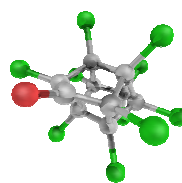


**Historique de la contamination  
des sédiments littoraux des  
Antilles françaises par la chlordécone**

**ChloSed**

**Rapport final**





<b>Numéro d'identification du rapport :</b>	<b>date de publication :</b> 2012
<b>Diffusion :</b> libre <input checked="" type="checkbox"/> restreinte <input type="checkbox"/> interdite <input type="checkbox"/>	<b>nombre de pages :</b> 93
<b>Validé par :</b>	<b>bibliographie :</b> oui
	<b>illustrations :</b> oui
	<b>langue du rapport :</b> français

### Titre et sous-titre du rapport

Historique de la contamination des sédiments littoraux des Antilles françaises par la chlordécone (ChloSed).

### Titre traduit

Historical study of the kepone contamination in the French West Indies coastal sediments (ChloSed project)

### Auteur principal

S. Robert

### Organisme / Direction / Service, laboratoire

Laboratoire Environnement-Ressources des Pertuis Charentais (LER PC L'Houmeau)

### Collaborateur(s) :

### Organisme / Direction / Service, laboratoire

Délégation des Antilles - Station du Robert  
Département RBE à Nantes

### Résumé

La connaissance de la contamination des milieux marins antillais par la chlordécone est fragmentaire. Or, la fonction potentielle de 'puits', mais également de 'source', qu'assurent les sédiments littoraux suite au transfert de la molécule des sols terrestres jusqu'aux fonds marins devrait leur conférer un rôle majeur dans leur relation avec les écosystèmes benthiques comme dans leur connexion avec les bassins versants correspondants. Du fait de la méconnaissance sédimentologique de ces milieux, le double objectif de la présente étude était de caractériser ces fonds afin de cerner l'extension spatiale de la contamination en chlordécone et de déterminer les phases temporelles de cette dernière dans la colonne sédimentaire superficielle (environ quarante premiers centimètres). Les zones d'étude choisies sont deux baies sud-atlantiques martiniquaises adjacentes, le havre du Robert, déjà retenu comme zone-atelier pour des études antérieures sur la dynamique du bassin versant, et la baie du Galion faisant l'objet de préoccupations environnementales et de travaux scientifiques prévus sur le bassin versant attenant.

Les résultats obtenus conduisent à : (i) confirmer le faible taux de contamination générale des sédiments du havre du Robert, alors que l'influence de la rivière à débit significatif de la baie du Galion marque en ce sens les sédiments proches de son exutoire ; (ii) relativiser le rôle de la matière organique liée aux particules les plus fines dans cette faible contamination marine des sédiments et enfin (iii) différencier fortement la contamination des deux baies à partir de paramètres caractéristiques. Les dynamiques sédimentaires et les cortèges minéralogiques constituent sans aucun doute des pistes explicatives aux différences de contamination des sédiments entre les deux baies dont les bassins versants sont également caractérisés par des sols présentant des composés argilo-humiques très différents.

### Abstract

*Kepone contamination of French West Indies marine environments is scarcely known. Contaminated soils particles are carried by rivers from terrestrial zones to the coastal marine sediments where they settle. Thus coastal sediments potential function as a sink for them, but also as a source of contamination for the marine biota. Therefore, they can be of major importance both in relation with the origin of the catchment area contamination and with the potential impact of this contamination on the benthic ecosystems. The objectives of this study are to characterize the marine deposits in order to define the spatial extent of the contamination and to determine the temporal stages of this contamination in the superficial sedimentary column (about one half-meter deep). Two neighbouring bays were chosen along the south-atlantic coasts of the Martinique Island, the Robert Bay, where different previous studies have been already performed, and the Galion Bay, which also present important environmental concerns.*

*The results (i) confirm the general low rate of kepone contamination in the Robert Bay superficial sediments, while the influence of the river is more pronounced in the Galion Bay for which sediment samples from the proximity of the river outfall are more contaminated, (ii) relativize the role of organic matter associated to the finer particle in the little contaminated marine sediments (iii) and at last, differentiate strongly the contamination of the two bays due to specific characteristic parameters. So, it appears that the sedimentary dynamics and mineralogical cohorts undoubtedly should explain the discrepancies in the contamination of the sediments between the two bays, also characterized by very different humus-clayed compounds in the soils of each catchment basin.*



## **Concours et participation aux travaux**

Initiés en 2009 par Jacques BERTRAND et Alain ABARNOU, les travaux de l'action de recherche ChloSed ont été réalisés en 2010-2011, à partir d'une mission de prélèvements et d'observations sur les sites d'études du 22/06/10 au 07/07/10.

Effectués avec le concours du personnel Ifremer de la délégation des Antilles-Station du Robert, des centres de Nantes et de Brest, ainsi que des stations de L'Houmeau et de La Tremblade, ils ont notamment mobilisé :

- \* Florence CORNETTE, Ifremer-La Tremblade, pour les plongées et l'aide-technique en sédimentologie ;
- \* Olivier DUGORNAY, Ifremer-Nantes, pour les plongées et la prise de vues photos et vidéos ;
- \* Xavier BODIGUEL, Ifremer-Le Robert, pour le pilotage constant de la barge de la station utilisée pour les prélèvements de le havre du Robert, ainsi que pour les échanges et conseils scientifiques.

Enfin, le bureau d'étude Impact-Mer a apporté un soutien technique à la mise en œuvre des opérations de terrain.

## **Analyses**

Analyses texturales (par microgranulométrie) et comportementales (par rhéophysique) réalisées par Ifremer-L'Houmeau et analyses de la matière organique particulaire (par CHN) par Ifremer-Nantes.

Analyses sédimentologiques (photographie, imagerie RX, porosité, spectrométrie  $\gamma$ ) et radiochronologiques réalisées par le laboratoire EPOC, université de Bordeaux I.

Analyses minéralogiques (diffraction X) réalisées par le laboratoire LEM (UMR 7569 CNRS-INPL), université de Nancy.

Analyses de chlordécone réalisées par le laboratoire Idhesa Bretagne Océane, Plouzané.

## **Financement**

La présente étude a bénéficié de financements du Ministère de l'Alimentation, de l'Agriculture et de la Pêche et d'Ifremer, par convention n° 09/5210 457/YF du 1<sup>er</sup> décembre 2009. Elle a été réalisée dans le cadre du Plan Chlordécone 2008-2010.

## **Citation**

Robert S., 2011. Historique de la contamination des sédiments littoraux des Antilles françaises par la chlordécone (ChloSed). Rapport final de convention MAAP-Ifremer. Ifremer, L'Houmeau. <http://archimer.ifremer.fr/doc/00071/18247/> 92 p.



# SOMMAIRE

<b>Introduction</b> .....	<b>9</b>
<b>[1] Façade Sud-Atlantique : contexte scientifique</b> .....	<b>11</b>
• Du cadre géomorphologique au cadre hydrodynamique .....	11-15
• Le plateau insulaire .....	16-22
• Risques de contamination par la chlordécone .....	23-28
<b>[2] Cadre de l'étude : le havre du Robert et la baie du Galion</b> .....	<b>29</b>
• Le havre du Robert et la baie du Galion : similitudes et différences .....	29-34
• Caractéristiques du havre du Robert .....	34-36
• Caractéristiques de la baie du Galion .....	36
<b>[3] Matériels et méthodes</b> .....	<b>37</b>
• Stratégie d'échantillonnage .....	38-39
• Analyses sédimentologiques .....	40-45
• Analyses chimiques .....	45-46
<b>[4] Caractérisation des sédiments littoraux contaminés</b> .....	<b>47</b>
• Havre du Robert : zone ouest .....	48-58
• Havre du Robert : zone est .....	59-64
• Baie du Galion .....	65-74
<b>[5] Discussion générale</b> .....	<b>75</b>
• Origine des sédiments .....	75-78
• Taux de sédimentation - Envasement .....	78-81
• Taux de contamination des sédiments superficiels .....	82-84
<b>[6] Conclusion</b> .....	<b>85-86</b>
<b>[7] Perspectives</b> .....	<b>87</b>
• Rôle de la dynamique sédimentaire dans la compréhension des processus de contamination en chlordécone dans les sédiments marins .....	87
• Impacts de la contamination en chlordécone du bassin versant dans les sédiments littoraux de fond de baie .....	87-89
<b>[8] Références bibliographiques</b> .....	<b>90</b>





# INTRODUCTION

La chlordécone, insecticide organochloré utilisé dans les bananeraies des Antilles françaises de 1972 à 1993, est un polluant organique persistant (POP) de la famille du DDT. Thermiquement stable, fortement résistant à la dégradation chimique ou biologique, très peu soluble dans l'eau et de très grande affinité avec la matière organique des sols (Lesueur Jannoyer *et al.* et Cabidoche *et al.* - In : Anon. 2007), ce pesticide est transporté des sols contaminés vers les eaux marines littorales par les cours d'eau, essentiellement en suspension. Compte-tenu de l'affinité par piégeage de cette molécule avec les particules les plus fines, du fait non seulement de la présence de matière organique, mais également de celle de minéraux argileux ayant la particularité structurale d'être disposés en feuillets permettant ainsi ces phénomènes d'absorption/adsorption, il s'en déduit l'hypothèse que les sédiments marins les plus fins puissent se trouver contaminés par la chlordécone, transportée jusqu'à la mer par les cours d'eau.

Pour aborder cette problématique, une action de recherche concernant l'*Historique de la contamination des sédiments littoraux des Antilles par la chlordécone* a été mise en place début octobre 2009. La démarche suivie a été induite par certains constats effectués lors de travaux antérieurs récents mettant en évidence des niveaux actuels de contamination en chlordécone significatifs, notamment dans la faune halieutique marine en 2002 (Bocquené & Franco 2005; Coat *et al.* 2006), puis en 2008 (Bertrand *et al.* 2009), alors que l'utilisation du produit a été arrêtée en 1993. Il était alors supposé que cette contamination, constatée plus particulièrement dans les réseaux trophiques de baies exposées au risque de contamination (Bodiguel *et al.* 2011) puisse impacter également les sédiments littoraux.

Le questionnement scientifique sous-tendant cette étude était double. Il s'agissait de :

- cibler un certain nombre de cônes de déjection de cours d'eau contaminés afin de caractériser la succession des flux de contamination dans les sédiments depuis l'arrêt de l'utilisation de la chlordécone ;
- étudier, à l'échelle des deux baies, divers dépôts sédimentaires susceptibles d'être impactés afin d'apprécier l'extension de la diffusion de la molécule dans les fonds marins.

De plus, il était prévu de mettre l'étude de cet "historique" au sein de la colonne sédimentaire en relation avec la dynamique de la contamination en référence à trois périodes-charnières : (i) "avant la chlordécone", période de référence ; (ii) "pendant la chlordécone", de 1972 à 1993; (iii) "après la chlordécone", de 1993 à aujourd'hui.

Pour la présente étude, une campagne de prélèvements a été effectuée du 22 juin au 7 juillet 2010 dans deux baies situées le long de la côte orientale de la Martinique : le havre du Robert et la baie du Galion. Le choix de ces deux baies a été principalement guidé par le constat qu'elles font partie, avec celle de Fort-de-France, des trois baies martiniquaises dont les bassins versants (sols et cours d'eau) sont les plus fortement contaminés (Diren, 2005 & 2008) ; de plus, le havre du Robert avait déjà été choisi par la communauté scientifique comme zone-atelier dans une démarche de recherche sur la gestion intégrée des zones côtières GIZC (Dao *et al.*, 2003). C'est aussi dans ces baies que les niveaux de contamination les plus élevés ont été relevés dans la faune marine (Bertrand *et al.*, 2009).

Pour appréhender l'ensemble des questions sédimentaires, tant à l'échelle temporelle (*historique de la contamination*) que spatiale (*extension de la contamination*) un certain nombre de paramètres ont été mesurés, relevant de diverses disciplines de géosciences, de chimie et biogéochimie de l'environnement ; en outre, la technologie SIG (système d'information géographique) a été utilisée pour la mise en forme cartographique des données. Ainsi, l'étude visait à mener une évaluation de la concentration de la chlordécone dans les faciès choisis à partir de travaux de caractérisation sédimentaire détaillée des fonds.

Ce rapport se compose de huit parties. La première partie intègre les zones étudiées dans l'ensemble des éléments majeurs de la Martinique permettant de comprendre les caractéristiques particulières de ces deux baies, incluant un premier chapitre sur les risques de contamination du milieu marin par la

chlordécone et un second chapitre sur le plateau insulaire dont l'existence est déterminante pour la compréhension des processus sédimentologiques. Les caractéristiques des deux baies, ainsi que leurs similitudes et différences, sont présentées plus en détail dans la seconde partie. La troisième partie expose les matériels utilisés dans cette étude, la stratégie d'échantillonnage et les méthodes relatives aux analyses sédimentologiques et chimiques. La quatrième partie présente les résultats obtenus, en indiquant les faciès sédimentaires rencontrés et en y effectuant, à l'aide de l'outil SIG, des comparaisons inter-paramétriques, successivement dans les zones ouest et est du havre du Robert, puis dans la baie du Galion. La discussion générale et la conclusion constituent respectivement la cinquième et la sixième partie. La septième partie présente des perspectives qui se déduisent de cette étude. Enfin, une liste de références bibliographiques clôture le rapport.

# [1] FAÇADE SUD-ATLANTIQUE : CONTEXTE SCIENTIFIQUE

## Du cadre géomorphologique au cadre hydrodynamique

Les deux entités étudiées, le havre du Robert et la baie du Galion (fig. 1), sont situées sur la côte orientale (atlantique) de la Martinique, dont la zone côtière est très découpée et le plateau insulaire attenant très étendu (de l'ordre de 10 km de large), se situant morphologiquement à l'opposé de la côte occidentale (façade caraïbe). En effet, à part sa partie méridionale (notamment la baie de Fort-de-France), cette dernière est plutôt rectiligne, avec un talus insulaire relativement très proche de la côte (fig. 4), puisque la profondeur de 100 m y est atteinte en général à une distance de moins d'un kilomètre (Froidefond *et al.* 1983), parfois moindre avec seulement 200 m environ (Pujos *et al.*, 1990 ; Augris *et al.* 2000).

Le long de la côte atlantique, deux ensembles peuvent être distingués de part et d'autre de la presqu'île de la Caravelle : la façade nord-atlantique hydrodynamiquement exposée et la façade sud-atlantique (jusqu'à la péninsule de Sainte-Anne), relativement protégée, dont font partie les deux baies étudiées.



Fig. 1 – Situation de la baie du Galion et du havre du Robert (Géoportail)

## > Cadre géologique et géomorphologique

Cette opposition géomorphologique provient principalement de l'**origine géologique** de l'île, qui provient d'une succession de mouvements géodynamiques importants induits par la rencontre de diverses plaques tectoniques (fig. 2).

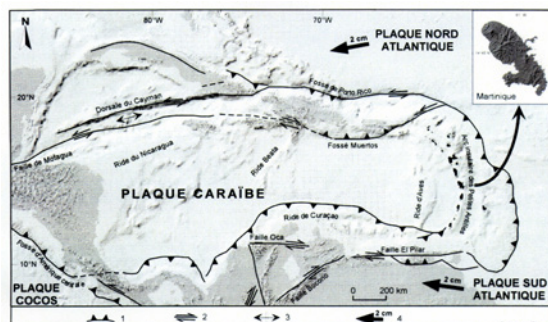


Fig. 2 – Géodynamique régionale (d'après Westercamp & Tazieff, 1980)

L'**activité volcanique** qui en a résulté a progressivement construit l'arc insulaire des Petites Antilles, dont la Martinique fait partie, située en position médiane dans ce chapelet d'îles (fig. 3). Cet arc, lié à la subduction de la plaque atlantique sous la plaque caraïbe (Westercamp & Tazieff, 1980), s'est formé en trois phases, dont deux d'entre-elles sont prédominantes dans les Antilles françaises, notamment à la Martinique (fig. 4).

L'arc ancien, d'âge éocène inférieur-oligocène moyen (de 23 à 6 millions d'années), est de nature calcaire. Concernant la Martinique, il résulte de la succession de phases volcaniques sous-marines, épicontinentales et aériennes (Pons, 1987) et correspond à la partie extrême orientale de l'île (presqu'île de la Caravelle, péninsule de Sainte-Anne).

L'arc récent, d'âge miocène inférieur-quaternaire (de 6 millions d'années à la période historique actuelle), est de nature essentiellement volcanique ; cependant, préalablement à cette phase volcanique, s'insère une phase calcaire, d'âge miocène inférieur (définissant ainsi un arc intermédiaire, cependant masqué par les activités volcaniques plus récentes), avec des roches sédimentaires ne représentant toutefois que 10 % des formations (Augris *et al.*, 2000 – d'après Fichaut, 1986). Concernant la Martinique, cet arc correspond à la majeure partie de l'île, des mornes centraux à relief modéré (Vauclin, Ducos, Trois-Îlets) aux mornes et pitons septentrionaux à altitude élevée (Carbet, Jacob, Montagne Pelée), en passant par la plaine alluviale d'effondrement du Lamentin.

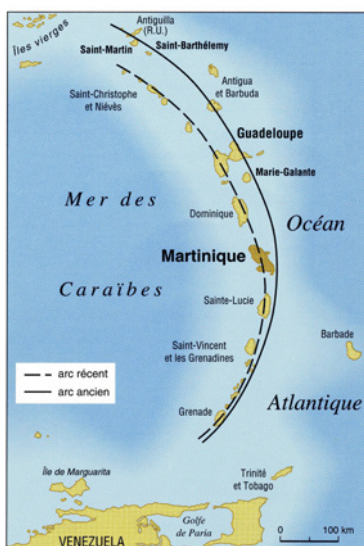


Fig. 3 – Arc insulaire des Petites Antilles (Augris *et al.*, 2000 - d'après Westercamp & Tazieff, 1980 ; Bouysse *et al.*, 1990))

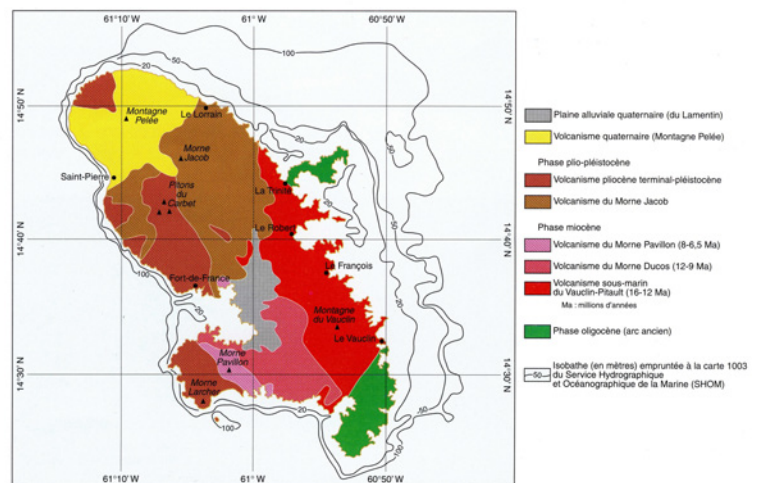


Fig. 4 – Schéma géologique de la Martinique (Augris *et al.*, 2000 - d'après Westercamp & Tazieff, 1980)

## > Cadre orographique et hydrographique

Cette structuration géologique a contribué à donner à la Martinique un **relief N-S** altimétriquement opposé : accentué dans la moitié septentrionale de l'île et avec des côtes assez rectilignes, il est modéré dans la moitié méridionale, voire assez plat centralement, et avec des côtes découpées (fig. 5).

La superficie de la Martinique, l'une des plus grandes îles des Petites Antilles, est de 1128 km<sup>2</sup>, avec une longueur de 64 km et une largeur variant de 25 à 35 km (Iedom, 2008). Ainsi, globalement, l'île présente un relief volcanique et montagneux : les mornes volcaniques constituent la plus grande partie de l'île, les plaines ne représentant que 10 % de la superficie.

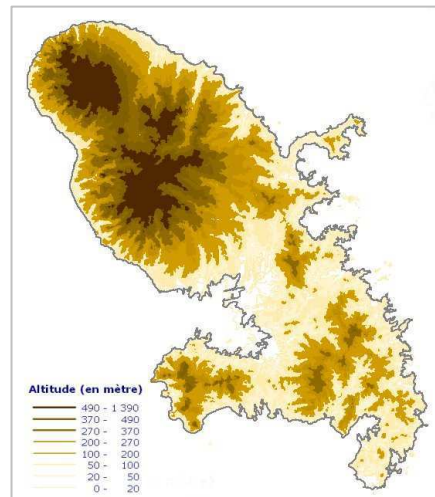


Fig. 5 – Relief de la Martinique (Diren, 2005)

De manière générale, on peut distinguer deux types de **réseaux hydrographiques** calqués sur les différences géomorphologiques et climatiques entre le nord et le sud de l'île (KhamSouk, 2001) : (i) au nord, les massifs volcaniques sont parcourus par un réseau hydrographique dense et rayonnant, avec des cours d'eau à régime pluvio-torrentiel alimentés par de petits bassins versants et qui, du fait du relief accidenté et de la pluviosité, coulent souvent dans des vallées très encaissées ; (ii) au sud, le réseau hydrographique est moins dense, constitué de petites rivières de longueur inférieure à 30 km, avec un cours amont encaissé et un cours aval composé de méandres, les caractéristiques de ce réseau s'expliquant par un relief moins accidenté qu'au nord et une pluviosité moins importante et moins fréquente.

La totalité du réseau hydrographique martiniquais compte plus de 70 cours d'eau (fig. 6), de petite ou moyenne importance, dont 80% au nord et au centre de l'île (Diren, 2005). Ce réseau hydrographique abondant, dont seulement la moitié des cours d'eau est pérenne, draine des bassins versants de taille modeste (inférieure à 15 km<sup>2</sup>). Seuls, sept bassins sont plus importants, assurant l'essentiel de la ressource en eau, leur taille variant de 20 à 37 km<sup>2</sup> pour cinq d'entre eux, atteignant jusqu'à 57 km<sup>2</sup> pour la rivière Capot et même 116 km<sup>2</sup> pour la rivière Lézarde, prenant l'île en "écharpe". Cette configuration hydrographique conduit d'ailleurs à distinguer trois principaux ensembles de cours d'eau en Martinique : les rivières du nord, celles du sud et la Lézarde.

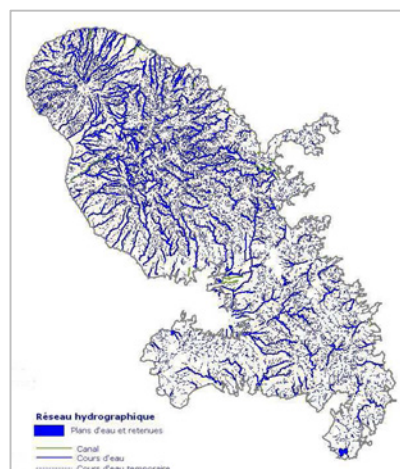


Fig. 6 – Réseau hydrographique principal de la Martinique (Diren, 2005)

## > Cadre météo-climatique

La **situation météo-climatique** de la Martinique est relativement simple (Khamsouk, 2001 ; Diren, 2005 ; Iedom, 2008), cette dernière bénéficiant d'un climat tropical chaud (26°C de température moyenne annuelle) et humide (hygrométrie de 80 % en mars-avril et 87 % en octobre-novembre).

Deux saisons principales sont distinguées : (i) une saison sèche, dite « Carême » (de février à avril) régie par l'anticyclone des Açores apportant des vents réguliers et frais, l'air étant plus sec et les pluies peu fréquentes ; (ii) une saison humide, dite « Hivernage », de juillet à octobre, sous l'influence des amas nuageux de la Zone Intertropicale de Convergence, avec des pluies nettement plus fréquentes et intenses. C'est à cette période de l'année que la Martinique peut connaître d'importants phénomènes cycloniques (dépressions ou tempêtes tropicales et ouragans) pour peu que leur trajectoire passe directement sur l'île et y apporte son lot de fortes perturbations (vents violents et fortes pluies, inondations et érosion des sols et des côtes). Ces deux saisons majeures sont séparées par deux intersaisons plus ou moins marquées.

Les pluies annuelles varient en moyenne entre 970 mm dans la presqu'île de la Caravelle et plus de 6000 mm sur la montagne Pelée et sur les hauteurs des pitons du Carbet. Grâce au climat tropical et à la proximité de l'océan, les températures varient peu au cours de l'année (3 à 4 degrés d'écart en moyenne entre les mois de février et d'août), la température moyenne annuelle oscillant autour de 25°C, avec des extrêmes allant de 18 à 35°C (Khamsouk, 2001 ; Diren, 2005). La température est ainsi un des éléments les plus uniformes du climat martiniquais, les eaux de surface variant en général de 25°C (février) à 28°C (septembre), l'amplitude de la température des eaux côtières étant néanmoins plus importante, pouvant présenter des valeurs localement plus élevées, notamment de juin à septembre.

Ainsi, on distingue trois grands types de climats en Martinique (Diren, 2005) : (i) un climat local très humide (précipitations supérieures à 4 m/an), correspondant aux massifs septentrionaux ; (ii) un climat local sec (précipitations inférieures à 2 m/an), correspondant à toute la côte méridionale, à la côte atlantique jusqu'à la presqu'île de la Caravelle et à toute la côte caraïbe, "sous le vent" ; (iii) un climat local intermédiaire, correspondant aux régions centrales et à la portion de la côte nord-atlantique "au vent". Cette situation climatique locale fait apparaître une opposition entre une *Martinique humide* (reliefs septentrionaux et centraux, ainsi que la côte nord) avec 9 m d'eau en moyenne, et une *Martinique sèche* (côte sud-caraïbe, littoral sud à sud atlantique), avec moins de 1,25 m d'eau par an (Pons, 1987 ; Diren, 2005).

Les **pluies** se répartissent inégalement avec une nette préférence sur les mornes et sommets volcaniques du nord et du nord-est (fig. 7), la moitié nord, au fort relief, étant plus arrosée (4000-4500 mm/an en moyenne) que la partie sud (1000 à 2000 mm/an) ; d'ailleurs, plus particulièrement, on distingue trois grandes zones à pluviométrie propre (Diren, 2005). Le contraste de pluviométrie provient du fait que ce système nuageux bute principalement sur les 'mornes' et autres sommets septentrionaux, ce qui déclenche des précipitations souvent violentes, habituelles en régime tropical. Ces précipitations favorisent alors le développement d'une végétation luxuriante dans le nord de l'île.

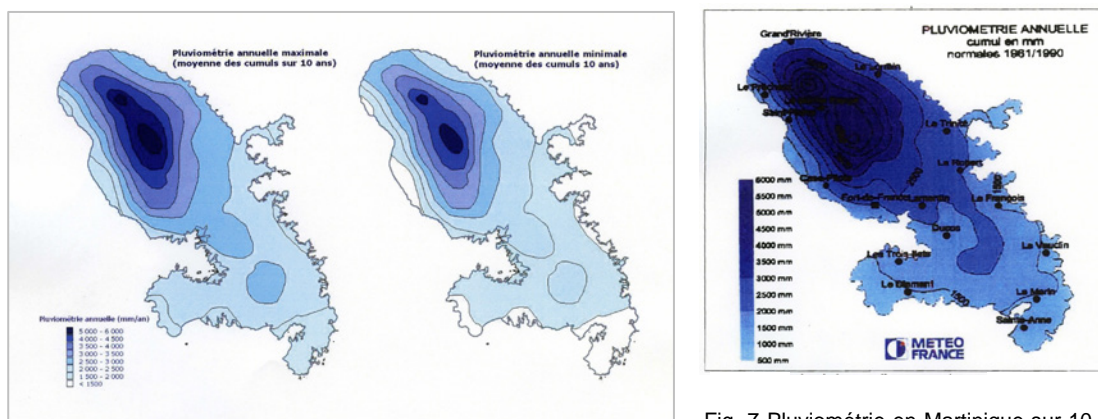


Fig. 7 Pluviométrie en Martinique sur 10 ans : à gauche, données minimales-maximales (Diren, 2005) et, au dessus, situation globale (Météo-France)

## > Cadre hydrodynamique

Les **conditions hydrodynamiques** résultent en général de l'action combinée des houles générées par les vents, des marées et des courants.

Le **régime de vents** est dominé par le flux des alizés (Durand *et al.*, 1997 & 1998 ; Diren, 2005). Les vents proviennent du secteur ENE-E et soufflent pendant 80 % de l'année avec des vitesses moyennes comprises entre 20 et 30 km.h<sup>-1</sup>, leur force moyenne étant maximale dans les périodes février-mars et juin-juillet (de l'ordre de 10 nœuds) et minimale en octobre (de l'ordre de 6 nœuds).

L'**action des houles**, liée au type de régime des vents, est simple puisque lorsque les alizés sont bien établis, l'amplitude des houles, de secteur N60 à N100, varie de 1 à 3 m avec des périodes de 6 à 9 s (Durand *et al.* 1998). À ces conditions météorologiques clémentes peuvent succéder des houles générées par des cyclones : la fréquence de ces derniers est assez élevée, de l'ordre de cinq à huit ans en moyenne (Durand, 1996 – d'après Flament *et al.*, 1979), avec néanmoins un risque cyclonique actuellement plus grand (de l'ordre de 3,5 ans, selon Météo-France), ces cyclones, comme d'ailleurs les tempêtes tropicales, perturbant alors de façon transitoire les conditions hydrodynamiques régnant autour de l'île.

Autour de la Martinique, la **direction des courants** côtiers de surface et de fond (aux abords du rebord du plateau insulaire) est fonction du cycle de marée (Durand, 1996 – d'après Gonzales, 1988). En surface, la direction des courants ne varie pratiquement pas au cours du cycle de marée, tandis que près du fond l'effet de marée est plus important qu'en surface, souligné par une majorité de courants de type rotatif à semi-rotatif. Ce phénomène s'accroît à l'extrémité sud de l'île en raison de l'orientation sud-ouest-nord-est de l'onde de marée lorsqu'elle aborde l'île. La **vitesse des courants** est plus élevée en surface qu'au fond et maximale au cours de la marée montante. Globalement, deux types de courant interagissent, soit en combinant leurs actions, soit de façon antagoniste : (1) les courants de marée, qui ont une action permanente mais faible dans cette région, et (2) les courants induits par les vents violents accompagnant les cyclones (Durand *et al.*, 1998).

La marée, de type microtidal, est mixte, avec une tendance diurne prononcée. Le **marnage** moyen varie entre 0,20 et 0,30 m, sauf sur la côte atlantique où il atteint 0,50-0,70 m ; l'intensité des courants de marée est assez faible (pas de distinction entre le jusant et le flot), l'ensemble des courants et des facteurs hydrodynamiques étant sous influence du courant équatorial de direction E-W. L'amplitude des houles générées par les alizés reste limitée, de même que les courants qu'ils induisent. En revanche, les houles cycloniques présentent des caractéristiques paroxysmales (Durand, 1996 ; Durand *et al.*, 1997 & 1998).

En conclusion, l'**hydrodynamisme** général de la Martinique peut être caractérisé ainsi, avec une dissymétrie 'nord et ouest' *versus* 'sud-est' : (i) d'une part, les côtes exposées aux houles de tempêtes, créées par les alizés de forte intensité et par les cyclones et qui sont les principaux facteurs responsables de l'érosion côtière dans ces milieux tropicaux microtidaux (Bossier *et al.*, 2000), alors que les courants de marée y ont une influence négligeable, avec un marnage de l'ordre de 0,30 m (cas de la côte caraïbe jusqu'à la baie de Fort-de-France et de toute la côte septentrionale ; (ii) d'autre part, la côte atlantique (moitié sud, à partir de la presqu'île de la Caravelle) exposée aux vents d'est dominants et avec des houles du large relativement amorties (hors périodes cycloniques), du fait de la présence d'un vaste plateau insulaire relativement peu profond, surmonté de barrières coralliennes.

## Le plateau insulaire

Le **plateau insulaire** martiniquais est une clé de compréhension de la dynamique sédimentaire générale, et donc de la caractérisation sédimentologique des baies atlantiques et des forçages qui y règnent. Ce plateau, dont la superficie est équivalente à celle de la partie terrestre de la Martinique, se développe inégalement entre les façades orientale et occidentale de l'île (fig. 8) : (i) son rebord atlantique, le plus étendu, couvre 75% de la surface totale du plateau martiniquais, avec une largeur maximale de 25 km au large de la Trinité (Augris *et al.*, 2000) et, en particulier, une distance de 15 km du rebord du plateau à la pointe extrême de la presqu'île de la Caravelle (Pons, 1987) ; (ii) du sud à l'ouest de l'île (excepté la baie de Fort-de-France), le plateau se rétrécit progressivement de 2 km à 100-150 m de large. Les valeurs des pentes enregistrées sont très faibles (de l'ordre de 1 %) le long de la côte atlantique, tandis que les déclivités de la côte caraïbe au nord de la baie de Fort-de-France sont importantes (de 7 à 17 %), cette côte étant d'ailleurs dépourvue de canyon sous-marin marqué (Augris *et al.*, 2000).

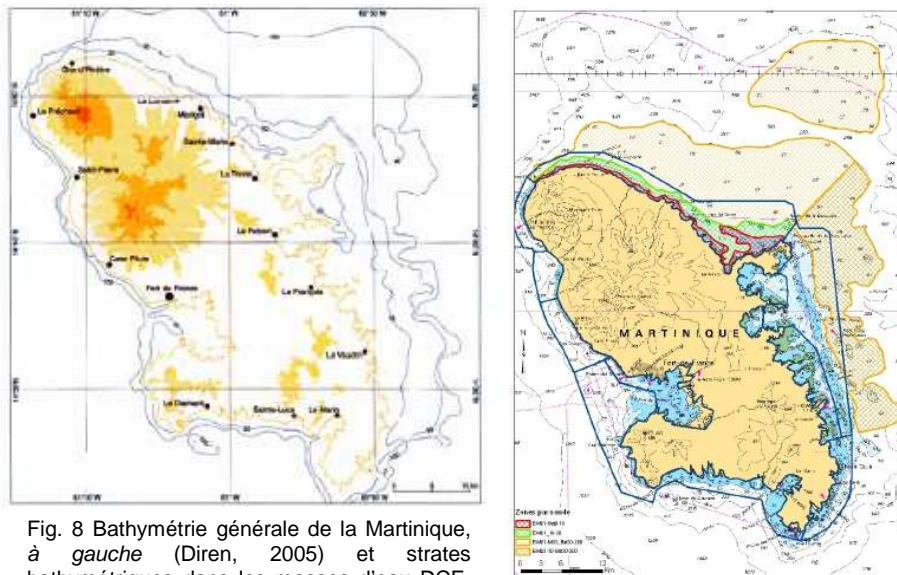


Fig. 8 Bathymétrie générale de la Martinique, à gauche (Diren, 2005) et strates bathymétriques dans les masses d'eau DCE, à droite (Bertrand, 2010)

### > Structuration géomorphologique

De façon générale, dans les parties sud et est de l'île, le plateau insulaire est composé d'une série de **falaises** et de **terrasses** successives, correspondant à d'anciens platiers récifaux formés au cours de la dernière remontée du niveau marin (Froidefond *et al.*, 1985).

D'abord, le platier littoral (entre -2 m et -10 m de profondeur) s'étend de la côte à la première rupture de pente, vers -18 à -20 m, avec un système de hauts fonds coralliens à émergence faible ou nulle ("*loups*"), de formations récifales actuelles à émergence moyenne à forte ("*caves*") et de chenaux ("*passes*") qui l'accidentent. Il est surmonté d'un récif-barrière discontinu de 0,5 à 1 km de large (Pons, 1987 ; Henocq *et al.*, 1990).

Ensuite, le platier médian (entre -30 m et -40 m de profondeur) correspond à une seconde terrasse bien développée à largeur *quasi* constante et dont la pente moyenne est de 0,5%, la rupture de pente limitant ce platier vers le large ayant une déclivité de 5 à 10%, induisant un dénivelé de 10 à 15 m jusqu'à une nouvelle falaise située à environ -50 m de profondeur. Des chenaux parcourent cette zone,



recouverte en grande partie de sables coralliens, et entaillent le ressaut externe, tandis que des constructions coralliennes se détachent nettement du substratum sub-horizontale (Pons, 1987 ; Henocq *et al.*, 1990).

Enfin, le platier inférieur (entre -60 m et -70 m de profondeur) plonge progressivement jusqu'à -70 à -80 m avec une pente de 1 à 5%, sa largeur variable étant plus faible que celle du platier médian et avec un ressaut externe présentant une inclinaison plus accentuée, de l'ordre de 8 à 13% (Pons, 1987 ; Henocq *et al.*, 1990). Cette dernière terrasse est recouverte également de sables grossiers, voire de graviers (Froidefond *et al.*, 1985).

Au-delà, plus profondément, deux autres ressauts sont identifiables, précédant le talus insulaire à forte pente.

Par ailleurs, les échancrures constatées dans le plateau oriental aux abords du Robert, du François et du Vauclin témoignent de la présence de **canyons sous-marins** en ces zones, celui du Robert ayant été particulièrement étudié (Pons, 1987).

Enfin, suite aux relevés effectués par Ifremer et l'université de Bordeaux en 1990 et 1993 (Augris *et al.*, 2000) ayant montré la présence de **mégarides** sur les deux platiers les plus profonds (fig. 9), une étude a été menée afin de rechercher les causes de leur formation (Durand, 1996). Excluant tout facteur hydrodynamique agissant en conditions normales (alizés), puisque les caractéristiques de ces vents sont incapables de générer des courants ou des houles possédant des forces individuelles ou combinées suffisantes pour entraîner les sédiments, cette étude conduit, par contre, à s'intéresser à l'action des cyclones (Durand *et al.*, 1997 & 1998 ; Augris *et al.*, 2000). L'estimation des vitesses d'entraînement par un courant orbital pendant les cyclones suggère en effet que le transport sédimentaire, même des particules les plus grossières (fig. 10), a lieu pendant ces épisodes météorologiques extrêmes (Durand, 1996). D'ailleurs, en général, le degré d'impact des cyclones dépend de la vitesse du vent, de la pression centrale (au cœur du cyclone), de la pente du plateau, de la configuration du trait de côte et des altérations anthropiques sur ce dernier. C'est le cas, notamment pour les plus récents concernant la Martinique, des cyclones David (1979) et Allen (1980), tandis que le dernier en date, le cyclone Dean (2007) n'a produit sur l'île que des dégâts mineurs (sans mise en place de mégarides) et que les effets produits ont en outre été atténués du fait que sa trajectoire était 2,5 fois plus éloignée de l'île que celle du cyclone David.

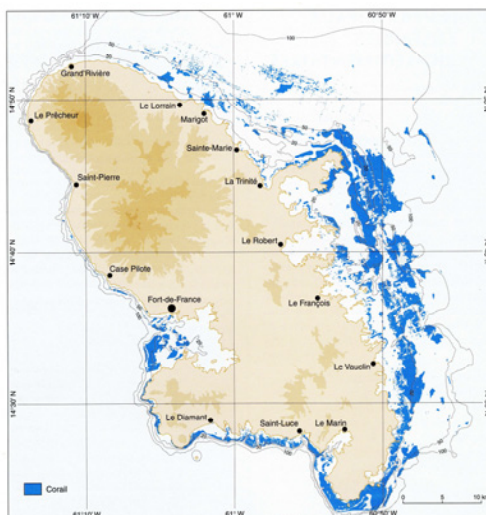
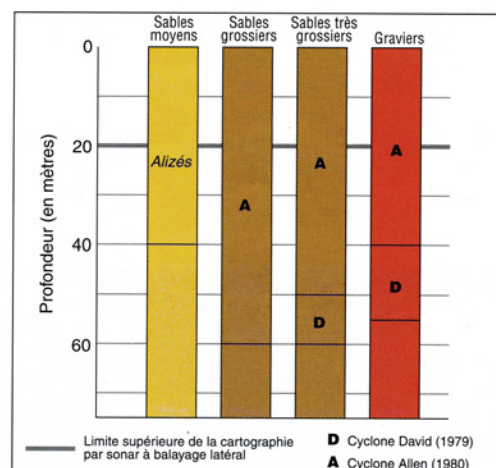


Fig. 10 – Profondeur d'action des cyclones David et Allen sur les sédiments (Augris *et al.*, 2000)

Fig. 9 – Formations coralliennes sur le plateau insulaire (Augris *et al.*, 2000)



Ainsi, sur la côte atlantique, les reliefs littoraux sont variés, passant de hautes falaises volcaniques pléistocènes (0,1-1 Ma) en érosion au nord à une série de baies, au sud, à altitude relativement basse et à côte déchiquetée (Adey *et al.*, 1977). Sur la moitié sud de cette côte (à partir de la presqu'île de la Caravelle), plus profondément au milieu du plateau, donc à l'extérieur des baies, se sont développés dès l'Holocène (0,01 Ma) des récifs coralliens rectilignes (fig. 2), ces coraux ayant atteint le stade des récifs de côte à haute énergie ; cependant, à l'origine massifs, ces récifs sont actuellement en train de se dégrader, différents facteurs rentrant en jeu, qu'ils soient naturels (cyclones, envasement) ou qu'ils soient anthropiques, liés aux pollutions, aux dégradations physiques ou aux activités d'aménagement (Brugneaux *et al.*, 2004).

