la hauteur d'eau la plus faible à marée basse dans le Petit Cul-de-Sac Marin (SHOM). Une fois les différents décalages connus, toutes les mesures bathymétriques sont ramenées au zéro topographique puisque les profondeurs obtenues lors de plusieurs missions ne sont mesurées ni au même moment, ni à la même hauteur de marée. L'observation du sens et de l'orientation des courants, sur chacun des 37 points, s'effectue au moment où les courants de marée sont les plus forts, c'est-à-dire au maximum de flot et de jusant (Vanne, 1991), les jours de marée de vive-eau. La détermination du sens des courants à chaque point a

été faite à l'aide de penons fixés au piquet correspondant. La mesure de l'orientation des courants est prise à la boussole. L'angle lu, à 10° près, correspond à l'orientation du penon. Ces sens et orientations de courants mesurés permettent d'établir une cartographie des courants de fond à chaque point.

Interprétation et Modèle Numérique de Terrain : la carte bathymétrique est dressée avec le logiciel Mapinfo. Pour spatialiser, il est nécessaire d'interpoler en estimant la valeur d'attribut pour des mesures non prises situées à l'intérieur des limites définies par les positions bathymétriques effectivement mesurées à l'aide du supplément Vertical Mapper de Mapinfo. Chaque méthode d'interpolation est simulée à partir des 37 points remarquables afin de sélectionner la plus convenable. Les résultats obtenus pour chacune des méthodes sont comparés avec ceux des autres points observés pour la validation de l'estimation calculée, la plus proche de nos observations en ces points. La méthode retenue est celle des plus proches voisins (*nearest neighbours*) qui représente le mieux la réalité. L'interpolation ainsi faite sous Mapinfo aboutit à la construction d'une carte en isolignes d'une équidistance de 50 cm qui constitue le Modèle Numérique de Terrain de référence. À partir de ce dernier, les volumes d'eau, repris dans le logiciel Surfer 7®, ont été calculés.

Renouvellement de l'eau : la contenance de la Manche-à-Eau à marée basse est estimée en prenant en compte la superficie et la profondeur moyenne de la lagune calculée à partir des mesures bathymétriques connues, à l'exception de celles des bordures qui, à cause de leur faible valeur, sous-estimeraient le calcul de la moyenne. Le volume d'eau à marée basse est également calculé à partir du Modèle Numérique de Terrain qui tient compte de la véritable topographie du fond lagunaire. Ceci permet une amélioration de la précision du résultat. Afin de calculer le taux de renouvellement de l'eau, il s'agit de déterminer le volume moyen d'eau entrant et sortant lors du flot et du jusant. La moyenne de marnage à marée montante et descendante durant la période d'étude, de janvier à juin 2007, est calculée à partir des données du SHOM. Les résultats entre prévisions et mesures du marnage peuvent différer du fait des précisions différentes utilisées par le SHOM

à 5 cm près et dans la présente étude au centimètre près. Les observations et calculs effectués permettent de connaître plus précisément le cycle de marée dans la Manche-à-Eau. De plus, une estimation moyenne du renouvellement de l'eau est possible.