## > Spécificités hydrologiques et hydrodynamiques

Les paramètres hydrologiques, notamment la salinité, sont stables, sauf en cas de dessalure due aux précipitations. Quant aux courants généraux, ils sont contrôlés globalement par les alizés (sauf en périodes cycloniques), ceux soufflant du nord-est déplaçant les masses d'eau superficielles vers le sud ou le sud-ouest, ceux soufflant du sud-est le faisant vers le nord (Durand, 1996). De plus, du fait de la constance de la pression atmosphérique, les seules surcotes enregistrées sont celles dues aux cyclones, venant de l'est. Les houles affectant la côte atlantique sont, quant à elles, de dimension moyenne (sauf en période de cyclones), puisque les vents lèvent des houles en provenance du secteur nord-est à est, d'amplitude et de période comprises respectivement entre 1 et 3 mètres et 6 et 9 secondes, qui s'amortissent sur le plateau insulaire, l'amplitude diminuant alors de l'ordre de 1 à 2 mètres. En période cyclonique, ces caractéristiques peuvent doubler ou tripler (Durand, 1996).

Du point de vue **hydrodynamique**, on rappellera ici différentes spécificités liées au plateau insulaire atlantique, de la presqu'île de la Caravelle à sa frange méridionale (Pons, 1987 ; Pujos *et al.*, 1992 ; Durand, 1996 ; Durand *et al.*, 1998). D'abord, la circulation générale le long de la côte nord-Atlantique de la Martinique est orientée du sud-est vers le nord-est, induisant un flux vers le nord (canal de la Dominique) d'une vitesse moyenne de  $0,50 \text{ m.s}^{-1}$ . Ensuite, le déplacement virtuel des masses d'eau pendant un cycle de marée est important dans le secteur nord-Atlantique, puisque ce déplacement est de l'ordre de 5,5 km en surface comme au fond dans les eaux du large au sud de la presqu'île de la Caravelle, avec une inversion des directions (orienté nord-est en surface et sud-est près du fond), le marnage moyen étant de l'ordre de 0,5-0,7 m. De plus, des déplacements locaux d'eaux marines peuvent être constatés près des côtes du fait de la présence des récifs. Cette situation hydrodynamique pourrait limiter l'expansion de la contamination vers le large dans le secteur nord-Atlantique de la Martinique (Bertrand, 2010). Enfin, sur le plateau insulaire oriental, les houles provenant de l'Atlantique sont significativement amorties par les récifs coralliens particulièrement développés sur cette côte exposée aux vents d'est dominants, cet amortissement des houles du large (hors périodes cycloniques) provenant de l'étendue du plateau insulaire (Durand, 1996 ; Durand *et al.*, 1998).

Ainsi, la Martinique présente un double contraste (Pons, 1987 ; Durand, 1996) entre :

- la côte atlantique et la côte caraïbe, notamment du point de vue géomorphologique (incluant la présence d'un plateau insulaire oriental développé) et hydrodynamique (par les forçages, dus au régime des vents, au marnage, aux houles ...) d'une part ;
- le NW et le SE, de part et d'autre d'une ligne virtuelle Fort-de-France / La Trinité, notamment du point de vue géologique ('arc ancien + arc intermédiaire' *versus* 'arc récent'), orographique ('pitons et mornes élevés' *versus* 'reliefs plus modestes') et météo-climatique (régime des pluies) d'autre part.

## > Faciès bio-sédimentaires et biocénoses

Les biocénoses (faune et flore) peuplant ces fonds présentent une forte biodiversité, mais elles sont fragiles en raison de leur caractère insulaire et de leur spécificité (Bertrand *et al.*, 2009), surtout sur le littoral même (fig. 11). Certains écosystèmes côtiers présentent des signes très nets de remaniements liés aux perturbations naturelles, notamment les cyclones, et d'altérations dues aux fortes pressions anthropiques (pollutions, activités économiques).



Fig. 11 – Éléments géomorphologiques et biosédimentaires généraux (tiré de Dao *et al.*, 2008)

De façon générale, les zones côtières de la Martinique abritent trois grands types de biocénoses marines, souvent imbriquées de façon complexe (Augris *et al.*, 2000) : les récifs coralliens, les herbiers de phanérogames marines et les mangroves (fig. 12). Au large, les sédiments sont principalement colonisés par des mollusques bivalves et des vers, localement par des gastéropodes, des éponges et des coraux.

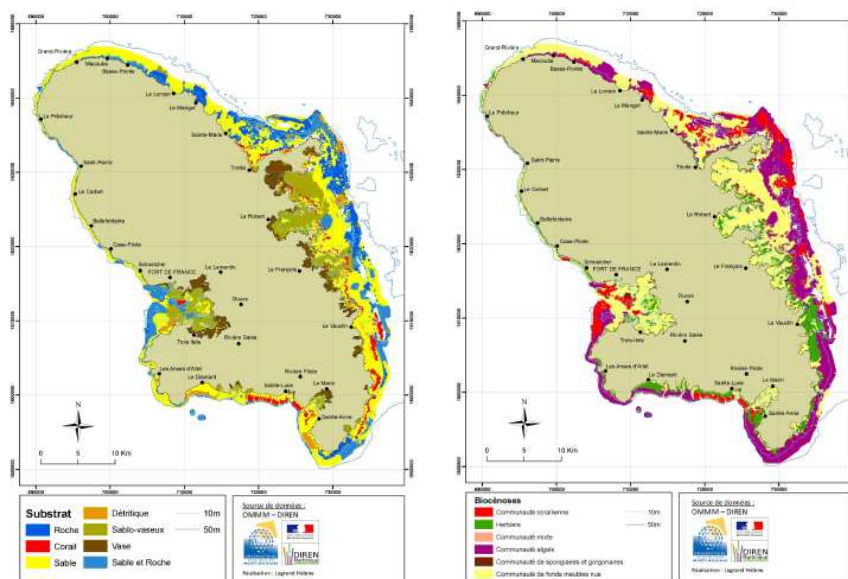


Fig. 12 – Cartographie des substrats (carte de gauche) et des biocénoses benthiques (carte de droite) des fonds de 0-50 m autour de la Martinique (Legrand, 2009)

Les **formations coralliennes** couvrent une superficie globale de 200 km<sup>2</sup> autour de la Martinique (Diren, 2005). Entre la presqu'île de la Caravelle et l'extrémité sud de l'île, trois ensembles de biohermes sont identifiés (Froidefond *et al.*, 1985 – cité par Durand, 1996) : un bioherme actuel à 0-10 m et deux biohermes fossiles à -30/ - 40 m et à - 60/ - 70 m.

Les récifs profonds (fossiles) disposés irrégulièrement autour de l'île ont bénéficié d'une vie biologique florissante jusqu'aux environs de 500 ans BP<sup>1</sup> (Adey *et al.*, 1977). L'augmentation récente de la turbidité, probablement d'origine humaine, serait à l'origine, d'une part, du développement des peuplements d'algues brunes et des encroûtements calcaires sur ces récifs et, d'autre part, d'un ralentissement de la vie corallienne autour de l'ensemble de l'île (Augris *et al.*, 2000).

Dans les formations récentes, les fonds coralliens non bio-constructeurs se sont développés surtout le long de la côte caraïbe et dans une moindre mesure sur la côte méridionale. En revanche, au sud de la presqu'île de la Caravelle, la barrière récifale actuelle, bordant la côte sur près de 25 km, immergée sous 5 à 10 m d'eau et éloignée de 3 à 5 km de la côte, présente des sommets encroûtés par des algues calcaires. Elle se trouve actuellement en grande partie couverte par des prairies de sargasses, ainsi que par d'autres algues brunes, depuis la surface jusqu'à une vingtaine de mètres de profondeur (Adey *et al.*, 1977 ; Durand, 1996 ; Augris *et al.*, 2000). La hauteur de cette barrière peut atteindre 10 m, mais plus généralement elle est de l'ordre de 2 à 3 m, surmontant des sables calcaires. A l'abri de cette barrière, des formations frangeantes se sont développées sur les côtes rocheuses, installées notamment sur toutes les pointes et avancées dans la mer, associées à des herbiers à phanérogames. La faune des formations coralliennes est largement dominée par des gastéropodes et quelques rares bivalves, ainsi que des éponges. Les fonds adjacents, issus du démantèlement des coraux, sont favorables à l'implantation des ensembles algaux (Augris *et al.*, 2000).

Enfin, les produits de destruction des associations faunistiques et floristiques, auxquels s'ajoutent des coquilles et des organismes morts, introduisent des stocks de matériel biogène dans le cycle sédimentaire (Durand, 1996). Cette alimentation permanente résulte de l'érosion, assurée soit par les agents climatiques (houle d'alizés et houle cyclonique), soit par les organismes marins (bioérosion). À cet égard, le démantèlement des édifices récifaux est occasionné, en Martinique comme ailleurs, par différents organismes lithophages (balistes, clones, oursins noirs, etc.), les édifices ainsi fragilisés par ces actions devenant alors plus vulnérables à l'action des tempêtes et des cyclones (Durand, 1996 – d'après Graus *et al.*, 1984).

Les formations récifales assurent la protection des côtes contre l'érosion littorale et jouent un rôle d'habitat et de source de nourriture important pour la faune et la flore associées. De plus, ces écosystèmes coralliens, composés essentiellement de coraux, de gorgones et d'éponges, sont particulièrement sensibles à la qualité des eaux et à l'envasement (Diren, 2005).

Les **formations d'herbiers à phanérogames marines** couvrent une superficie globale d'au moins 40 km<sup>2</sup> (Diren, 2005). Elles sont dominées par l'espèce *Thalassia testudinum* et s'installent principalement sur les sédiments sablo-vaseux dans des zones inférieures à 20 m, dans lesquelles les conditions écologiques sont réunies (Rathier, 1993 ; Augris *et al.*, 2000 – d'après Chauvaud, 1997). Les herbiers constituent l'écosystème marin côtier le plus important par la surface occupée et sont particulièrement bien développés dans les baies et lagons de la façade sud-est. Ils couvrent surtout la partie interne des récifs frangeants, avec un taux de colonisation élevé, de l'ordre de 80% (Augris *et al.*, 2000). Ces herbiers constituent un habitat privilégié pour les mollusques exploités commercialement, tels que le lambi (*Strombus gigas*), les palourdes et les soudons (bivalve *Tellinoidea*), ainsi que pour les oursins (Rathier, 1993) et sont à la base de l'alimentation de poissons et de tortues marines (Diren,

<sup>1</sup> L'expression « avant le présent » (en anglais, *Before Present* : BP) est utilisée en archéologie, mais également en géologie, pour désigner les âges exprimés en nombre d'années comptées vers le passé à partir de l'année 1950 du calendrier grégorien. Cette date a été fixée arbitrairement comme année de référence et correspond aux premiers essais de datation au carbone 14.

2005). Ils jouent un rôle écologique très important en tant que zone de recrutement et de croissance pour les jeunes de nombreuses espèces d'intérêt économique (comme les langoustes) qui vivent à l'état adulte dans les écosystèmes voisins. Par ailleurs, la photosynthèse de ces plantes produit journalièrement une quantité importante d'oxygène dont la production contribue à la "respiration" des lagons et des fonds de baies confinées (Augris *et al.*, 2000), constituant ainsi un écosystème fixateur des sédiments et participant alors à l'épuration des eaux et à la protection contre l'érosion littorale (Diren, 2005). Dans les sédiments à dominante vaseuse, les mollusques sont peu diversifiés mais 'abondants'.

Les **mangroves** couvrent une superficie globale d'environ 18,5 km<sup>2</sup>, dont plus d'un tiers dans les baies et les anses des côtes orientale et méridionale de l'île, leur extension maximale se situant dans la baie de Fort-de-France dans laquelle elles sont le plus menacées.

La frange maritime des mangroves à palétuviers rouges est d'une importance capitale pour l'équilibre des écosystèmes marins littoraux, puisqu'elle revêt plusieurs rôles écologiques, comme zone de décantation et filtre épurateur naturels des particules et des matières dissoutes entre les milieux terrestres et marins, comme système à forte productivité biologique, comme habitat pour de nombreuses espèces marines fixées ou non et comme lieu de reproduction, d'alevinage, de recrutement, d'alimentation ou de grossissement pour de nombreuses espèces de coquillages, de crustacés et de poissons récifaux d'intérêt commercial ou non. Elle représente actuellement l'écosystème marin côtier le plus menacé en Martinique (Augris *et al.*, 2000 ; Diren, 2005).

## > **Éléments sédimentaires principaux**

Il s'agit de présenter ici quelques éléments sur la **nature** et l'**origine des sédiments**, principalement concernant le plateau insulaire atlantique.

D'un point de vue général, l'opposition E/W se confirme, à travers une différenciation sédimentaire sur les deux façades de l'île, que ce soit sur le plateau insulaire ou en domaine profond. Ainsi, dans le bassin caraïbe, la phase volcanoclastique représente en moyenne 34% des sédiments marins (tout en étant parfois le constituant exclusif), tandis que du côté atlantique, cette même phase ne représente en moyenne que 10% d'un sédiment essentiellement carbonaté. Cette dissymétrie de répartition met en évidence le rôle fondamental des vecteurs de transport, à terre, dans le domaine marin et dans l'espace aérien (Pons, 1987). De plus, la répartition des sédiments déposés est sous un double contrôle climatique (régime hydraulique, variations du niveau marin, régime des vents) et géologique (volcanique, tectonique) (Durand, 1996).

Plus précisément, ces formations carbonatées (hors zone caraïbe) permettent d'identifier trois zones en conformité avec la structure de l'île (Pons, 1987) : (i) une zone sud / sud-est, à très forte contribution bioclastique, de près de 88% en moyenne ; (ii) une zone médiane regroupant un secteur nord-est et un secteur sud / sud-ouest, à moyenne plus basse de l'ordre de 62%, avec des variations selon les secteurs ; (iii) une zone nord avec un faible taux de carbonates, environ 10% en moyenne. La répartition des carbonates en milieu littoral martiniquais est donc contrôlée par la structure et la géologie de l'île, avec un gradient positif allant du NW dans les sables de l'arc ancien à teneur forte en Ca CO<sub>3</sub>, au SE dans les sables de l'arc récent qui en sont presque dépourvus (Pons, 1987). La phase bioclastique correspond à des sédiments à teinte claire (blanche à beige) qui renferment des débris d'échinodermes, d'algues calcaires, des coraux, des mollusques, ainsi que des foraminifères, des ptéropodes, des radiolaires, des spongiaires, des mollusques et des ostracodes. Elle résulte du démantèlement des constructions récifales actuelles et anciennes qui se sont préférentiellement développées sur le littoral et le proche plateau de la moitié sud de l'île, alors que la moitié nord alimentée par des produits volcanoclastiques à teinte foncée (grise à noire) et provenant du lessivage des reliefs terrestres par des apports fluviatiles et exceptionnellement par voie aérienne (éruptions de la Montagne Pelée, seul volcan actif de l'île) est peu favorable à la fixation et au développement de vie animale et végétale (Pons, 1987 ; Augris *et al.*, 2000). Ainsi, les dépôts résultent du mélange d'éléments calcaires marins et d'éléments volcaniques terrestres,

dont les proportions dépendent du degré de proximité des sources d'apport, que sont la côte et les reliefs volcaniques d'une part, les barrières récifales d'autre part (Augris *et al.*, 2000).

Par ailleurs, les formations superficielles des fonds compris entre la presqu'île de la Caravelle et l'extrémité sud de la Martinique se distinguent par des sédiments hétérométriques à haute teneur en carbonates, toujours supérieure à 60 % dans la zone littorale et à 95 % au large, indépendamment de la granulométrie des dépôts. Donc, peu d'éléments volcaniques et terrigènes participent à la sédimentation dans cette zone, en raison d'un réseau hydrographique peu développé et de reliefs terrestres peu accusés (Augris *et al.*, 2000). En outre, la faible teneur en minéraux lourds dans les sédiments sud-atlantiques martiniquais, "traceurs" en quelque sorte de l'activité volcanique en milieu littoral, reflète trois causes majeures, en confirmant ce qui précède : (i) pas de réseau fluvial susceptible de transporter des produits détritiques insulaires grossiers vers le littoral ; (ii) pas de volcanisme de type péléen dans cette zone ; (iii) pauvreté en minéraux lourds des formations lithologiques constituant la côte, leur démantèlement ne fournissant qu'une très faible contribution diluée dans une sédimentation essentiellement carbonatée (Pons, 1996). Ces éléments volcanoclastiques représentent en fait au maximum 10 % de la composition des sédiments, leur proportion augmentant jusqu'à 40 % dans les dépôts littoraux de la côte sud de la presqu'île de la Caravelle, dans la baie du Galion et dans le havre du Robert (Augris *et al.*, 2000). Du fait de leur origine volcanique, leur présence ne doit s'expliquer que par le transport aérien haute-altitude (supérieure à 10 km) des produits provenant des volcans septentrionaux, aboutissant à des sédiments composés de lithoclastes andésitiques, de lapillis ponceux, de plagioclases, de pyroxènes, de magnétite, de hornblende et de grains de quartz (Pons, 1988 ; Durand, 1996 ; Augris *et al.*, 2000).

De plus, les fonds de toutes les baies, situées au sud de la presqu'île de la Caravelle, sont essentiellement composés de vases et de vases sableuses (Augris *et al.*, 2000), d'origine principalement terrigène. À cet égard, il faut souligner que la plate-forme, jalonnée par des récifs-barrières, joue un double rôle, d'une part en fournissant les éléments biogènes et d'autre part en réduisant considérablement les échanges entre les eaux internes et les eaux externes, piégeant ainsi les sédiments terrigènes littoraux (Durand *et al.*, 1993).

Finalement, au sud de la presqu'île de la Caravelle, les formations coralliennes jouent un rôle primordial de protection des secteurs littoraux en agissant comme des brise-lames. Les directions d'allongement des crêtes de mégarides, édifiées par les houles en provenance du secteur Nord - Nord-Est à Est - Sud-Est, sont N-S à N20° au large et N150° aux abords de la barrière récifale. Entre les édifices coralliens et la côte, les dépôts ne présentent plus de figures sédimentaires en raison d'une granulométrie plus fine et d'une agitation de l'eau plus faible, le maximum d'énergie s'étant dissipé lors du passage des vagues sur les récifs-barrières. La mobilité des sédiments grossiers, entre 20 et 60 m de profondeur, ne peut être expliquée par l'action des houles d'alizés : seules les houles cycloniques sont capables de façonner des mégarides à ces profondeurs (Augris *et al.*, 2000).

Quant à la **faune** peuplant en général les sédiments meubles, sa biodiversité est grande (Paulmier & Durand, 1997 ; Augris *et al.*, 2000). Les bivalves et les vers en sont les principaux groupes colonisateurs. La diversité et la densité des espèces de bivalves augmentent avec le taux de particules fines. Les gastéropodes occupent les fonds les plus grossiers. Quelques coraux et éponges vivent sur les fonds meubles dans lesquels ils se maintiennent en développant un long pivot faisant office d'ancrage. Les vers sont représentés par des formes enfouies dans les sédiments sablo-vaseux et vaseux. Les sables moyens jusqu'aux graviers, dans lesquels les éléments sont parfois consolidés par des algues calcaires, favorisent à la fois la présence d'espèces de substrats durs et l'installation d'une grande variété d'espèces fouisseuses. Parfois, des échinodermes vivent sur des fonds constitués d'éboulis à proximité du littoral. Un gradient de décroissance de la productivité avec la profondeur est observé jusqu'aux environs de l'isobathe 60 mètres. La faune semble prospérer de nouveau jusqu'à l'approche du talus insulaire. Les aires infralittorales, comprises entre 0 et 20 m de profondeur, et circalittorales, de 60 à 80 m de profondeur, présentent les populations les plus riches en abondance comme en diversité (Paulmier & Durand, 1997).

## Risques de contamination par la chlordécone

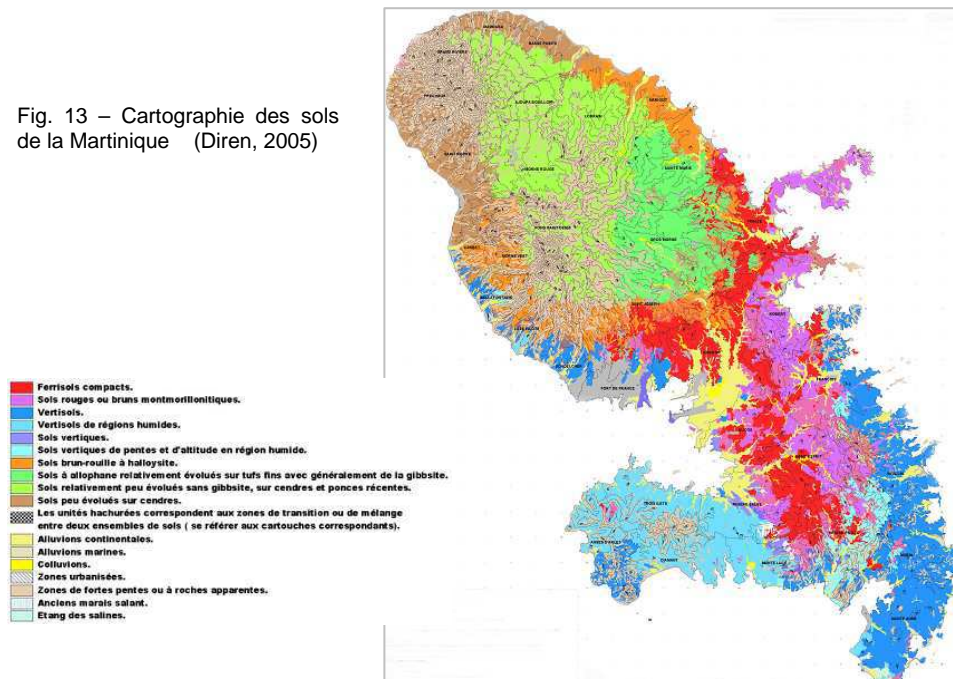
### > Les sols

La contamination des milieux par la chlordécone affectant d'abord les sols, la présente étude a conduit à prendre en compte les caractéristiques pédologiques de la Martinique dans son ensemble, puis à considérer plus spécifiquement ci-après les sols des bassins versants correspondant aux deux baies étudiées.

Parmi les différents processus physico-chimiques à l'origine de la formation des sols, le principal facteur qui intervient dans le cas de la Martinique, île volcanique sous influence tropicale humide et à substrats éruptifs, est l'hydrolyse, qui conduit principalement à des argiles (Duchauffour, 1997) et qui est plus ou moins accentuée selon les écarts climatiques sur l'île (pluviosité notamment). Du fait des différentes formations géologiques et surtout de la pluviosité importante variant sur une courte distance, il s'avère qu'un certain nombre de sols diversifiés peuvent se former en Martinique (fig. 13). Globalement, sept grandes classes de sols sont distinguées, qui peuvent être regroupées en deux familles d'âges différents (Colmet-Daage & Lagache, 1965) :

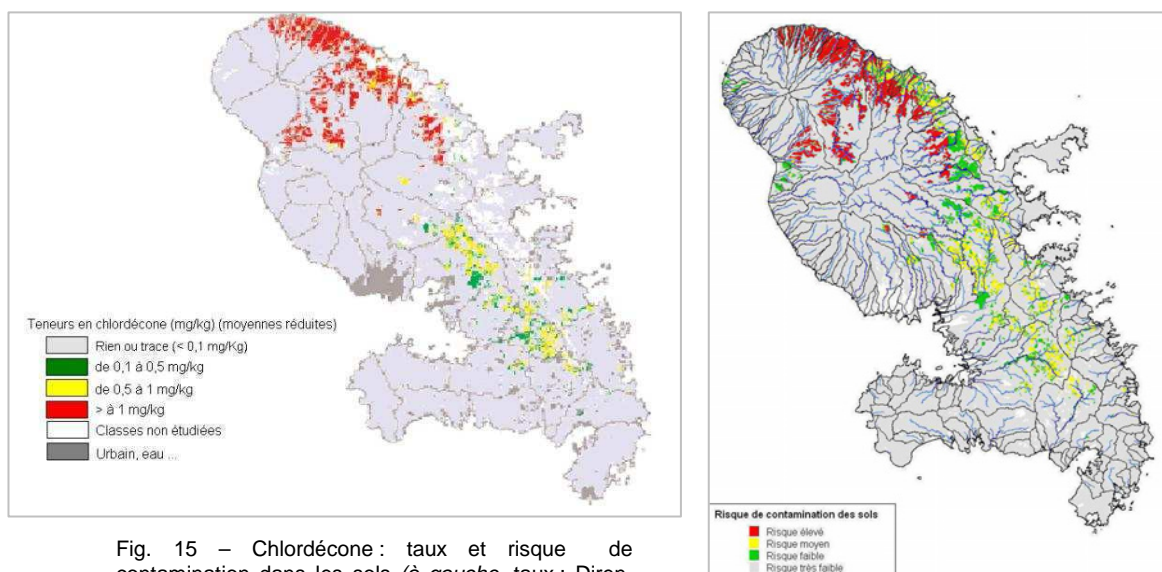
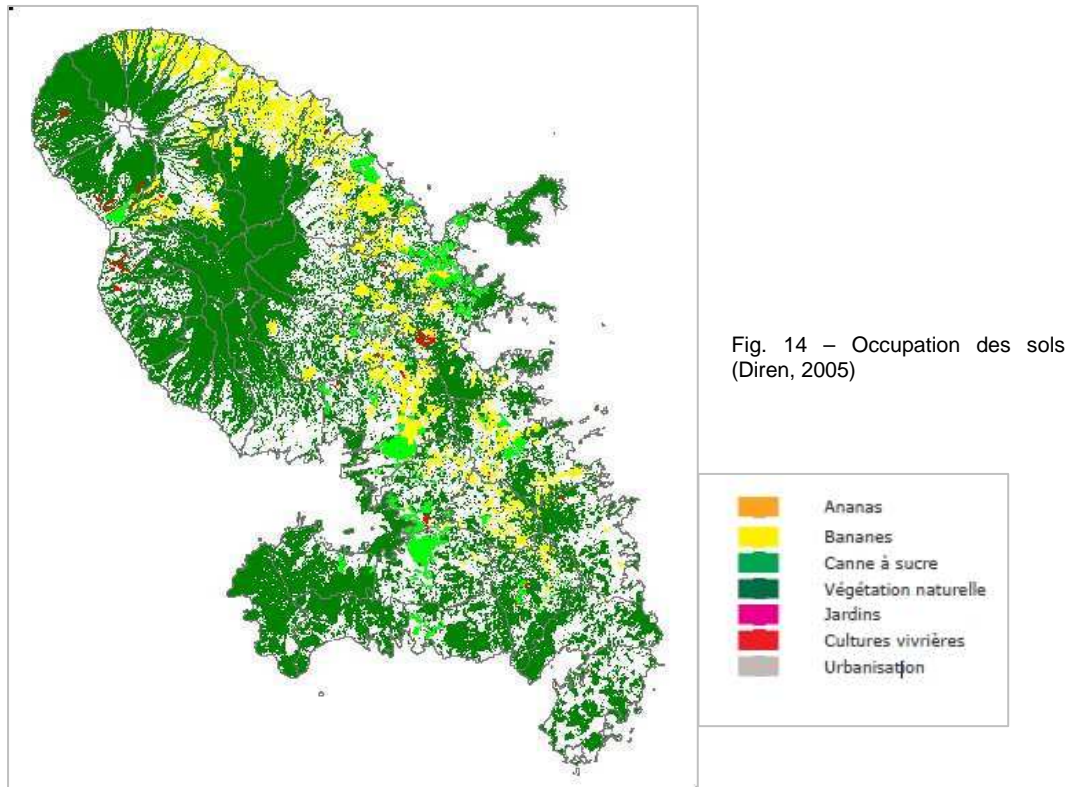
- une première famille de sols se développant sur des formations volcaniques anciennes et regroupant les *Sols ferrallitiques*, les *Ferrisols* et les *Vertisols* – Ces sols sont issus de processus d'altération et d'évolution durant de longues périodes sur des matériaux originels peu perméables ;
- une seconde famille de sols se développant sur des formations volcaniques récentes regroupant les sols peu évolués sur cendres et ponces (*Lithosols*), les sols à allophane (ou *Andosols*), les sols brun-rouille à halloysite et les sols sur alluvions – Issus de projections volcaniques récentes, ces sols jeunes semblent être apparentés avec des caractéristiques voisines, et leur évolution serait contrôlée par les variations climatiques.

Fig. 13 – Cartographie des sols de la Martinique (Diren, 2005)



## > L'occupation des sols

Les risques de contamination des sols par la chlordécone dépendent bien évidemment du type de cultures occupant les sols (fig. 14), notamment les bananeraies à l'origine de la contamination. Cette distribution des cultures ainsi que les mesures directes de contamination ont permis de cartographier les risques de contamination des sols sur l'ensemble de l'île (fig. 15).





## > Les cours d'eau et les eaux souterraines

En aval des sols, la contamination des cours d'eau (fig. 16) et des eaux souterraines (fig. 17) est à prendre également en compte, afin d'essayer de suivre ensuite le cheminement de la contamination dans le complexe : *sols (et cultures) – cours d'eau (en interaction avec les aquifères) – milieu marin (MES et sédiments / colonne d'eau)*.

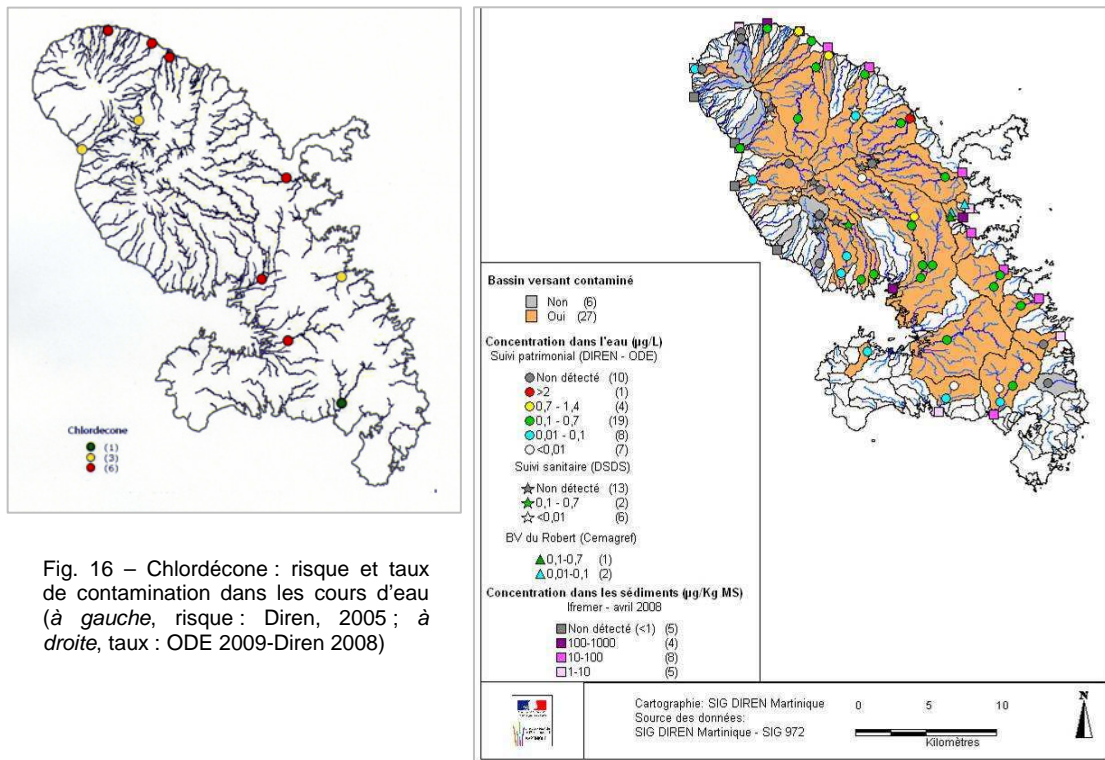


Fig. 16 – Chlordécone : risque et taux de contamination dans les cours d'eau (à gauche, risque : Diren, 2005 ; à droite, taux : ODE 2009-Diren 2008)

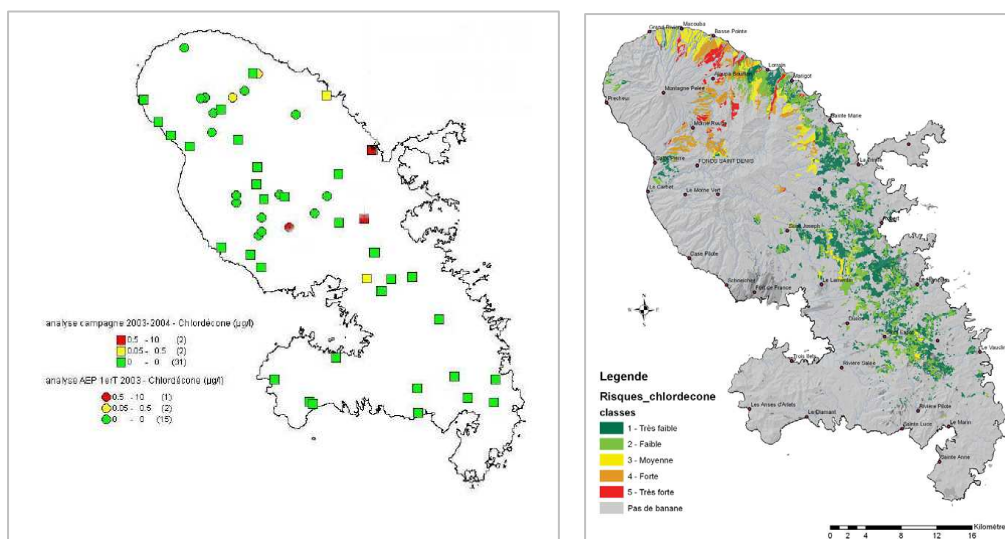


Fig. 17 – Chlordécone : taux et risque de contamination dans les eaux souterraines – d'après BRGM (à gauche, taux : Diren, 2005 ; à droite, risque : ODE 2009)

Du fait de la forte densité du réseau hydrographique, de la présence de bassins versant courts à forte pente, du régime pluviométrique important durant la saison des pluies, de la fragilité du substrat superficiel facilement érodable que constituent les sols tropicaux humides, l'érosion est forte et entraîne avec elle sédiments terrigènes et rejets d'origine anthropique (Brugneaux, 2004 ; Bertrand *et al.*, 2009) : c'est, en particulier le cas de la chlordécone qui a de fortes affinités avec les particules fines et la matière organique de ces apports (Cahiers du PRAM n°7, 2007 ; Cabidoche *et al.*, 2009).

## > Le milieu marin

Une évaluation globale du risque écotoxique littoral prenant en compte notamment celui engendré par la chlordécone (fig. 18) souligne le risque en la matière concernant le havre du Robert (risque localisé en fond de baie), mais surtout concernant la baie du Galion (risque fort à très fort, dans toute la baie). Comme pour les précédents écosystèmes, la contamination par la chlordécone du milieu marin et de la faune halieutique associée a également été appréhendée (Bertrand *et al.*, 2009).

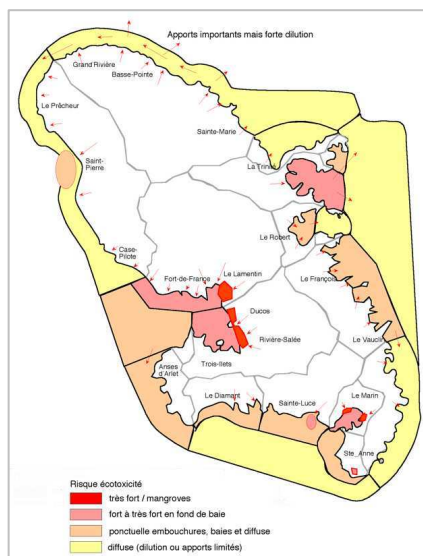
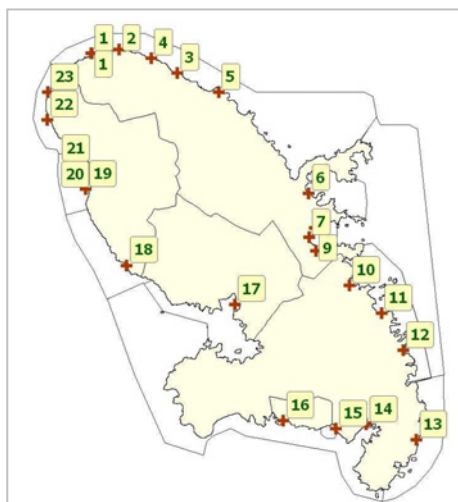


Fig. 18 – Risque écotoxique littoral (Diren, 2005)

Dans les travaux menés par Ifremer, des caractéristiques du milieu ont été étudiées, notamment la contamination par la chlordécone du sédiment superficiel des embouchures des principales rivières permanentes de l'île (fig. 19).



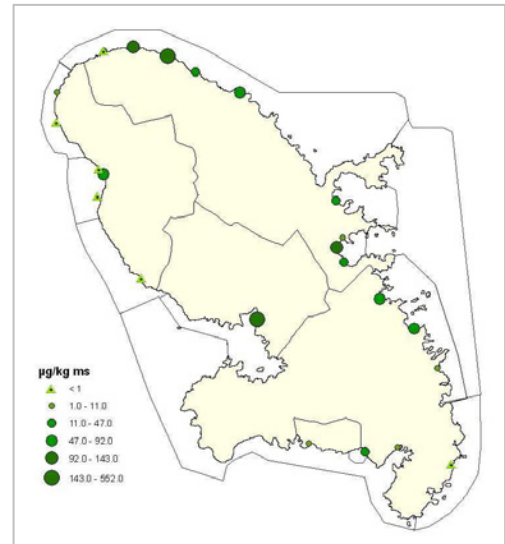
1 Grand Rivière (2 échantillons)	9 Rivière Cacao	17 Rivière la Lézarde
2 Rivière Macouba	10 Rivière du François	18 Rivière Case Pilote
3 Rivière Capot	11 Rivière du Simon	19 Rivière du Carbet
4 Rivière Basse Pointe	12 Rivière du Vauclin	20 Rivière Roxelane
5 Rivière du Lorrain	13 Rivière des Ebichets	21 Rivière des Pères
6 Rivière du Galion	14 Rivière du Marin	22 Rivière du Précheur
7 Rivière Mansarde	15 Rivière Pilote	23 Rivière de l'anse Céron
8 Rivière Gaschette	16 Rivière Oman (Trois rivières)	

Fig. 19 – Localisation des stations de prélèvements effectués en avril 2008 dans les sédiments des rivières de Martinique (Bertrand *et al.*, 2009)

Les résultats de cette étude montrent une grande variation dans la contamination de ces rivières. Ils sont en cohérence avec la contamination des bassins versants qui alimentent ces cours d'eau, sa distribution devant être rapprochée notamment de celle de la contamination des cours d'eau de la Martinique par la chlordécone, d'après les mesures faites par la Diren également en 2008 (fig. 20).

Stations	Chlordécone ( $\mu\text{g}/\text{kg p.s.}$ )	Stations	Chlordécone ( $\mu\text{g}/\text{kg p.s.}$ )
1 Grand Rivière 1	0,5 < 1	12 Rivière du Vauclin	5
1 Grand Rivière 2	8	13 Rivière des Ebichets	0,5 < 1
2 Rivière Macouba	143	14 Rivière du Marin	11
3 Rivière Capot	26	15 Rivière Pilote	38
4 Rivière Basse Pointe	549	16 Rivière Oman (Trois rivières)	3
5 Rivière du Lorrain	54	17 Rivière la Lézarde	552
6 Rivière du Galion	47	18 Rivière Case Pilote	0,5 < 1
7 Rivière Mansarde	143	19 Rivière du Carbet	0,5 < 1
8 Rivière Gaschette	5	20 Rivière Roxelane	69
9 Rivière Cacao	23	21 Rivière des Pères	0,5 < 1
10 Rivière du François	92	22 Rivière du Prêcheur	0,5 < 1
11 Rivière du Simon	62	23 Rivière de l'anse Céron	9

Fig. 20 – Concentrations en chlordécone (*ci-dessus*) relevées dans les sédiments des exutoires des rivières en 2008 et distribution de la concentration en chlordécone (*à droite*) dans les sédiments des rivières relevée en 2008 (Bertrand *et al.*, 2009)



D'autres travaux centrés sur le havre du Robert ont été menés en commun par les organismes scientifiques regroupés au sein du Pôle de recherche agro-environnementale de la Martinique (PRAM) et l'Ifremer concernant le transfert de la chlordécone du bassin versant vers le milieu marin (Rocle *et al.*, 2009). Plus récemment, une étude a été conduite par l'Ifremer sur le devenir de la chlordécone dans le réseau trophique des espèces marines consommées (projet Chloretro : Bodiguel *et al.*, 2011). Les résultats de ces travaux relatifs aux sédiments marins seront comparés à ceux de la présente étude dans la partie 'Discussion' de ce rapport.



## [2] CADRE DE L'ÉTUDE : LE HAVRE DU ROBERT ET LA BAIE DU GALION

### Le havre du Robert et la baie du Galion - Similitudes et différences

#### > Dans le milieu marin

Dans le chapitre précédent, les traits caractéristiques de la côte sud-atlantique dont font partie le havre du Robert et la baie du Galion ont été rappelés. Il s'agit ici de changer d'échelle et d'étudier les points communs et les spécificités de chacune des deux baies.

Au préalable, il convient de mentionner à nouveau que, du point de vue de ses **caractéristiques géomorphologiques**, la partie côtière de la façade sud-orientale de la Martinique, principalement aux abords du Robert, du François et du Vauclin, est occupée par des récifs-barrières externes, échancrés d'anses et de baies, elles-mêmes parsemées par des récifs coralliens ("cayes") soulignant en extension les pointes et promontoires, et par des hauts-fonds ("loups") séparés par des chenaux de profondeur variable. Cependant, si toutes les deux sont des baies bien découpées (et les deux plus grandes de cette côte), le havre du Robert et la baie du Galion diffèrent (fig. 21) : (i) *primo*, le havre du Robert, de forme rectangulaire ( $21 \text{ km}^2$ ) et d'orientation est-ouest, pénètre plus profondément dans les terres et se trouve donc exposé plein est, tandis que la baie du Galion, de forme plus circulaire et d'orientation nord-ouest / sud-est, est relativement plus grande ( $25 \text{ km}^2$ ), avec une exposition essentiellement aux houles de sud-est ; (ii) *secundo*, l'entrée du havre du Robert est protégée par une dizaine d'îlets entourés de récifs coralliens, lui conférant un caractère de baie 'semi-fermée', tandis que la baie du Galion, seulement protégée des houles du nord par la presqu'île de la Caravelle, se présente comme une baie 'ouverte'.

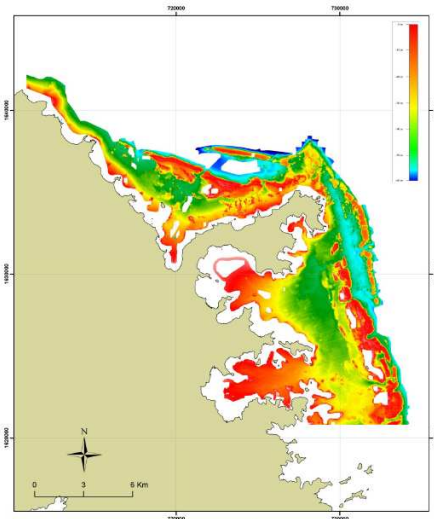


Fig. 21 Bathymétrie générale des deux baies et des zones adjacentes (Legrand, 2009)

Concernant les **facteurs hydrodynamiques** régissant ces deux baies, le marnage moyen sur la côte atlantique est de l'ordre de 0,5 m, pouvant atteindre 0,7 m au maximum, générant des **courants de marée** faibles (moyennes de  $0,10 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ , avec des maxima de  $0,20$  à  $0,25 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  – Durand, 1996), sans distinction entre le flot et le jusant. Du fait de leurs vitesses, ces courants ne peuvent pas être considérés comme des facteurs déterminants dans le transport des sédiments grossiers, mais ils peuvent l'être dans le cas de particules fines en suspension. Cependant, sous l'effet de tempêtes, des zones habituellement non

recouvertes par la mer peuvent être attaquées, l'énergie déployée étant plus grande et les sédiments étant alors transportés parallèlement à la côte (plutôt que vers le large), ce qui peut expliquer, dans ce cas, le 'vannage' des particules fines.

Hors période de cyclones ou de précipitations importantes durant la période des alizés, les *pluies* ont peu d'impact sur la sédimentation. En revanche, lors du passage de cyclones accompagnés généralement de pluies violentes dont la force croît progressivement au fur et à mesure qu'ils s'approchent de l'île, les précipitations et les forts débits des rivières jouent un rôle non négligeable dans l'apport de matériel terrestre dans et autour de l'embouchure des rivières (Durand, 1996). Les dépôts s'étendent alors de l'estran vers les faibles profondeurs, constituant des couches sédimentaires graduelles pouvant être remises en suspension et éventuellement transportées vers le large.

Plusieurs types d'action des *vents* doivent être distingués. D'abord, l'action éolienne directe n'est pas significative du fait de la faiblesse des alizés, ce qui implique qu'il en est de même pour les courants induits par le vent. Ainsi, en Martinique, les courants, même en période cyclonique, ne sont responsables d'aucune mobilisation côtière, l'action conjuguée des courants de marée et des courants induits par le vent en période cyclonique ne pouvant entraîner qu'éventuellement (?) des sables très fins et la fraction la plus fine des sables fins (Durand, 1996). Néanmoins, la présence des formations sédimentaires peut dans certains cas avoir un certain effet sur les courants, du fait qu'elles constituent un obstacle à la propagation des courants et qu'elles canalisent et augmentent leurs vitesses dans les chenaux et les passes. Il a ainsi été mesuré des vitesses maximales moyennées sur la profondeur variant de 0,70 à 0,90 m.s<sup>-1</sup>, alors que, même à 1 m au-dessus du fond, elles sont encore de l'ordre de 0,45-0,60 m.s<sup>-1</sup>, capables donc de mobiliser des sables grossiers (Durand, 1996).

En revanche, d'autres actions dues aux vents sont importantes à considérer lorsque ces derniers génèrent des *houles*, selon leurs caractéristiques propres.

En période normale, les houles d'alizés ont un impact limité sur la dynamique sédimentaire. Sur la base d'observations décennales effectuées sur la station de la Caravelle par Météo-France, la Diren de Martinique a rapporté qu'une houle de 2 mètres d'amplitude et de période de 8 secondes est représentative des houles maximales régnant en ces périodes d'alizés. En terme hydrosédimentaire, cette action correspond à différents degrés de mobilisation de types de sédiments, puisqu'ainsi sont atteints les silts (0,04-0,06 mm) jusqu'à 6 m de profondeur d'eau, les sables très fins (0,06-0,125 mm) jusqu'à 3,5 m et les sables fins (0,125-0,25 mm) jusqu'à 1,5 m. En revanche, les sédiments très fins de type argileux (< 0,04 mm), comme à l'opposé les sédiments moyens (> 0,25 mm) et ceux de plus grande granulométrie, ne sont jamais déplacés (Durand, 1996). Il s'en déduit que le déferlement des houles d'alizés aux abords de la barrière récifale actuelle provoque un effet mécanique peu important.

En période extrême, les effets des houles cycloniques sur la mobilisation des sédiments sont par contre importants même si, lors de la diminution de la profondeur ou à l'arrivée sur la barrière corallienne, l'énergie et la hauteur de la houle subissent de fortes réductions en relation avec la hauteur d'eau au-dessus des formations récifales. Ainsi, la hauteur des vagues est réduite de 20% entre 10 et 20 m de profondeur, de 26% entre 20 et 5 m et de 82% lorsque la houle passe sur le récif, tandis que, simultanément, leur énergie diminue de 35% entre 10 et 20 m de profondeur, de 45% entre 20 et 5 m et de 97% en passant de l'avant-récif à l'arrière-récif (Durand, 1996 – d'après différents auteurs). Les vagues de tempête, aux caractéristiques hydrodynamiques plus importantes que les vagues d'alizés, initient le phénomène de fragmentation des formations récifales, les destructions s'opérant à l'avant et sur la crête du récif. Le déferlement sur la crête génère alors un courant perpendiculaire au récif capable de transporter des sédiments grossiers, tandis que les courants à l'arrière-récif sont faibles et les sédiments fins restent en suspension plus longtemps que les grossiers (Durand, 1996 – d'après différents auteurs). Le bilan de ces courants induits par les vagues est que le transport de sédiments grossiers s'effectue à partir de l'avant-récif et de la crête vers l'arrière-récif, lieu de dépôt où les courants de déferlement sont rapidement atténués. Les courants dans les environnements d'arrière-récifs peu profonds sont ainsi sous la dépendance de courants résultant du déferlement des vagues, les récifs constituant alors une protection pour les grains plus fins qui se trouvent piégés au-dessous des éléments grossiers (Durand, 1996 – d'après Komar, 1987).

L'étude de la **nature des sédiments récents** de ces deux baies (Durand *et al.*, 1998) montre que les formations superficielles comprises entre la presqu'île de la Caravelle et l'extrémité sud de l'île sont constituées de sédiments à haute teneur en carbonates (au contraire de la partie nord-atlantique dans laquelle les dépôts sont mixtes, volcaniques et biogènes), résultat du démantèlement par la houle des barrières coralliennes récentes et/ou fossiles. Près des côtes, dans la zone protégée par la barrière récifale actuelle, la sédimentation est plus fine, toujours à dominante carbonatée, sauf en fond de baie où elle est d'origine terrigène.

Si la mobilisation des sédiments est gouvernée par l'énergie des agents dynamiques, par la profondeur, par la distance par rapport à la côte et par l'exposition au vent ou sous le vent de la zone considérée (Durand, 1996 – d'après Rodriguez *et al.*, 1994), par contre le vent apparaît comme un facteur important contrôlant à la fois l'organisation fonctionnelle des coraux (brassage et oxygénation des eaux) et le transport des sédiments par l'intermédiaire des courants induits par le vent et par les houles. Ainsi, en période d'alizés, les coraux croissent et le sable s'accumule dans les dépressions, tandis que lors des perturbations météorologiques, les formations coralliennes subissent d'importants dégâts et les sédiments sont remaniés (Durand, 1996 – d'après différents auteurs). De plus, sur les plates-formes situées sur la trajectoire des cyclones, les dépôts mis en place en période météorologique perturbée alternent avec les couches déposées hors période cyclonique, la distribution des sédiments se modifiant du haut vers le bas de plage en raison de la diminution de l'énergie, mais également en raison du tri des matériaux (Durand, 1996).

### > En rapport avec leur bassin versant

D'après les données cartographiques présentées dans le chapitre précédent, la nature des sols et l'organisation des bassins versants et des rivières associées diffèrent fortement entre le havre du Robert et la baie du Galion.

Les principales différences entre leurs bassins versants selon la **nature des sols** (fig. 22) sont les suivantes :

- concernant la baie du Galion, excepté la *quasi* totalité des formations de la presqu'île de la Caravelle qui est constituée de *sols rouges ou bruns montmorillonitiques*, l'ensemble du bassin versant de la baie est composé de *ferrisols compacts* (ou *sols ferralitiques*), ces derniers étant drainés par la rivière du Galion, le seul cours d'eau débouchant dans la baie ;
- concernant le havre du Robert, l'ensemble des sols du bassin versant correspondant sont des *sols rouges ou bruns montmorillonitiques* drainés par les trois principales rivières se jetant dans la baie, sauf dans la zone méridionale dans laquelle on trouve successivement d'ouest en est des *ferrisols compacts* à partir de la localité de Reynoird, puis des *vertisols* de la pointe Hyacinthe en direction du large.

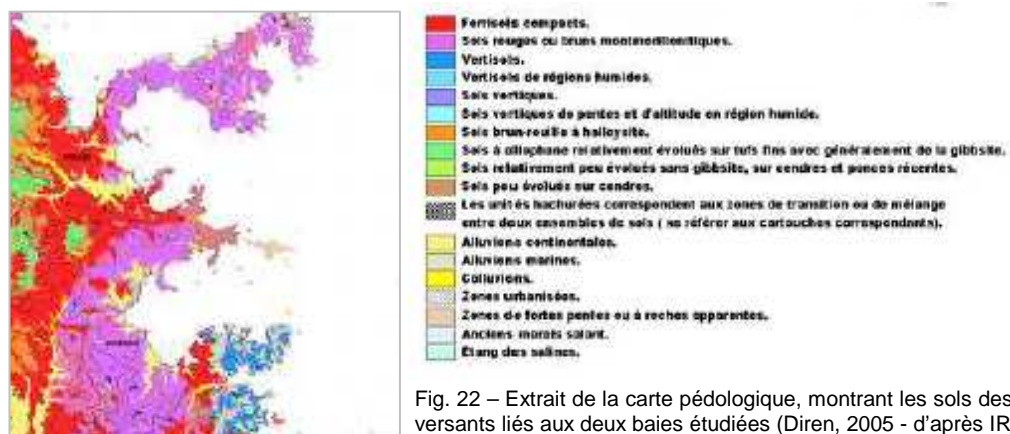


Fig. 22 – Extrait de la carte pédologique, montrant les sols des bassins versants liés aux deux baies étudiées (Diren, 2005 - d'après IRD)

Les caractéristiques de ces trois types de sols (Atlan, 1990 ; Khamsouk, 2001 – d’après Colmet-Daage & Lagache, 1965 & Colmet-Daage, 1969), rappelées ci-dessous, expliquent leur comportement vis-à-vis de la chlordécone.

Les *ferrisols compacts* (ou *sols ferrallitiques*) sont des sols de climat tropical humide à saison sèche modérée de 3 à 4 mois (précipitations de 1700 à 3000 mm/an), de teintes rouges et/ou bariolées. Ce sont des sols profonds (un à plusieurs mètres d’épaisseur, voire jusqu’à 10 m) à argile kaolinite dominante (et parfois des quantités notables de montmorillonite, voire de la méta-halloysite) et à oxy-hydroxyde de fer (goethite abondant), développés sur des projections volcaniques épaisses (type andésite, labradorite et dacite) ou sur d’anciennes altérations de tufs. Ils se caractérisent par une texture argileuse à très argileuse (60-80% d’argile), une teneur en eau d’environ 50% (leurs caractéristiques physiques n’étant guère modifiées par les phénomènes de dessiccation), un taux de matière organique MO de 2 à 3%, une capacité d’échange cationique CEC de 12 à 20 meq/100 g sol sec en surface, par une structure en agrégats (horizon superficiel) et une sous-structure polyédrique (horizon profond). Ils sont largement cultivés en bananeraie, en canne à sucre ou encore en cultures vivrières.

Les *sols rouges* ou *bruns montmorillonitiques* et les *vertisols* sont deux types de sols qui, surtout les seconds, occupent les régions les plus sèches de la Martinique et sont des matériaux à argiles gonflantes, leur densité apparente étant d’environ 1,1 et de larges fentes de retrait (1 à 4 cm) peuvent y être observées en saison sèche (Atlan, 1990).

Les *sols rouges* ou *bruns montmorillonitiques* (anciennement appelés ‘*ferrisols*’) sont des sols voisins des sols ferrallitiques, liés à un climat analogue, quoique plus sec (précipitations de 1600 à 2300 mm/an). Ce sont des sols à kaolinite, riches en hydroxydes de fer, formés sur des collines de brèches ou coulées de type andésites et labradorites anciennes ou sur des tufs andésites labradorites récents. En général, ils ont une texture argileuse allant de 20% d’argile en surface à 50-60% en profondeur, un taux de MO de 2,5 à 4%, une CEC de 15 à 25 meq/100 g sol sec (horizon superficiel) et une structure friable en surface et peu nette en profondeur. Comparativement aux sols ferrallitiques, ils semblent avoir une pédogenèse moins poussée liée à un climat plus sec, une texture plus pauvre en argile et plus riche en limon et sont principalement cultivés en canne à sucre et en banane.

Les *vertisols* sont localisés près des côtes sud caractérisées par une saison sèche marquée (précipitations de 500 à 1500 mm/an). Ce sont des sols noirs à argiles gonflantes (montmorillonite) provoquant des fentes de retrait ou des fissurations en période sèche. Développés sur diverses formations volcaniques anciennes (coulées, brèches et surtout tufs), ils se distinguent par une texture argileuse (40-80% d’argile), un taux de MO de 2 à 4% en surface, une CEC d’environ 80 meq/100 g sol sec et par une structure variable selon l’humidité du sol (l’état humide correspondant à une structure large en surface, puis massive et continue en profondeur et l’état sec correspondant à une structure très fissurée). Cette propriété de gonflement/retrait par rapport à l’humidité est source de contrainte pour le labour du sol tant en saison sèche (sol fissuré et dur à travailler) qu’en saison humide (sol plastique et lourd à travailler), ces sols étant occupés par des champs de canne à sucre, des cultures maraîchères, des prairies et depuis peu des bananeraies.

En référence à l’**occupation des sols**, les bassins versants correspondant aux deux baies sont également différents puisque, si des bananeraies sont présentes dans les deux systèmes, avec un léger avantage pour le bassin versant lié à la baie du Galion (Dao *et al.*, 2003), ce dernier héberge de plus un domaine de canne à sucre assez important (fig. 23).



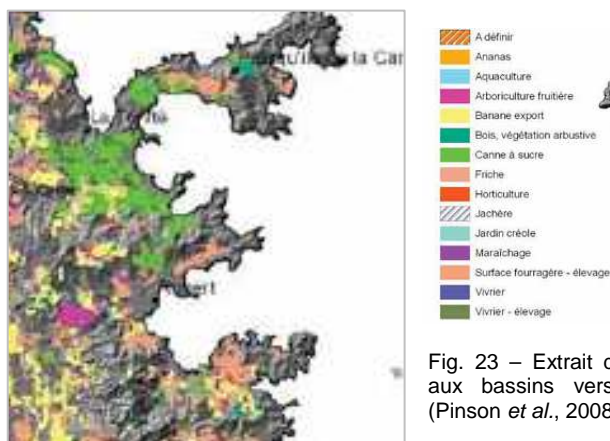


Fig. 23 – Extrait de la sole agricole, correspondant aux bassins versants des deux baies étudiées (Pinson *et al.*, 2008)

En termes d'impact sur les **eaux souterraines**, le risque de pollutions par les intrants agricoles est faible, leur vulnérabilité étant toutefois plus importante dans la baie du Galion que dans le havre du Robert (dans lequel elle est moyenne), sauf en ce qui concerne la rivière du Galion où elle est nettement plus forte (fig. 24). Ce constat doit être mis en relation avec la pauvreté en aquifères poreux dans cette zone (Lions *et al.*, 2008), les eaux souterraines étant diffuses, voire *quasi* inexistantes sur le littoral. Quant à la 'pression' des intrants agricoles, elle s'avère être plus significative pour la baie du Galion que pour le havre du Robert (fig. 25).

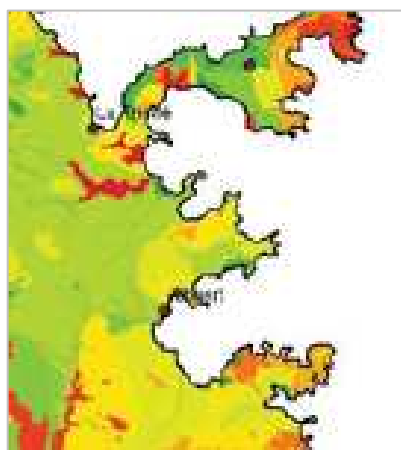


Fig. 24 – Extrait de la carte de vulnérabilité des eaux souterraines, correspondant aux bassins versants des deux baies étudiées (Pinson *et al.*, 2008)

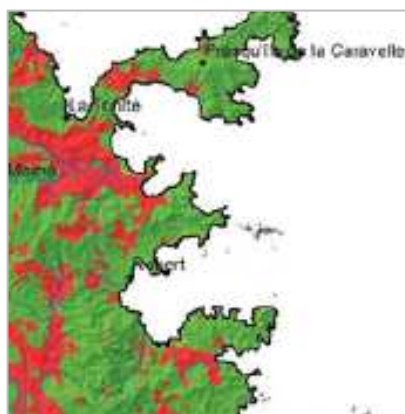
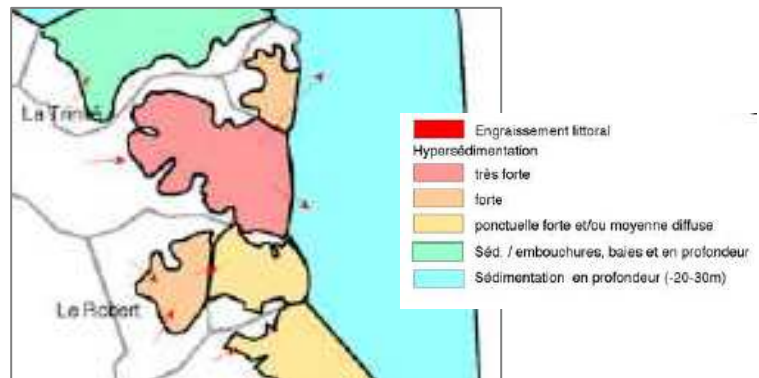


Fig. 25 – Extrait de la carte de pression 'intrants agricoles', correspondant aux bassins versants des deux baies étudiées (Pinson *et al.*, 2008)

Enfin, l'impact des **perturbations terrigènes sur l'envasement** (fig. 26) apparaît nettement plus important dans la baie du Galion que dans le havre du Robert.

Fig.26 – Impact des perturbations terrigènes sur le littoral (Diren, 2005)



## Caractéristiques du havre du Robert

Les données recueillies concernant le bassin versant de le havre du Robert sont assez importantes du fait que cette baie ait été choisie dès 2003 (lors du programme Liteau II) comme zone-atelier par l'Ifremer et le Cemagref, ainsi que différents organismes (Cirad, Inra, IRD) regroupés au sein du Pôle de recherche agro-environnementale de la Martinique (PRAM) et l'Université des Antilles et de la Guyane (UAG). Ainsi, des études intégrées ont été menées (Dao *et al.*, 2003 ; Rocle *et al.*, 2009), même si avant les campagnes de l'Ifremer de 2008 le domaine marin n'a pas pu bénéficier d'une mobilisation aussi importante dans les moyens d'étude.

Les principales **caractéristiques physiques du havre du Robert** sont rappelées ci-dessous, d'après les résultats des études précédentes (Dao *et al.*, 2003).

Le havre du Robert (21 km<sup>2</sup>) est une baie semi-fermée à côte très découpée formant sept micro-baies internes, son plan d'eau étant parsemé de dix îlets et d'un grand nombre de hauts fonds récifaux ("cayes" et "loups"). Il est fermé au large par un récif-barrière discontinu et un tombant récifal (5 km de long). Cette baie constitue ainsi un patchwork d'habitats diversifiés favorisant l'installation d'écosystèmes étroitement imbriqués, notamment de nombreuses mangroves (représentant 4,5 km de linéaire, soit près de 11% de l'ensemble des mangroves martiniquaises), de vastes herbiers de phanérogames (211 ha) et de nombreux petits récifs frangeants internes (81 ha de communautés mixtes herbiers-coraux).

Du fait de l'orientation de la baie (E-W) face aux vents dominants, l'énergie des alizés se traduit par la formation d'une houle au large dont une partie pénètre par le chenal et par déferlement sur les récifs, complétée par un clapot et un courant superficiel provoqué par le vent local qui pousse les eaux de surface vers le fond de la baie. Les vents, soutenus de novembre à mai ("carême" avec les intersaisons) et plus intermittents de juin à octobre lors de la saison des pluies ("hivernage") maintiennent quasiment toute l'année ce courant de surface, même faiblement ; il existe également une variation nyctémérale du vent avec une atténuation la nuit, une reprise en matinée avec un maximum à mi-journée. Comme l'eau rentrante poussée par les courants de vent ne peut pas s'accumuler, elle s'évacue par un phénomène de chasse compensatoire influencé par la marée, même si son marnage est faible, faisant alors alterner des phases de vidange (marée descendante) et de blocage (marée montante). De plus, l'existence de hauts fonds à l'entrée de la baie entre les îlets et la côte rendant l'arrivée de l'eau du large *quasi* permanente par les courants de surface liés aux vents dominants, la sortie des eaux ne peut s'effectuer qu'en profondeur, soit uniquement par le seul chenal profond d'entrée de la baie (la passe de l'Est de l'îlet Ti-

Piton). Le temps de résidence des eaux des effluents, du fait de la présence des îlets, impliquerait un renouvellement des eaux de la baie estimé entre 2% et 8% par jour selon la marée.

D'autres données mesurées ou simulées ont été acquises, lors de campagnes à objectifs appliqués (Impact-Mer, 2005 & 2007) comme la sédimentation des matières en suspension (MES), l'eutrophisation, la cartographie des biocénoses benthiques ou encore en support d'autres études, comme les travaux de modélisation hydrodynamique des rejets d'épuration (Safège, 2006). Selon leur degré de pertinence, ces données seront prises en compte dans la partie '*Discussion*' du présent rapport.

Les **traits physiques** généraux du **bassin versant associé** au havre du Robert sont de divers ordres (Dao *et al.*, 2003 ; Safège, 2006 ; Rocle *et al.*, 2009).

D'abord, du point de vue météo-climatique, le régime des vents dépend du temps : lorsqu'il est sec, la dominance est NE, avec parfois des fluctuations ENE-ESE.

Le régime des pluies est variable selon les saisons à l'échelle du bassin versant. Si les températures sont relativement constantes avec une moyenne annuelle de 25°C, le rythme des pluies est caractérisé par une double irrégularité, spatiale et temporelle. Leurs variations spatiales sont liées aux pluies orographiques, issues de la conjonction entre les nuages poussés par les vents et les turbulences formées par le relief. La partie amont du bassin formée par une "chaîne" de mornes de 300 à 400 m d'altitude est ainsi plus arrosée que le littoral. De fait, les variations temporelles sont marquées par l'alternance saison sèche / saison humide : en saison sèche, seules les pluies orographiques arrosent le bassin, tandis qu'en saison humide ce dernier est soumis au passage des ondes tropicales et des cyclones, distribuées uniformément.

Enfin, du point de vue géomorphologique et fonctionnel, le bassin versant associé au havre du Robert, qui est très particulier par sa forme (avec 23 km<sup>2</sup> de superficie) et par son relief très vallonné (avec 27% de pente) le différenciant en de nombreux 'sous-bassins versants'. Ramassé autour de la baie, il est drainé par 22 cours d'eau tributaires au régime hydrique turbulent et parfois temporaire, suite aux épisodes pluvieux violents. Cette organisation induit l'existence d'un réseau hydrographique dense constitué de trois rivières et de ravines qui partent des lignes de crête avec de fortes pentes dans leur partie amont et arrivent sans détour à la baie. Ces trois cours d'eau principaux et permanents, mais à débit moyen modeste (hors crues) sont du nord au sud (Dao *et al.*, 2003 ; Safège, 2006) : la ravine Gaschette, avec 3.0 km<sup>2</sup> de superficie de sous-bassin et 20 m<sup>3</sup>/s de débit maximal estimé (crues), la ravine Mansarde-Voltaire, avec 4,2 km<sup>2</sup> de superficie de sous-bassin et 29 m<sup>3</sup>/s de débit maximal estimé, ainsi que la rivière Cacao avec 6,3 km<sup>2</sup> de superficie de sous-bassin (et un linéaire de 4,6 km, le plus long de la zone) et 40 m<sup>3</sup>/s de débit maximal estimé. La partie aval des cours d'eau les plus importants est canalisée pour protéger les zones urbanisées potentiellement inondables. Le bassin versant présente donc des caractéristiques propices au transfert rapide des produits du milieu terrestre au milieu marin, d'origine anthropique ou naturelle.

L'analyse du **fonctionnement physique de l'interface 'bassin versant / milieu récepteur marin'** (Dao *et al.*, 2003) montre l'existence d'un transfert important par ruissellement de particules vers le littoral. Une grande partie sédimente près de l'exutoire, tandis que les particules les plus fines créent un panache très turbide dans le fond du havre du Robert et des "culs de sac" qui le composent, ce panache pouvant s'étendre sur le tiers de la surface et gagner par dilution progressive l'ensemble de la baie. Son évolution est la résultante de plusieurs phénomènes, la tendance principale semblant être associée au vent provoquant le courant de surface poussant les eaux vers le fond et piégeant le panache. L'action est amplifiée par le vent qui provoque un clapot sur les zones de très faible profondeur, lequel peut remettre en suspension les particules fines déposées par les événements antérieurs et entretenir la turbidité, les courants de retour en profondeur entraînant, quant à eux, les particules qui sédimentent peu à peu dans la baie. Le panache turbide qui s'étend en profondeur peut subir des mouvements ascendants dus à la topographie des fonds : le mélange se fait ainsi peu à peu, dépendant des courants engendrés par la marée et surtout par les vents.

L'effet de piégeage et de rétention des particules fines est caractéristique du sud de la côte est de Martinique, mais il est particulièrement accusé en havre du Robert. Plusieurs conséquences en sont déduites (Dao *et al.*, 2003) : (i) l'effet de la forte turbidité sur l'activité biologique de certains organismes du fait de la pénétration perturbée de la lumière ; (ii) le dépôt en zones abritées ou en profondeur des particules sur la surface des plantes et des substrats sur lesquels viennent se fixer les épiphytes, dépôt qui peut constituer un frein au recrutement des organismes fixés ; (iii) la protection des hauts fonds du centre et de l'est de la baie et de leurs habitats vis-à-vis du clapot et des courants de vent alors que les sédiments des zones exposées et peu profondes sont susceptibles d'être remis en suspension ; (iv) le maintien dans la colonne d'eau des substances dissoutes (nutriments et matière organique) pouvant subir par rétention une autoépuration efficace en fond de baie grâce à un ensoleillement et une température favorables ; (v) l'envasement du fond de baie et des exutoires des sous-bassins versants qualifié de très important par les résidents de longue date, envasement ayant pu contribuer à modifier le tracé de la côte en association avec la mise en place de remblais ; (vi) vis-à-vis de l'eutrophisation de la baie modifiant les peuplements benthiques, caractérisés par une augmentation de la colonisation en macro-algues et invertébrés coloniaux opportunistes aux dépens des coraux et des herbiers de phanérogames.

## Caractéristiques de la baie du Galion

Si les données disponibles relatives au havre du Robert deviennent assez importantes, du fait de sa prise en compte comme zone-atelier dans une perspective d'exploration 'intégrée' (GIZC), il n'en est pas de même pour la baie du Galion, excepté des travaux de "cartographie diachronique" (Saffache, 2000).

Le bassin versant associé à la baie du Galion est semblable morphologiquement à celui du havre du Robert, avec des petites collines aux versants faiblement inclinés (10 % environ), composés de sols homogènes et partiellement recouverts de canne à sucre. En revanche, son réseau hydrographique est très différent, puisque non diffus, mais plutôt concentré en un seul cours d'eau d'importance, la rivière du Galion. Avec ses 44 km<sup>2</sup> de superficie, ce sous-bassin constitue le 4<sup>ème</sup> bassin versant de la Martinique, avec de plus forts débits pour la rivière du Galion que pour les rivières du havre du Robert : 0,5 m<sup>3</sup>/s.de débit moyen et 250 m<sup>3</sup>/s de débit estimé lors du passage du cyclone David (Saffache, 2000).

La superficie de la baie du Galion est de 25 km<sup>2</sup>, la frange côtière, peu escarpée et constituée d'un substrat vaseux, étant colonisée par des plantes halophiles. Dans la baie, les profondeurs sont extrêmement faibles puisqu'à proximité du rivage les isobathes oscillent de 0,2 à 0,5 m, l'isobathe 1,9 m se trouvant à 70 m de la côte et l'isobathe 10 m à plus de 800 m. L'analyse diachronique des cartes topographiques indique que la baie du Galion est le siège d'une importante accumulation sédimentaire : en 39 ans, plus de 10 ha ont été gagnés sur la mer, ce qui représente une progradation moyenne du rivage de 30 m environ (Saffache, 2000). Par ailleurs, il a été mesuré un linéaire de mangroves de 2,1 km.

## [3] MATÉRIELS ET MÉTHODES

Centrée sur des systèmes sédimentaires côtiers reconnus comme significativement contaminés par la chlordécone que sont en Martinique, outre la baie de Fort-de-France, le havre du Robert et la baie du Galion, la **stratégie d'échantillonnage** de la présente étude a été établie en référence aux questionnements antérieurs (Bertrand *et al.*, 2009) et aux connaissances disponibles sur la dynamique sédimentaire dans ces zones d'étude.

Afin de caractériser les sédiments potentiellement contaminés (vases et vases sableuses), le premier objectif était, à partir des cartes sédimentaires (Augris *et al.*, 2000) et biocénétiques (Legrand, 2009) déjà dressées, de réaliser une étude sédimentologique détaillée, fondée sur l'examen de la **nature texturale** (effectué par microgranulométrie) et du **comportement rhéophysique\*** (effectué par rhéométrie).

Par ailleurs, notamment en Martinique, la fraction minérale des sédiments fins peut être issue de calcaire marin ou de matériel d'origine volcanique (Pons, 1987 ; Durand, 1996), ce qui implique de prendre alors en considération les éléments volcaniques terrestres. C'est pourquoi, la **nature minéralogique** des sédiments a été recherchée en effectuant des analyses, notamment concernant les minéraux argileux, afin de caractériser l'origine (marine ou terrestre) des sédiments et d'essayer de comprendre, selon la nature de ces minéraux, les capacités de piégeage et relargage des dépôts vis-à-vis de la chlordécone.

En outre, des observations antérieures, notamment dans le havre du Robert, ont indiqué de grands et rapides changements de l'épaisseur des sédiments, cette dynamique dans la sédimentation induisant la perspective d'une bonne identification des couches successives du fait de la réduction de l'impact relatif de la bioturbation. L'**état de structuration** présumée et l'influence biologique sur la structure du sédiment ont été ainsi appréhendés par l'étude en imagerie RX de carottes entières, tandis que les **taux de sédimentation** l'ont été par radiodatation.

Ensuite, l'influence de la **matière organique (particulaire)** a été étudiée. En effet, du fait de la complexation de la chlordécone par cette dernière décelée dans les sols et les MES des cours d'eau (Cattan *et al.*, 2006 ; Rocle *et al.*, 2009), l'hypothèse de ce processus doit être également vérifiée dans les sédiments fins marins. Il s'est alors agi de quantifier la part de la matière organique particulaire dans les couches sédimentaires, d'en identifier le degré de dégradation et de chercher à en caractériser l'origine (terrestre ou marine).

Quant à la **teneur en chlordécone**, des analyses ont été effectuées sur une série de sédiments, afin de rechercher la corrélation entre le taux de contamination et les caractéristiques physiques et physico-chimiques des sédiments déterminées antérieurement.

\* **Quelques explications sur le comportement rhéophysique** Kervella *et al.*, 2009 ; Pantet *et al.*, 2010

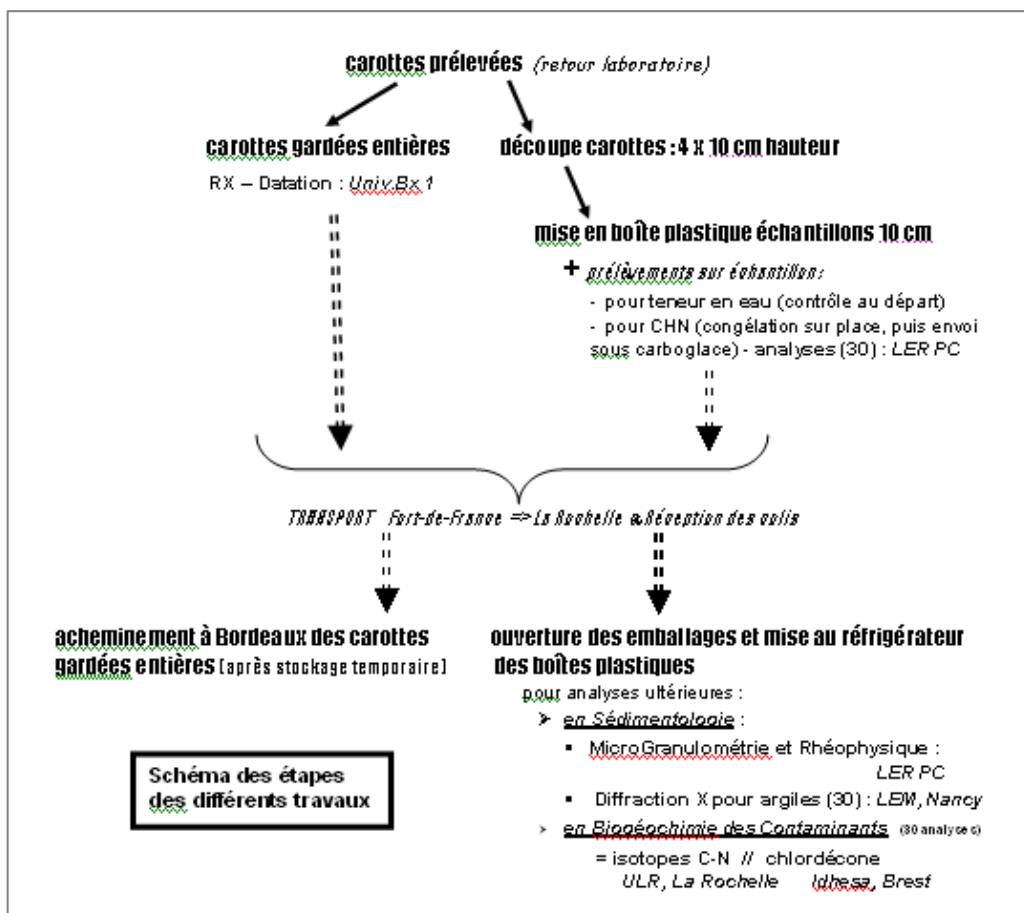
*L'approche rhéophysique s'applique essentiellement aux sédiments fins et cohésifs, en suspension ou en place sur le fond, dans lesquels la part argileuse permet des liaisons interparticulaires déterminant, selon la teneur en eau du matériau étudié, la cohérence physique sédimentaire qu'est la cohésion. L'étude de cette dernière, déduite indirectement de différentes propriétés rhéologiques, est importante non seulement dans les travaux hydrosédimentaires lorsqu'on étudie le comportement des sédiments, dans leur dynamique de remise en suspension ou d'érosion, mais aussi dans la détermination de l'arrangement des particules dans le matériau, lorsqu'un composant organique, naturel ou contaminant, est susceptible d'interagir avec d'autres particules, minérales et organiques. En effet, l'approche rhéophysique permet de mieux identifier le rôle du paramètre de structuration qui varie selon de nombreux paramètres tels que la salinité, la turbidité, la composition minéralogique, le pH, le potentiel redox, la teneur en matières organiques ainsi que la nature de ses composants, etc., comme l'ont montré notamment Migniot en précurseur dans les années 1960, mais également différents auteurs depuis ces travaux ; il en est de même dans le domaine des Sciences du Sol. À cet égard, il faut aussi considérer non seulement que les relations constitutives au sein d'un sédiment varient selon la nature et l'état du matériau, mais également que les propriétés chimiques des sédiments cohésifs permettent plusieurs types de liaisons entre les particules qui sont à l'origine des différentes structures particulières, notamment les argiles (Paumier *et al.*, 2006). Voir aussi la partie 'Comportement rhéophysique' ci-après.*

## Stratégie d'échantillonnage

Les zones sédimentaires ciblées dans l'étude étant toutes situées en milieu subtidal, les prélèvements sous forme de carottages 'superficiels' ont été réalisés par plongées, la plupart effectuée dans des sédiments vaseux ou vaseux à tendance sableuse (seuls, quelques-uns ont été faits dans le chenal central ou proches de "cayes") : deux-tiers des prélèvements ont été réalisés dans le havre du Robert et un tiers dans la baie du Galion, cette proportion étant choisie en référence au 'statut' de zone-atelier du havre du Robert.

Au total, 22 carottes superficielles de 40 cm de profondeur ont été prélevées (fig. 27), 15 d'entre-elles réalisées dans le havre du Robert et 7 dans la baie du Galion. Chacune de ces carottes a été par la suite découpée en 4 tronçons d'égale longueur, définissant ainsi 4 niveaux (0-10cm / 10-20cm / 20-30cm / 30-40cm), qui ont fait l'objet d'analyses spécifiques selon la chronologie présentée dans le tableau ci-après (tab.1). De plus, sur 10 des 22 stations échantillonnées (7 stations dans le havre du Robert et 3 stations dans la baie du Galion), une seconde série de carottes de 40 cm adjacentes aux précédentes a été effectuée, et conservées entières pour l'étude de la structuration sédimentaire et la détermination du taux de sédimentation.