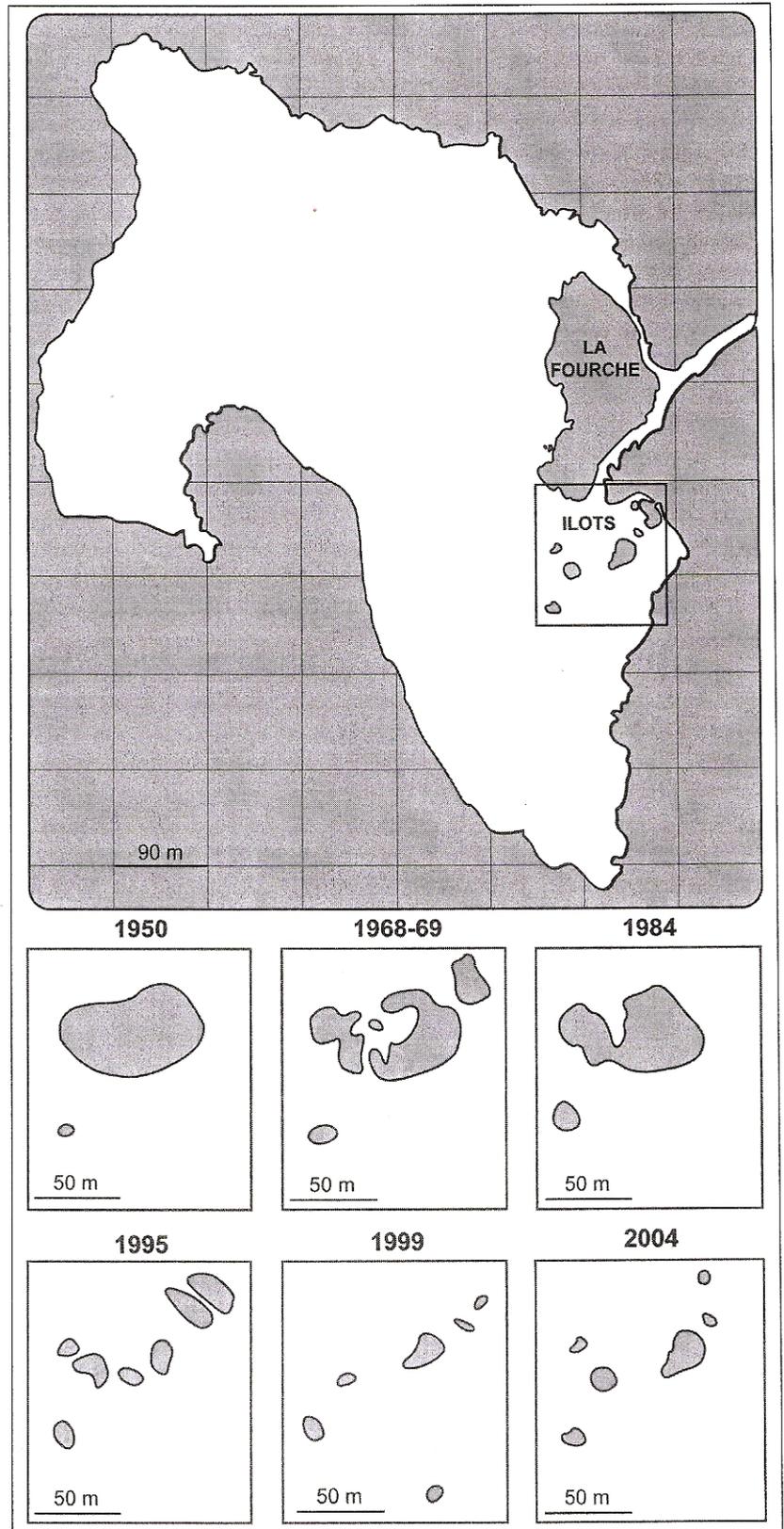


Fig. 4 – Évolution morphologique des îlots entre 1950 et 2004.

Fig. 4 – Morphological evolution of the small islands between 1950 and 2004.

Résultats

Les cartes morphologiques de la Manche-à-Eau dessinées d'après les photographies aériennes datant de 1950, 1968-69, 1984, 1995, 1999 et 2004, permettent de distinguer son évolution morphologique de 1950 à 2004. Les plus grandes longueurs et plus grandes largeurs de la lagune ne varient pas. La lagune mesure 970 m x 620 m, a une circonférence de 4 661 m et une superficie de 281 700 m² et ses contours n'ont pas changé entre 1950 et 2004. L'île de La Fourche (fig. 4), située à l'entrée de la lagune, est stabilisée. Elle a une superficie de 155 m². Toutefois, les changements sont discernables pour les îlots présents à l'entrée sud au niveau du chenal principal. D'après les six prises de vues aériennes disponibles (fig. 4), le nombre d'îlots et leur surface totale sont passés de 2 (3 084 m²) avant (1950), à 5 plus petits (2 727 m²) après (1968-69) le cyclone Inès de 1966, de 2 (2 609 m²) avant (1984), à 7 (1 346 m²) après (1995) le cyclone Hugo de 1989 et la tempête tropicale Marilyn de 1995, puis à 6 (562 m²), avant (1999) jusqu'à la tempête tropicale Lenny de 1999. Ce nombre est resté à 6 (769 m²) en 2004. D'après notre comptage sur le terrain en 2007, celui-ci a diminué à 5 îlots.

Afin de déterminer la bathymétrie et la circulation des masses d'eau, la profondeur a été relevée à partir de 1 437 points géographiquement référencés dans un Système d'Information Géographique (fig. 3) : 37 points remarquables, ceux situés sur les transects (1 136) et ceux localisés sur le pourtour de la lagune (254). L'interpolation de la bathymétrie aux 1 437 points aboutit à la création d'une carte en isolignes de 50 cm de précision mettant en évidence deux grands secteurs à hauts-fonds au NW et au sud, et trois dépressions de profondeur supérieure à 2 m. La profondeur maximale (3 m) se trouve dans la dépression ouest. La surface totale de l'eau calculée dans la Manche-à-Eau est de 265 140 m². La profondeur moyenne est de 1,2 m. L'estimation du contenu en eau est donc de 318 170 m³. La surface totale de la lagune et le volume contenu entre le Modèle Numérique de Terrain de référence et le zéro topographique calculés sont respectivement de 260 400 m² et de 316 300 m³. En période normale, l'eau est renouvelée pendant les cycles de marée. Les observations et mesures sur le marnage ont été effectuées lors d'une marée de vive-eau et une marée de morte-eau, en marquant le niveau de l'eau sur un piquet. Respectivement, le marnage mesuré est de 38 cm dans le chenal principal pour 40 cm prévus par le SHOM et le deuxième jour, il est respectivement de 8 et 10 cm. Le marnage moyen de janvier à juin 2007 est d'environ 0,18 m. Les volumes moyens d'eau entrants et sortants, calculés avec Surfer, sont de 46 872 m³. Le taux de renouvellement moyen de l'eau est de 14,8 %.

Discussion

Morphologie de la lagune

Les palétuviers rouges, *Rhizophora mangle*, entourant la Manche-à-Eau se développent sur un sol tourbeux, constitué à plus de 50 % par de la matière organique plus ou moins

décomposée. L'île de La Fourche est constituée de tourbes racinaires. L'aération du sol n'est pas suffisante pour permettre une bonne décomposition de ces débris végétaux. La matière organique produite par la végétation peut s'accumuler. Les tourbes racinaires très fibreuses sont produites au pied des palétuviers rouges et constituent un substrat meuble et stable (Office National des Forêts, 1988). Les contours de la lagune et de l'île de La Fourche, constituée de 155 m² de végétation, sont moins sensibles aux cyclones car les grands arbres protègent les plus petits en formant une voûte et donc diminuent leur mortalité en atténuant la violence du vent. C'est l'« effet bouclier » (Imbert, 1996).

Au cours de la présente étude, la morphologie générale de la lagune n'a pas varié depuis 1950. En revanche, la modification observée du nombre d'îlots (fig. 4) et de leur surface serait à l'évidence la conséquence des passages destructeurs des cyclones survenus depuis Inès en 1966. En effet, les deux îlots ont été fragmentés en cinq après son passage puis, entre 1968 et 1984 soit en seize ans, ceux-ci certainement sous l'effet de l'accumulation sédimentaire entre eux (Association des sédimentologues français, 1989), se sont rassemblés en deux îlots (voire peut-être un seul) avant l'intervention d'Hugo en 1989. On les retrouve fragmentés à nouveau en sept îlots en 1995. Les événements majeurs déstructurent tous les îlots, en affectant plus les petits que les grands. Cependant, les événements de plus faibles amplitudes, de type tempêtes tropicales, ont uniquement une influence sur les îlots les plus sensibles, c'est-à-dire les plus petits. D'après les superficies des îlots, 11,6 % de la surface de mangrove a disparu à cause du cyclone Inès et 48,4 % à cause d'Hugo. Il s'agissait des plus grands îlots (fig. 4). Les deux tempêtes tropicales, Marilyn et Lenny, bien que de plus faibles amplitudes que les cyclones, ont beaucoup affecté les petits îlots restant (diminution de 58,2 % de la surface) du fait de leur plus grande fragilité.

La cause des changements morphogènes est l'inversion des conditions hydrodynamiques provoquant d'importantes remises en circulation et pertes de sédiment avec pour conséquence la désagrégation des îlots aussi observée récemment dans les mangroves de Martinique (Flower et Imbert, 2006) et de Guyane (Fromard *et al.*, 2004). De tels changements ne sont possibles, dans ce type de milieu, qu'en situation paroxystique et sans « effet bouclier » (Imbert, 1996). C'est l'analyse diachronique des îlots, corrélée à la série historique des cyclones, qui permet la mise en évidence de ruptures temporelles se manifestant par une destruction de la végétation interrompant le lent processus de colonisation de la lagune par la mangrove. Sans aucun passage de cyclone entre 1999 et 2004, la surface des îlots a augmenté de 36,8 %. Les ruptures peuvent s'expliquer par différents phénomènes liés directement aux cyclones : vents violents, importantes précipitations, houle et marée cycloniques (Bouchon *et al.*, 1991 ; Hamparian, 1994 ; Morell, 1989a, 1989b, 1990). Le vent est un facteur prédominant dans la destruction de la mangrove. *Rhizophora mangle* est le palétuvier le plus sensible à cet agent (Imbert, 1996) et donc le plus fragile lors du passage d'un cyclone. L'impact destructeur des cyclones peut affecter l'état de la mangrove pour des années