En outre, la logistique disponible sur place pour effectuer les prélèvements, ainsi que la proximité et l'accessibilité des moyens de la station Ifremer de la Martinique, située au nord de le havre du Robert, ont permis la bonne réalisation de ces travaux.



Tab.1 – Chronologie d'ensemble des travaux de conditionnement et d'analyse

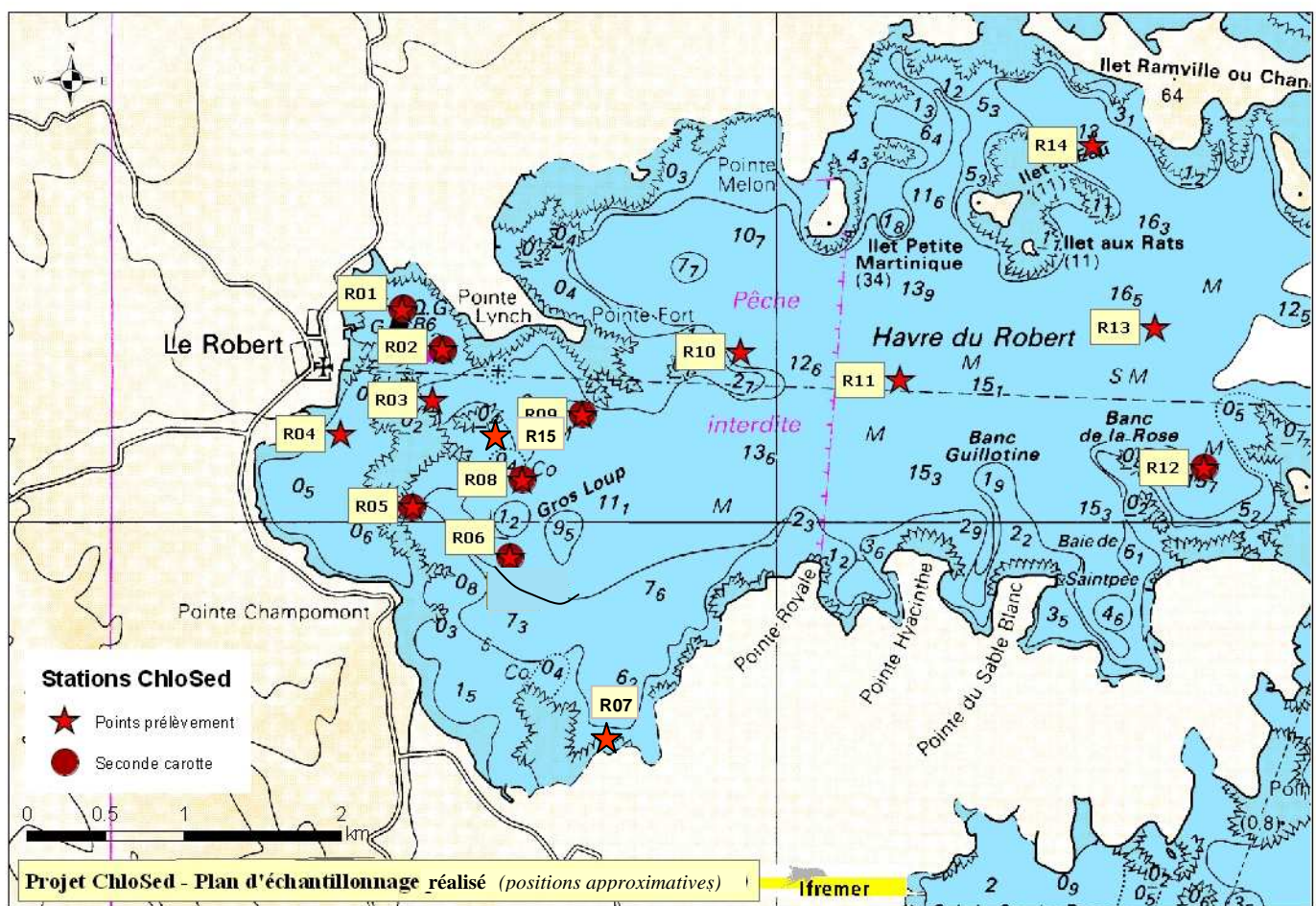
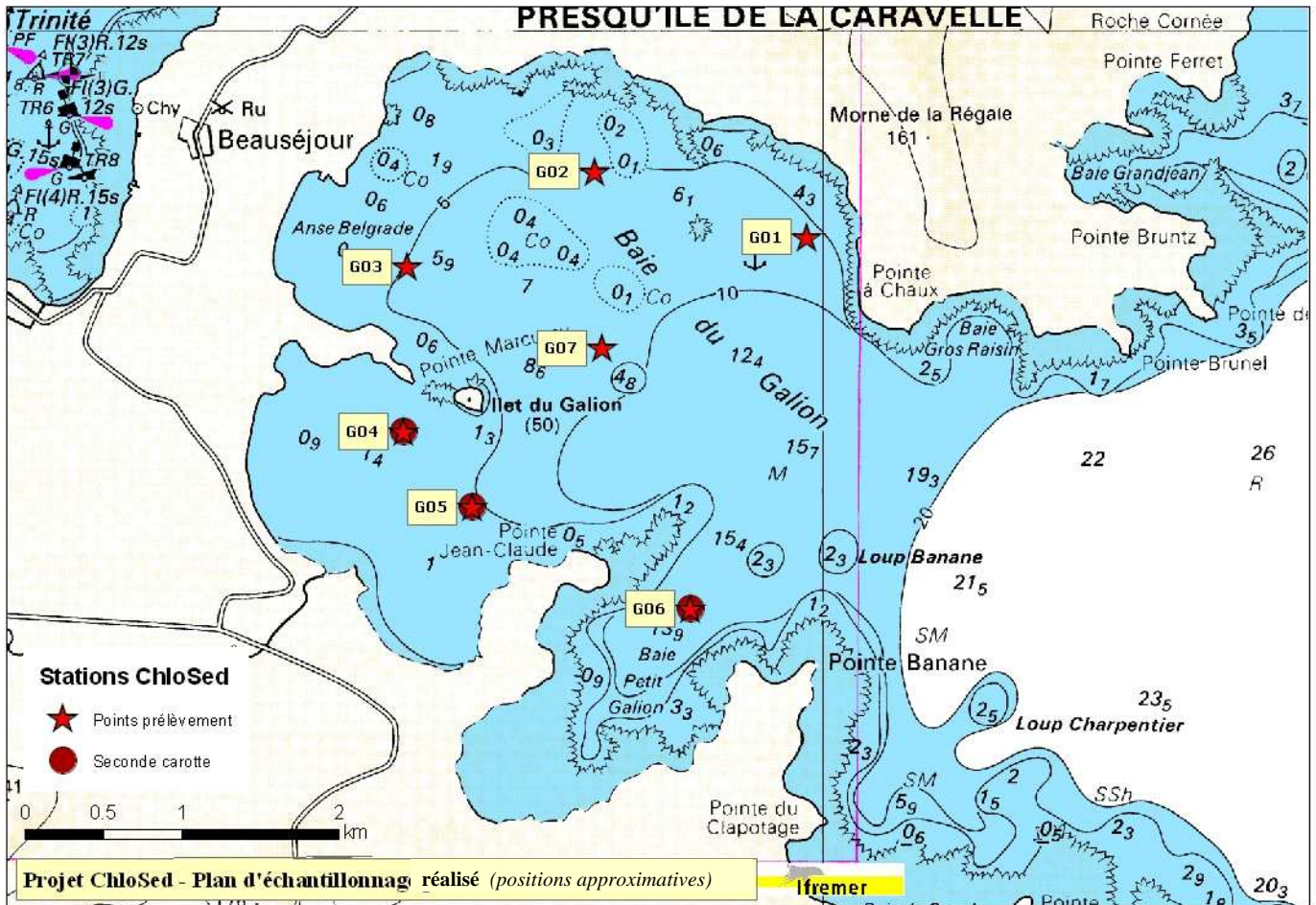


Fig.27 – Cartes des 22 points de prélèvements (ou stations) réalisés par carottages (au-dessus : baie du Galion – au-dessous : havre du Robert)

## Analyses sédimentologiques

### Nature texturale

Elle est fondée sur la mesure de la taille des particules à partir d'un microgranulomètre à diffraction laser Beckman Coulter LS13320C, à focale de 780 mm produisant un spectre granulométrique s'étalant de 0,4 à 2000  $\mu\text{m}$  (fig. 28). Pour chaque échantillon préalablement bien homogénéisé, un protocole spécifique a été appliqué, dont le principe repose sur la réalisation d'une série impaire d'analyses d'au moins 3 essais concluants devant conduire à l'obtention de 3 courbes de fréquences très proches (dans le cas contraire, on procède à un nombre d'essais supplémentaires). Ces analyses se font en 'conditions naturelles', c'est-à-dire en eau de mer filtrée et sans traitement chimique (défloculant, notamment).

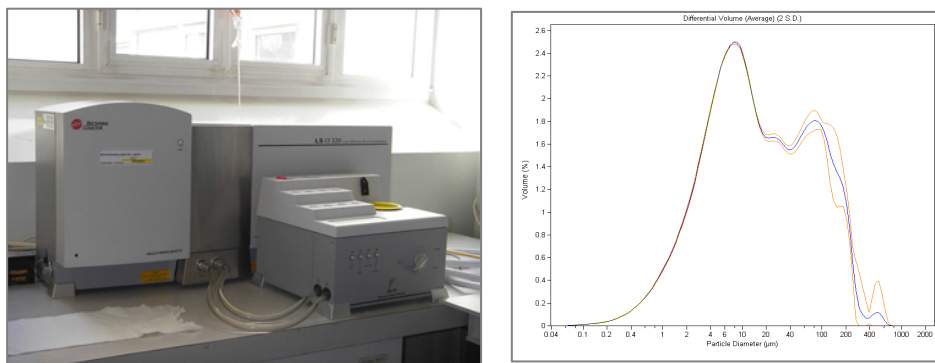


Fig.28 – Microgranulomètre utilisé (à gauche) et exemple de courbe granulométrique obtenue (à droite)

On en déduit d'abord la moyenne (utilisée principalement par la suite), la médiane et l'écart-type, seuls paramètres granulométriques inclus dans la présente étude, du fait du caractère non-significatif des autres paramètres (coefficients et tests) habituellement utilisés dans le cas des sédiments sableux, ainsi que la ou les modalités en lecture graphique directe. Ensuite, sont calculés les fractions principales texturales, fondées sur les 3 pôles "argileux" (<2  $\mu\text{m}$ ), "silteux" (2-50  $\mu\text{m}$ ) et "sableux" (> 50  $\mu\text{m}$ ) selon la classification USDA, ainsi que le pourcentage de 'vase' (somme des fractions 'argileuse' et 'silteuse'). Enfin, sont nommés les types sédimentaires (avec symbole et couleur associée) en utilisant le tableau de nomenclatures ci-après, de même que les faciès sédimentaires selon la classification suivante (fig. 29).

< 2 $\mu$	argile	<b>A</b>		cohésifs
2-15 $\mu$	silt fin	<b>Lf</b>		
15-30 $\mu$	silt moyen	<b>Lm</b>		
30-50 $\mu$	silt grossier	<b>Lg</b>		
50-100 $\mu$	sable très fin	<b>Stf</b>		granulaires
100-250 $\mu$	sable fin	<b>Sf</b>		
250-500 $\mu$	sable moyen	<b>Sm</b>		
500-2000 $\mu$	sable grossier	<b>Sg</b>		

faciès		% V
sableux	< 10 %	
mixte 'sablo-vaseux'	11 - 30 %	
mixte 'vase-sableux'	31 - 80 %	
vaseux	> 80 %	

Fig.29 – Types sédimentaires (à gauche) et faciès sédimentaires (à droite) : classifications utilisées



## Comportement rhéophysique

Il est analysé par deux types d'essais rhéologiques complémentaires, en *oscillation* et en *écoulement*, à partir d'échantillons préalablement homogénéisés.

Tous ces essais sont réalisés à partir d'un rhéomètre Anton Paar MCR 301 (fig. 30) muni d'un système plan-plan, selon un protocole spécifique relatif à des matériaux analogues de ce type (Pantet *et al.*, 2010) ayant un comportement rhéofluidifiant et thixotropes (voir p. 37) et avec une température fixée à 20°C (conforme à celle du fond).

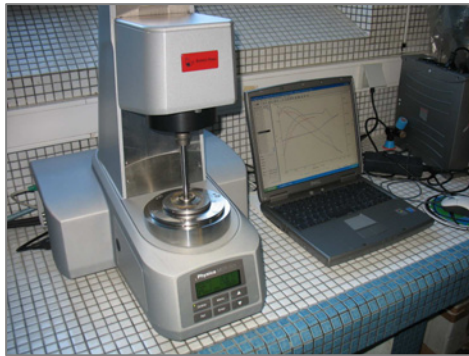


Fig.30 – Rhéomètre utilisé pour les deux types d'essais (*oscillation* et *écoulement*)

Le premier mode (*oscillation*) se base sur l'évolution temporelle sous déformation croissante de deux modules intrinsèques du matériau, liés à ses **propriétés viscoélastiques**, que sont, en fonction de l'amplitude de déformation  $\gamma$ , le module de conservation  $G'$  rendant compte du caractère élastique d'un matériau, et le module de perte  $G''$  rendant compte de son caractère visqueux (fig. 31) : on en déduit le facteur d'amortissement ou de perte,  $\tan \delta = G''/G'$ . Lorsque ces deux modules sont égaux, c'est-à-dire lorsque les deux courbes se croisent, on relève, à partir du tableau des données enregistrées, la contrainte  $\tau_f$  appelée "point d'écoulement".

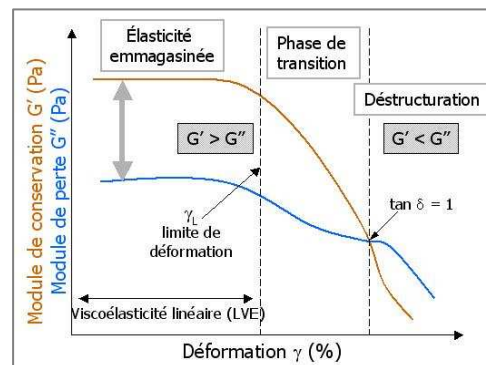


Fig.31 – Type de courbe théorique obtenue en oscillation

La contrainte de cisaillement relevée correspond au moment précis à partir duquel les caractéristiques liquides prennent le pas sur les caractéristiques solides, mettant en évidence la contrainte-seuil de l'échantillon étudié : il y a alors déstructuration de la vase (ou de la vase sableuse). En effet, pour de faibles amplitudes de déformation, la vase (ou assimilée) possède un comportement viscoélastique linéaire à dominante élastique, tandis que, pour des amplitudes de déformation plus importantes, le comportement devient non linéaire et s'approche d'un comportement visqueux, la vase se liquéfiant alors.

Le protocole choisi repose en général sur 2 mesures pour chaque échantillon, avec comme paramètres, une déformation ( $\gamma$ ) croissante de 0,01 à 1000 % et une fréquence ( $f$ ) de 1,5 Hz.

Le second mode (*écoulement*), en régime *pseudo* établi, conduit à déterminer la **contrainte de cisaillement**  $\tau_y$  et la **viscosité**  $\eta$  (fig. 32), **en fonction du taux de cisaillement**  $\dot{\gamma}$  ( $= d\gamma/dt$ ). Le test se déroule en suivant un protocole spécifique relatif à des matériaux analogues de ce type, d'abord en faisant croître progressivement le taux de cisaillement (*i.e.* suivant une rampe croissante de vitesses de cisaillement), d'où une première courbe '*aller*' (charge), puis en le faisant décroître (*i.e.* suivant une rampe décroissante), d'où une seconde courbe '*retour*' (décharge). Sur cette seconde partie du "rhéogramme", on relève la valeur du taux de cisaillement à  $0,1 \text{ s}^{-1}$ , d'où l'on déduit, dans le tableau de données enregistrées, la valeur de la contrainte de cisaillement correspondante, notée  $\tau_{y/0,1}$ . Il est à noter que ce relevé est effectué sur cette partie du rhéogramme, car on peut considérer l'écoulement comme *quasi* (ou *pseudo*) établi (Pantet *et al.*, 2010). En effet, la couche limite, c'est-à-dire la zone d'interface entre un corps (la géométrie) et le fluide (échantillon) est pleinement développée lors d'un mouvement relatif entre les deux entités, cette couche limite étant conséquente de la viscosité de l'échantillon. Par ailleurs, cette valeur de contrainte de cisaillement correspond au "seuil d'écoulement apparent" à cette valeur du taux de cisaillement, ce qui, en terme de dynamique sédimentaire, est l'équivalent de la 'contrainte de déformation en masse' du niveau sédimentaire considéré.

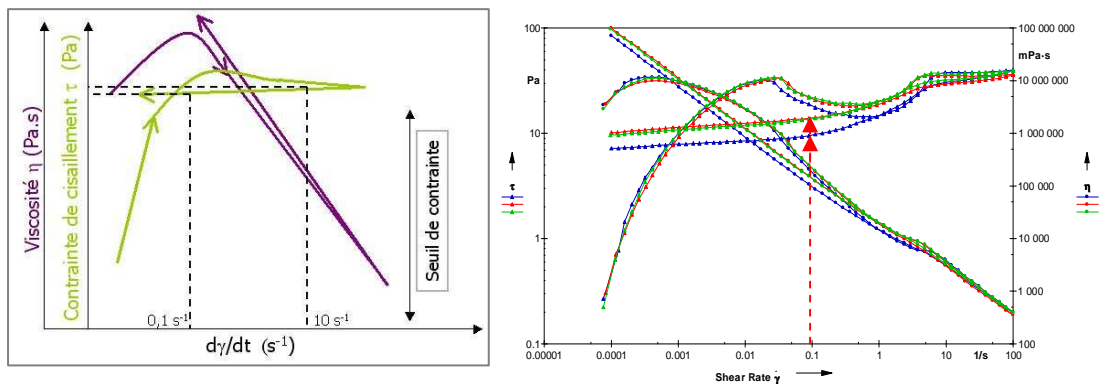
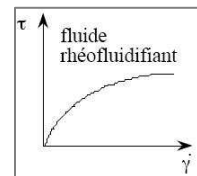


Fig.32 – Type de courbe théorique obtenue en écoulement (à gauche) et exemple de 'rhéogrammes', avec le **seuil d'écoulement apparent relevé, en rouge, à  $10^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$**  (à droite)

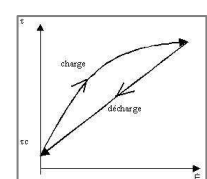
Le protocole choisi repose sur au moins trois mesures pour chaque échantillon, devant aboutir à l'obtention de trois courbes ('rhéogrammes') très proches. Dans le cas contraire, des essais supplémentaires sont réalisés, en nombre suffisant pour permettre de meilleurs résultats significatifs, jusqu'à éventuellement épuisement du matériau. Concernant les paramètres des rampes de vitesses appliquées au système travaillant en rotation, il s'agit des taux successivement suivants :  $0,0001 \rightarrow 100 \text{ s}^{-1}$  (aller), puis  $100 \rightarrow 0,0001 \text{ s}^{-1}$  (retour).

En outre, puisqu'il a été indiqué précédemment que les sédiments étudiés sont connus pour être considérés comme des matériaux rhéofluidifiants et thixotropes, un éclairage à ce sujet doit être apporté.

D'abord, un fluide est dit "rhéofluidifiant" si sa viscosité [telle que  $\tau = \eta (d\gamma/dz) = \eta \dot{\gamma}$ ] diminue lorsque le taux de cisaillement augmente selon le diagramme ci-joint : compte-tenu que les rhéogrammes obtenus dans la présente étude suivent en général cette tendance théorique, les sédiments correspondants ont alors un tel comportement rhéofluidifiant.



Ensuite, comme les rhéogrammes obtenus sont de plus proches du schéma ci-joint qui montre que la structure a été modifiée durablement lors de la charge et que le comportement du produit a été affecté, le rhéogramme de décharge est donc différent et l'échantillon est moins visqueux. Cependant, si après ce cycle de charge et décharge, l'échantillon est laissé au repos pendant un temps assez long et



que la structure se réorganise après un temps dit 'de restructuration', le fluide est qualifié de "thixotrope". *Un fluide est donc thixotrope si sa viscosité, à vitesse de cisaillement constante, diminue au cours du temps et à condition que ce phénomène soit réversible permettant que le fluide reprenne progressivement sa consistance initiale.*

Enfin, un fluide à seuil correspond à un fluide qui, pour être mis en mouvement, nécessite que lui soit appliquée une certaine contrainte non nulle : les échantillons de sédiments étudiés ont également un comportement thixotrope à seuil.

À cette étude rhéologique du comportement est adjointe la détermination de la teneur en eau, effectuée en parallèle sur chaque échantillon, permettant ainsi de compléter les informations sur les sédiments. Sa connaissance est nécessaire, car elle influe sur les essais rhéologiques et donc sur le comportement sédimentaire.

$W = \frac{E}{P_s} = \frac{P_h - P_s}{P_s}$	<p>E = Poids d'eau dans le matériau.</p> <p>P<sub>s</sub> = Poids du matériau sec.</p> <p>P<sub>h</sub> = Poids matériau humide</p>
<p>Si W est exprimé en % :</p>	$W\% = 100 \frac{P_h - P_s}{P_s}$

La teneur en eau d'un matériau est le rapport du poids d'eau contenue dans ce matériau au poids du même matériau sec, ce qui revient à définir, selon la formulation ci-dessus, la teneur en eau comme le poids d'eau W contenu par unité de poids de matériau sec, obtenu après chauffage à 60°C du matériau humide initial pendant au moins 48h.

## Nature minéralogique

La détermination de la composition minéralogique globale des échantillons sélectionnés a été faite par diffraction DRX. La méthode tire parti du fait que les minéraux sont des composés cristallins dont les atomes sont disposés selon une structure spatiale périodique bien établie, ce qui définit des plans de diverses densités d'électrons (réseau) sur lesquels se réfléchissent le rayon X. Chaque réseau est alors révélé par un jeu d'équidistances entre ces plans et pour chacun d'entre eux par une aptitude à réfléchir qu'on appelle "intensité". Le jeu des équidistances et des intensités fournit une fiche *d'identité* de chaque réseau, cette caractéristique du minéral étant ensuite interprétée en termes de détermination qualitative et semi-quantitative. La méthode ne permet évidemment pas de distinguer entre elles des espèces différentes ayant les mêmes caractéristiques de réseau.

L'analyse a été conduite sur une installation "Bruker D8 Advance", en mode réflexion, sur poudre désorientée. Le dispositif travaille sans monochromateur physique ; cependant par calcul, la radiation est considérée comme monochromatique avec une longueur d'onde de 1,789 Å. La résolution en distance varie avec l'angle de réflexion, donc l'équidistance réticulaire, de 0,05Å vers 10Å, à environ 0,01Å vers 2,00Å.

Les diffractogrammes sont présentés comme des intensités en fonction de l'angle de réflexion, lequel est traduit en équidistances réticulaires par l'intermédiaire de la loi de Bragg. Dans un premier temps, les diffractogrammes ont été interprétés à l'aide d'un logiciel automatique d'analyse, dont les résultats bruts figurent au bas des diffractogrammes. Ensuite ces résultats ont été critiqués et interprétés, ce qui explique quelques nuances déterminatives par rapport aux données brutes. (*i.e.* sur la présence de smectites). L'interprétation des caractéristiques de réseaux, en termes d'espèces minérales (tab.2), a été effectuée à l'aide de la base de données JCPDS de l'"*International Center for Diffraction Data*".

Par ailleurs, comme pour les analyses chimiques, les analyses minéralogiques ont été faites sur des échantillons relatifs aux points qui ont fait l'objet d'une étude spécifique de structuration et de radiodation, en ne considérant que trois des quatre niveaux prélevés : le premier (0-10 cm), le second (10-20 cm) et le quatrième et dernier niveau (30-40 cm).

Minéral	Abréviation	Formule structurale schématique – Propriétés remarquables
Albite	Ab	$\text{Si}_3\text{AlO}_8\text{Na}$ – famille des feldspaths acides, à origine et mode d’altération diversifiés
Amphibole	Amp	Base $\text{Ca}_2\text{Mg}_5\text{Si}_8\text{O}_{22}(\text{OH})_2$ ou $\text{NaCa}_2\text{Mg}_5\text{Si}_7\text{AlO}_{22}(\text{OH})_2$ – famille minérale nombreuse
Anatase	Ana	$\text{TiO}_2$
Ankérinite	Ank	$\text{Ca}(\text{Fe},\text{Mg})(\text{CO}_3)_2$
Antigorite	Ant	Base $\text{Mg}_3\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$
Aragonite	Ar	$\text{CaCO}_3$
Augite	Au	$\text{Ca}(\text{Fe},\text{Mg})\text{Si}_2\text{O}_6$ éventuellement avec Al octaédrique – famille des pyroxènes (origine volc.)
Bernalite	Be	$\text{Fe}(\text{OH})_3 \cdot 0.25\text{H}_2\text{O}$ .
Calcite	Ca	$\text{CaCO}_3$
Clinoptilolite	Cl	Base $(\text{Na}_2\text{KCa}_2)(\text{Si}_{29}\text{Al}_7)\text{O}_{32} \cdot 32\text{H}_2\text{O}$ – zéolite peu déformable, susceptible d’adsorption, car à struct. alvéolaire avec une grande surface interne (SI) et avec des nanopores
Cristobalite	Cr	$\text{SiO}_2$ Haute température
Gehlénite	Ge	$\text{Ca}_3\text{Al}_2\text{SiO}_8$ – minéral de laitiers sidérurgiques ( ?)
Gibbsite	Gi	$\text{Al}(\text{OH})_3$
Gypse	Gy	$\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ – (eau de mer)
Halite	Ha	$\text{NaCl}$ –(eau de mer)
Hématite	He	$\text{Fe}_2\text{O}_3$ – confusion possible avec pyrite (et problème/aragonite)
Illite	I	Base $\text{Al}_2\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$
Kaolinite	K	Base $\text{Si}_2\text{Al}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$
Quartz	Q	$\text{SiO}_2$ Basse à moyenne température
Rutile	R	$\text{TiO}_2$ – ambiguïté par rapport aux feldspaths
Smectite	Sm	à compositions chimiques très variables – argiles ‘gonflantes’ à défaut de charge compensable par cations intra foliaires et fortes CEC et SI – nombreux types définis selon structure moléculaire et selon charge acceptable
Sylvite	Sy	$\text{KCl}$ – (eau de mer)

Tab.2 – Liste des phases minérales, avec leurs abréviations et leurs formules structurales schématiques, ainsi que certaines de leurs propriétés intéressantes pour cette étude

## État de structuration – Taux de sédimentation

Cette étude en plusieurs étapes avait pour objectif la datation des prélèvements, ce qui nécessitait la caractérisation sédimentologique des carottes sédimentaires et la détermination de radionucléides, sur des couches sélectionnées en fonction de la description des carottes, par spectrométrie gamma. Elle a procédé aux travaux suivants : photographie, imagerie RX (par SCOPIX<sup>®</sup>), profils de porosité et de DBD (masse spécifique du sédiment sec), profils de  $^{210}\text{Pb}_{\text{xs}}$  et de  $^{137}\text{Cs}$  par spectrométrie gamma afin d’en déduire les vitesses (taux) de sédimentation.

Outre la détermination de la masse spécifique par déduction de la teneur en eau réalisée sur ces carottes entières, l’évaluation des activités des radioéléments d’intérêt ( $^{210}\text{Pb}$ ,  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ) repose sur la mesure non-destructive par spectrométrie  $\gamma$ , directe ou après tamisage, d’environ 10 g de sédiments secs.

Le détecteur utilisé est un spectromètre à bas bruit de fond de type co-axial (Schmidt *et al*, 2007), un comptage durant de 6 à 24 heures par échantillon, la calibration du détecteur étant effectuée au moyen de sédiments certifiés de l'IAEA (RGU, RGTh, IAEA-314). Les isotopes  $^{210}\text{Pb}$  et  $^{137}\text{Cs}$  sont directement déterminés à partir de leurs émissions  $\gamma$  à 46,5 et 661,7 keV,  $^{226}\text{Ra}$  l'étant par la combinaison de trois raies sélectionnées de descendants radioactifs ( $^{214}\text{Pb}$  : 295,2 et 351,9 keV ;  $^{214}\text{Bi}$  : 609,3 keV), en sachant que la mesure du  $^{226}\text{Ra}$  *via* ses descendants radioactifs implique un délai d'au moins trois semaines entre le conditionnement des sédiments et l'analyse (pour assurer l'équilibre radioactif entre  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{214}\text{Pb}$  et  $^{214}\text{Bi}$ ). Les activités sont exprimées en mBq g<sup>-1</sup>; le Plomb-210 en excès étant calculé comme la différence des activités mesurées de  $^{210}\text{Pb}$  et de  $^{226}\text{Ra}$ .

Quant à la détermination de la vitesse (taux) de sédimentation ( $^{210}\text{Pb}_{\text{xs}}$ ), elle est calculée à partir d'un modèle pertinent. En effet, la datation des sédiments au moyen du  $^{210}\text{Pb}$ , initialement proposée par Goldberg (1963), repose sur le principe que l'activité du  $^{210}\text{Pb}_{\text{xs}}$  dans la colonne sédimentaire décroît avec le temps selon la loi de désintégration radioactive, de formule :

$$A^t = A^0 e^{-\lambda t}, \text{ dans laquelle } A^0 \text{ et } A^t \text{ représentent les activités du } ^{210}\text{Pb}_{\text{xs}} \text{ (mBq g}^{-1}\text{) aux temps 0 et t, } \\ t = \text{l'âge de la couche sédimentaire et } \lambda = \text{la constante de décroissance radioactive (0,031 an}^{-1}\text{)}$$

A partir de cette relation, il existe trois principaux modèles, sans remaniement sédimentaire, pour déterminer la vitesse ou le taux d'accumulation et l'âge des sédiments : (i) modèle CF : CS (Constant Flux and Constant Sedimentation) ; (ii) modèle CRS (Constant Rate of Supply) ; modèle CIC (Constant Initial Concentration).

Le choix du modèle de datation repose sur la connaissance des facteurs environnementaux qui contrôlent l'accumulation et sur une bonne évaluation des profils de  $^{210}\text{Pb}_{\text{xs}}$  du site étudié. Pour les carottes ChloSed, le modèle CF : CS a été utilisé pour toutes les carottes présentant une décroissance du  $^{210}\text{Pb}_{\text{xs}}$  avec la profondeur.

Ce choix a conduit par conséquent à écarter d'emblée la méthode CSR impliquant que les activités de  $^{210}\text{Pb}_{\text{xs}}$  soient négligeables à la base de la carotte (ce qui permet l'évaluation précise de l'inventaire sédimentaire total de  $^{210}\text{Pb}_{\text{xs}}$ ), condition jamais atteinte dans ces sédiments. Quant au dernier modèle, le CIC, il repose sur l'hypothèse d'une activité initiale constante : or, pour un environnement côtier, cette hypothèse est peu plausible et ce dernier modèle a également été rejeté.

## Analyses chimiques

### Matière Organique Particulaire

La caractérisation de la Masse Organique Particulaire a été effectuée dans cette étude par la détermination des teneurs en Carbone Organique Particulaire et Azote Organique Particulaire. Le protocole choisi suit la méthode décrite par Hedges & Stern (1984), modifiée par Nieuwenhuize *et al.* (1994). Après homogénéisation du prélèvement, un aliquote est lyophilisé, puis broyé. Il est ensuite pesé dans une capsule d'argent dans laquelle la décarbonatation s'effectue par ajout successif de HCl 0,5N et évaporation à 50°C. La décarbonatation est considérée comme terminée quand il n'y plus d'effervescence lors d'addition d'acide sur le sédiment. La capsule est alors introduite dans un analyseur CHN (Carbo Erba Strumentazione NA 1500), à partir duquel sont obtenues deux valeurs notées SN et SC, respectivement pour l'azote organique et pour le carbone organique. Il y a en moyenne 15 à 20 mg de poudre par capsule (Pchn en mg) pour les sédiments fins, masse de produit pouvant aller jusqu'à 40 mg pour les sédiments sableux. Un "blanc de mesure" est réalisé sur une capsule d'argent vide (avec une valeur Bcaps notée). Les constantes de calibration KC et KN sont obtenues après calibration de l'appareil avec de l'acétanilide.

La quantité d'Azote Organique Particulaire (NOP) est calculée à l'aide de la formule :

$$\text{NOP} = ((\text{SN} - \text{Bcaps}) * \text{KN}) / \text{Pchn} \text{ en } \mu\text{g.mg}^{-1} \text{ de sédiment sec}$$

La quantité de Carbone Organique Particulaire (COP) est calculée à l'aide de la formule :

$$\text{COP} = ((\text{SC-Bcaps}) * \text{KC}) / \text{Pchn} \quad \text{en } \mu\text{g.mg}^{-1} \text{ de sédiment sec}$$

Par ailleurs, comme pour les analyses minéralogiques précédentes, les analyses de MOP ont été faites sur des échantillons relatifs aux points qui ont fait l'objet d'une étude spécifique de structuration et de radiodatation, en ne considérant sur les quatre niveaux prélevés que le premier (0-10 cm), le second (10-20 cm) et le quatrième et dernier niveau (30-40 cm).

## Teneur en chlordécone

Les mesures de chlordécone dans les prélèvements de sédiment ont été réalisées par chromatographie en phase liquide couplée à un spectromètre de masse (HPLC-MS-MS) au laboratoire Idhesa Bretagne Océane selon une méthodologie analytique interne (Idhesa, comm. pers.). Elle est présentée succinctement ci-après, d'après les éléments fournis par Bodiguel *et al.* (2011).

### Principe de la méthode 10.MOA.33

La méthode repose sur les phases analytiques suivantes : extraction de la chlordécone par de l'acétone-pentane, purification fractionnée sur Florisil, concentration par évaporation du solvant, injection en chromatographie liquide couplée à un spectromètre de masse pour l'analyse par MS-MS.

Après différentes étapes d'étalonnages, les processus se poursuivent par divers stades de la chaîne analytique suivante : extraction – adjonction de solvants et ajustement – purification – fractionnement spécifique et récupération de la fraction de la chlordécone – analyse par LC/MS-MS – chromatographie – dosage à partir de transitions spécifiques (quantification et confirmation) – vérification des linéarités par contrôle à chaque série d'analyses.

Le calcul se fait par étalonnage interne et la calibration est réalisée par rapport à une gamme d'étalonnage dans la matrice.

### Validation de la méthode

> domaine de linéarité : pour les sédiments, le domaine de linéarité par détection MS-MS est de 0,45 à 10,0  $\mu\text{g}/\text{kg}$  sur produit brut.

> limite de détection : pour les sédiments, la limite de détection déterminée par la droite de régression est de 0,15  $\mu\text{g}/\text{kg}$  sur produit brut sec, en sachant que le seuil de détection de la méthode analytique pour cette matrice est de 0,5  $\mu\text{g}/\text{kg}$  de sédiment humide.

> limite de quantification : pour les sédiments, la limite de quantification, fixée à 0,45  $\mu\text{g}/\text{kg}$  sur produit brut.

> spécificité : elle a été déterminée en réalisant des ajouts de chlordécone sur la matrice.

> justesse : l'absence de matériau de référence certifié en chlordécone ne permet pas de vérifier la justesse de la méthode, celle-ci étant déduite des résultats de rendement réalisés au cours des essais de spécificité.

> fidélité : évaluée sur les mêmes échantillons que pour la spécificité, elle a été estimée sur les résultats de l'ensemble des matrices étudiées, ce qui revient à déterminer la fidélité intermédiaire ou reproductibilité interne au laboratoire (espacement des analyses dans le temps et réalisation par plusieurs opérateurs).

> essai inter-laboratoires : à ce jour, il semblerait qu'aucun essai inter-laboratoire (EIL) n'a été organisé pour la chlordécone sur la matrice sédimentaire.

Par ailleurs, comme pour les analyses minéralogiques et les analyses de carbone et azote précédentes, les quantifications de chlordécone ont été faites uniquement sur des échantillons relatifs aux points qui ont fait l'objet d'une étude spécifique de structuration et de radiodatation (10 stations), en ne considérant sur les 4 niveaux prélevés que le premier (0-10 cm), le second (10-20 cm) et le quatrième et dernier niveau (30-40 cm).

## [4] CARACTÉRISATION DES SÉDIMENTS LITTORAUX CONTAMINÉS

Afin de déterminer l'historique de la contamination potentielle des sédiments superficiels des deux baies choisies, notamment dans leur partie occidentale (fond de baies), il est fondamental de bien connaître les caractéristiques sédimentologiques pertinentes de ces dépôts vaseux ou mixtes (vases à tendance sableuse) qui reçoivent et sans doute piègent les matières en suspension contaminées. C'est pour cette raison que cette investigation portait, en cette phase d'étude exploratoire, sur la recherche d'éléments significatifs, voire de gradients dans les paramètres analysés, relatifs à ces types de sédiments, de leur surface jusqu'à une profondeur d'un demi-mètre, accessible manuellement par plongées.

À partir de la caractérisation sédimentologique (nature texturale, comportement rhéophysique, nature minéralogique, état de structuration et taux de sédimentation) et chimique (COP/NOP et teneur en chlordécone) de l'ensemble des 4 niveaux sédimentaires des 22 points choisis *a priori* représentatifs de ces faciès sédimentaires, une synthèse des résultats et de leurs éventuelles corrélations a été réalisée sous forme cartographique SIG, qui est le moyen le plus adéquat pour l'interprétation des données.

Pour améliorer la lisibilité des résultats et compte tenu de la répartition différente des points dans les deux baies (fig. 27, p.39), l'ensemble des secteurs étudiés a été décomposé en trois zones : deux pour le havre du Robert (ouest/est) et une pour la baie du Galion prise dans son ensemble.

Une série de cartes a été dressée (liste ci-dessous), chaque carte correspondant soit à un seul paramètre sédimentologique (cartes 1 à 6), soit à un regroupement de paramètres afin de faciliter l'analyse d'éventuelles corrélations entre certains d'entre eux (cartes 7 à 12). Les résultats présentés ci-après sont issus de la sélection d'une partie de ces cartes établies sous SIG (les cartes choisies pour cette analyse sont indiquées par un astérisque après leur numéro dans la liste ci-dessous).

→ Zonation : **A** (zone Ouest du havre du Robert à 1/17000<sup>ème</sup>) – **B** (zone Est du havre du Robert à 1/17000<sup>ème</sup>) – **C** (baie du Galion à 1/28000<sup>ème</sup>)

→ Représentation cartographique des paramètres étudiés :

**Carte 1** : type de sédiment (à partir de la moyenne granulométrique)

**Carte 2** : type de sédiment (à partir de la médiane granulométrique)

**Carte 3** : composition texturale

**Carte 4\*** : faciès sédimentaire (à partir du pourcentage de vase)

**Carte 5** : seuil d'écoulement

**Carte 6** : point d'écoulement

**Carte 7\*** : composition texturale - type de sédiment (à partir de la moyenne granulométrique)

**Carte 8\*** : seuil et point d'écoulement - teneur en eau

**Carte 9\*** : rapport carbone/azote (total et organique) particulaire - concentration de chlordécone ( $\mu\text{g}/\text{kg}$  de sed.sec)

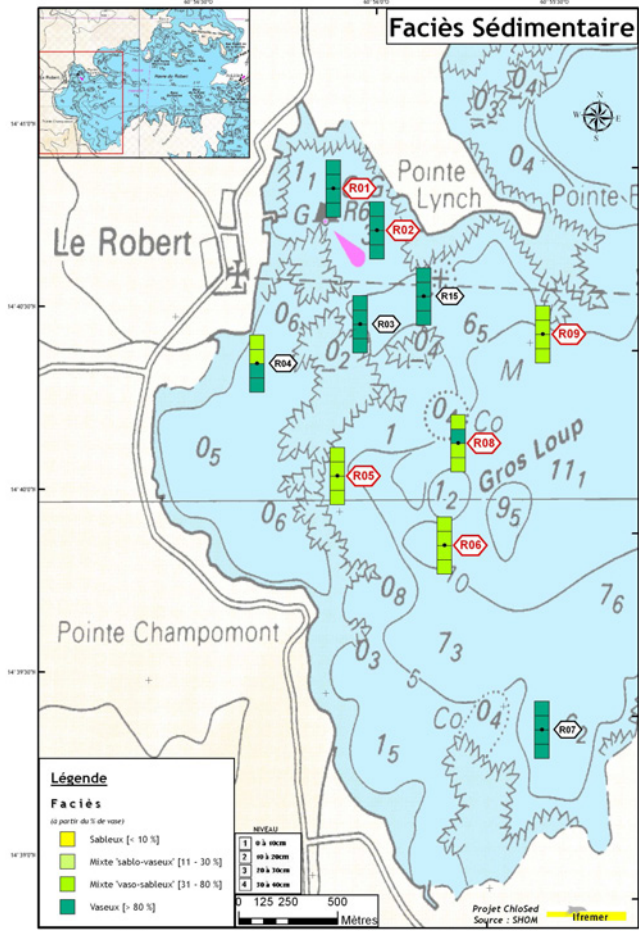
**Carte 10\*** : composition texturale - type de sédiment (à partir de la moyenne granulométrique) - rapport carbone/azote (total et organique) particulaire - concentration de chlordécone ( $\mu\text{g}/\text{kg}$  de sed.sec)

**Carte 11\*** : composition texturale - type de sédiment (à partir de la moyenne granulométrique) - seuil et point d'écoulement - image RX de la colonne sédimentaire - profil de porosité

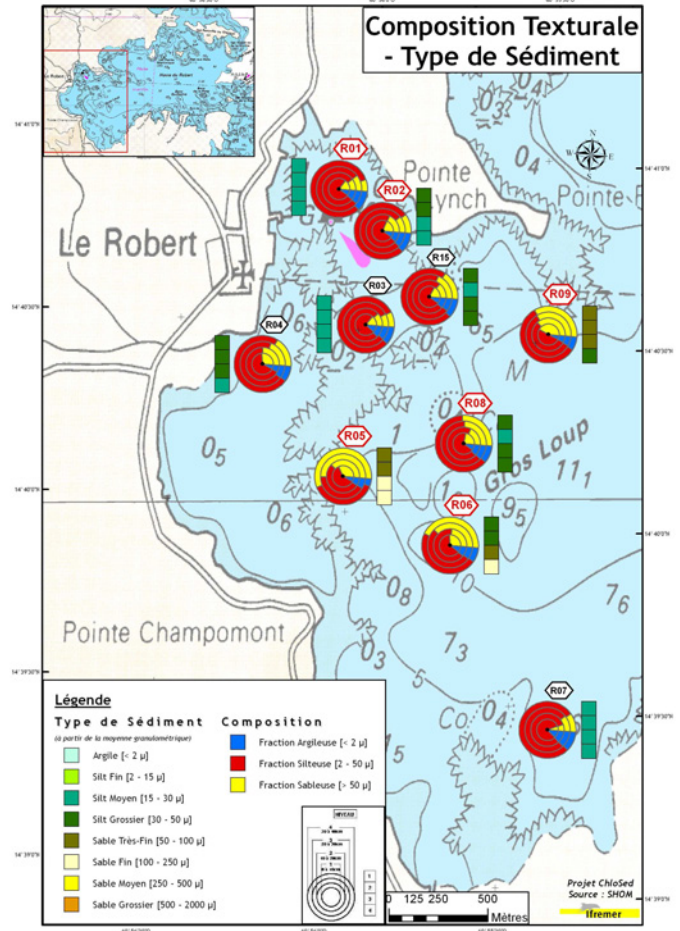
**Carte 12\*** : composition texturale - faciès sédimentaire (à partir du % de vase) - type de sédiment (à partir de la médiane granulométrique) - formations superficielles (de 0 à 10 cm)

*Note – Dans les cartes suivantes (pour les trois zones), les numéros des stations sont inclus dans des hexagones allongés, noirs pour les stations à un seul carottage, rouges pour celles à carottage double.*

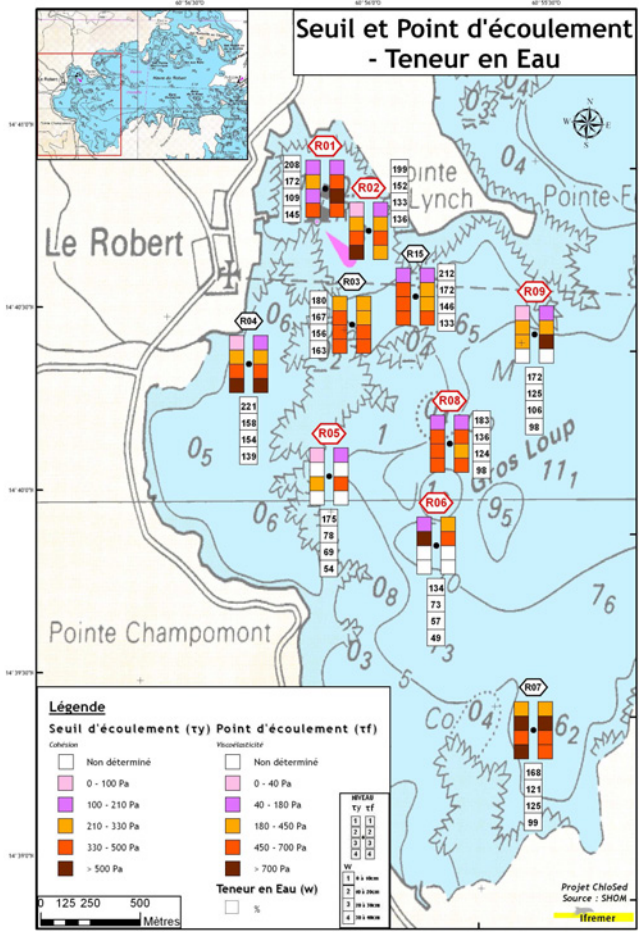
*Par ailleurs, on lira dans les cartes " $\mu\text{m}$ " au lieu de " $\mu$ "; quant aux valeurs de chlordécone indiquées, elles correspondent toutes à des valeurs inférieures au seuil de quantification, sauf pour G04 et G05 (p.65 et 73).*



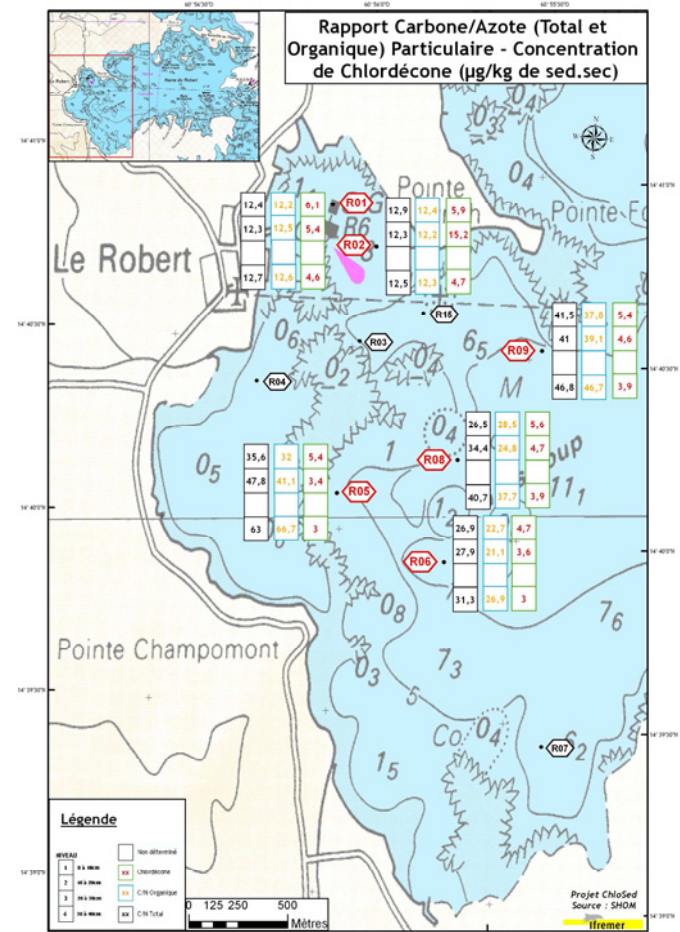
Carte 4A



Carte 7A



Carte 8A



Carte 9A



## Havre du Robert : zone ouest

### Caractéristiques sédimentologiques et chimiques Cartes 4A – 7A – 8A – 9A

#### *Faciès vaseux au débouché de la rivière Gaschette* (R01 – R02 – R03 – R15)

Les deux stations R01 et R02 (situées à la même profondeur de 2 m) ont fait l'objet du prélèvement de deux carottes, la seconde étant réservée aux études de structuration et de radiodatation, ainsi qu'aux analyses minéralogiques. Les deux autres stations, R03 située à 5 m de profondeur et légèrement décalée par rapport au débouché de la rivière Gaschette et R15 située à 7 m environ de profondeur en prolongation de R01 et R02, n'ont été échantillonnées que par une seule carotte.

**Nature texturale et minéralogique** (cartes 4A & 7A) - Ces sédiments correspondent à des faciès vaseux, uniformément homogènes selon la profondeur sédimentaire, représentant en quelque sorte un transect depuis le proche débouché de la rivière Gaschette jusqu'à l'isobathe -10 m environ. À signaler également l'influence de mangroves à proximité de R01 et, dans une moindre mesure, de R02.

L'ensemble des prélèvements de ces quatre stations assez proches l'une de l'autre (de l'ordre de 300 à 500 m) présente globalement les mêmes caractéristiques texturales, avec les nuances présentées ci-après.

Concernant le transect R01-R02-R15, une évolution vers des éléments légèrement plus grossiers apparaît du NW (à proximité immédiate du débouché de la rivière) vers le SE, avec successivement : (i) pour R01, sur toute la colonne sédimentaire prélevée, des silts moyens unimodaux (21 à 26  $\mu\text{m}$ , selon la moyenne granulométrique, excepté une tendance plus grossière pour le premier décimètre avec 27  $\mu\text{m}$  et au contraire une tendance plus fine pour le dernier décimètre avec 16  $\mu\text{m}$ ) ; (ii) pour R02, des silts également unimodaux, mais partagés en une demi-partie supérieure (0-20 cm) composée de silts grossiers (33-34  $\mu\text{m}$ ) et en une demi-partie inférieure (20-40 cm) avec des silts moyens (21-22  $\mu\text{m}$ ) ; (iii) enfin, pour R15, sur toute la colonne sédimentaire, des silts grossiers unimodaux (29 à 36  $\mu\text{m}$ ). Quant à la fraction argileuse, elle croît légèrement avec la profondeur (8-9 à 11-12%) pour R01, R02 et R15.

Concernant la station R03, l'examen de sa composition montre que l'ensemble des niveaux sédimentaires se rapprochent texturalement de R01 et sont constitués de silts moyens unimodaux, avec une moyenne granulométrique décroissante selon la profondeur (de 28 à 19  $\mu\text{m}$ ) montrant ainsi une tendance de plus en plus fine dans le même sens, la fraction argileuse, par contre, se maintenant constante (10%).

Les carottes sédimentaires entières des stations R01 et R02, outre les éléments concernant la vitesse de sédimentation qui seront présentés ultérieurement, sont apparues comme très "liquides" lors de leur ouverture et présentaient des signes évidents d'une forte bioturbation, avec de nombreux trous, correspondant sans nul doute à des terriers. Le caractère constant des activités de  $^{210}\text{Pb}_{\text{xs}}$ , dont résulte le calcul de la vitesse de sédimentation, suggère que les sédiments des deux stations découlent soit d'un dépôt rapide avec des apports sédimentaires importants et peu consolidés, soit d'un mélange important, cette dernière hypothèse étant aussi à considérer au vu du rendu des images réalisées et de la forte teneur en eau. Enfin, le sédiment de R02 semble toutefois plus consolidé que celui de R01, du fait de sa masse spécifique plus élevée (0,62 contre 0,53).

L'analyse minéralogique des stations R01 et R02 donne les résultats suivants dans les 3 niveaux examinés : (1) l'albite, l'anatase, le gypse et le rutile, ainsi que l'hématite sont 'faiblement abondants', avec une abondance relative un peu plus forte de l'hématite dans le premier décimètre de R01 et dans le dernier décimètre de R02 ; (2) la kaolinite est 'abondante' dans les deux stations ; (3) les smectites sont 'assez fortement abondantes' et enfin (4) le quartz est 'fortement abondant'. À signaler la présence en faible abondance, pour R02, de l'augite dans les premier et dernier décimètres et de l'ankérite dans le second décimètre.

**Comportement rhéophysique** (carte 8A) – Du fait de leur caractère vaseux, ces sédiments sont cohésifs, avec d'assez fortes à fortes teneurs en eau (de 130 à 210%), décroissantes en général avec la profondeur.

Les cohésions  $y$  sont moyennes à fortes, généralement croissantes avec la profondeur, comme le montrent les valeurs du seuil d'écoulement (choisi à un taux de  $0,1 \text{ s}^{-1}$ ) des premiers aux derniers décimètres des différentes stations : de 120 à 450 Pa pour R01, de 90 à 590 Pa pour R02, de 140 à 480 Pa pour R15 et de 210 à 430 Pa pour R03.

L'examen des rhéogrammes montre bien le caractère rhéofluidifiant à seuil de ces matériaux sédimentaires, leur thixotropie étant faiblement exprimée (processus de charge et décharge très semblables). Quant aux valeurs du point d'écoulement obtenues rendant donc compte des propriétés visco-élastiques des sédiments, elles sont souvent en ordre croissant avec la profondeur sédimentaire : de 70 à 690 Pa pour R01, de 100 à 450 Pa pour R02, de 130 à 680 Pa pour R15 et de 180 à 680 Pa pour R03.

**Carbone et Azote Organiques Particulaires** (carte 9A) – Les analyses de carbone et azote particulaire (organique et totale) faites sur les prélèvements des stations R01 et R02 aboutissent, pour les trois niveaux choisis, à des valeurs faibles, correspondant à une *quasi* constance du rapport C/N total selon la profondeur, ainsi que du rapport C/N organique, puisque les valeurs du premier rapport ne varient que de 12,3 à 12,9 pour les deux stations, celles du second rapport de 12,2 à 12,6.

**Teneur en chlordécone** (carte 9A) – Dans les prélèvements des stations R01 et R02, et pour tous les niveaux, les teneurs en chlordécone sont très faibles et inférieures aux seuils de quantifications qui se situent entre 4 et 6  $\mu\text{g/kg}$  p.s. (poids de sédiment sec). Un seul de ces prélèvements, le deuxième décimètre de la carotte R02 présente un niveau de contamination quantifiable et égal à de 15,2  $\mu\text{g/kg}$  p.s.

### ***Faciès vaso-sableux / vaseux, au débouché de la rivière Mansarde*** (R04)

La station R04 est située au proche débouché de la rivière Mansarde, à 2 m de profondeur en 'avant-récif', c'est-à-dire entre le quai de la ville du Robert et la "caye" voisine.

**Nature texturale et minéralogique** (cartes 4A & 7A) - Les sédiments de cette station correspondent à des faciès 'superposés', clairement vaso-sableux sur les deux premiers décimètres, puis plutôt vaseux (à la limite avec le faciès précédent plus grossier), sur les deux derniers décimètres.

Les sédiments de ce point de prélèvement sont composés de silts grossiers uni-, voire bimodaux, dans les 3 premiers niveaux (diminuant de 40 à 30  $\mu\text{m}$ , selon la moyenne granulométrique), évoluant selon la profondeur vers des silts moyens unimodaux dans le dernier décimètre (27  $\mu\text{m}$ ), la fraction argileuse variant significativement des deux premiers décimètres, avec 6-7%, jusqu'aux deux derniers décimètres, avec 9%, contribuant ainsi au caractère vaseux de ces faciès.

Aucune analyse minéralogique n'a été faite sur les prélèvements de R04.

**Comportement rhéophysique** (carte 8A) – Ces sédiments vaso-sableux s'avèrent en fait cohésifs et montrent des teneurs en eau qui, fortes dans le premier décimètre (220%), diminuent brutalement dans le second décimètre (160%) pour ensuite décroître progressivement selon la profondeur sédimentaire, jusqu'à atteindre une valeur encore suffisante (140%) dans le dernier décimètre pour permettre des essais rhéologiques.

Ainsi, les seuils d'écoulement croissent avec la profondeur sédimentaire (de 100 Pa à 570 Pa), l'examen des rhéogrammes montrant, comme pour les faciès précédents, le caractère rhéofluidifiant à seuil de ces matériaux sédimentaires, leur thixotropie étant là encore faiblement exprimée (processus de charge et décharge très semblables). Quant aux valeurs du point d'écoulement obtenues, elles sont en ordre croissant avec la profondeur, variant de 90 à 800 Pa.

**Carbone et Azote Organiques Particulaires** (carte 9A) – Aucune analyse de carbone et azote particulaire (organique et totale) n'a été faite sur les prélèvements de cette station.

**Teneur en chlordécone** (carte 9A) – Aucune analyse de teneur en chlordécone n'a été faite sur les prélèvements de cette station.

### ***Faciès vaso-sableux de proche contrebas de "cayes"*** (R05 – R09)

La station R05 est située à 10 m de profondeur et correspond symétriquement à R04, en extérieur par rapport à la "caye" au droit de la ville du Robert. Quant à la station R09, elle est située à 12 m de profondeur. Les deux stations ont fait l'objet du prélèvement d'une seconde carotte à fins d'étude de structuration et de radiodation, ainsi que d'analyses minéralogiques.

**Nature texturale et minéralogique** (cartes 4A & 7A) - Les sédiments de ces deux stations correspondent à des faciès vaso-sableux, qui présentent néanmoins, selon la profondeur sédimentaire, des variations de tailles de particules entre les deux points de prélèvements complètement différentes, voire opposées.

La station R05 est constituée de sables, d'origine récifale, partagés en une demi-partie supérieure (0-20 cm), composée de sables très fins (50-63  $\mu\text{m}$ , de moyenne granulométrique) bimodaux, et en une demi-partie inférieure (20-40 cm) avec des sables fins (117-179  $\mu\text{m}$ ) trimodaux. Quant à la fraction argileuse, elle est constante (7-8%) sur les trente premiers centimètres, puis chute brutalement à 4% dans le dernier décimètre.

La station R09 présente des sables très fins, diminuant de taille particulaire avec la profondeur (de 85 à 50  $\mu\text{m}$ ), bimodaux et également coralliens. Quant à la fraction argileuse de ces sédiments, elle est *quasi* constante (6-8%) sur l'ensemble de la station.

Outre les éléments concernant la vitesse de sédimentation qui seront présentés ultérieurement, l'examen des carottes sédimentaires entières des stations R05 et R09 montre qu'elles diffèrent entre elles.

La carotte R05 présente une évolution du sédiment avec la profondeur : plus "vaseux" en surface, il semble plus grossier ensuite avec la présence de petit débris. Le profil de  $^{210}\text{Pb}_{\text{xs}}$  montre l'existence d'une couche de mélange jusqu'à environ 10cm, puis il y a une décroissance significative du  $^{210}\text{Pb}_{\text{xs}}$  avec la profondeur, aboutissant, aux environs de 25 cm, à des valeurs inférieures à celles attendues d'après la régression générale, cette évolution s'expliquant par plusieurs processus envisageables : apport de matériel plus ancien par bioturbation, dilution par des débris coquilliers fins, apport sédimentaire latéral, etc.

La carotte R09 présente un sédiment assez homogène sur l'ensemble de la section, avec des petits débris coquilliers. À l'ouverture, la partie supérieure était constituée de craquelures sans doute en lien avec la nature légèrement sablonneuse du sédiment et avec une perte partielle des eaux interstitielles, les sédiments de surface étant plus clairs et une couche superficielle de mélange d'environ 5 cm étant détectée, ainsi que d'autres événements de mélange enregistrés vers 30 cm. Le profil de porosité, quant à lui, est plutôt monotone avec la profondeur.

L'analyse minéralogique des stations R05 et R09 montre dans les trois niveaux examinés que : (1) certains minéraux sont 'faiblement abondants', comme la kaolinite pour les deux stations, comme les smectites et l'albite pour R05, ce dernier élément devenant brutalement 'fortement abondant' dans le dernier décimètre et comme le gypse pour R09 (sauf dans le premier décimètre) ; (2) la calcite et l'halite sont 'abondantes' pour les deux stations, de même que le sont l'albite, l'hématite (sauf dans le premier décimètre) et le quartz (qui est 'très abondant' dans le premier décimètre) pour R09 ; (3) sont 'assez fortement abondants' le quartz, l'augite et l'hématite (sauf dans le dernier décimètre) pour R05 et les smectites pour R09 ; enfin (4) sont 'fortement abondantes' l'aragonite pour les deux stations, ainsi que l'augite pour R09. À signaler la présence en faible abondance, pour R05, de gypse dans le premier décimètre, d'antigorite pour le second et de d'anatase pour le dernier.

**Comportement rhéophysique** (carte 8A) – Selon leur teneur en eau, les sédiments vaso-sableux de ces deux stations s'avèrent cohésifs ou non, déterminant la faisabilité d'essais de caractérisation de leur comportement rhéophysique. Pour R05, les essais n'ont pas pu avoir lieu, sauf pour le premier décimètre (taux à 175%), du fait de valeurs faibles à très faibles de la teneur en eau diminuant avec la profondeur (de 78 à 54%); en revanche, pour R09, les teneurs en eau relativement fortes, quoique décroissantes avec la profondeur (de 170 à 100%), ont permis la réalisation d'essais rhéologiques.

Il en découle que le premier décimètre de R05, seul niveau ayant pu être analysés, présente une cohésion moyenne, avec un seuil d'écoulement à 80 Pa et un point d'écoulement à 70 Pa. Quant à R09, les cohésions obtenues sont de moyennes à fortes, croissantes avec la profondeur, comme le montrent les valeurs du seuil d'écoulement (de 100 à 480 Pa), avec un point d'écoulement variant également avec la profondeur (de 100 à 1600 Pa). Par ailleurs, l'examen des rhéogrammes montre bien le caractère rhéofluidifiant à seuil de ces matériaux sédimentaires, leur thixotropie étant faiblement exprimée (courbes de charge et décharge très proches).

**Carbone et Azote Organiques Particulaires** (carte 9A) – Les analyses de carbone et azote particulaire (organique et totale) faites sur les prélèvements des stations R05 et R09 donnent, pour les trois niveaux choisis des deux stations, des valeurs moyennes, de même ordre et croissantes avec la profondeur, selon les résultats suivants : (i) pour le rapport C/N total, de 35,6 à 63,0 pour R05 et de 41,5 à 46,8 pour R09 ; (ii) pour le rapport C/N organique, de 32,0 à 66,7 pour R05 et de 37,8 à 46,7 pour R09.

**Teneur en chlordécone** (carte 9A) – Tous les prélèvements des stations R05 et R09, et pour tous les niveaux échantillonnés, présentent des teneurs en chlordécone très faibles, inférieures aux seuils de quantification qui se situent entre 3 et 5,4 µg /kg de sédiment sec.

### ***Faciès vaso-sableux de contrebas éloigné de "cayes"*** (R06 – R08)

Les stations R06 et R08 sont situées respectivement à 11 m et à 12 m de profondeur.

Les deux stations ont fait l'objet du prélèvement d'une seconde carotte à fins d'étude de structuration et de radiodatation, ainsi que d'analyses minéralogiques.

**Nature texturale et minéralogique** (cartes 4A & 7A) - Les sédiments de ces deux stations correspondent à des faciès vaso-sableux, à caractère plus grossier pour les deux derniers décimètres de la station R06 et, au contraire, à caractère plus fin (et constant selon la profondeur) pour la station R08, avec, même, un passage vaseux pour cette dernière au niveau 10-20 cm.

La station R06 présente un ensemble de sédiments d'origine récifale, superposés et de nature différente, puisque les deux premiers décimètres sont composés de silts grossiers (41-43 µm, selon la moyenne granulométrique) bimodaux, le 3<sup>ème</sup> décimètre étant constitué de sables très fins (95 µm) trimodaux et le dernier décimètre étant composé de sables fins (122 µm) également trimodaux. Quant à la fraction argileuse, elle est constante (8-9 %) sur l'ensemble de la carotte.

La station R08 montre une série de silts grossiers, constants en taille de particules (35 à 37 µm), uni- à bimodaux, avec cependant un passage silteux moyen (29 µm), tous d'origine récifale. Quant à la fraction argileuse, elle est *quasi* constante (9-11 %) sur l'ensemble des sédiments de la station.

Outre les éléments concernant la vitesse de sédimentation qui seront présentés ultérieurement, l'examen des carottes sédimentaires entières dénote de fortes ressemblances entre les stations R06 et R08. À l'ouverture, elles présentent une bonne préservation du matériau sédimentaire, avec un premier décimètre plus fluide, correspondant à une couche de mélange (jusqu'à environ 7-8 cm pour R06 et 10 cm pour R08), puis un matériel plus compact à la base, cette évolution étant en accord avec une augmentation progressive de la masse spécifique. De nombreux débris coquilliers, voire même, pour R06, la présence d'une coquille d'un gros bivalve (3-4 cm) entre 28 et 31 cm, illustrent l'existence d'une forte activité biologique confirmée à plusieurs reprises sur les images de ces carottes (fragments de coquilles et traces de terriers).

L'analyse minéralogique des stations R06 et R08 montre dans les trois niveaux examinés que : (1) certains minéraux sont 'faiblement abondants' pour les deux stations, comme l'albite (devenant brutalement 'fortement abondante' dans le dernier décimètre de R06), comme le gypse (sauf pour les deux derniers décimètres) et la kaolinite (sauf pour le dernier décimètre de R08), ainsi que l'aragonite, l'hématite, l'augite, l'halite (ces deux derniers éléments étant même 'abondants' dans son premier décimètre) et les smectites (sauf dans son premier décimètre) pour la station R06 et l'antigorite, sauf dans son dernier décimètre, pour la station R08; (2) la calcite est 'abondante' pour les deux stations (plutôt 'faiblement abondante' dans le dernier décimètre de R06), ainsi que, pour la station R08, l'halite (même 'assez fortement abondante' dans son premier décimètre) ; (3) certains minéraux sont 'assez fortement abondants' comme l'aragonite, les smectites et l'augite (cette dernière étant 'fortement abondante' dans son dernier décimètre) pour la seule station R06 ; enfin (4), est 'fortement abondant' le quartz pour les deux stations, avec toutefois pour R08, une décroissance de son abondance avec la profondeur (devenant 'assez fortement abondant' dans son second décimètre et seulement 'abondant' dans son dernier). À signaler la présence en faible abondance d'amphiboles et d'anatase dans le premier décimètre de la station R06, d'illite dans son second et d'antigorite dans le dernier décimètre.

**Comportement rhéophysique** (carte 8A) – Selon leur teneur en eau, les sédiments vaso-sableux de ces deux stations s'avèrent cohésifs ou non, déterminant la possibilité d'essais de caractérisation de comportement rhéophysique. Pour la station R06, à part le premier décimètre (à 134%), les teneurs en eau sont faibles à très faibles, diminuant avec la profondeur sédimentaire (de 73 à 49%) ; en revanche, pour R08, elles sont relativement fortes, décroissantes avec la profondeur (de 180 à 100%).

Il en découle, pour les deux premiers décimètres de R06 (les deux autres niveaux n'ayant pu être analysés), une cohésion moyenne à (brutalement) très forte, avec un seuil d'écoulement à 160 Pa (premier décimètre) et à 670 Pa (second décimètre), tandis que les points d'écoulement s'affichent à 180 Pa (premier décimètre) et à 550 Pa (second décimètre). Quant à R08, les cohésions sont de moyennes à fortes, très progressivement croissantes avec la profondeur sédimentaire, comme le montrent les valeurs du seuil d'écoulement (de 130 Pa-1<sup>er</sup> niveau, puis de 330 à 440 Pa), avec un point d'écoulement *quasi* constant, à part le premier décimètre (140 Pa, puis de 530 à 560 Pa). Par ailleurs, l'examen des rhéogrammes montre bien le caractère rhéofluidifiant à seuil de ces matériaux sédimentaires, leur thixotropie étant faiblement exprimée (courbes de charge et décharge très proches).

**Carbone et Azote Organiques Particulaires** (carte 9A) – Les analyses de carbone et azote particulière (organique et totale) faites sur les prélèvements des stations R06 et R08 donnent, pour les trois niveaux choisis des deux stations, des valeurs moyennes très rapprochées et faiblement croissantes avec la profondeur selon les résultats suivants : (i) pour le rapport C/N total, de 26,9 à 31,3 pour R06 et de 26,5 à 40,7 pour R08 ; (ii) pour le rapport C/N organique, de 22,7 à 26,9 pour R06 et de 28,5 à 37,7 pour R08.

**Teneur en chlordécone** (carte 9A) – Les teneurs en chlordécone dans les prélèvements des stations R06 et R08 sont très faibles et inférieures aux seuils de quantification entre 3 et 5,6 µg /kg sédiment sec.

### ***Faciès vaseux de mini-baie à l'est de la rivière Cacao*** (R07)

La station R07 située à 7,5 m de profondeur est probablement sous influence indirecte de la rivière Cacao, à proximité d'une mangrove (distance de l'ordre de 600-700 m).

**Nature texturale et minéralogique** (cartes 4A & 7A) - Les sédiments de la station R07 sont très vaseux et sont composés de silts moyens unimodaux, homogènes dans les 20 premiers centimètres (16 µm de moyenne granulométrique) comme dans les 20 derniers centimètres (22-23 µm), la fraction argileuse étant constante selon la profondeur sédimentaire, avec une valeur de 11-12%.

Aucune analyse minéralogique n'a été faite sur les prélèvements de R07.

**Comportement rhéophysique** (carte 8A) – Du fait de leur caractère vaseux, ces sédiments sont cohésifs, avec des teneurs en eau fortes dans le premier décimètre (170%) et décroissant progressivement selon la profondeur sédimentaire pour atteindre une valeur encore suffisante (100%) dans le dernier décimètre pour permettre des résultats suite aux essais rhéologiques.

*A contrario*, les seuils d'écoulement croissent avec la profondeur (de 100 Pa à 570 Pa), avec des cohésions fortes à très fortes dès le premier décimètre. Par ailleurs, l'examen des rhéogrammes montre, comme pour les faciès précédents, le caractère rhéofluidifiant à seuil de ces matériaux sédimentaires, leur thixotropie étant faiblement exprimée (courbes de charge et décharge très proches). Quant aux valeurs du point d'écoulement obtenues, elles croissent également avec la profondeur, variant de 290 à 600 Pa. Il s'en déduit que ces sédiments sont compactés, sans doute en place depuis longtemps, sans mobilité significative.

**Carbone et Azote Organiques Particulaires** (carte 9A) – Aucune analyse de carbone et azote particulière (organique et totale) n'a été faite sur les prélèvements de cette station.

**Teneur en chlordécone** (carte 9A) – Aucune analyse de teneur en chlordécone n'a été faite sur les prélèvements de cette station.

## Vitesses de sédimentation

Les résultats des déterminations des excès de  $^{210}\text{Pb}$  ( $^{210}\text{Pb}_{\text{xs}}$ ) sur les carottes entières des stations R01, R02, R05, R06, R08 et R09 conduisent aux estimations de vitesses de sédimentation de cette zone ouest, présentées dans le tableau suivant (tab.3) :

Station	Faciès	Profondeur	Vitesse de sédimentation
R01	<b>Vaseux</b> débouché Gaschette - mangrove	2 m	<b>&gt; 10 cm/an</b>
R02	<b>Vaseux</b> à ~300 m de R01 influence Gaschette	2 m	<b>~ 10 cm/an</b>
R05	<b>Vaso-sableux</b> extérieur / caye 'Robert'	10 m	<b>1,1 cm/an</b>
R06	<b>Vaso-sableux</b> éloigné / caye 'Robert' au milieu du fond de baie	11 m	<b>0,5 cm/an</b>
R08		12 m	<b>0,8 cm/an</b>
R09	<b>Vaso-sableux</b> extérieur Sud / caye 'P <sup>le</sup> Fort'	12 m	<b>0,6 cm/an</b>

Tab.3 – Vitesses de sédimentation mesurées et faciès sédimentaires des 6 stations choisies dans la zone ouest du havre du Robert

## Comparaisons inter-paramétriques

Cartes 12A – 11A – 10A

Afin d'effectuer des rapprochements entre différents types de paramètres relatifs à un petit nombre de stations, la méthode analytique choisie pour l'interprétation des résultats a été l'utilisation de données géoréférencées gérées dans un Système d'Information Géographique (SIG) et présentées sous forme de cartes.

La première comparaison effectuée concerne les faciès sédimentaires et porte sur la juxtaposition des données acquises dans la présente étude avec celles établies antérieurement en 1990-1993 par l'Ifremer et l'université de Bordeaux, sous forme de cartes sédimentologiques dressées à partir de données issues de différents moyens couplés entre eux (Durand, 1996) : concernant les zones peu profondes des baies, l'utilisation des photographies aériennes IGN et la réalisation de prélèvements *in situ* a été particulièrement importante du fait des difficultés d'accès de bateaux océanographiques pour la réalisation de profils (sonar, sismique, photo, etc.). Toutefois, on peut relever que pour la partie ouest du havre du Robert, un seul point de prélèvement par benne (à la limite de la carte) effectué en 1990-1993 se trouve à proximité de la station R09 de la présente étude.

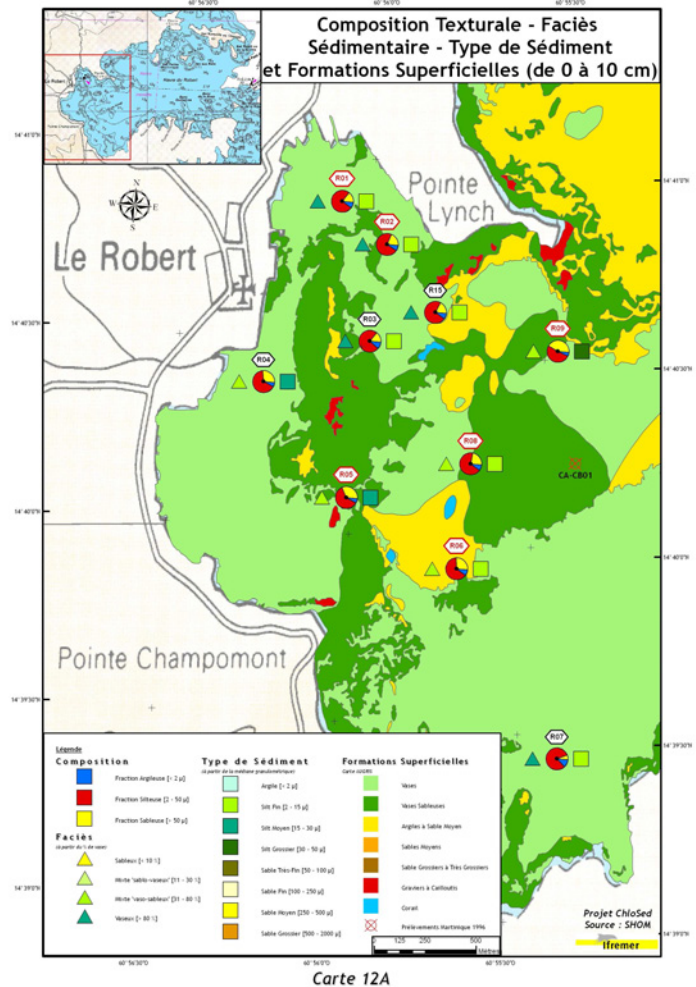
La comparaison des cartes sédimentaires régionales (Augris *et al.*, 2000) et des résultats de la présente étude montre certaines différences qui pourraient aboutir aux améliorations cartographiques suivantes :

- la simplification de la représentation spatiale des faciès sédimentaires en fond de baie, avec de plus l'étendue des faciès vaseux à réduire jusqu'aux environs de l'isobathe -5m au bénéfice des faciès vaso-sableux ;

- la représentation de la surface occupée par les fonds de type 'vaso-sableux' du milieu de baie, ainsi que ceux situés plus à l'est, correspondant à une zone allant de l'isobathe -10 m jusqu'aux profondeurs au moins d'une quinzaine de mètres ;

- la réduction des zones vaso-sableuses au voisinage des 'cayes' à leur strict contrebas et la représentation cartographique de ces cayes récifales par des formations coralliennes ;

- la recherche de précision texturale concernant la formation dite "argiles à sables moyens" déterminée à partir des profils acoustiques afin d'effectuer des correspondances avec les paramètres sédimentologiques étudiés dans la présente étude sur des formations situées aux mêmes localisations.



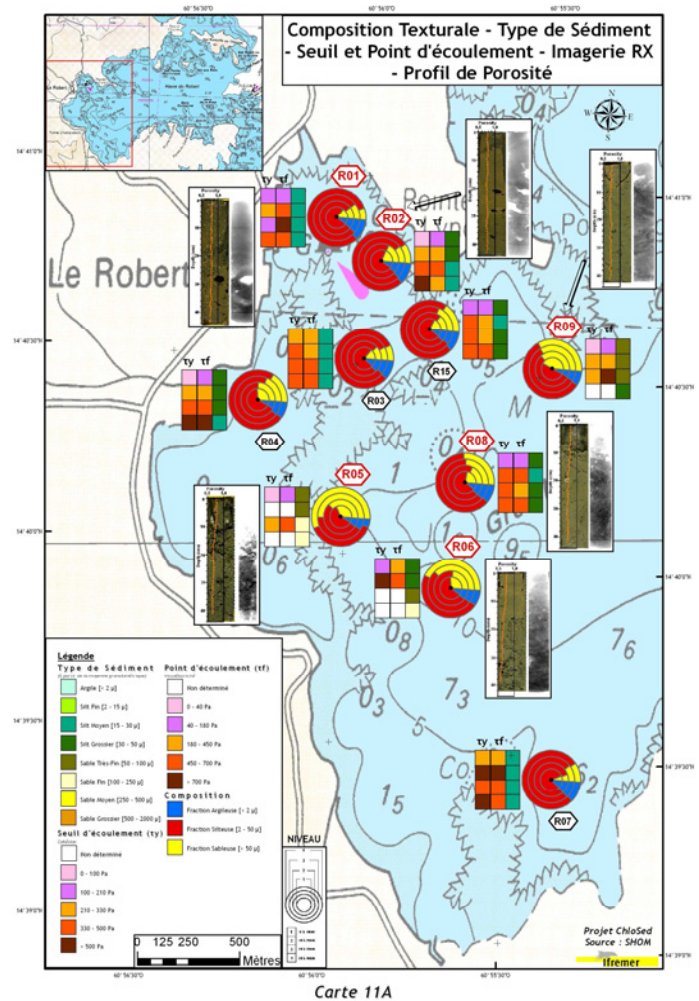
Dans cette seconde comparaison, il s'agit de rechercher les corrélations cartographiques entre les paramètres texturaux pertinents et les paramètres rhéophysiques, ainsi que les résultats tirés de l'analyse structurale des carottes superficielles.

Les *faciès vaseux nord-ouest* de la baie (stations R01, R02, R15 et R03), liés au débouché de la *Gaschette* et proches de *mangroves* pour les deux premières, voient selon la profondeur sédimentaire une variation sensible de la taille de particules, rendant compte graduellement de l'influence de cette rivière, avec : (i) sur l'ensemble des 40 centimètres sédimentaires de la station R01, des silts moyens à dépôt rapide, de granulométrie variable et à héritage minéralogique détritique (quartz, kaolinite et smectites), mais à comportement significatif indiquant une compaction minimale ; (ii) pour la station R02, plus éloignée de l'embouchure, une structuration sédimentaire semblable, également due à un dépôt rapide quoique plus consolidée, de même cortège minéralogique, mais composée d'une moitié supérieure à silts grossiers surmontant une moitié inférieure à silts moyens ; (iii) pour la station R15, encore plus distante et à influence corallienne des silts grossiers sur la totalité de la colonne sédimentaire et à cohésions significatives, semblables aux précédentes ; (iv) enfin, dans le prolongement de ce transect de trois stations, mais légèrement décalée de l'axe du débouché de la rivière Gaschette, la station R03, composée, comme R01, de silts moyens avec toutefois une teneur en argiles légèrement plus faible et constante par rapport à celles des trois stations précédentes.

Symétriques des précédents, les *faciès vaseux du sud* de la baie, illustrés par la station R07, sont sous influence indirecte de la *rivière Cacao* et se trouvent également à proximité de *mangroves*. Ils sont constitués de silts moyens bien consolidés (cohésions fortes à très fortes), sans doute depuis longtemps en place.

Les *faciès mixtes 'vaso-sableux / vaseux'* liés au débouché de la *rivière Mansarde*, tels que l'illustre la station R04 située en avant de la caye relative à la ville du Robert présentent des sédiments devenant progressivement plus fins (de silts grossiers à silts moyens) et relativement consolidés en profondeur avec corrélativement une fraction argileuse croissant régulièrement.