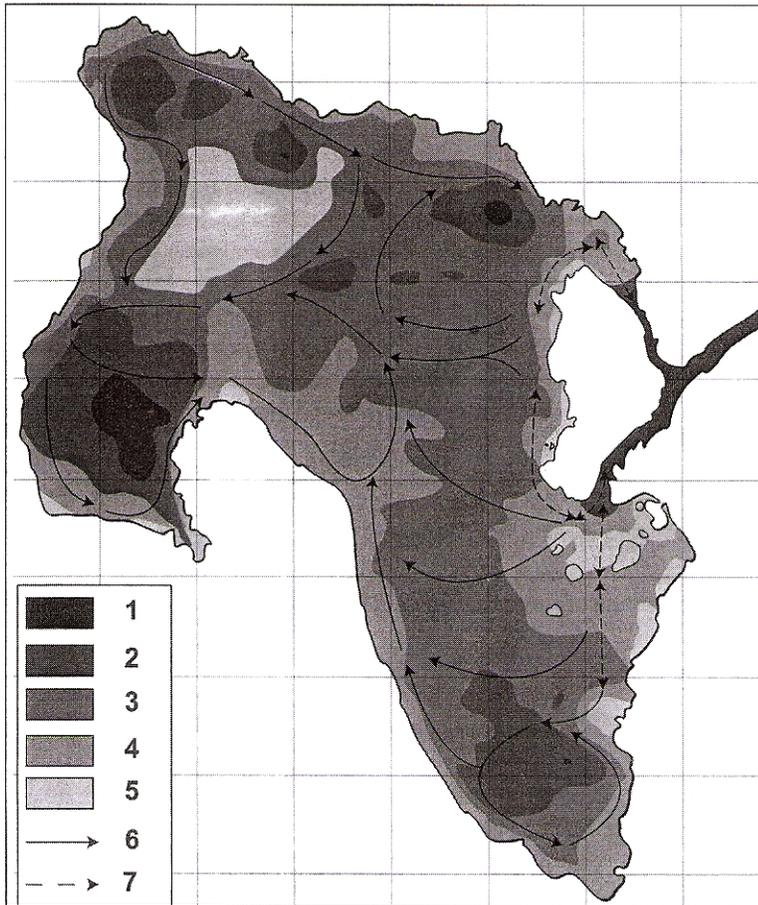


Fig. 5 – Courantologie et bathymétrie de la lagune de la Manche-à-Eau en 2007. 1 : [0 - 0,5[m ; 2 : [0,6 - 1[m ; 3 : [1,1 - 1,5[m ; 4 : [1,6 - 2[m ; 5 : [> 2[m ; 6 : circulation générale des courants ; 7 : courants de marée.

Fig. 5 – Water circulation and bathymetry of Manche-à-Eau lagoon in 2007. 1 : [0 - 0.5[m ; 2 : [0.6 - 1[m ; 3 : [1,1 - 1,5[m ; 4 : [1,6 - 2[m ; 5 : [> 2[m ; 6 : general circulation of currents ; 7 : tide currents.

(Imbert *et al.*, 2000). Ceci a été observé dans les forêts de petite stature en mangrove aux Petites Antilles (Imbert *et al.*, 2000), en forêt sèche au Sri Lanka et aux Îles Vierges (Dittus, 1985 ; Reilly, 1991), et en forêt inondable à Porto Rico (Frangi et Lugo, 1991).

Bathymétrie

L'ajustement des niveaux lors des étales explique que les marnages observés dans le chenal et la lagune soient les mêmes que ceux annoncés par le SHOM. Etant limité par une précision maximum de 50 cm, il ne nous est pas possible de considérer l'augmentation de la profondeur maximale de 2,8 à 3,0 m entre 1987 et 2007 comme significative. La profondeur moyenne (1,5 m) est identique dans les deux études. Les principales dépressions au nombre de quatre sont toujours présentes, mais l'une, située au nord, s'est partagée (fig. 5 et fig. 6). Leur profondeur maximale a diminué de l'ordre de 50 cm. Elles sont passées de 2,5 à 2 m pour les dépressions est, ouest et sud. Le nombre des hauts-fonds a augmenté de deux à trois, tandis que leur profondeur moyenne a diminué de l'ordre de 1,5 à 1 m. Dans le chenal principal, la profondeur maximale a varié de 2,75 à 3 m à la confluence des deux chenaux. Les différences de résultats observées peuvent s'expliquer par l'une ou les deux hypothèses suivantes : soit les mesures bathymétriques de l'étude de 1987 n'ont pas été ramenées au niveau de la marée basse contrairement à celles de la présente étude ; soit la lagune connaît un processus de sédimentation entraînant une diminution de la taille des dépressions, une augmentation de la superficie des hauts-fonds (fig. 5) et une dynamique de circula-

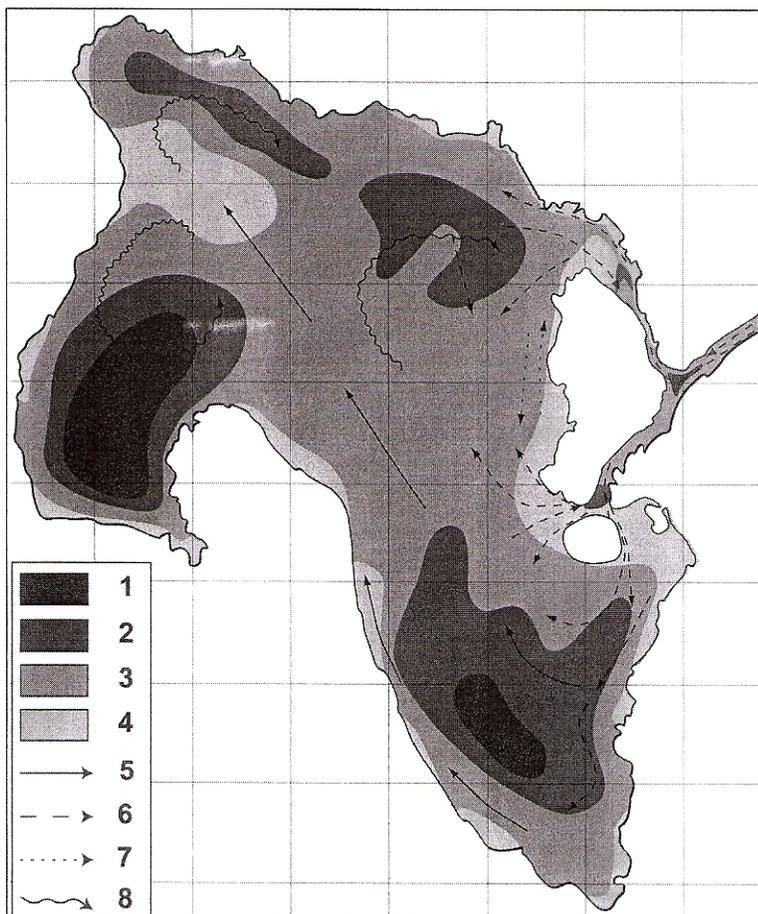


Fig. 6 – Courantologie et bathymétrie de la lagune de la Manche-à-Eau en 1987, d'après Assor. 1 : [0 - 1,5[m ; 2 : [1,6 - 2[m ; 3 : [2,1 - 2,5[m ; 4 : [> 2,5[m ; 5 : circulation générale des courants en période de vent ; 6 : courants de marée ; 7 : courants alternatifs ; 8 : cellules tourbillonnaires.

Fig. 6 – Water circulation and bathymetry of Manche-à-Eau lagoon in 1987, according to Assor. 1 : [0 - 1.5[m ; 2 : [1.6 - 2[m ; 3 : [2.1 - 2.5[m ; 4 : [> 2.5[m ; 5 : general circulation of currents due to winds ; 6 : tide currents ; 7 : alternative currents ; 8 : whirling cells.

tion sédimentaire dans les chenaux sans dépôt. Le passage d'un ouragan sur la Manche-à-Eau provoquerait un effet de pompe avec l'apparition, dans la Rivière Salée d'une dépression entre les Grand et Petit Cul-de-Sac Marin, qui vidangerait la lagune et lessiverait les canaux de leurs sédiments du fait de la vitesse subitement accrue du courant entrant ou sortant. Les deux principaux processus sédimentaires, dépôt et transport, sont présents à différents endroits de la lagune au cours des trois dernières décennies. Ceci permet de comprendre les modifications bathymétriques entre 1987 et 2007, en tenant compte de la cinétique des masses d'eau.

Courantologie

Les mouvements actuels de masse d'eau présents dans la lagune de la Manche-à-Eau s'expliquent par la juxtaposition de plusieurs types de circulations : les courants de surface, les courants de marée et les courants internes de fond (fig. 5). R. Assor (1987) a réutilisé la méthodologie de l'étude de la lagune de Belle-Plaine (Assor et Julius, 1983) pour établir la carte de la circulation des eaux dans la lagune en 1987 (fig. 6). Elle est différente de la présente étude puisque les orientations des courants ont été observées en plusieurs points à l'aide de perches et de bouchons lestés en surface et d'une drogue lestée en fonction de la tranche d'eau observée. Il distingue deux types de courants dont l'allure générale n'est pas modifiée entre 1987 et 2007 : les courants de marée dans le chenal et sur le pourtour de l'île de La Fourche, et les courants de surface influant sur la quasi-totalité de la lagune. Toutefois, l'auteur évoque des cellules tourbillonnaires dans l'ensemble de la lagune.