Les *faciès vaso-sableux en contrebas de cayes* situés soit juste à proximité (stations R05 et R09), soit un peu plus éloignés (stations R06 et R08) sont constitués de silts grossiers ou/et sables fins à très fins d'origine récifale, dans l'ensemble plus ou moins bioturbés et avec des apports coquilliers, le premier décimètre étant plus fluide (dépôt rapide ou plus mobile) et le reste des colonnes sédimentaires étant nettement plus compacté comme l'attestent les cohésions. Ces sédiments possèdent un cortège minéralogique composé de halite et de carbonates (calcite, aragonite) en quantité variable selon les stations et les niveaux, d'albite et d'hématite pour les stations situées juste en contrebas des cayes nord et

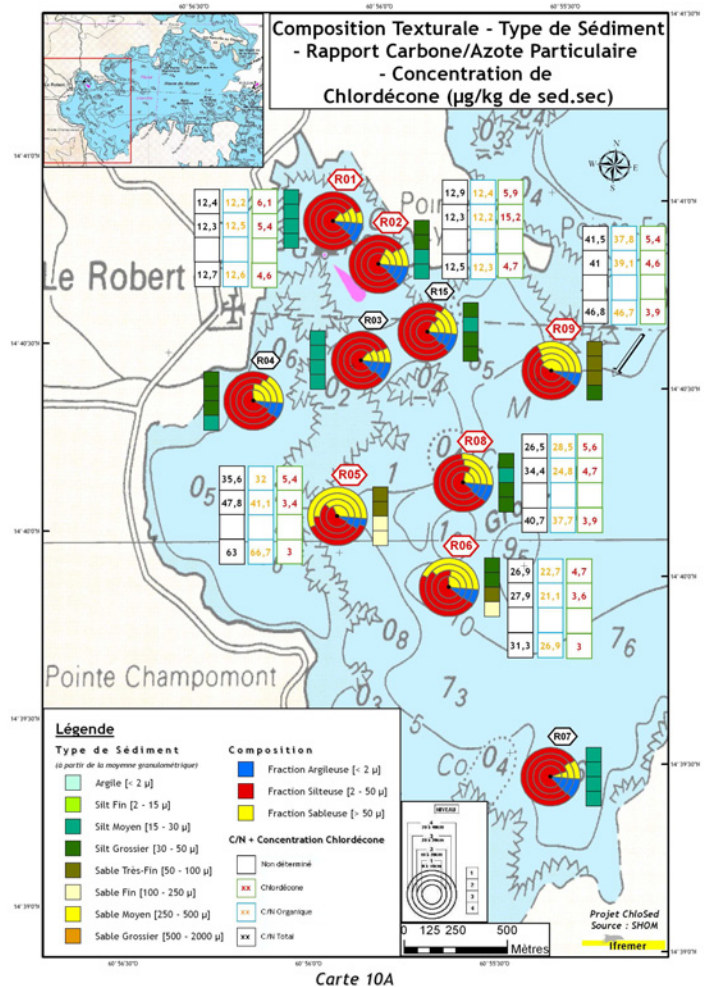




ouest et de smectites et d'augite pour celle du nord, tandis que les smectites, l'augite et le quartz détritique sont plus ou moins fortement 'abondants' dans les stations du milieu de baie, en contrebas éloigné de cayes.

Dans cette troisième et dernière comparaison, il s'agit de rechercher les corrélations par SIG entre les paramètres texturaux et les paramètres chimiques, concernant la teneur en matière organique (*via* les C/N) et en chlordécone, pour les stations spécifiquement analysés chimiquement, à savoir les six stations R01, R02, R05, R06, R08 et R09. Le classement de ces stations d'après leur faciès, leur type sédimentaire et leur composition texturale montre les caractéristiques ci-après.

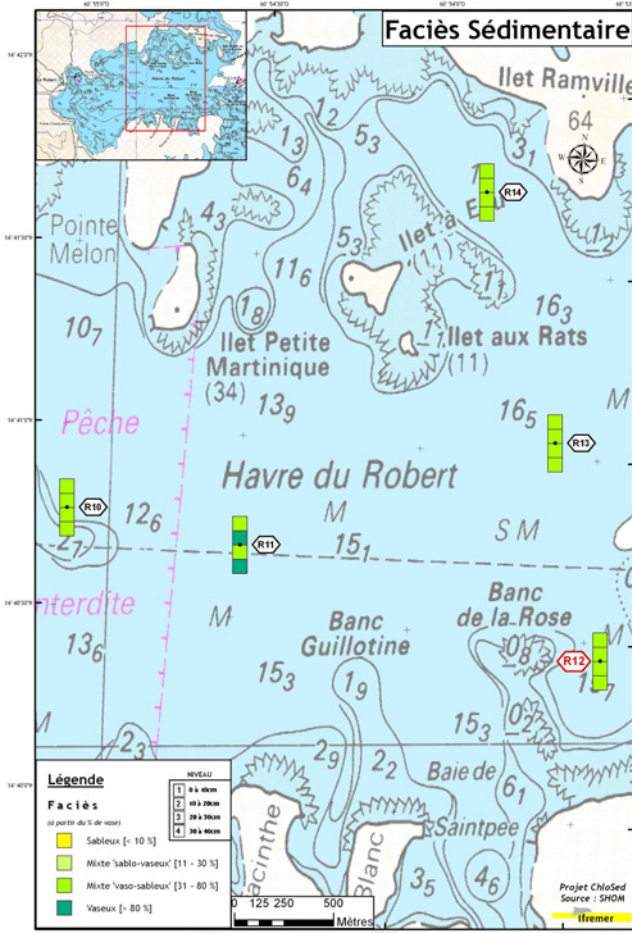
Les *faciès vaseux nord-ouest* de la baie (stations R01, R02), *proches de mangroves et du débouché de la Gaschette* et composés essentiellement de silts moyens, présentent une fraction argileuse légèrement croissante avec la profondeur (de 8 à 12%). Ils indiquent des **C/N totaux et organiques** affichant des valeurs globalement faibles (12-13), d'une part *quasi* identiques entre les deux types de rapports, ce qui semble signifier corrélativement l'absence de carbone et azote minéraux, et d'autre part constantes avec la profondeur, ce qui confirme le dépôt soudain et en masse des 40 centimètres analysés. Quant à la teneur en **chlordécone**, ses valeurs sont très faibles pour les prélèvements dans ces deux stations (< 6 µg/kg p.s.), excepté celui du second décimètre de la station R02 qui présente une concentration de 15,2 µg/kg p.s.;



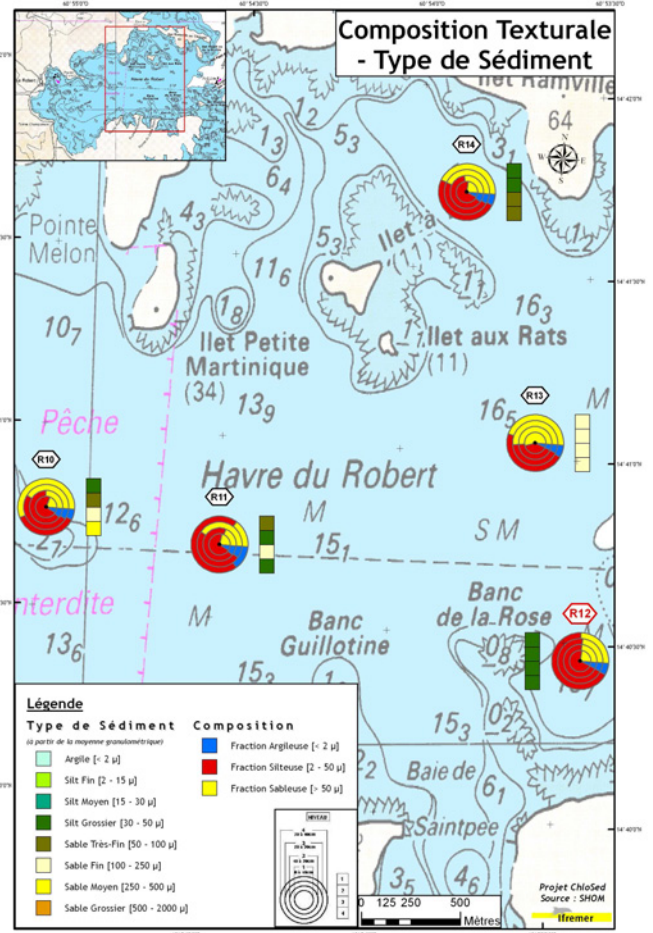
Les *faciès vaso-sableux des contrebas des cayes ouest et nord* (stations R05 et R09), d'origine récifale et constitués essentiellement de silts grossiers à sables fins à très fins, présentent une fraction argileuse identique et constante, se situant aux alentours de 7% (sauf pour le dernier décimètre de R05 où elle chute à 4%). Ils montrent des **C/N totaux et organiques** affichant des valeurs globalement moyennes (pour R05, C/N total de 36 à 63 et C/N organique de 32 à 67 ; pour R09, C/N total de 42 à 47 et C/N organique de 38 à 47), soit 3 à 4 fois plus fortes que pour les précédents faciès vaseux, avec toutefois quelques différences entre les deux stations : (i) des valeurs pour les deux types de C/N sensiblement plus faibles dans les deux premiers décimètres de la station ouest (R05) que pour ceux de la station nord (R09) ; (ii) des valeurs légèrement croissantes selon la profondeur sédimentaire pour les deux stations ; (iii) une valeur nettement plus forte pour le dernier décimètre de R05 tant pour le rapport total que pour l'organique ; enfin (iv) la part du C/N minéral, obtenu par déduction, variable sur l'ensemble de la carotte (de l'ordre de 5 à 15%), excepté dans le dernier décimètre de chacune des stations où elle est *quasi* nulle. Quant à la **teneur en chlordécone**, ses valeurs sont identiques entre les

deux stations, comme pour les stations précédentes : dans l'ensemble, elles sont très faibles, inférieures à 5 µg/kg ;

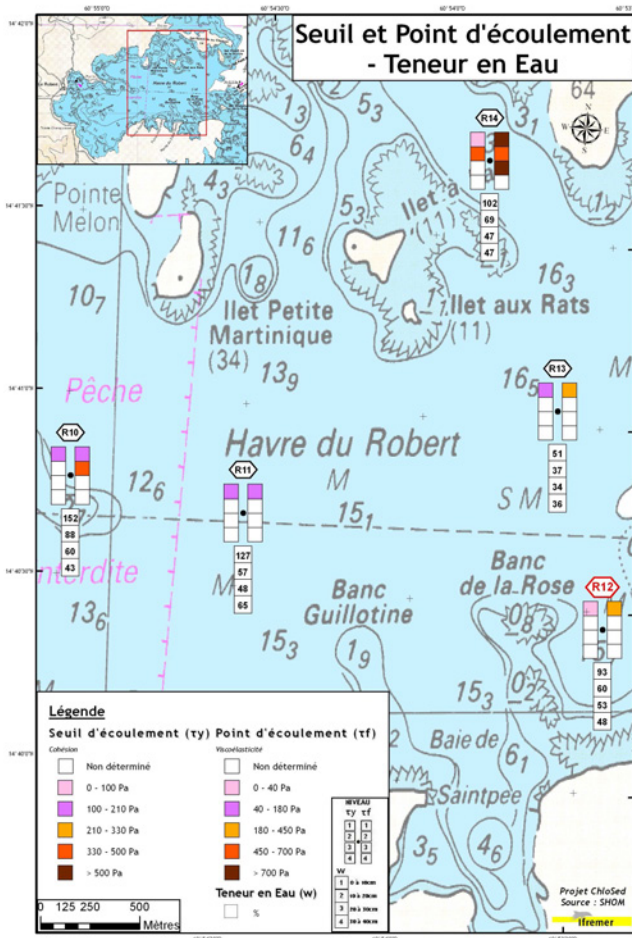
Les *faciès vaso-sableux de milieu de fond de baie*, en contrebas éloigné de la caye ouest (stations R06 et R08), d'origine récifale et composés essentiellement de silts grossiers, indiquent une fraction argileuse identique et constante selon la profondeur sédimentaire (de l'ordre de 9-10%). Ils montrent des **C/N totaux et organiques** présentant des valeurs globalement moyennes, intermédiaires entre les deux types de faciès précédents (soit 2 fois plus fortes que pour les précédents faciès vaseux), avec les caractères suivants : (i) ces valeurs sont semblables entre les deux stations et légèrement croissantes avec la profondeur (pour R06, C/N total de 27 à 31 et C/N organique de 23 à 27 ; pour R08, C/N total de 27 à 41 et C/N organique de 29 à 38) ; (ii) le C/N minéral y représente une part variable, assez faible dans les premiers et derniers décimètres (de l'ordre de 10-15%), mais plus du double dans les seconds décimètres (~35%) de ces stations. Quant à la **teneur en chlrodécone**, ses valeurs sont identiques entre les deux stations, également identiques à celles de l'ensemble des stations précédentes : au total, elles sont faibles (de l'ordre de 5 µg/kg en surface jusqu'à 3-4 µg/kg au fond).



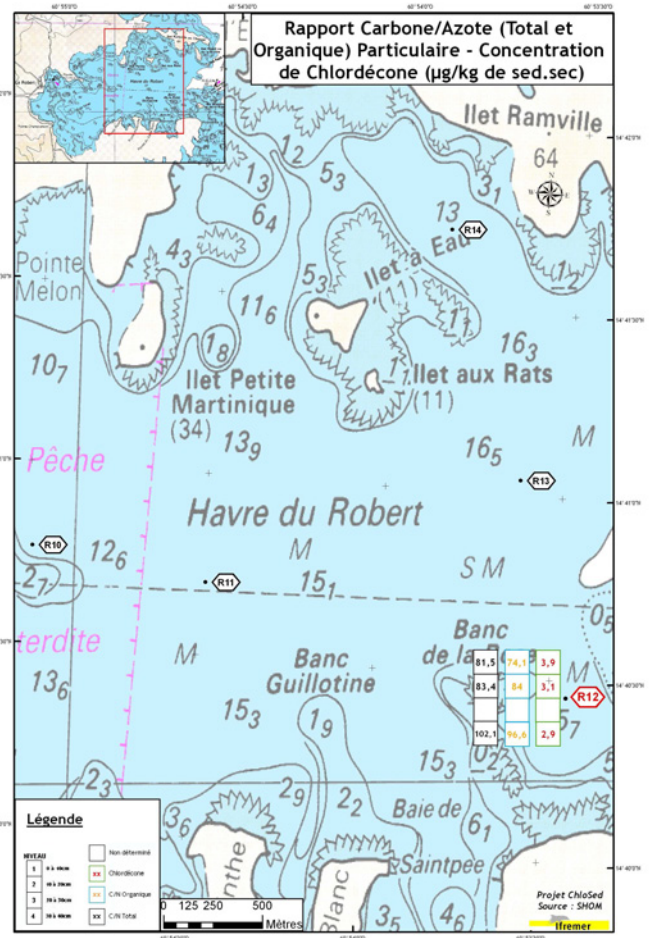
Carte 4B



Carte 7B



Carte 8B



Carte 9B

## Havre du Robert : zone est

### Caractéristiques sédimentologiques et chimiques *Cartes 4B – 7B – 8B – 9B*

#### *Faciès vaso-sableux du chenal central* (R10 – R11 – R13)

Les stations R10 et R11 sont relativement proches l'une de l'autre (de l'ordre de 800 m de distance) et sont situées à la même profondeur (14-16 m). La station R13, localisée à la sortie du havre du Robert, se trouve à une profondeur de 19 m.

**Nature texturale et minéralogique** (cartes 4B & 7B) - Les fonds de ces trois stations correspondent essentiellement à des faciès vaso-sableux, relativement homogènes selon la profondeur sédimentaire, excepté pour le dernier niveau du point R11 plus vaseux.

Les stations R10 et R11 montrent des sédiments à texture variable selon la profondeur sédimentaire. Leurs 20 premiers centimètres sont constitués de silts grossiers à sables très fins (à respectivement 36-39  $\mu\text{m}$  et 59  $\mu\text{m}$ , selon la moyenne granulométrique), uni-, voire bimodaux, avec une inversion de l'évolution des tailles de particules entre les niveaux des deux stations, les particules étant sensiblement plus grossières de R10 à R11 dans le premier décimètre et, paradoxalement, légèrement plus fines dans le second décimètre. Le troisième niveau (20-30 cm) est constitué de sables fins (124-166  $\mu\text{m}$ ) trimodaux, tandis que le type sédimentaire du dernier décimètre de chacune des deux stations est complètement différent : (i) des sables moyens (261  $\mu\text{m}$ ), trimodaux au moins pour la station R10 ; (ii) des silts grossiers (33  $\mu\text{m}$ ) unimodaux ou plus pour la station R11 avec une valeur significative de la fraction argileuse (14% contre 6-9% pour l'ensemble des stations).

Ces variations selon la profondeur se retrouvant dans la composition texturale, l'historique sédimentaire apparaît alors divergent entre ces deux stations. Il semblerait se décomposer en trois phases : le dernier décimètre sédimentaire carotté, correspondant à la première phase de dépôt constaté, présente une dynamique originelle contrastée entre les deux stations (apport très grossier pour R10 *versus* apport relativement très fin pour R11), à laquelle succède une seconde phase nettement différente avec un décimètre sédimentaire (situé à 20-30 cm) granulométriquement plus homogène (sableux fin), puis une troisième et dernière phase commune aux deux points avec 20 centimètres de sédiments relativement fins (silteux grossiers/sableux très fins).

*Les différences observées entre R10 et R11 proviennent sans doute du fait que la station R10 se situe en position décalée par rapport à la direction WSW-ENE du chenal de la baie et se trouve alors sous influence des 'cayes' coralliennes de Pointe Fort.*

Aucune analyse minéralogique n'a été faite sur les prélèvements de R10 et R11.

La station R13 est constituée uniformément de sables fins (de 126 à 184  $\mu\text{m}$ , selon la moyenne), trimodaux au moins, avec une décroissance granulométrique de la surface au fond sédimentaire, sa composition texturale présentant des fractions vaseuses constantes (45-47%), excepté le dernier décimètre plus silteux (la part vaseuse s'élevant alors à 54%). Par ailleurs, la fraction argileuse est en général moindre (6%) que pour R10 et R11.

Aucune analyse minéralogique n'a été faite sur les prélèvements de R13.

**Comportement rhéophysique** (carte 8B) – Du fait de leur caractère vaso-sableux, ces sédiments ne sont pas cohésifs, leurs teneurs en eau étant en général très faibles (de l'ordre de 40% pour R13 ; de l'ordre de 50-60 % pour R10 et R11), excepté pour les premiers décimètres de R10 et R11 avec des teneurs en eau respectives de 150% et 130%. Ce sont les deux seuls cas pour lesquels des essais rhéologiques ont pu être réalisés avec des résultats significatifs.

Les cohésions s'avèrent assez fortes au regard des valeurs obtenues sur les seuils d'écoulement pour le premier niveau sédimentaire de chacune des stations R10 et R11 (de l'ordre de 140-150 Pa, au taux choisi de  $0,1 \text{ s}^{-1}$ ), ainsi que pour les propriétés visco-élastiques (points d'écoulement à 130-170 Pa).

**Carbone et Azote Organiques Particulaires** (carte 9B) – Aucune analyse de carbone et azote particulaire (organique et totale) n'a été faite sur les prélèvements de ces stations.

**Teneur en chlordécone** (carte 9B) – Aucune analyse de teneur en chlordécone n'a été faite sur les prélèvements de ces stations.

### ***Faciès vaso-sableux de mini-baies en sortie*** (R12 – R14)

Les stations R14 (nord de la baie) et R12 (sud de la baie) sont situées *quasiment* à la même profondeur (15 m pour la première station, 16 m pour la seconde).

La station R12 a fait l'objet du prélèvement d'une seconde carotte à fins d'étude de structuration et de radiodatation, ainsi que d'analyses minéralogiques

**Nature texturale et minéralogique** (cartes 4B & 7B) - Les sédiments de ces deux stations correspondent à des faciès vaso-sableux, uniformément homogènes selon la profondeur sédimentaire pour R12 et plus variables pour R14 (tendance plus sableuse pour la moitié inférieure de la carotte).

Les 20 premiers centimètres de la station R14 sont constitués de silts grossiers (38 à 45  $\mu\text{m}$ , selon la moyenne granulométrique), unimodaux, voire plus, tandis que ses deux derniers niveaux (20-40 cm) sont composés de sables fins (92 à 98  $\mu\text{m}$ ) bimodaux. Quant à la part argileuse, elle est *quasi* constante, à 6-7%.

Ces variations selon la profondeur sédimentaire se retrouvant dans la composition texturale, il s'avère que l'historique sédimentaire diffère en cette station, avec une phase terminale plus fine par rapport à une phase antérieure relativement plus grossière, ces deux phases correspondant chacune à des épaisseurs sédimentaires identiques.

Aucune analyse minéralogique n'a été faite sur la station R14.

La station R12 a fait l'objet du prélèvement d'une seconde carotte à fins d'étude de structuration et de radiodatation, ainsi que d'analyses minéralogiques.

Elle est constituée uniformément de silts grossiers (32-34  $\mu\text{m}$ , selon la moyenne) unimodaux. Sa composition texturale reflète cette même homogénéité, montrant des fractions constantes selon la profondeur, de même que la part argileuse (6-7%) identique aux autres stations de sortie de baie (R13 et R14).

Outre les éléments relatifs à la vitesse de sédimentation qui seront présentés ultérieurement, la carotte de la station R12 s'est distinguée des précédentes dès son ouverture par une couleur très claire et une texture plus grumeleuse, sans marques ni événements sédimentaires, les profils de teneur en eau et de masse spécifique variant en opposition avec la profondeur.

L'analyse minéralogique de la station R12 a conduit aux résultats suivants dans les trois niveaux examinés : (1) l'halite, l'hématite et le quartz sont 'faiblement abondants' ; (2) la calcite et les smectites sont 'abondants' (ce dernier minéral l'étant plus fortement dans le second décimètre) ; (3) l'albite est 'assez fortement abondante' ; (4) enfin, l'aragonite et l'augite sont 'fortement abondants'.

**Comportement rhéophysique** (carte 8B) – Du fait de leur caractère vaso-sableux, ces sédiments ne sont pas *a priori* cohésifs, d'autant que les teneurs en eau correspondantes sont très faibles (de 50 à 70% pour R14 et R12), sauf pour les premiers décimètres de R12 (90%) et de R14 (100%). Ce sont les seuls cas pour lesquels des essais rhéologiques ont pu être réalisés avec des résultats significatifs.

L'étude de la station R12 conduit à la détermination significative des caractéristiques du seul premier décimètre avec une cohésion relativement faible (à seuil d'écoulement de 50 Pa), constat

conforté par un point d'écoulement modeste (180 Pa). Les essais réalisés toutefois sur les niveaux inférieurs compactés indiqueraient des cohésions nettement plus fortes, croissantes avec la profondeur (seuils de 484 et 516 Pa et points d'écoulement successivement de 600, 1990, puis de 2740 Pa).

L'analyse rhéologique de la station R14 montre que, entre les deux premiers décimètres de la carotte, il y a un saut brutal des cohésions (suivant ainsi les teneurs en eau), puisque le seuil d'écoulement croît soudainement de la valeur de 100 Pa (premier décimètre, à relativement faible cohésion) à 490 Pa (second décimètre, à très forte cohésion), le point d'écoulement, quant à lui, chutant curieusement de la valeur singulièrement très forte de 1030 Pa (0-10 cm) à 500 Pa (10-20 cm) pour croître ensuite logiquement à 800 Pa (20-30 cm).

**Carbone et Azote Organiques Particulaires** (carte 9B) – Les analyses de carbone et azote particulaire (organique et totale) faites sur les prélèvements de la station R12 aboutissent à des valeurs fortes pour les trois niveaux choisis, avec une croissance du rapport C/N total selon la profondeur, passant d'une valeur de 81,5 (0-10 cm) à 83,4 (10-20 cm), puis à 102,1 (30-40 cm), tandis que le rapport C/N organique suit la même tendance, en augmentant de 74,1 (0-10 cm) à 84,0 (10-20 cm), puis à 96,6 (30-40 cm).

**Teneur en chlordécone** (carte 9B) – Les teneurs en chlordécone dans les prélèvements de la station R12 sont très faibles, et toujours inférieures à 3,9 µg/kg, quelque soit le niveau échantillonné.

## Vitesses de sédimentation

Les résultats des déterminations des excès de  $^{210}\text{Pb}$  ( $^{210}\text{Pb}_{\text{xs}}$ ) sur la carotte entière de la station R12 conduisent à estimer la vitesse de sédimentation de cette zone est, présentée dans le tableau suivant (tab.4) :

Station	Faciès	Profondeur	Vitesse de sédimentation
R12	<b>Vaso-sableux</b> mini-baie Sud / sortie baie	16 m	<b>1,3 cm/an</b>

Tab.4 – Vitesses de sédimentation mesurées et faciès sédimentaires de la station choisie dans la zone est du havre du Robert

## Comparaisons inter-paramétriques

Cartes 12B – 11B – 10B

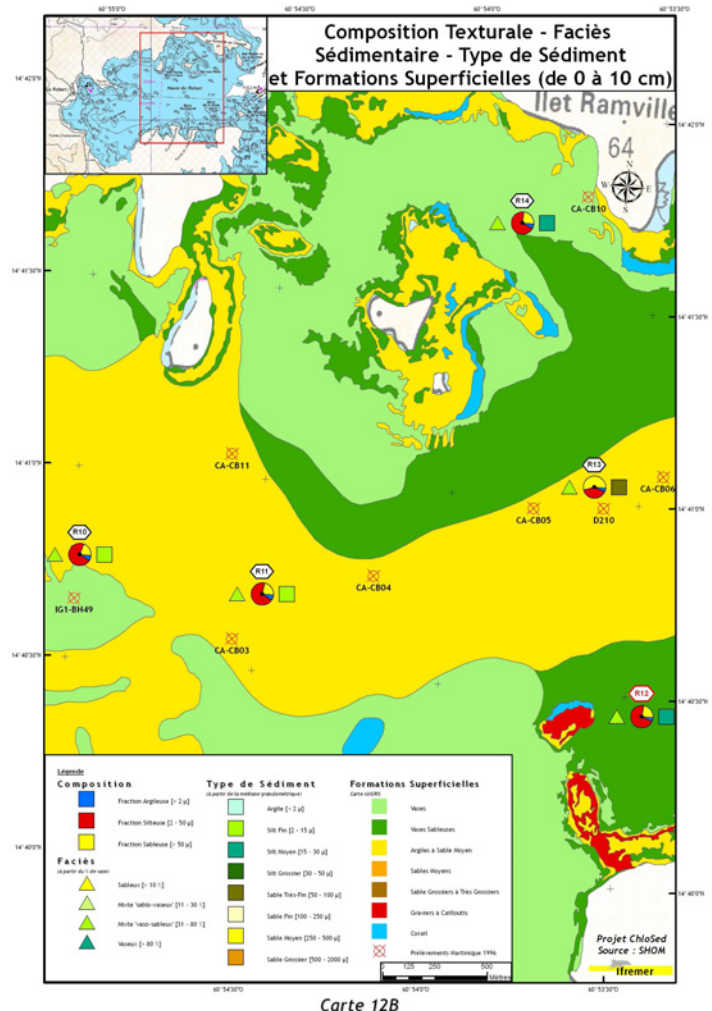
Comme pour la zone ouest du havre du Robert, la première comparaison effectuée concerne les faciès sédimentaires et porte sur la juxtaposition des données acquises dans la présente étude avec celles établies antérieurement sous forme de cartes sédimentologiques publiées par l'Ifremer (Augris *et al.*, 2000). Dans cette étude antérieure, un profil aller-retour en sonar latéral accompagné d'une série de cinq prélèvements a été réalisé dans la partie centrale de la zone d'étude. Enfin, on peut relever que quatre points par benne des études antérieures sont à considérer pour cette partie orientale de la baie, les uns proches des stations R10 et R14, les autres *quasi* superposés aux stations R11 et R13.

La comparaison des cartes sédimentaires régionales (Augris *et al.*, 2000) et des résultats de la présente étude montre, comme précédemment, certaines différences pouvant aboutir aux améliorations cartographiques suivantes (carte 12B) :

- la réduction des zones vaso-sableuses au voisinage des 'cayes' à leur strict contrebas et la représentation cartographique de ces cayes récifales par des formations coralliennes ;

- la recherche de précision texturale concernant la formation dite "argiles à sables moyens" déterminée à partir des profils acoustiques afin d'effectuer des correspondances avec les paramètres sédimentologiques étudiés dans la présente étude sur des formations situées aux mêmes localisations ;

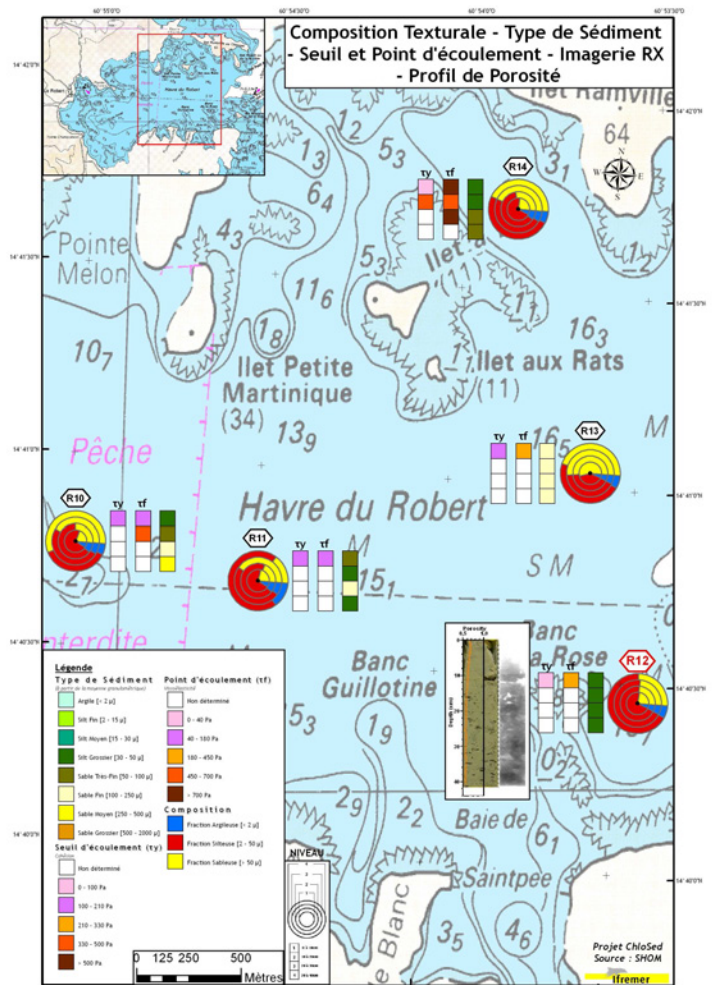
- la mise en correspondance cartographique des faciès de la partie centrale avec la typologie vaso-sableuse, ces faciès se trouvant alors en continuité avec leurs homologues de la zone ouest de la baie et se poursuivant jusqu'aux environs de la longitude de l'ilet à Eau ; il pourrait en être de même au sujet des faciès à l'est de cette zone en sortie de baie apparaissant selon la présente étude comme des faciès vaso-sableux à tendance sableuse (en limite typologique avec le faciès sablo-vaseux).



Carte 12B

Dans cette seconde comparaison (carte 11B), il s'agit de rechercher les corrélations cartographiques entre certains paramètres texturaux et les paramètres rhéophysiques, ainsi que les résultats tirés de l'analyse structurale des carottes superficielles (applicables à la seule station R12).

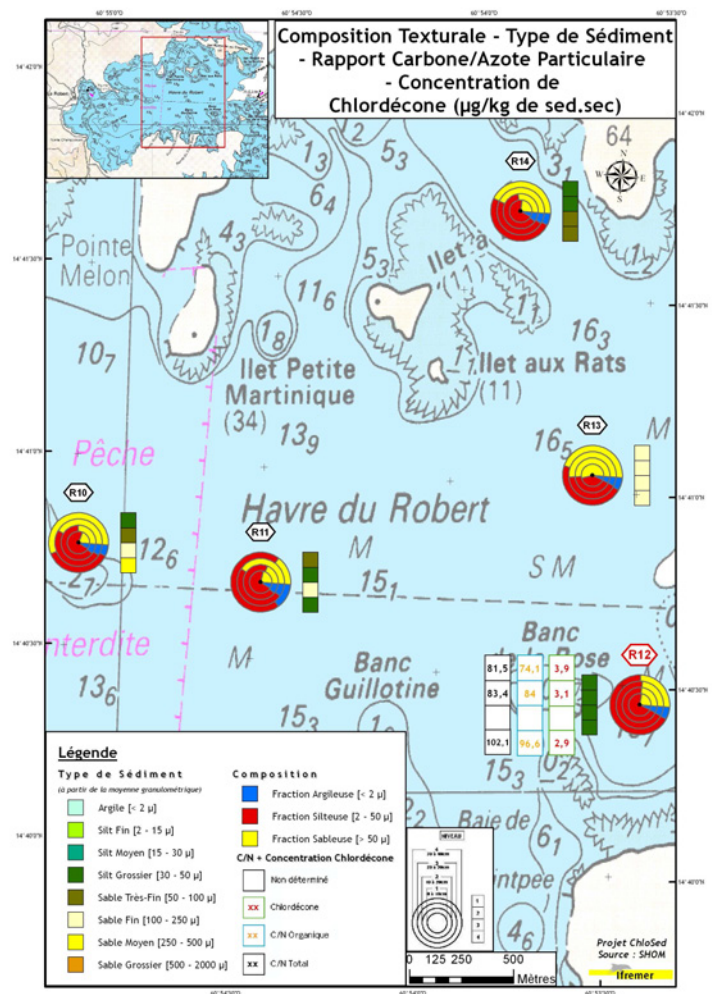
Les faciès vaso-sableux du chenal central (stations R10, R11 et R13) présentent une variation sensible de la taille de particules selon la profondeur sédimentaire des stations R10 et R11, avec : (i) pour leurs 20 premiers centimètres, des silts grossiers à sables très fins non cohésifs et moyennement consolidés ; (ii) pour le troisième niveau (20-30 cm), un passage nettement sableux (sables fins) ; (iii) un dernier niveau (30-40 cm) complètement différent entre les deux stations, celui de R10 étant plus grossier à sables moyens, celui de R11 plus fin à silts grossiers avec une fraction argileuse significative (14%), la plus forte de l'ensemble des niveaux de ces deux stations (de l'ordre de 6-9%). Concernant la station R13, la part sableuse dans ce faciès vaso-sableux est nettement plus importante que pour les deux précédentes stations avec des sables fins sur l'ensemble de la carotte sédimentaire, la fraction argileuse étant moindre (6%).



Carte 11B

Les faciès vaso-sableux de mini-baies, au sud et au nord, en sortie de baie (stations R12 et R14) présentent des différences entre les deux stations : (i) pour la station R14 au nord de la baie, une phase terminale plus fine à silts grossiers bien consolidés sur les 20 premiers centimètres surmontant une phase basale plus grossière à sables fins sur les 20 derniers centimètres, avec une fraction argileuse *quasi* constante à 6-7% ; (ii) pour la station R12 au sud de la baie, des sédiments très clairs et grumeleux (du fait de l'influence des carbonates récifaux) constitués de silts grossiers homogènes et marqués ni d'aucune structuration, ni événement particulier, le premier décimètre sédimentaire étant composé d'une couche de mélange et le cortège minéralogique de l'ensemble étant composé de carbonates (calcite et surtout aragonite), de smectites, d'albite et d'augite.

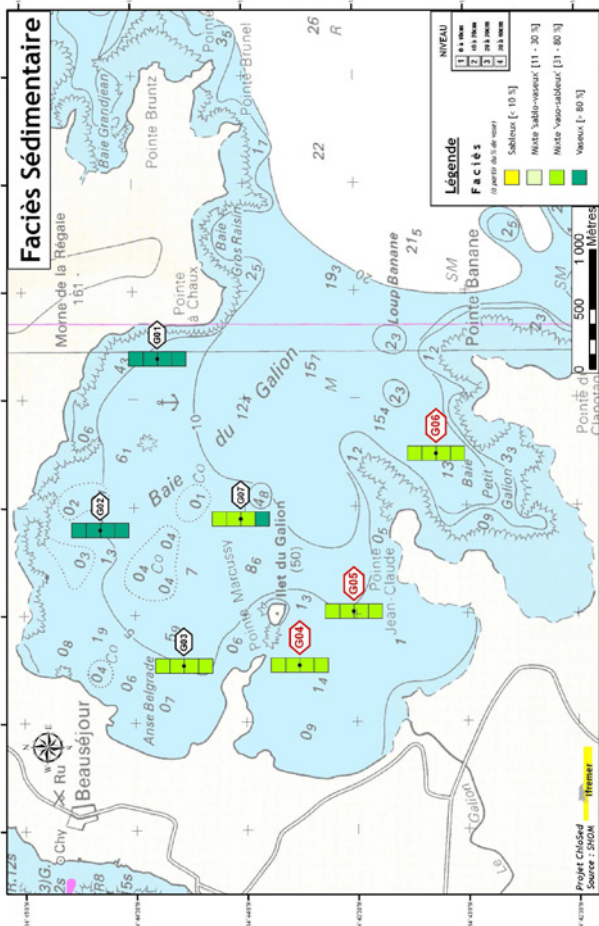
Dans cette troisième et dernière comparaison il s'agit de rechercher, pour la seule station R12, les corrélations entre les paramètres texturaux et les paramètres chimiques (teneurs en matière organique-C/N et en chlordécone). Le faciès vaso-sableux de cette station R12, composé de silts grossiers homogènes selon la profondeur sédimentaire, présente une fraction argileuse constante dans les quatre niveaux (6-7%) identique aux autres stations de sortie de baie. Les **C/N totaux et organiques** affichent des valeurs fortes sensiblement croissantes avec la profondeur, soit de 82 à 102 pour le C/N total et de 74 à 97 pour le C/N organique, ce qui implique corrélativement un faible taux de carbone et azote minéraux (5-9%). Quant à la teneur en **chlordécone**, ses valeurs enregistrées sont très faibles, inférieures à 3,9  $\mu\text{g}/\text{kg}$ .



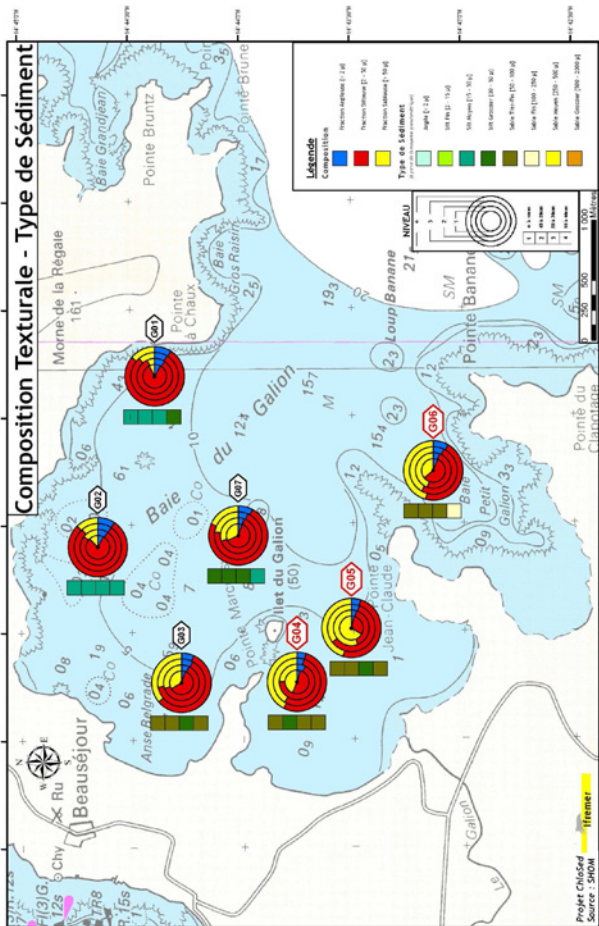
Carte 10B

Les teneurs de chlordécone indiquées sont inférieures aux seuils de quantification





Carte 4C



## Baie du Galion

### Caractéristiques sédimentologiques et chimiques Cartes 4C – 7C – 8C – 9C

#### *Faciès vaseux de l'anse septentrionale* (G01 – G02)

Les stations G01 et G02 sont situées respectivement à 6,5 m et 5 m de profondeur dans les fonds d'une anse au nord de la baie du Galion (côte sud de la presqu'île de la Caravelle).

**Nature texturale et minéralogique** (cartes 4C & 7C) - Les sédiments des stations G01 et G02 sont très vaseux et sont composés de silts moyens unimodaux, homogènes dans toute la colonne sédimentaire pour G02 (22-26  $\mu\text{m}$  de moyenne granulométrique) et à légère tendance plus grossière en profondeur pour G01 (de 20 à 30  $\mu\text{m}$ ), la fraction argileuse étant constante pour les deux stations, avec une valeur de 8-10% selon les niveaux sédimentaires.