Les courants de surface sont soumis au vent dominant de secteur est. La masse d'eau est poussée par ce vent, mais suit le « couloir » lagunaire, orienté du SSE vers le NNW (Assor, 1987). Toutefois, toute la lagune n'est pas influencée par le vent puisque certaines zones se retrouvent sous le vent (fig. 5) : aux embouchures des chenaux, à proximité des îlots, au haut-fond situé au centre de la lagune et aux extrémités sud et ouest. Le reste est largement soumis au vent de surface. Les masses d'eau affluent obligatoirement au nord de la lagune, ce qui explique le phénomène de descente des eaux de surface vers le fond, au niveau de la bordure nord. L'influence de la marée se limite aux pourtours de l'île de La Fourche et des îlots, aux entrées principales et secondaires. Les courants de marée de surface et de fond, dans les chenaux et sur le pourtour de l'île, engendrent des mouvements de va-et-vient, issus des courants de flot et de jusant. Ces deux facteurs couplés, le vent et la marée, créent des mouvements de va-et-vient dans les chenaux. Les courants internes de fond sont le résultat de la circulation des courants superficiels et de l'allure bathymétrique de la lagune avec l'alternance de hauts-fonds et de dépressions à proximité d'un plateau lagunaire. Les dépressions et les hauts-fonds canalisent les courants de fond.

Les trois types de courants déterminent les dynamiques sédimentaires d'accumulation et de creusement. Nous avons observé que les sédiments se déposent à l'entrée et à la sortie des

chenaux et sur plusieurs zones situées à l'ouest de l'île, au SE, au centre de la lagune et à proximité du point 22 (fig. 3). Des mesures de vitesses des courants seraient à envisager pour vérifier que cette dynamique de sédimentation est bien due, respectivement, au ralentissement de la vitesse des courants, à l'effet nul du vent de surface ou à la conjugaison de ces deux facteurs. Les deux chenaux, le principal et le secondaire, se creuseraient consécutivement à la canalisation de la force des courants qui entraînerait les sédiments dans la circulation générale intérieure de la lagune. La présence du plateau lagunaire de 0,5 m de profondeur serait le résultat de la combinaison des processus de sédimentation et de creusement. L'individualisation de la zone déprimée observée au nord serait la conséquence d'un phénomène de descente des eaux de surface, poussées par les vents, qui se distribuent ensuite selon le parcours, soit en empruntant le voisinage des berges, soit en tournant autour des dépressions observées créant ainsi des courants circulaires. Ces derniers correspondraient-ils aux courants tourbillonnaires de R. Assor (1987) ?

Conclusion

Les résultats originaux et les interprétations issus de cette étude apportent des connaissances nouvelles sur les aspects de l'évolution morphologique, de la bathymétrie et de l'hydrologie dans la lagune de la Manche-à-Eau. Le suivi morphologique a été rendu possible grâce à la lecture de six photographies aériennes de 1950 à 2004. Les contours de la lagune et de l'île de La Fourche sont restés stables, alors que les îlots se sont agrégés et désagrégés selon le rythme de passage des cyclones sur la Guadeloupe. La stabilité de la mangrove est due à la présence d'un sol de type tourbe racinaire qui maintient les *Rhizophora mangle* en place. La frange de mangrove reste stable, ce qui consolide le trait de côte protégé des vents forts par l'« effet bouclier » des palétuviers. Ne bénéficiant pas de cet effet, les îlots se déstructurent lors du passage des ouragans. Le regroupement de ces îlots s'explique par la sédimentation et la recolonisation des hauts-fonds par les plantules de palétuviers rouges lors des calmes inter-cycloniques. Les événements majeurs modifient périodiquement la végétation à mangrove. Les 37 points sélectionnés suivant un quadrillage de 90 m de côté ont permis les mesures bathymétriques et courantométriques. Les mesures de topographie du fond lagunaire aboutissent à une carte bathymétrique, d'après une interpolation des données de profondeur. La profondeur moyenne de la Manche-à-Eau est de 1,5 m et la maximale de 3,0 m dans la dépression ouest.

D'après la comparaison des situations bathymétriques de 1987 et 2007, la lagune connaît un processus normal de dépôt sédimentaire avec une diminution de l'extension des quatre dépressions présentes (fig. 5 et fig. 6), un élargissement des quatre zones à plus faible profondeur, et un processus de transport sédimentaire dans les deux chenaux. Les calculs des volumes du contenu lagunaire (316 300 m³ à marée basse) et de celui renouvelé à chaque marée (46 872 m³ à partir du marnage moyen de 18 cm, établi de janvier à juin

2007) a permis de déterminer le taux de renouvellement de l'eau de 14,8 % à chaque marée. Ce taux élevé de renouvellement de l'eau d'origine marine laisse penser qu'il s'agit d'un écosystème peu confiné (Mantran *et al.*, 2007). La zonation biologique proposée par J.-L. Bouchereau *et al.* (2008), selon l'échelle de confinement (Guélorget et Perthuisot, 1983) et les travaux d'O. Guélorget *et al.* (1990) est à réviser à partir de la nouvelle carte de la circulation générale des courants établie dans cette étude (Mantran *et al.*, 2008a). En effet, les masses d'eau s'enrichissent à chaque marée en oligo-éléments divers extérieurs (Mantran *et al.*, 2008b) de façon plus importante que ce qui avait été interprété pour un système plus confiné (Bouchereau *et al.*, 2008). De plus, l'actualisation de la localisation du trait de côte est une référence en cas d'augmentation du niveau de la mer consécutivement au changement climatique planétaire, surtout dans la zone tropicale où les risques d'inondation des milieux côtiers et la multiplication du nombre des cyclones semblent accrus.

Remerciements

Les auteurs remercient les relecteurs, ainsi que J.-C. Thouret et G. Arnaud-Fassetta pour les nombreux commentaires et remarques ayant permis d'améliorer la qualité de cet article.

Références

- Association des sédimentologues français (1989)** – *Dynamique et méthodes d'étude des bassins sédimentaires*. Éditions TECHNIP, Paris, 443 p.
- Assor R. (1987)** – Impacts de la marée et du vent sur la sédimentation dans la lagune de la Manche-à-Eau (Guadeloupe). *Bulletin de l'Institut Géologique du Bassin d'Aquitaine*, 42, 53-66.
- Assor R. (1988)** – Hydrologie et sédimentologie du Grand Cul-de-Sac Marin (Guadeloupe F.W.I.). *Annales de la Société Géologique du Nord*, CVII, 221-238.
- Assor R., Julius C. (1983)** – Caractérisations sédimentologique et micropaléontologique de la lagune de Belle-Plaine (mangrove de Guadeloupe). *Extrait du Bulletin de la Société Géologique de France*, XXV-6, 889-902.
- Bleuse N., Mandar C. (1996)** – *Le régime pluviométrique de la Guadeloupe*. Service Central de la Communication et de la Commercialisation de Météo France, 9, 32 p.
- Bouchereau J.-L., Chaves P. de T., Monti D. (2008)** – Factors Structuring the Ichthyofauna Assemblage in a Mangrove Lagoon (Guadeloupe, French West Indies). *Journal of Coastal Research* 24-4, 969-982.
- Bouchon C., Bouchon-Navaro Y., Imbert D., Louis M. (1991)** – Effet de l'ouragan Hugo sur les communautés côtières de Guadeloupe (Antilles Françaises). *Annales de l'Institut Océanographique*, Paris, 67-1, 5-33.
- Camprasse P. (1972)** – *Géomorphologie littorale en Grande-Terre (la Guadeloupe)*. Centre d'Etudes de Géographie Tropicale, Bordeaux, Mémoire dactylographié, 101 p. (non publié).
- Derruau M. (2001)** – *Les formes du relief terrestre. Notions de géomorphologie*. Armand Colin, Paris, 119 p.
- Dittus W.P.J. (1985)** – The influence of cyclones on the dry evergreen forest of Sri Lanka. *Biotropica* 17, 1-14.
- Flower J.M., Imbert D. (2006)** – Recovery deficiency following tree mortality in mangroves of two Caribbean islands : field survey and statistical classification. *Wetlands Ecology and Management* 14, 185-199.
- Frangi, J. L., Lugo, A. E. (1991)** – Hurricane damage to a flood plain forest in the Luquillo Mountains of Puerto Rico. *Biotropica* 23, 324-335.
- Fromard F., Vega C., Proisy C. (2004)** – Half a century of dynamic coastal change affecting mangrove shorelines of French Guiana. A case study based on remote sensing data analyses and field surveys. *Marine Geology* 208, 265-280.
- Guélorget O., Gaujous D., Louis M., Perthuisot J.-P. (1990)** – Macrobenthofauna of lagoons in Guadeloupean mangroves (Lesser Antilles) : Role and expression of the confinement. *Journal of Coastal Research* 45, 629-636.
- Guélorget O., Perthuisot J.-P. (1983)** – *Le domaine paralique : expressions géologiques, biologiques et économiques du confinement*. Travaux du laboratoire de géologie, Presses de l'École Normale Supérieure (Paris), 16, 136 p.
- Guilcher A., Marec A. (1978)** – Le récif-barrière et le lagon du Grand Cul-de-Sac Marin (Guadeloupe, Antilles françaises). *Géomorphologie et sédiments. Oceanologica Acta* 1-4, 435-444.
- Hamparian R. (1994)** – La Guadeloupe à l'épreuve de l'ouragan Hugo : chronique d'une catastrophe annoncée. Mémoire de maîtrise, université des Antilles et de la Guyane, 151 p. (non publié).
- Imbert D., Labbe P., Rousteau A. (1996)** – Hurricane damage and forest structure in Guadeloupe, French West Indies. *Journal of Tropical Ecology* 12, 663-680.
- Imbert D. (2002)** – Impact des ouragans sur la structure et la dynamique forestières dans les mangroves des Antilles. *Bois et forêts des Tropiques*, 273, 3, 69-78.
- Imbert D., Rousteau A., Scherrer P. (2000)** – Ecology of mangrove growth and recovery in the lesser Antilles : state of knowledge and basis for restoration projects. *Restoration Ecology* 8-3, 230-236.
- Mantran M. (2007)** – Étude morphologique, bathymétrique, courantométrique et physico-chimique de la lagune à mangrove de la Manche-à-Eau en Guadeloupe ; relation avec la zonation biologique. Master professionnel en sciences et technologies, biodiversités tropicales, université des Antilles et de la Guyane, n° 2007-07, 48 p. (non publié).
- Mantran M., Hamparian R., Bouchereau J.-L. (2007)** – Relations entre géomorphologie, hydrodynamisme et assemblage des poissons dans une lagune à mangrove: la Manche-à-Eau (Guadeloupe), Antilles françaises). Résumé des Actes du « Premier Congrès franco-maghrébin de Zoologie et d'Ichtyologie », université de El Jadida, Maroc (4-7/11/2007), sous le thème « Environnement Aquatique et ses Ressources : Connaissance, Gestion et Valorisation », 34.
- Mantran M., Hamparian R., Bouchereau J.-L. (2008a)** – Morphological evolution of the Manche-à-Eau mangrove lagoon (Guadeloupe, French West Indies) from 1950 to 2004, and its 2007 bathymetry and current structure. *Gulf and Caribbean*