Aucune analyse minéralogique n'a été faite sur les prélèvements de G01 et G02.

**Comportement rhéophysique** (carte 8C) – Du fait de leur caractère vaseux, ces sédiments sont cohésifs, avec des teneurs en eau fortes à très fortes en général, sensiblement décroissantes avec la profondeur du premier décimètre sédimentaire (230% pour G01, 190% pour G02) au dernier décimètre (180% pour G01, 160% pour G02).

Les seuils d'écoulement mesurés croissant avec la profondeur sédimentaire, les cohésions obtenues sont relativement faibles à moyennes pour la station G01 (seuils de 100 Pa pour le premier décimètre sédimentaire à 230 Pa pour le dernier décimètre) et sont plus fortes pour la station G02, de valeurs moyennes à très fortes (seuils de 200 Pa pour le premier décimètre sédimentaire à 610 Pa pour le dernier décimètre). L'examen des rhéogrammes montre que ces sédiments, au contraire de ceux étudiés dans le havre du Robert, présente un caractère rhéopaississant à seuil et sans thixotropie.

Les valeurs du point d'écoulement obtenues sont faibles et *quasi* constantes avec la profondeur (20-50 Pa pour G01 et 40-60 Pa pour G02). Ce résultat indique que ces données ne sont pas du même ordre et ne suivent pas la même évolution croissante que les valeurs du seuil d'écoulement mesurées, ce qui explique en partie les propriétés visco-élastiques différentes de ces sédiments de la baie du Galion.

**Carbone et Azote Organiques Particulaires** (carte 9C) – Aucune analyse de carbone et azote particulaire (organique et totale) n'a été faite sur les prélèvements de ces stations.

**Teneur en chlordécone** (carte 9C) – Aucune analyse de teneur en chlordécone n'a été faite sur les prélèvements de ces stations.

#### *Faciès vaso-sableux de l'anse nord-occidentale* (G03)

La station G03 est située à une profondeur de 15 m dans les fonds de la partie basale de la presqu'île de la Caravelle.

**Nature texturale et minéralogique** (cartes 4C & 7C) - Les sédiments de la station G03 correspondent à des faciès vaso-sableux montrant selon la profondeur sédimentaire des variations de tailles de particules. Ils sont composés de sables très fins uni- à bimodaux, à tendance grossière dans les premier et dernier décimètres sédimentaires (respectivement 72  $\mu\text{m}$  et 63  $\mu\text{m}$  selon la moyenne granulométrique), tandis que les niveaux médians (10-30 cm) sont relativement plus fins (55  $\mu\text{m}$  pour le niveau 10-20 cm, voire même 43  $\mu\text{m}$  pour le niveau 20-30 cm), la fraction argileuse étant croissante selon la profondeur, de 5% pour le premier décimètre sédimentaire jusqu'à 9% pour le dernier décimètre.

Aucune analyse minéralogique n'a été faite sur les prélèvements de la station G03.

**Comportement rhéophysique** (carte 8C) – Du fait de leur caractère vaso-sableux, ces sédiments ne sont pas *a priori* cohésifs. Cependant, des essais rhéologiques ont pu être effectués en raison de valeurs de teneur en eau suffisantes, relativement fortes et *quasi* constantes selon la profondeur sédimentaire (130-150 %).

Les valeurs croissantes du seuil d'écoulement avec la profondeur sédimentaire (de 90 à 380 Pa) conduisent corrélativement à des cohésions moyennes à fortes. Comme pour les deux stations précédentes, l'examen des rhéogrammes présente pour ces sédiments un caractère rhéoépaississant à seuil et sans thixotropie.

Les valeurs du point d'écoulement obtenues sont, par contre, très faibles à faibles et croissantes avec la profondeur sédimentaire (de 7 Pa pour le premier décimètre à 70 Pa pour le dernier). Ce résultat exprime les propriétés visco-élastiques différentes de ces sédiments par rapport à ceux du havre du Robert.

**Carbone et Azote Organiques Particulaires** (carte 9C) – Aucune analyse de carbone et azote particulaire (organique et totale) n'a été faite sur les prélèvements de cette station.

**Teneur en chlrodécone** (carte 9C) – Aucune analyse de teneur en chlrodécone n'a été faite sur les prélèvements de cette station.

### ***Faciès vaso-sableux au débouché de la rivière du Galion*** (G04 – G05)

Les deux stations G04 et G05 sont situées respectivement à un peu plus de 3 m et de 6 m de profondeur.

Les deux stations ont fait l'objet du prélèvement d'une seconde carotte à fins d'étude de structuration et de radiodatation, ainsi que d'analyses minéralogiques

**Nature texturale et minéralogique** (cartes 4C & 7C) - Ces sédiments correspondent à des faciès vaso-sableux qui présentent entre les deux stations des variations de tailles de particules différentes selon la profondeur sédimentaire, avec des passages nettement plus fins dans le second décimètre de la station G04 et dans les troisième et quatrième décimètres de la station G05 (toutefois, moins marqué pour ce dernier niveau).

Les sédiments des deux stations G04 et G05 sont composés de sables très fins, voire de passées de silts grossiers, tous unimodaux. Ainsi pour G04, les tailles particulières sont constantes selon la profondeur sédimentaire (51-53  $\mu\text{m}$ ), sauf pour le second décimètre dans lequel la moyenne granulométrique est nettement plus faible (à 36  $\mu\text{m}$ ), tandis que pour G05 les tailles particulières diminuent progressivement selon la profondeur, sauf concernant le troisième décimètre qui enregistre une baisse significative (65  $\mu\text{m}$  pour 0-10 cm, 58  $\mu\text{m}$  pour 10-20 cm, 44  $\mu\text{m}$  20-30 cm et 53  $\mu\text{m}$  pour 30-40 cm). Quant à la fraction argileuse des sédiments des deux stations G04 et G05, sa valeur est faible et constante dans l'ensemble (4-5%), avec une augmentation certaine pour le deuxième décimètre de G04 (à 8%) et pour le troisième décimètre de G05 (près de 7%).

Outre les éléments concernant la vitesse de sédimentation qui seront présentés ultérieurement, l'examen des carottes sédimentaires entières des stations R05 et R09 indique diverses ressemblances.

La carotte G04 présente à l'ouverture des litages de couleur marqués par des niveaux de densité variable, certains de ces niveaux coïncidant avec des masses spécifiques plus fortes, comme l'illustre par exemple le niveau -16,5 cm. Par ailleurs, les excès de  $^{210}\text{Pb}$  correspondent à une couche de mélange sur le premier décimètre sédimentaire.

La carotte G05 montre également un sédiment avec des lamines, notamment entre 24 et 26 cm et entre 34 et 38cm. Quant au profil de  $^{210}\text{Pb}_{\text{xs}}$ , il présente des valeurs *quasi* constantes sur l'ensemble de la carotte, ce qui indique, soit un dépôt rapide, soit un mélange important des sédiments sur l'ensemble de la carotte, cette dernière hypothèse étant toutefois à exclure du fait de la présence de structures.

L'analyse minéralogique des sédiments des stations G04 et G05 conduit aux résultats suivants dans les trois niveaux examinés : (1) certains minéraux sont 'faiblement abondants' pour les deux stations, comme la cristobalite, l'hématite, la gibbsite et la kaolinite (à caractère 'assez abondant' pour les deux derniers minéraux dans le premier décimètre de G04) ou pour l'une d'entre elles, comme le rutile pour la seule G04 et l'halite pour la seule G05 (à caractère 'assez abondant' dans son premier décimètre), ainsi que, pour cette dernière station, le gypse sauf dans son second décimètre et l'antigorite, le clinoptilolite et la gehlénite, sauf dans son premier décimètre ; (2) d'autres minéraux sont 'abondants' pour la seule station G04, comme le quartz, l'albite (quoique cette dernière en abondance moindre dans son dernier décimètre sédimentaire) et le gypse ('assez fortement abondant' dans son deuxième décimètre) ; (3) sont 'assez fortement abondants' le clinoptilolite uniquement pour le premier décimètre de la station G04 (son dernier décimètre en recèle également, mais en faible abondance) et les smectites pour la seule station G05 ; enfin (4), sont 'fortement abondants' l'halite pour G04 et le quartz pour G05, ainsi que pour cette dernière station une décroissance progressive de l'abondance de l'albite, de forte dans le premier décimètre à faible dans le dernier décimètre. À signaler la présence en faible abondance de smectites pour le premier décimètre de la station G04 et, pour la station G05, d'augite dans son second décimètre et de calcite dans son dernier décimètre.

**Comportement rhéophysique** (carte 8C) – Du fait de leur caractère vaso-sableux, ces sédiments ne sont *a priori* pas cohésifs. Cependant, des essais rhéologiques ont pu être effectués en raison de teneurs en eau suffisantes, de valeurs moyennes à relativement fortes, marquées toutefois par des différences pour ces deux stations : elles sont constantes (de l'ordre de 120%) pour l'ensemble de la station G04, sauf pour son dernier décimètre un peu moins fluide (à 100%), tandis que pour la station G05, les valeurs croissent légèrement en profondeur (de 80 à 120%), sauf également pour son dernier décimètre moins fluide (à 100%).

Les seuils d'écoulement mesurés croissant avec la profondeur sédimentaire, les cohésions obtenues sont assez moyennes dans l'ensemble pour la station G04 (seuils de 40 Pa à 180 Pa), avec un second décimètre à cohésion plus forte (seuil à 190 Pa) et sont constamment assez fortes pour la station G05 (200 à 260 Pa), sauf concernant son troisième décimètre dans lequel la cohésion chute (seuil à 90 Pa). L'examen des rhéogrammes montre l'existence pour les deux stations de courbes en '8' indiquant le caractère complexe du comportement rhéophysique de leurs sédiments, avec probablement une première période rhéofluidifiante, suivie d'une seconde période rhéoépaississante.

Les points d'écoulement sont constants, avec des valeurs de l'ordre de 40 Pa dans les trente premiers centimètres de la station G04, atteignant 180 Pa dans son dernier niveau (30-40 cm) et des valeurs relativement constantes pour la station G05 (160 à 210 Pa), chutant très fortement jusqu'à la valeur de 15 Pa dans le troisième niveau sédimentaire (20-30 cm).

**Carbone et Azote Organiques Particulaires** (carte 9C) – Les analyses de carbone et azote particulière (organique et total) faites sur les prélèvements des stations G04 et G05 donnent pour les trois niveaux choisis des deux stations des valeurs faibles, de même ordre et légèrement croissantes avec la profondeur sédimentaire : (i) pour le rapport C/N total, de 11,7 à 16,1 pour G04 et de 11,9 à 13,9 pour G05 ; (ii) pour le rapport C/N organique, de 11,8 à 16,8 pour G04 et de 11,9 à 14,0 pour G05.

**Teneur en chlrodécone** (carte 9C) – Les teneurs en chlrodécone dans les prélèvements des stations G04 et G05 sont quantifiables et relativement fortes, surtout pour les deux premiers décimètres de la station G04. En G04, elles varient de 30,5 µg /kg (p.s.) pour le niveau 0-10 cm à 68,3 µg/kg pour le niveau 10-20 cm, et diminuent à 14,4 µg/kg pour le niveau 30-40 cm. Pour la station G05, ces teneurs valeurs augmentent progressivement de 12,8 µg /kg pour le niveau 0-10 cm, puis à 15,3 µg/kg pour le niveau 10-20 cm et 21,7 µg/kg pour le niveau 30-40 cm.

## ***Faciès vaso-sableux en mini-baie méridionale*** (G06)

La station G06 est située à 15 m de profondeur. Elle a fait l'objet du prélèvement d'une seconde carotte à fins d'étude de structuration et de radiodatation, ainsi que d'analyses minéralogiques.

**Nature texturale et minéralogique** (cartes 4C & 7C) - Ces sédiments correspondent à des faciès vaso-sableux avec des tailles de particules croissantes selon la profondeur sédimentaire.

Les sédiments de la station G06 sont constitués de sables très fins bimodaux (0-10 cm) à trimodaux jusqu'à 30 cm environ, puis de sables fins trimodaux dans le dernier décimètre : les tailles particulières croissent progressivement avec la profondeur sédimentaire (de 56 à 100  $\mu\text{m}$ , selon la moyenne granulométrique). Quant à la fraction argileuse, elle croît très légèrement avec la profondeur (de 6 à 8%).

Outre les éléments concernant la vitesse de sédimentation qui seront présentés ultérieurement, l'examen de la carotte entière de la station G06 montre un fort contraste selon la profondeur sédimentaire, avec d'une part la partie supérieure (jusqu'à environ 10-12 cm) présentant un sédiment assez fin avec une forte teneur en eau et des activités de  $^{210}\text{Pb}_{\text{xs}}$  assez constantes et d'autre part la partie inférieure avec un sédiment paraissant à l'ouverture légèrement plus grossier, la teneur en eau diminuant les activités de  $^{210}\text{Pb}_{\text{xs}}$  des niveaux 10 cm à 41 cm d'un facteur 2.

L'analyse minéralogique des sédiments de la station G06 conduit aux résultats suivants dans les trois niveaux examinés : (1) certains minéraux sont 'faiblement abondants', comme le quartz, ainsi que l'antigorite et la calcite, sauf dans son premier décimètre, et la kaolinite sauf dans son second décimètre ; (2) les smectites sont 'abondantes'; (3) l'halite est 'assez fortement abondante' avec une abondance décroissante avec la profondeur sédimentaire, devenant 'abondante' dans le second décimètre et 'faiblement abondante' dans le dernier ; enfin (4), l'aragonite et l'augite sont 'fortement abondantes'. À signaler la présence en faible abondance, de la bernalite et de la cristobalite dans le premier décimètre sédimentaire de la station G06, de l'hématite dans le second et, enfin, de la sylvite dans le dernier décimètre.

**Comportement rhéophysique** (carte 8C) – Du fait de leur caractère vaso-sableux, ces sédiments ne sont *a priori* pas cohésifs. Cependant, des essais rhéologiques ont pu être effectués sur les deux premiers niveaux sédimentaires en raison de teneurs en eau suffisantes, moyennes à relativement fortes : les valeurs décroissent selon la profondeur sédimentaire, de 145% (0-10 cm) à 100% (10-20 cm) pour la première moitié de la carotte, puis de 80% (20-30 cm) à 65% (30-40 cm) pour la seconde moitié.

Les cohésions obtenues sont fortes à très fortes dans l'ensemble, les seuils d'écoulement mesurés croissant avec la profondeur, du premier décimètre (à 210 Pa) au troisième décimètre sédimentaire (à 870 Pa). À l'examen des rhéogrammes et de leurs formes enchevêtrées, il est difficile de distinguer de façon évidente leur type de comportement rhéophysique, qui semblerait toutefois proche de celui d'un matériau rhéofluidifiant.

Les points d'écoulement augmentent brusquement du premier décimètre sédimentaire avec une valeur très faible (10 Pa) jusqu'au dernier décimètre avec une valeur très forte (940 Pa).

**Carbone et Azote Organiques Particulaires** (carte 9C) – Les analyses de carbone et azote particulière (organique et totale) faites sur les prélèvements de la station G06 donnent pour les trois niveaux choisis des valeurs fortes, croissantes avec la profondeur, suivant les résultats suivants : (i) pour le rapport C/N total, de 48,2 à 63,9 ; (ii) pour le rapport C/N organique, de 47,2 à 70,8.

**Teneur en chlordécone** (carte 9C) – Les teneurs en chlordécone dans les prélèvements de la station G06 sont nettement plus faibles que pour les stations G04 et G05, elles restent inférieures aux seuils de quantification qui se situent entre 3,3 et 4,8  $\mu\text{g}/\text{kg}$ .

## ***Faciès vaso-sableux à tendance vaseuse de milieu de fond de baie*** (G07)

La station G07 est située à une profondeur de 10 m.

**Nature texturale et minéralogique** (cartes 4C & 7C) - Les sédiments de cette station correspondent à des faciès vaso-sableux dont la part vaseuse croît avec la profondeur sédimentaire.

Ils sont composés de silts grossiers unimodaux (à tendance bimodale pour leur dernier décimètre) dont les tailles de particules décroissent avec la profondeur, depuis les premiers et deuxièmes décimètres (44  $\mu\text{m}$ , selon la moyenne granulométrique) jusqu'au dernier décimètre sédimentaire (30  $\mu\text{m}$ ). Quant à la fraction argileuse, elle est croissante selon la profondeur sédimentaire, de 5% pour le premier décimètre jusqu'à 8% pour le dernier décimètre.

Aucune analyse minéralogique n'a été faite sur les prélèvements de la station G07.

**Comportement rhéophysique** (carte 8C) – Du fait de leur caractère vaso-sableux, ces sédiments ne sont *a priori* pas cohésifs. Cependant, des essais rhéologiques ont pu être effectués sur l'ensemble des niveaux sédimentaires en raison de teneurs en eau suffisantes, relativement fortes et *quasi* constantes selon la profondeur sédimentaire (130-140 %).

Les cohésions obtenues sont assez moyennes à très fortes dans l'ensemble et croissantes avec la profondeur sédimentaire, comme le montrent les seuils d'écoulement variant de 74 à 630 Pa. L'examen des rhéogrammes montre des comportements variables de ces matériaux à seuil selon la profondeur, d'abord rhéoépaississant dans le premier décimètre, puis à tendance (?) rhéofluidifiante pour les second et troisième décimètres, enfin nettement rhéofluidifiante pour le dernier.

Les points d'écoulement augmentent brusquement du premier décimètre sédimentaire avec une valeur très faible (15 Pa) jusqu'au dernier décimètre avec une valeur très forte (1360 Pa).

**Carbone et Azote Organiques Particulaires** (carte 9C) – Aucune analyse de carbone et azote particulaire (organique et totale) n'a été faite sur les prélèvements de cette station.

**Teneur en chlordécone** (carte 9C) – Aucune analyse de teneur en chlordécone n'a été faite sur les prélèvements de cette station.

## **Vitesses de sédimentation**

Les résultats des déterminations des excès de  $^{210}\text{Pb}$  ( $^{210}\text{Pb}_{\text{xs}}$ ) sur la carottes entière des stations G04, G05 et G06 conduisent à estimer la vitesse de sédimentation de cette baie, présentée dans le tableau suivant (tab.5) :

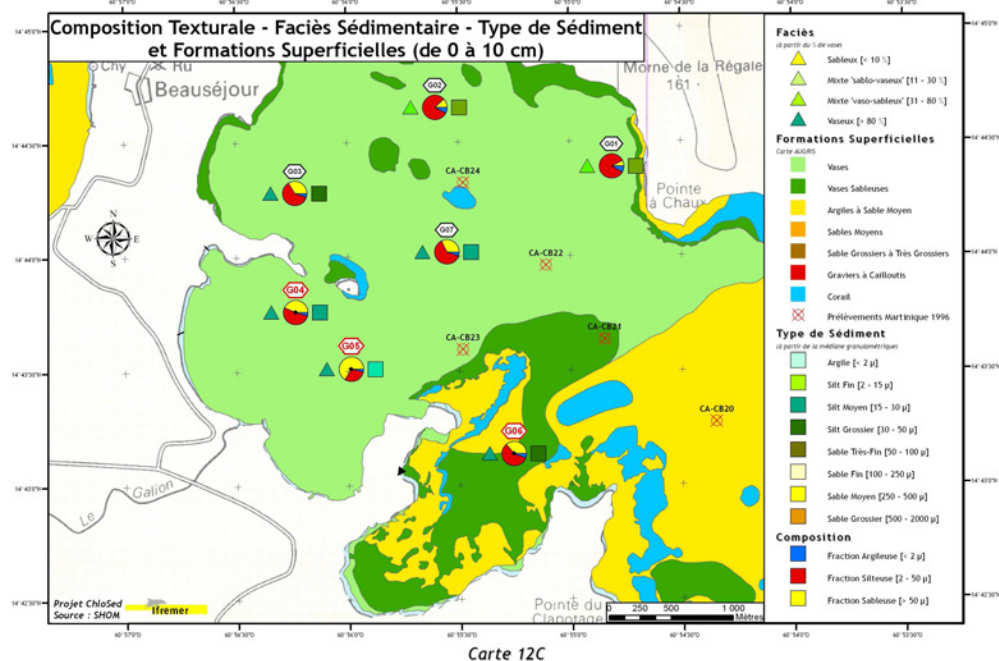
Station	Faciès	Profondeur	Vitesse de sédimentation
G04	<b>Vaso-sableux</b> débouché Galion - mangrove	3 m	<b>2,1 cm/an</b>
G05	<b>Vaso-sableux</b> débouché Galion	6 m	<b>~ 10 cm/an</b>
G06	<b>Vaso-sableux</b> mini-baie S / fond	15 m	<b>0,9 cm/an</b>

Tab.5 – Vitesses de sédimentation mesurées et faciès sédimentaires des 3 stations choisies dans la baie du Galion

## Comparaisons inter-paramétriques

Cartes 12C – 11C – 10C

Comme pour les deux zones du havre du Robert, la première comparaison effectuée concerne les faciès sédimentaires et porte sur la juxtaposition des données acquises dans la présente étude avec celles établies antérieurement sous forme de cartes sédimentologiques publiées par l'Ifremer (Augris *et al.*, 2000). Concernant ce fond de baie du Galion, on peut relever que deux points par benne des études antérieures sont à considérer, proches des stations G02 et G07.

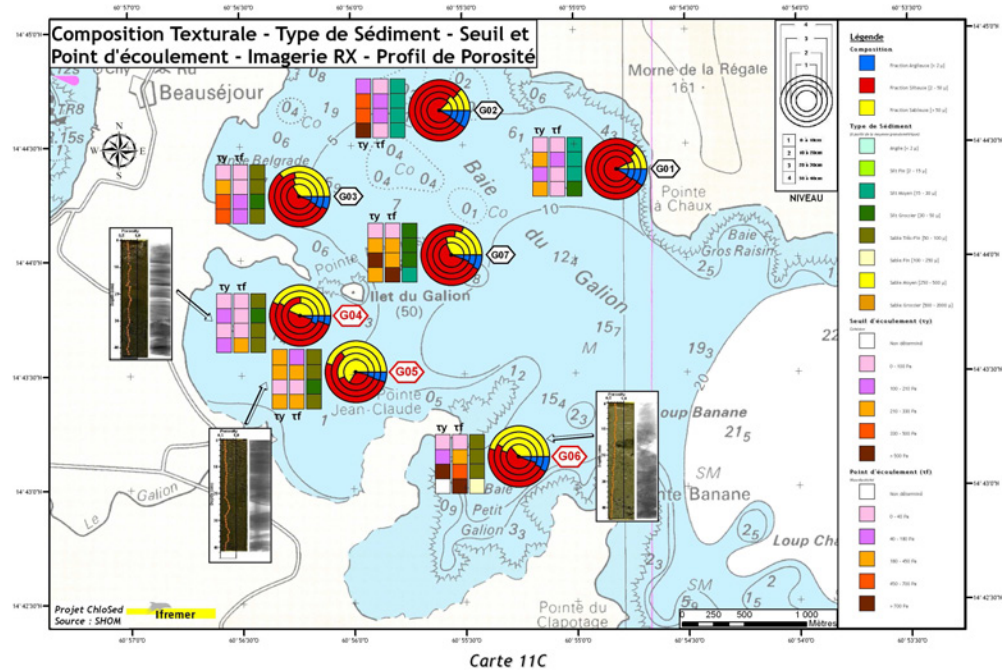


La comparaison des cartes sédimentaires régionales (Augris *et al.*, 2000) et des résultats de la présente étude montre, comme précédemment, certaines différences qui pourraient aboutir aux améliorations cartographiques suivantes (carte 12C) :

- la modification de l'extension vers le large des faciès vaseux allant alors de la côte jusqu'à l'isobathe -10/12 m (de la Pointe à Chaux jusqu'à la Pointe Jean-Claude) en excluant toutefois quelques zones vaso-sableuses plus ou moins importantes à mieux redéfinir ;
- la réduction des zones vaso-sableuses au voisinage des 'cayes' à leur strict contrebas et la représentation cartographique de ces cayes récifales par des formations coralliennes ;
- la recherche de précision texturale concernant la formation dite "argiles à sables moyens" déterminée à partir des profils acoustiques afin d'effectuer des correspondances avec les paramètres sédimentologiques étudiés dans la présente étude sur des formations situées aux mêmes localisations.

Dans cette seconde comparaison, il s'agit de rechercher les corrélations cartographiques entre les paramètres texturaux pertinents et les paramètres rhéophysiques, ainsi que les résultats tirés de l'analyse structurale des carottes superficielles (carte 11C, page suivante).

Les *faciès vaseux de l'anse nord* de la baie (stations G01 et G02) sont formés de silts moyens, homogènes sur l'ensemble des 40 centimètres sédimentaires prélevés et avec une fraction argileuse identique (8-10%) entre les deux stations. Leurs cohésions faibles à moyennes (nettement plus fortes pour la station G02) indiquent un état de consolidation significatif de ces sédiments, difficilement mobilisables en raison du caractère rhéoépaississant de leur comportement rhéophysique.



Les faciès vaso-sableux du nord-ouest de la baie, tels que l'illustre la station G03, sont constitués de sables très fins, à taille de particules variable et avec une fraction argileuse croissante (de 5 à 9%), montrant ainsi des apports différents selon la profondeur sédimentaire. Leurs cohésions assez moyennes à fortes indiquent un état de relative compaction de ces sédiments, également difficilement mobilisables du fait du caractère rhéoépaississant de leur comportement.

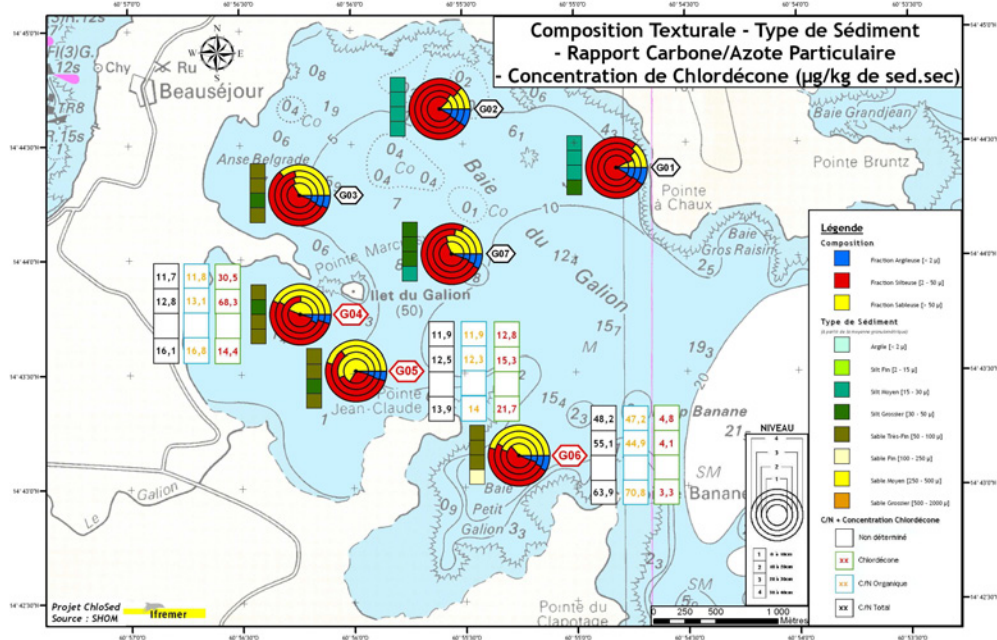
Les faciès vaso-sableux, situés au sud-ouest de la baie et liés au débouché de la rivière du Galion (stations G04 et G05) sont composés essentiellement de sables très fins, avec des passées plus fines localisées (silts grossiers) et caractérisés par une fraction argileuse relativement faible, mais constante dans l'ensemble (4-5%), excepté dans les niveaux plus fins (7-8%). Ces sédiments quelque peu cohésifs présentent un comportement rhéophysique complexe selon les stations et montrent d'une part pour les deux stations une structuration litée, signe de la variabilité rapide des apports, et d'autre part, notamment pour la station G05, l'indication d'un dépôt rapide de l'ensemble de la colonne sédimentaire. Le cortège minéralogique est très différent selon chacune des stations, avec en abondance de l'albite, du gypse et du quartz pour la seule station G04, en assez forte abondance du clinoptolite pour la station G04 et des smectites pour la station G05 et enfin, en forte abondance de l'halite pour la station G04, ainsi que du quartz et de l'albite (quoique décroissante en profondeur) pour la station G05.

Les faciès vaso-sableux de la mini-baie méridionale, tels que l'illustre la station G06, sont formés de sables très fins à fins, avec une fraction argileuse significative (de 6 à 8%). Leurs cohésions fortes à très fortes indiquent un état de forte consolidation de ces sédiments bien en place (même avec une couche de mélange sur le premier décimètre) et dont le cortège minéralogique est constitué de smectites en abondance, de l'halite en assez forte abondance, quoique de façon décroissante avec la profondeur sédimentaire, ainsi que de l'aragonite récifale et de l'augite en forte abondance.

Les faciès vaso-sableux à tendance vaseuse de milieu de fond de baie, tels que l'illustre la station G07, sont constitués de silts grossiers à tailles particulières décroissantes avec la profondeur sédimentaire et à fraction argileuse augmentant corrélativement de 5 à 8%. Leurs cohésions sont assez moyennes à très fortes, ce qui indique un état de forte consolidation de ces sédiments, mais avec un comportement rhéophysique complexe, variant d'un caractère rhéoépaississant en surface (premier décimètre) à un caractère rhéofluidifiant pour le reste de la colonne.



Dans cette troisième et dernière comparaison, il s'agit de rechercher les corrélations cartographiques entre les paramètres texturaux et les paramètres chimiques concernant la teneur en matière organique (*via* les C/N) et en chlordécone pour les stations également choisies pour réaliser des analyses chimiques, à savoir les trois stations G04, G05 et G06. Le classement de ces stations d'après leur faciès, leur type sédimentaire et leur composition texturale montre que les caractéristiques ci-après.



Carte 10C  
Les teneurs de chlordécone indiquées sont quantifiables, sauf pour G06 où les valeurs inférieures aux seuils

Les faciès *vaso-sableux*, situés au sud-ouest de la baie et liés au débouché de la rivière du Galion (stations G04 et G05) sont composés de sables très fins, avec des passées localisées plus fines (silts grossiers) et une fraction argileuse constante dans l'ensemble (4-5%), sauf dans les niveaux plus fins (7-8%). Ils présentent des **C/N totaux et organiques** à valeurs globalement faibles (12-13) pour leurs 20 premiers centimètres et légèrement plus fortes pour leurs derniers centimètres (16-17 pour la station G04 et 14 pour la station G05), ces valeurs d'ailleurs *quasi* identiques entre les deux types de rapports indiquant corrélativement l'absence de carbone et azote minéraux (de l'ordre de 2%). Quant à la teneur en **chlordécone**, elle présente des niveaux quantifiables et qui pour la station G04 sont les plus forts de l'étude. Ces teneurs augmentent avec la profondeur, soit 31 µg/kg pour le niveau 0-10 cm, 68 µg/kg pour le niveau 10-20 cm pour diminuer ensuite, 14 µg/kg pour le niveau 30-40 cm. Pour la station G05, les valeurs sont nettement plus faibles, et croissent progressivement avec la profondeur, soit 13 µg/kg pour le niveau 0-10 cm, 15 µg/kg pour le niveau 10-20 cm et 22 µg/kg pour le niveau 30-40 cm.

Les faciès *vaso-sableux en mini-baie méridionale*, représentés par la station G06, sont constitués de sables très fins à fins, à fraction argileuse significative (de 6 à 8%). Ils montrent des **C/N totaux et organiques** à valeurs globalement moyennes (3 à 4 fois plus fortes que pour les précédents faciès), variant selon la profondeur sédimentaire, de 48 à 64 pour le C/N total et de 47 à 71 pour le C/N organique, ces valeurs indiquant, à la différence des précédents résultats, la part significative du C/N minéral (de l'ordre de 11 à 20%). Quant à la **teneur en chlordécone**, ses valeurs sont faibles, très comparables à celles mesurées dans des sédiments analogues du havre du Robert (moins de 5 µg/kg).



## [5] DISCUSSION GÉNÉRALE

Situés sur le plateau insulaire atlantique martiniquais dont le rôle dans l'amortissement des houles océaniques est essentiel, le havre du Robert et la baie du Galion présentent des similitudes, mais aussi des différences spécifiques. Les différences entre ces deux baies reposent principalement sur : (i) leurs propres caractéristiques physiques et géomorphologiques ; (ii) les facteurs hydrodynamiques assez faibles qui les affectent hors périodes cycloniques ; (iii) la nature et la capacité de mobilisation des sédiments de leurs fonds, et enfin (iv) les caractéristiques sédimentologiques des faciès biosédimentaires qui les spécifient, en rapport avec les biocénoses et comme supports potentiels du réseau trophique sur le fond marin. De plus, les particularités de leurs bassins versants accentuent cette distinction : nature et type d'occupation des sols, relief, réseau et régime hydrographique, vulnérabilité des eaux souterraines vis-à-vis des intrants agricoles, etc.

Pour mieux comprendre les mécanismes généraux de la contamination sédimentaire potentielle des deux baies par la chlordécone, la discussion porte successivement sur : (i) l'origine des sédiments, en traitant de leur nature (texturale et comportementale), de leur cohorte minéralogique et de la matière organique les caractérisant (rapport C/N) ; (ii) le taux de sédimentation et l'envasement terrigène constaté permettant, avec d'autres paramètres sédimentologiques, d'appréhender les étapes de la contamination du premier demi-mètre sédimentaire étudié, et enfin (iii) l'extension spatiale et l'historique de la contamination en chlordécone des sédiments superficiels des deux baies, ainsi que le rôle des différents facteurs déterminants.

### Origine des sédiments

La présente étude montre l'existence de deux grands types de sédiments caractéristiques de leur environnement, ces sédiments pouvant parfois se superposer du fait de la variabilité particulière de leur dépôt. Le premier type est constitué de sédiments *fins, cohésifs et terrigènes*, situés en fond de baie et liés aux rivières et ravines qui y débouchent. Ces sédiments sont composés essentiellement de *silts moyens à grossiers* (à moyenne granulométrie de 16 à 44  $\mu\text{m}$ ), à fraction argileuse assez significative, constante (~ 10-11 %) ou bien croissante (5 à 12%) selon la profondeur sédimentaire. Les sédiments du second type sont plutôt *grossiers*, a priori *non cohésifs* (mais à comportement rhéologique paradoxal) et *organogènes* (présence de nombreux débris carbonatés), avec une répartition ubiquiste liée aux récifs ou aux hauts fonds coralliens sub-affleurants ('cayes' ou 'loups'). Ils sont constitués principalement de *sables très fins à fins* (à moyenne granulométrie de 50 à 180  $\mu\text{m}$ ), à fraction argileuse en général plus faible (6-9 %), voire très faible (4%), constante selon la profondeur sédimentaire pour le havre du Robert et légèrement croissante avec la profondeur pour la baie du Galion.

Ces résultats généraux confirment certains traits de l'origine sédimentaire des formations rencontrées dans la zone sud-atlantique de Martinique mis en évidence antérieurement (Pons, 1987 ; Durand, 1996). En effet, si les matériaux détritiques arrivant en milieu marin ont intégré les particularités des différents types d'horizons altérés (altérites) présents dans les bassins versants, chacun y entre pour une part variable, proportionnelle à l'importance de son affleurement et à son degré de vulnérabilité vis-à-vis de l'érosion, leur nature dépendant du type de faciès originel. Si les potentialités en sédiments grossiers issus de l'arc ancien sont réduites par opposition à celles du nord de l'île du fait de la nature du volcanisme, par contre celles en produits fins issus des formations volcano-sédimentaires (essentiellement des tuffites avec présence de smectites hydrothermales bien cristallisées) sont relativement importantes. Toutefois, la faible efficacité du drainage à terre et le faible hydrodynamisme

limitant notamment le transfert des particules vers le large (d'ouest en est) réduisent fortement leur dispersion.

Ces constatations s'appliquent aux produits originels, notamment volcano-sédimentaires, et non à leurs formations superficielles qui en sont issues par altération physico-chimique. À cet égard, les altérites et leurs produits dérivés contribuant à la pédogénèse, les sols obtenus sont effectivement variés et sont de nature différente entre les bassins versants de la baie du Galion et du havre du Robert. En effet, l'essentiel des formations à l'ouest et au sud du bassin de la baie du Galion est constitué de *ferrisols compacts*, tandis que la majeure partie de la presqu'île de la Caravelle est formée de *sols rouges ou bruns montmorillonitiques*. Quant au bassin versant de la baie du Galion, la situation est inverse, avec majoritairement des *sols rouges ou bruns montmorillonitiques*, pouvant inclure localement en zone méridionale des *ferrisols compacts* ou des *vertisols*.

Ainsi, les sédiments littoraux sud-atlantiques proviennent de la combinaison de deux sources particulières majeures, terrestres et marines, qui sont rappelées ci-après.

Les apports terrestres marqués par l'antagonisme pétrographique N-S se trouvent sous l'influence minoritaire de la phase volcanoclastique. Cependant, alors que cette même phase ne représente en moyenne que 10% maximum de la composition des sédiments de l'ensemble des fonds situés au sud de la presqu'île de la Caravelle, cette proportion peut augmenter à 40% dans les sédiments des baies du Robert et du Galion (Augris *et al.*, 2000). Ces proportions restent néanmoins à vérifier spatialement et selon la profondeur sédimentaire afin de mieux connaître l'influence des minéraux volcaniques dans les sédiments marins.

Les apports marins à phase bioclastique, correspondant à des sédiments à teinte claire, renferment différents débris organogènes résultant du démantèlement des constructions récifales actuelles et anciennes, qui se sont préférentiellement développées sur le littoral et le proche plateau de la moitié sud de l'île. Il en découlerait alors, selon Augris *et al.* (2000), des formations superficielles à haute teneur en carbonates, toujours supérieure à 60% dans la zone littorale et d'origine récifale, voire algale.

### **Apport de l'analyse minéralogique**

Ce type d'analyse a permis de mettre en évidence quatre caractères dominants de la typologie minérale des sédiments des deux baies (tab.7).

1/ On observe une relation nette et presque systématique entre la présence de carbonates de calcium (aragonite et calcite) d'origine marine et d'augite (silicates de calcium, de fer et de magnésium – famille des pyroxènes) indicateur de l'influence volcanique. Si la corrélation entre les deux variétés cristallines du  $\text{CaCO}_3$  est compréhensible du fait de leur genèse voisine, celle de ces deux carbonates avec l'augite ne se prête pas à une interprétation simple. D'autre part, les prélèvements faits dans les faciès vase-sableux liés aux cayes des deux baies étudiées en fond de baie comme dans les différentes mini-baies étudiées présentent des analogies de composition. La présence d'aragonite trace les origines coquillières ou coralliaires du carbonate de calcium, donc ses origines biologiques.

2/ On peut constater que les différences constatées entre les prélèvements issus des deux baies sont liées au fait que ceux de la baie du Galion présentent, surtout pour les prélèvements au débouché de la rivière éponyme, des abondances relatives significatives en clinoptilolite (de la famille des zéolites), cristobalite (silice haute température, donc indicateur de l'apport volcanique direct) et gibbsite (hydroxyde d'aluminium), alors que ces phases minéralogiques sont absentes des prélèvements effectués dans le havre du Robert. On doit ainsi prendre en compte que la baie du Galion, à la différence du havre du Robert, est alimentée par des effluents issus, au moins en partie, de roches acides contenant de la silice de haute température (cristobalite) et/ou de roches d'altération hydrothermale (clinoptilolite), ainsi que d'apports issus d'altérations latéritiques (gibbsite). Cette interprétation est confortée par le fait que l'un des prélèvements de surface de la station située dans une mini-baie méridionale présente également un tri-hydroxy-hydrate de fer (bernalite).

3/ Si on ne peut pas rejeter l'hypothèse de la présence de sels solubles issus de l'eau de mer et non éliminés, susceptible d'altérer les interprétations, une remarque s'impose cependant sur leurs quantités

relevées. En effet, au moins en apparence, le rapport d'abondance entre le gypse et l'halite semble varier en faveur du gypse dans les prélèvements au débouché de la rivière du Galion. Ce fait pose la question de l'existence probable de zones d'évaporation susceptibles de produire des accumulations différentielles, selon la solubilité des espèces minérales, ces zones pouvant éventuellement être sujettes à remaniements ; néanmoins, on ne peut pas exclure à cet égard l'hypothèse d'un *artefact* d'orientation (par texturation) des aliquotes analytiques dû au séchage de l'échantillon, à l'origine de nuances de rendement de la diffraction.

4/ Les observations effectuées ne permettent pas d'identifier de logique simple entre les compositions minérales et les profondeurs de prélèvements.