- Fisheries Institute-2008, 61th International Meeting, 10-14/11/2008, Gosier, Guadeloupe, France. Abstracts Book: 85-86.
- Mantran M., Hamparian R., Chaves P. de T., Bouchereau J.-L. (2008b)** – Relations entre géomorphologie, hydrodynamisme et assemblage des poissons dans une lagune à mangrove : la Manche-à-Eau (Guadeloupe, Antilles françaises). Gulf and Caribbean Fisheries Institute-2008, 61th International meeting, 10-14/11/2008, Gosier, Guadeloupe, France. Abstracts Book: 86-87.
- Météo France (2003)** – *Bulletin climatologique annuel*. Service Régional, Guadeloupe, 26 p.
- Morell M. (1989a)** – Les phénomènes hydrologiques paroxysmiques en Guadeloupe. ORSTOM Pointe-à-Pitre, 7 p.
- Morell M. (1989b)** – Quelques aspects sur les crues et inondations en Guadeloupe. Rencontres « École et Développement » des 24 et 25 octobre 1989 ; États généraux de la culture scientifique et industrielle et technique. ORSTOM-Conseil Général, Pointe-à-Pitre, octobre 1989, 8 p.
- Morell M. (1990)** – Ouragans, crues et inondations en Guadeloupe. Colloque international, 23-26 mai 1990 « Les risques naturels et technologiques dans le Bassin Caraïbéen ». Médecins du Monde – Université Antilles-Guyane, Parc Naturel de la Martinique. ORSTOM Pointe-à-Pitre, mai 1990, 22 p.
- Office National des Forêts (1988)** – *Les milieux humides du littoral guadeloupéen*. Direction régionale, Guadeloupe, 61 p.
- Reilly A.E. (1991)** – The effects of hurricane Hugo in three tropical forests in the U.S. Virgin Islands, *Biotropica* 23, 414-419.
- Vanne J.-R. (1991)** – Introduction à la géographie de l’océan, une vue nouvelle du Monde. *Oceanis*, 17, 1-2, 1-212.

Article soumis le 9 juillet 2007, accepté le 16 juin 2009.