### **Apport de l'étude du rapport Carbone/Azote**

Les analyses du rapport 'C/N organique' entre le carbone organique particulaire (COP) et l'azote organique particulaire (NOP), ainsi que celui du carbone et de l'azote particulaire totaux (C/N total), permettent de tracer la part de l'influence continentale (C/N faibles) ou *a contrario* l'influence marine (C/N forts) ainsi que, par déduction entre le C/N total et le C/N organique, la part du carbone et de l'azote minéraux (tab.7).

Concernant les taux de matière organique particulaire, différentes constatations sont relevées.

Il existe un gradient croissant des valeurs C/N de la côte vers le large pour les deux types de rapports ('organiques' et 'totaux'), ce gradient étant bien visible (de 1 à 7-8) dans le cas du havre du Robert, les prélèvements ayant été effectués en fond de baie et à sa sortie. En comparant l'éloignement des stations par rapport à la côte, le taux moyen passe de 1 à 4-5, quelque soit la baie considérée, entre les prélèvements correspondants à des débouchés de rivières (fond de baie) et ceux qui en sont éloignés (en milieu de fond de baie ou dans les différentes mini-baies), puis de 4-5 à 8-9 entre ces derniers et la station de sortie dans le cas du havre du Robert.

Les comportements de ces rapports selon la profondeur sédimentaire sont variables. Ils sont constants pour les stations du havre du Robert toutes proches du débouché de la rivière de Gaschette, ce qui correspond à la forte vitesse de dépôt des sédiments dans ce secteur (au moins, 40 centimètres de matériau en *quasi* instantané). En revanche, pour les stations de la baie du Galion proches du débouché de la rivière éponyme, on note de légères augmentations des deux types de rapports selon la profondeur sédimentaire, ce qui correspondrait à une différence de mode de dépôt, puisque dans ce cas, quelque soit l'épaisseur de sédiment déposé lors d'un apport terrigène soudain (10 ou 40 cm), ce mode n'affecte pas les valeurs des rapports, *quasi* identiques selon les stations.

Les taux en C/N sont liés aux types de sédiments et leurs faciès associés, les valeurs faibles correspondant à des sédiments vaseux ou vasosableux à tendance vaseuse (sauf pour une station du Galion, quoique à dépôt rapide), les valeurs fortes étant plutôt associées à des sédiments vasosableux.

La proximité des cayes influe sur le rapport C/N, puisque les rapports sont de 1 à 1,4-1,8 entre les stations proches et les stations éloignées de ces récifs affleurants, contribuant ainsi à l'enrichissement des sédiments en carbone. Toutefois, il subsiste le cas particulier d'une station située dans une mini-baie proche de cayes en baie du Galion et composée de sédiments vasosableux qui présentent des rapports C/N moyens, intermédiaires entre les extrêmes constatés et augmentant de 1 à 1,3 selon la profondeur sédimentaire.

Enfin, la part du carbone et de l'azote minéraux particulaire est en général inexistante indiquant que les apports de ces deux éléments C et N sont essentiellement organiques, sauf pour des sédiments vasosableux plus ou moins proches de cayes, sous influence récifale.

En résumé, il apparaît que (i) la part du carbone organique particulaire croît par rapport à celle de l'azote organique particulaire lorsqu'on s'éloigne de la côte en direction du large, montrant ainsi le rôle du carbone organogène, (ii) les rapports C/N organiques et C/N totaux augmentent légèrement avec la profondeur sédimentaire, sauf dans les zones à dépôts sédimentaires rapides, ce qui ferait supposer un léger appauvrissement temporel des apports carbonatés d'origine récifale ou algale.

Il est également intéressant de rapprocher les présents résultats sur la matière organique particulière de ceux tirés d'une récente étude de l'Ifremer sur le réseau trophique dans le havre du Robert (Bodiguel *et al.*, 2011) incluant quelques analyses isotopiques sur les sédiments.

Ces auteurs ont mis en évidence que les sédiments vaseux prélevés à proximité des herbiers de phanérogames présentent une signature en carbone très faible, contrairement aux sédiments grossiers prélevés directement sur les herbiers. Cette caractéristique est probablement engendrée par des apports en matière organique d'origine terrestre dont le  $\delta^{13}\text{C}$  est très faible, influençant les signatures en carbone des invertébrés benthiques s'y développant et les prédateurs se nourrissant de ces derniers. La mangrove dont la production primaire possède également des signatures en carbone très faibles ne serait d'ailleurs que peu responsable des valeurs basses en  $\delta^{13}\text{C}$  observées. Enfin, l'exportation de la matière organique issue de la litière de mangroves semble limitée dans l'espace et n'affecterait donc que faiblement les sédiments et animaux prélevés hors des mangroves.

Du point de vue spatial, des différences significatives sont notées pour les valeurs en  $\delta^{13}\text{C}$  du sédiment. Dans les sédiments fins comme dans les sédiments grossiers, un gradient d'augmentation des valeurs en  $\delta^{13}\text{C}$  est observé, du fond vers la sortie de la baie (fig. 34).

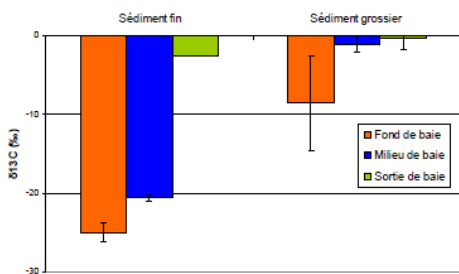


Fig. 33 – Influence du secteur étudié sur les valeurs en  $\delta^{13}\text{C}$  du sédiment (d'après Bodiguel *et al.*, 2011)

Pour ces auteurs, il est aussi la conséquence des apports terrigènes de carbone par les rivières, dont les valeurs isotopiques sont particulièrement basses. Toutefois, les très fortes valeurs de  $\delta^{13}\text{C}$  observées dans les sédiments grossiers seraient à pondérer pour des raisons méthodologiques (décarbonatation insuffisante).

Quoiqu'il en soit, les deux méthodologies utilisées (déterminations par C/N et par isotopes) conduisent à des résultats concordants : les rapports C/N sont croissants des sédiments vaseux aux sédiments vaso-sableux, ainsi qu'avec l'éloignement des 'cayes' récifales pour ces derniers ; les valeurs  $\delta^{13}\text{C}$  sont également croissants des sédiments 'fins' aux sédiments 'grossiers' et le sont de même du fond au milieu, puis à la sortie de baie, quel que soit le type de sédiment ('fin' ou 'grossier').

## Taux de sédimentation - Envasement

La présente étude a permis de déterminer la vitesse (ou taux) de sédimentation sur dix stations choisies du havre du Robert et de la baie du Galion. Les résultats obtenus couplés avec d'autres paramètres sédimentologiques sont présentés dans le tableau synthétique ci-après (tab.6).

	Station	Faciès	Profondeur	Vitesse sédimentation.	% A <small>% fraction argileuse</small>	Structuration
baie	R01	<b>Vaseux</b> débouché Gaschette mangrove	2 m	<b>&gt; 10 cm/an</b>	8 → 12	mél = 0-40 cm consolidation nulle
	R02	<b>Vaseux</b> à ~300 m de R01 influence Gaschette	2 m	<b>~ 10 cm/an</b>	8 → 12	mél = 0-40 cm consolidation nulle
Fond de	R05	<b>Vaso-sableux</b> extérieur / caye 'Robert'	10 m	<b>1,1 cm/an</b>	7-8 (4 <sup>è</sup> = 4%)	mél = 0-10 cm + 25-40 cm = biot, coq fines, apport latéral consolidation croiss.
	R06	<b>Vaso-sableux</b> éloigné / caye 'Robert' au milieu du fond de baie	11 m	<b>0,5 cm/an</b>	8-9	mél = 0-8 cm + nb débris et terriers compacté dès -10 cm
	R08		12 m	<b>0,8 cm/an</b>	9-11	mél = 0-10 cm consolidation croiss
	R09	<b>Vaso-sableux</b> extérieur Sud / caye 'P <sup>1è</sup> Fort'	12 m	<b>0,6 cm/an</b>	6-8	mél = 0-5 cm consolidation croiss.
Sortie de baie	R12	<b>Vaso-sableux</b> mini-baie Sud / sortie baie	16 m	<b>1,3 cm/an</b>	7	mél = 0-10 cm consolidation croiss. ?
Fond de baie	G04	<b>Vaso-sableux</b> débouché Galion mangrove	3 m	<b>2,1 cm/an</b>	4-5	mél = 0-10 cm nb <sup>ses</sup> lamines consolidation faible
	G05	<b>Vaso-sableux</b> débouché Galion	6 m	<b>~ 10 cm/an</b>	4-5	mél = 0- 40 cm lamines 24-26 / 34-38 consolidation marquée
	G06	<b>Vaso-sableux</b> mini-baie S / fond	15 m	<b>0,9 cm/an</b>	6 → 8	mél = 0-10 cm consolidation forte croiss.

Tab.6 – Vitesses de sédimentation et paramètres sédimentologiques calculés sur les dix stations du havre du Robert et de la baie du Galion

Ces résultats montrent que, même en fond de baie, le taux de sédimentation moyen est en général de l'ordre de 0,5-1 cm/an. Ce taux est à rapprocher des valeurs mesurées dans des baies comparables en taille et en configuration physique, comme pour la baie de Fort-de-France en Martinique avec 0,3-0,4 cm/an (Pujos *et al.*, 2000) ou la baie de Marennes-Oléron, dans laquelle les vitesses de sédimentation de dépôts vaseux et vasosableux, soumis certes à un hydrodynamisme complètement différent, sont de l'ordre de 0,3 à 1 cm/an selon le type morphologique des estrans (Gouleau *et al.*, 2000). Les éléments majeurs de l'envasement mesuré dans ces deux baies sud-atlantiques martiniquaises sont les suivants : (i) un taux moyen compris entre 0,5 à 1,3 cm/an, excepté au débouché de rivières dans des faciès vaseux (havre du Robert) comme dans des faciès vaso-sableux (baie du Galion), dans lesquels le taux est de

l'ordre de 10 cm/an ; (ii) de légères variations du taux moyen précédent dues principalement à la proximité de cayes récifales ou à la situation dans la baie (ainsi, la valeur relativement plus forte – 1,3 cm/an – correspond à une station en sortie de baie), ce qui devra toutefois être confirmé.

Il convient ainsi de souligner que des vitesses de sédimentation bien supérieures à ce taux moyen ont été rencontrées dans les sédiments vaseux au débouché de rivières du havre du Robert, comme le taux mesuré de 10 cm/an à proximité de la rivière Gaschette, voire plus à son débouché (~ 300 m). Toutefois, au regard des cohésions mesurées sur les prélèvements du secteur, on constate que cette vitesse diminue fortement avec l'éloignement de l'embouchure de la rivière et avec la proximité de cayes favorisant la consolidation progressive, plus ou moins rapide, des sédiments en place, hormis le premier décimètre superficiel remobilisable.

En baie du Galion, la situation apparaît différente, même à partir du faible nombre de carottes étudiées, vis-à-vis de la structuration des dépôts et de leurs vitesses de sédimentation. En effet, si l'on trouve également un taux de sédimentation de l'ordre de 10 cm/an pour une formation proche du débouché de la rivière du Galion, il s'agit d'un sédiment de type vasosableux, plus pauvre en fraction argileuse que ses homologues du havre du Robert et à consolidation marquée, son comportement rhéophysique complexe montrant paradoxalement des cohésions modestes. En outre, ce sédiment a la particularité d'être constitué d'une couche de mélange sur les 40 centimètres d'épaisseur, composée de lamines dans les niveaux 24-26 cm et 34-38 cm. Par ailleurs, à proximité et à égale distance du débouché de la rivière, une autre carotte sédimentaire prélevée dans un sédiment également vasosableux et à même proportion d'argiles (4-5%) révèle un taux de sédimentation nettement moindre de 2,1 cm/an, néanmoins de l'ordre du double ou triple du taux moyen observé dans le havre du Robert. Cette carotte présentait une consolidation faible et une couche de mélange réduite aux 10 premiers centimètres, entièrement marquée par de nombreuses lamines.

Dans la baie du Galion, l'apport sédimentaire direct s'effectue principalement au "droit" de la rivière comme le confirment les observations illustrées par la photographie ci-dessous (fig. 34) réalisée lors de la campagne de prélèvements. En effet, après un violent orage, l'étalement du panache turbide des eaux douces chargées en matières en suspension (MES) dans cette baie est relativement limité en distance parcourue (extension de l'ordre de 2 km) ainsi qu'en surface atteinte, puisque il ne couvre que la moitié sud de la baie.



Fig. 34 – Photo panoramique de la baie du Galion prise depuis la presqu'île de la Caravelle montrant l'extension du panache turbide après un épisode pluvieux (au centre, l'îlet du Galion).



Malgré l'absence de données antérieures en nombre suffisant et établies selon une stratégie d'échantillonnage adéquate pour répondre pleinement à ce questionnement<sup>2</sup>, la dynamique sédimentaire de fond de baie à l'origine de cette sédimentation semblerait due principalement aux courants. Ils procéderaient selon le schéma suivant : les eaux superficielles entrent dans la baie par les passes et sont poussées par les alizés vers le fond de la baie, tandis que les effluents des bassins versants chargés de MES ayant un impact sédimentaire sont transportés et maintenus en fond de baie. En effet, l'eau entrante poussée par les courants de vent ne pouvant s'accumuler, un phénomène de chasse compensatoire est forcé par la marée selon une balance entre la vidange des eaux lors de la marée descendante et le blocage de ces dernières lors de la marée montante. Ainsi, l'arrivée de l'eau du large par les courants de surface liés aux vents dominants est *quasi* permanente, tandis que la sortie des eaux ne peut s'effectuer qu'en profondeur (essentiellement par la passe de Ti-Piton). Il s'en déduit que le temps de résidence des eaux des effluents dans la baie serait significatif, notamment en raison de la présence des îlets, ce qui impliquerait un renouvellement des eaux de la baie estimé (Impact-Mer, 2005) de 2 à 8% par jour selon la marée, pouvant atteindre 18% en situation maximale, en fort marnage et avec un alizé établi.

En période normale (hors cyclones), l'action des houles conduit à différents degrés de mobilisation des sédiments suivant leur type : les silts (40-60  $\mu\text{m}$ ) jusqu'à 6 m de profondeur d'eau, les sables très fins (60-125  $\mu\text{m}$ ) jusqu'à 3,5 m et les sables fins (125-250  $\mu\text{m}$ ) jusqu'à 1,5 m, tandis que les sédiments très fins de type argileux (< 40  $\mu\text{m}$ ) ne sont jamais déplacés (Durand, 1996). Ainsi, les particules les plus fines non mobilisables et peu transportées resteraient principalement en stagnation à proximité des rivières. Cette dernière hypothèse devrait être néanmoins vérifiée par l'acquisition de données hydrosédimentaires couplées à des échantillons des fonds correspondants.

Finalement, la présente étude a permis de mettre en évidence plusieurs résultats importants concernant la dynamique de l'envasement.

D'abord, il a été établi que la vitesse de sédimentation moyenne est de l'ordre de 0,5 à 1 cm/an, excepté certaines zones vaseuses à proximité du débouché de rivières dans lesquelles ce taux en est le décuple, atteignant le plus souvent 10 cm/an. Il sera toutefois nécessaire de confirmer ce résultat caractéristique du débouché des rivières pour d'autres cas, dans le havre du Robert (rivière Cacao, rivière Mansarde) comme dans la baie du Galion (rivière éponyme). Par ailleurs, les résultats de la présente étude infléchissent quelque peu certaines conclusions de travaux antérieurs (Impact-Mer, 2005 & 2007) fondés sur la seule analyse granulométrique de matières en suspension recueillies selon une stratégie d'échantillonnage techniquement limitée rendant les résultats difficilement comparables avec ceux relatifs à des sédiments en place. La présente étude conduit à considérer que l'hypersédimentation mise en évidence par ces travaux antérieurs ne concernerait en fait que des zones localisées au débouché des rivières dans des faciès vaseux (havre du Robert) ou vasosableux (baie du Galion).

Ensuite, l'impact des perturbations terrigènes sur l'envasement en milieu marin diffère entre les deux baies étudiées, se trouvant être nettement plus important dans la baie du Galion que dans le havre du Robert (Diren, 2005). Les résultats de la présente étude confirment cette différenciation, même s'ils doivent être consolidés dans le cas de la baie du Galion.

Enfin, le taux d'envasement moyen relativement modéré ne doit pas occulter l'impact anthropique dans ce phénomène de dépôt sédimentaire (Impact-Mer, 2007) : augmentation des apports alluvionnaires suite à la déforestation intensive et aux types de pratiques culturales, augmentation du ruissellement due à l'extension des zones imperméabilisées urbaines et à la diminution drastique des zones humides suite à leur remblaiement, mise en place d'activités littorales et d'aménagement urbain sans conception durable des installations vis-à-vis notamment des eaux de ruissellement, destruction des mangroves, etc.

<sup>2</sup> Seules quelques mesures ponctuelles ont été réalisées dans le havre du Robert par Impact-Mer en 2005 dans le cadre d'un travail d'appui à une étude de modélisation menée par Safège en 2006.

## Taux de contamination des sédiments superficiels

Les analyses de la contamination en chlordécone des niveaux sédimentaires superficiels effectuées sur dix stations du havre du Robert et de la baie du Galion conduisent aux résultats présentés dans le tableau synthétique ci-après, en relation avec certains paramètres sédimentologiques (tab.7).

Ces résultats montrent que la contamination des sédiments superficiels par la chlordécone est très différente entre les deux baies.

	station	caract. sédim.	niveau cm	CHDC µg/kg p.s.	C/N org	Vsédim structuration	% A	minéral susceptible de piéger CLD
Fond de baie	R01	Vaseux déb. Gaschette mangrove 2 m	0-10	< 6,1	12,2	> 10 cm/an mél = 0-40	8 → 12	Q > Sm > K
			10-20	< 5,4	12,5			
			30-40	< 4,6	12,6			
	R02	Vaseux influence Gaschette 2 m	0-10	< 5,9	12,4	~ 10 cm/an mél = 0-40	8 → 12	Q > Sm > K
			10-20	15,2	12,2			
			30-40	< 4,7	12,3			
	R05	Vaso-sableux extérieur / caye N 10 m	0-10	< 5,4	32,0	1,1 cm/an mél = 0-10	7-8 (4 <sup>e</sup> = 4%)	Ar > Au-He-Q > K-Ca-Ha > (Ab)
			10-20	< 3,4	41,1			
			30-40	< 3,0	66,7			
	R06	Vaso-sableux éloigné / caye au milieu 11 m	0-10	< 4,7	22,7	0,5 cm/an mél = 0-8 cm	8-9	Q > Ar-Au-Sm > Ca > (Ab)-(Ha)
			10-20	< 3,6	21,1			
			30-40	< 3,0	26,9			
	R08	Vaso-sableux ext. S / caye N 12 m	0-10	< 5,6	28,5	0,8 cm/an mél = 0-10	9-11	Q >> Ca-Ha
			10-20	< 4,7	24,8			
			30-40	< 3,9	37,7			
	R09	Vaso-sableux ext. S / caye N 12 m	0-10	< 5,4	37,8	0,6 cm/an mél = 0-5 cm	6-8	Ar-Au > Sm > K-Ca-Ha-Q-Ab- He-Q
			10-20	< 4,6	39,1			
			30-40	< 3,9	46,7			
Sortie de baie	R12	Vaso-sableux mini-baie Sud / sortie baie 16 m	0-10	< 3,9	74,1	1,3 cm/an mél = 0-10	7	Ar-Au > Ab > Ca-Sm
			10-20	< 3,1	84,0			
			30-40	< 2,9	96,6			
Fond de baie	G04	Vaso-sableux débouché Galion mangrove 3 m	0-10	30,5	11,8	2,1 cm/an mél = 0-10 nb <sup>SES</sup> lamines	4-5	Ha > Cli > Ab-Gy-Q > (Gi)-(K)
			10-20	68,3	13,1			
			30-40	14,4	16,8			
	G05	Vaso-sableux débouché Galion 6 m	0-10	12,8	11,9	~ 10 cm/an mél = 0- 40 lamines 24-26 / 34-38	4-5	Q-Ab > Sm >> (Gi)-(K)-(Ha)
			10-20	15,3	12,3			
			30-40	21,7	14,0			
	G06	Vaso-sableux mini-baie S / fond 15 m	0-10	< 4,8	47,2	0,9 cm/an mél = 0-10	6 → 8	Ar-Au > Ha > Sm
			10-20	< 4,1	44,9			
			30-40	< 3,3	70,8			

Tab.7 – Taux de contamination en chlordécone (CHDC) mesurés et paramètres sédimentologiques calculés sur trois niveaux sédimentaires de dix stations du havre du Robert et de la baie du Galion (pour la signification des abréviations des espèces minérales, voir tab.2)

Dans le **havre du Robert**, la contamination des échantillons de sédiments analysés est globalement très faible (en général sous le seuil de quantification par la méthode utilisée), excepté pour le niveau 10-20 cm de la station R02 sous influence directe de la rivière Gaschette. Elle ne présente aucune corrélation avec la profondeur sédimentaire, ni avec les paramètres sédimentologiques étudiés (type de faciès sédimentaire, composition texturale, fraction argileuse, matière organique particulaire). Quant aux minéraux analysés dans ces sédiments, principalement des carbonates, du quartz, de l'augite et de la kaolinite, leur structure cristalline ne permet ni d'adsorber, ni encore moins d'absorber les molécules de chlrodécone.

Également présentes dans ces sédiments et constituant une famille d'argiles dont la structure foliaire a la capacité de gonfler en réaction à certains liquides (dont l'eau de mer), les smectites ont un défaut de charge compensable par des cations intrafoliaires. Elles présentent également des possibilités d'adsorption extrafoliaire du fait de leurs fortes capacités d'échange cationique (CEC)<sup>3</sup> et leurs surfaces internes développées (SI) : elles sont donc capables potentiellement d'adsorber de la chlrodécone. Dans le havre du Robert, ces smectites sont présentes en abondance dans les sédiments vaseux proches de l'embouchure de la rivière Gaschette, ainsi que dans certains faciès vasosableux plus ou moins proches de 'cayes', sauf que l'absence de piégeage potentiel de chlrodécone dans ces faciès vasosableux ne peut pas être expliquée par leur cortège minéralogique incluant des smectites. La rapidité du dépôt des formations vaseuses (10 cm/an) rend difficilement décelable la contamination dans les carottes prélevées dont l'épaisseur ne correspond qu'aux 3-4 dernières années (seul un 'bruit de fond' en chlrodécone peut être mesuré, comme pour l'ensemble des sédiments du havre).

La situation apparaît différente dans la **baie du Galion**, puisqu'à part pour une station située dans une mini-baie sans apport terrigène notable (pas de cours d'eau proche), les sédiments des deux stations à proximité du débouché de la rivière du Galion sont nettement plus contaminés. La première (G04) présente des niveaux en chlrodécone qui doublent entre le premier et le second décimètre (de 30 à près de 70 µg/kg p.s.) ; le niveau le plus profond présente une diminution de teneur (14,4 µg/kg p.s.) avec un niveau de contamination voisin de celui de l'autre station. Pour cette seconde station (G05), les concentrations en chlrodécone sont plus faibles aux premiers niveaux et croissent avec la profondeur (13, 15, puis 22 µg/kg p.s.).

Dans cette baie, le cortège minéralogique est très différent de celui analysé dans le havre du Robert. En effet, outre du quartz et de l'albite, ainsi que des smectites pour la seule station à plus faible teneur en chlrodécone, les résultats montrent de la gibbsite qui est un hydroxyde d'aluminium susceptible d'avoir un rôle sur la rétention en chlrodécone, mais surtout de la clinoptolite, présente dans les sédiments superficiels de la station relativement contaminée. Or, la clinoptolite est une zéolite qui peut adsorber différents types de molécules (du fait de sa grande surface interne) alors que sa structure interne alvéolaire non déformable et constituée de nano-pores ne peut absorber que de petites molécules cationiques : ainsi le piégeage de la chlrodécone ne peut se faire que par adsorption sur cette zéolite.

Lors d'études antérieures, des mesures de chlrodécone ont été effectuées sur des sédiments aux embouchures des rivières (nommés sédiments "estuariens") autour de la Martinique et notamment dans

<sup>3</sup> La capacité d'échange cationique (CEC ou T pour capacité totale) d'un sol est la quantité de cations que celui-ci peut retenir sur son complexe absorbant à un pH donné. La CEC correspond donc au nombre de sites négatifs dans la matrice du sol. Chaque sol a une CEC bien précise qui correspond à la somme S des principaux cations (calcium, potassium, magnésium, sodium et ammonium), appelée "somme des bases échangeables". Cette CEC est en quelque sorte le "garde-manger" du sol. Plus le sol est riche en argile et matière organique, plus sa CEC est importante. Ce paramètre pédologique est transférable et a déjà été également utilisé dans le cas des sédiments marins.

certaines rivières sud-atlantiques (Bertrand *et al.*, 2009). L'ensemble de ces résultats ainsi que des données issues de travaux d'autres organismes sont présentés ci-après (tab.8).

baie	Cours d'eau	2002		Juillet 2007	Août 2007	2008
		Bocquené et Franco, 2005 MES / sédiments 'estuariens' MES sédiments		Rocle <i>et al.</i> , 2009 sédiments 'estuariens'	Rocle <i>et al.</i> , 2009 sédiments 'estuariens'	Bertrand <i>et al.</i> , 2009 sédiments 'estuariens'
Galion	rivière du Galion	52	< 10			47
Robert	rivière Mansarde			4,6	3,9	143
	rivière Gaschette			16,1	16,8	5
	rivière Cacao	22	< 10	25,1	15,4	23

Tab.8 – Taux de contamination en chlordécone (en  $\mu\text{g}/\text{kg}$  p.s.) mesurés sur des matières en suspension (MES) et sur des sédiments d'embouchures de rivières ('estuariens') du havre du Robert et de la baie du Galion

Ces données présentent de nombreuses limites, dues notamment au petit nombre de mesures, aux techniques de prélèvements non renseignées, à l'absence d'information sur la nature des sédiments et aux différences dans les méthodologies analytiques et en particulier à leur manque de sensibilité. Toutefois, ces données sont en accord entre elles, surtout si on exclut le prélèvement de la rivière Mansarde de 2008 pour lequel la contamination atteint  $143 \mu\text{g}/\text{kg}$  p.s. Cette limite dans l'interprétation apparaît d'autant plus forte puisqu'il s'agit de matériaux sédimentaires de nature et de comportement variés (MES, sédiments de rivière, sédiments marins) et susceptibles de posséder des caractéristiques sédimentologiques et physico-chimiques différentes.

Néanmoins, les ordres de grandeur sont proches des valeurs mesurées jusque-là dans les baies sud-atlantiques en général, puisque l'étude de Rocle *et al.* (2009) montre que la concentration en chlordécone des sédiments superficiels de l'embouchure des rivières du havre du Robert en 2007 variait de 3 à  $40 \mu\text{g}/\text{kg}$ , alors que Bocquené et Franco (2005) rapportent, quant à eux, des concentrations comprises entre 20 et  $60 \mu\text{g}/\text{kg}$  dans les matières en suspension (MES) et dans le sédiment superficiel des fonds de baies de la façade atlantique. Seule la rivière Mansarde en 2008 a présenté une valeur nettement plus élevée (Bertrand *et al.*, 2009). Il faut noter de plus que des valeurs de même ordre de grandeur ont été relevées dans la baie du François, située au sud du havre du Robert, puisque d'après Bocquené et Franco (2005) et Bertrand *et al.* (2009) les teneurs étaient de  $57 \mu\text{g}/\text{kg}$  pour les MES en 2002 et variaient de  $38 \mu\text{g}/\text{kg}$  (année 2002) à  $92 \mu\text{g}/\text{kg}$  (année 2008). Enfin, on peut noter que les sédiments prélevés après le cyclone Dean (août 2007) ne sont pas plus contaminés que ceux effectués en juillet 2007, les différences sensibles entre les résultats de mesures dupliquées s'expliquant par la nature très hétérogène du sédiment superficiel.

Si l'étendue des paramètres analysés dans la présente étude a permis de progresser dans la caractérisation de la contamination des sédiments marins par la chlordécone, cette exploration illustre la difficulté des approches à mettre en œuvre pour appréhender les processus de transfert de la molécule à partir des flux issus des bassins versants vers les écosystèmes *sensu lato* et les biocénoses marines. Quoiqu'il en soit, les résultats de la présente étude sont en cohérence avec ceux obtenus sur des sédiments de surface prélevés dans le havre du Robert par Bocquené et Franco (2005) et par Bodiguel *et al.* (2011), confirmant leur très faible contamination hors des dépôts terrigènes à proximité immédiate d'embouchures de cours d'eau.

## [6] CONCLUSION

Cette étude visait principalement à déterminer si et depuis quand les sédiments littoraux sont contaminés par la chlordécone, étant donnée la contamination des différentes matrices (sols, MES) des bassins versants attenants et des organismes marins habitant ou fréquentant les zones côtières. Le questionnement qui en découlait était de deux ordres :

- cibler un certain nombre de cônes de déjection de cours d'eau contaminés afin de caractériser la succession des flux de contamination dans les sédiments depuis l'arrêt de l'utilisation de la chlordécone ;
- étudier à l'échelle des deux baies divers dépôts sédimentaires susceptibles d'être impactés afin d'apprécier l'extension de la diffusion de la molécule dans les fonds marins.

L'étude a été centrée sur deux baies appartenant au plateau insulaire sud-atlantique de la Martinique et caractérisées par des bassins versants contrastés, avec notamment une plus grande surface de bananeraies drainées par une rivière permanente pour la baie du Galion. Elle a révélé de grandes différences dans la nature de leur système sédimentaire, contribuant ainsi à expliquer les teneurs variables en chlordécone des sédiments superficiels de ces baies.

Les travaux effectués ont d'abord permis de répondre à différentes questions méthodologiques liées à la prospection des fonds par des carottages superficiels afin d'envisager ultérieurement, par des prélèvements plus profonds dans les dépôts sédimentaires, d'étudier plus en détail l'historique de la contamination. Ensuite, cette étude a contribué à acquérir une meilleure connaissance des systèmes sédimentaires des baies sud-atlantiques de la Martinique, non seulement en proposant d'améliorer la cartographie superficielle existante, mais également en caractérisant les fonds sédimentaires à l'aide de nombreux paramètres d'état (texture, matière organique, minéralogie, etc.) et dynamiques (comportement mécanique, structuration, vitesse de sédimentation, etc.). Enfin, afin de comprendre les processus de contamination sédimentaire, des corrélations par SIG ont été recherchées entre les variations spatio-temporelles de ces différents paramètres et celles de la teneur en chlordécone dans les sédiments superficiels étudiés. Dans ce but, deux types de fond ont été considérés dans cette étude exploratoire : (i) les cônes de déjection de cours d'eau potentiellement contaminés à partir d'une rivière significative pour chacune des deux baies, afin de caractériser la succession des flux de contamination dans les sédiments depuis l'arrêt de l'utilisation de la molécule et (ii) les sédiments à faciès vaseux et vaseux-sableux, essentiellement silteux ou sableux très fins, correspondant à des dépôts sédimentaires susceptibles d'être contaminés, afin d'estimer l'étendue de la diffusion de la molécule dans les fonds marins. Cependant, l'interprétation relative à la présence ou à l'absence de chlordécone dans les sédiments superficiels doit être prudente puisque ce contaminant est potentiellement remobilisable par remise en suspension naturelle due aux tempêtes, aux forts débits des rivières en crues ou bien provoquée par l'activité humaine, comme les dragages.

La présente étude montre que les sédiments susceptibles d'être contaminés (vaseux et vaseux-sableux), même au débouché des rivières, sont impactés différemment dans chacune des deux baies.

Dans le havre du Robert, toutes les concentrations en chlordécone mesurées sont très faibles, égales ou inférieures à 6 µg/kg p.s., correspondant au seuil de quantification. Elles concernent des sédiments dont le marqueur organique (C/N particulaire) est très variable selon le type de sédiment : de l'ordre de 12 pour les formations vaseuses, de l'ordre de 20 à 50 pour les formations vaseux-sableuses en fond de baie et à proximité de 'cayes'. L'envasement moyen des sédiments de fond de baie du havre du Robert est au taux de 0,5 à 1 cm/an, communément obtenu dans ce type de baies semi-fermées, sauf à l'embouchure de la rivière Gaschette où il est de l'ordre de 10 cm/an. Cette dernière valeur implique que les sédiments potentiellement contaminés dans cette zone au moment de l'arrêt définitif de l'utilisation de la

chlordécone (année 1993) pourraient se situer actuellement à une profondeur sédimentaire de l'ordre de 1,4-1,8 m, tandis que ceux marquant le début de la contamination (année 1972) devraient l'être à 3-4 m, ces estimations étant faites dans l'hypothèse d'une même vitesse de sédimentation au cours du temps et en tenant compte d'une compaction modérée et supposée progressive selon la profondeur.

Dans la baie du Galion, les concentrations en chlordécone diffèrent fortement de celles relevées en baie du Robert. Dans les sédiments vaso-sableux étudiés, les concentrations sont du même ordre que les précédentes pour une station située dans une mini-baie. Elles atteignent par contre des valeurs nettement plus élevées pour deux stations très proches du débouché de la rivière Galion : de l'ordre de 15 à 30  $\mu\text{g}/\text{kg}$  p.s. en général, jusqu'à 68  $\mu\text{g}/\text{kg}$  p.s. pour le second niveau (10-20 cm) de la station qui est la plus proche du débouché, sous 3 m de profondeur d'eau. À la différence du havre du Robert, le rapport C/N varie en fonction du type de sédiment montrant le caractère accentué des apports terrigènes de la rivière du Galion dont l'importance a été soulignée. Les taux d'envasement mesurés dans cette baie sont du même ordre de grandeur, notamment pour les deux stations très proches du débouché de la rivière avec une valeur de 10 cm/an pour les sédiments de l'une d'entre elles, à consolidation marquée et à structuration en lamines, et de 2,1 cm/an pour la seconde, à consolidation faible et à lamines plus éparses dans la colonne sédimentaire. Dans cette baie, le cortège minéralogique dans les sédiments superficiels est marqué par la présence notable de clinoptilolite (de la famille des zéolites), de cristobalite (indicateur de l'apport volcanique direct) et de gibbsite (hydroxyde d'aluminium), à rapprocher de la différence de nature des sols entre les deux baies et de l'influence des apports aériens volcaniques.

Ainsi, les sédiments superficiels n'apparaissent pas actuellement comme un réceptacle important de la chlordécone dans le milieu marin au regard des résultats généraux de cette étude exploratoire. Cette contamination faible (à valeurs proches des limites de quantification) relevée dans l'ensemble du havre du Robert, même à proximité de l'une des trois petites rivières, ne concerne toutefois que les 3-4 dernières années pour les sédiments les plus fins, susceptibles d'être contaminés. Dans le cas de la baie du Galion, sous réserve du nombre modeste de mesures ne concernant également que les 3-4 dernières années, certains sédiments sont plus contaminés, avec des niveaux élevés supérieurs de plus d'un demi-ordre de grandeur à ceux mesurés dans le havre du Robert. Il s'agit de sédiments unimodaux sensiblement plus grossiers que ces derniers et situés au débouché de l'unique, mais importante rivière. Ce cantonnement de la contamination est à rapprocher du fait que les matériaux particuliers issus de cours d'eau diffusent peu, leur sédimentation s'effectuant essentiellement à proximité immédiate des embouchures, tandis qu'au-delà les sédiments sont surtout d'origine marine.

En résumé, les traits dominants de cette étude montrent une nette zonation dans les deux baies étudiées entre les sédiments terrigènes et les sédiments d'origine marine, les premiers étant les plus fins et cohésifs (faciès vaseux et vaso-sableux), restant cantonnés en fond de baies sur la frange littorale de 0 à 5-15 m de profondeur. C'est dans ce type de sédiments à proximité des embouchures des rivières que se trouvent, surtout dans la baie du Galion, les plus fortes teneurs en chlordécone mesurées dans cette étude. Les différences de contamination sédimentaire entre les deux baies résident notamment dans leurs spécificités sédimentologiques (comportement rhéologique, cortège minéralogique, processus de stratification du dépôt, etc.) en rapport d'ailleurs avec le type de sols de leurs bassins versants. Cependant, la forte variabilité des teneurs mesurées dans ces sédiments, alors que l'on trouve précisément dans ces baies, ainsi que celle de Fort-de-France, les teneurs les plus élevées en chlordécone dans la faune marine martiniquaise, induit que la phase particulière n'est pas la seule en cause dans les processus de transfert de la contamination dans le milieu marin à partir des bananeraies. Enfin, la teneur variable des sédiments superficiels étudiés correspondant à une période post-épandage, la période d'application de la chlordécone allant de 1972 à 1993 implique d'étudier ces fonds jusqu'à 4-5 m de profondeur sédimentaire.

## [7] PERSPECTIVES

À partir du modèle différent des deux baies étudiées, ces travaux ont mis en évidence des caractéristiques des fonds sédimentaires côtiers de la Martinique orientale nouvelles par rapport aux connaissances antérieures. Cependant, ces travaux sont à approfondir pour mieux approcher l'historique de la contamination des sédiments marins par la chlordécone. Cet approfondissement pourrait impliquer des études sur la dynamique sédimentaire des baies d'une part, sur l'articulation des processus entre bassin versant et milieu marin d'autre part, en incluant le rôle écosystémique de l'habitat physique dans l'établissement et le maintien des communautés benthiques.

### **Rôle de la dynamique sédimentaire dans la compréhension des processus de contamination en chlordécone dans les sédiments marins**

L'étude de la dynamique des sédiments dans les baies nécessite une connaissance précise de la répartition et des caractéristiques des formations superficielles. Sur la base des acquis méthodologiques de la présente étude, il pourra s'agir de faire réaliser des travaux de télédétection (photographies aériennes, images satellites), ainsi que d'effectuer des profils d'images acoustiques et soniques très haute résolution dans les eaux littorales. De plus, les présents résultats restant partiels, il sera opportun de chercher à déterminer l'évolution de la contamination avec la profondeur dans la zone étudiée de la baie du Galion en réalisant des carottages plus profonds, ainsi que des prélèvements en plus grand nombre dans les sédiments superficiels du fond de baie. Ces travaux sédimentologiques devront inclure des analyses minéralogiques plus approfondies concernant les types de sédiments contaminés et susceptibles de l'être, ainsi que la détermination de leurs composants humiques et fulviques afin de mieux caractériser les complexes organiques et minéraux dans ces sédiments.

La connaissance des différents paramètres hydrodynamiques est également nécessaire puisqu'ils permettent de comprendre la mobilité des sédiments dans les baies. Or, cette connaissance est très fragmentaire concernant le havre du Robert (Safège, 2006) et inexistante pour la baie du Galion. Une étude *in situ* sur une durée suffisamment longue devra prendre en compte simultanément, sur des stations judicieusement choisies et en nombre suffisant, les courants de surface et de fond, l'agitation locale (clapots) issue de la houle, et inclure une caractérisation des sédiments superficiels. Enfin, pour permettre une compréhension globale de la dynamique sédimentaire de fond de baie, ces études devront être complétées par une modélisation de la dynamique sédimentaire afin d'estimer le transport sédimentaire et les zones en érosion/dépôt et par le développement de la plateforme cartographique caraïbe sous SIG en cours de constitution.

### **Impacts de la contamination en chlordécone du bassin versant dans les sédiments littoraux de fond de baies**

La contamination des milieux marins par la chlordécone provenant de certains sols des bassins versants, il apparaît primordial de suivre l'évolution du comportement de la molécule dans les différents milieux traversés, des sols initialement contaminés jusqu'à la mer, dans une approche intégrée pluridisciplinaire.

Les sujets à aborder concerneront en particulier les trois compartiments suivants : (i) les sols, notamment sur les agrégats argileux des andosols et des nitisols afin de permettre de comprendre la minéralogie sédimentaire marine à partir de l'héritage pédologique ; (ii) les cours d'eau, notamment sur les différentes voies de transfert de la chlordécone selon son état (phase particulière/phase soluble) à travers diverses matrices (eau chargée de MES, flore et faune dulcicoles, sédiments fluviaux) et sur les principaux facteurs agissant sur ce transfert (contribution du rapport solide à la contamination exprimée,

influence déterminante de la granulométrie, rôle de la sorption – sur le fond et dans la colonne d'eau – particulièrement lors des crues, effet éventuel de la turbidité), ainsi que (iii) le milieu marin.

Dans les systèmes de transition, il conviendra de prendre particulièrement en compte le fait que : (i) les teneurs de la chlordécone dans les sédiments 'estuariens' sont en général supérieures à celles mesurées dans les sédiments marins à proximité des embouchures ; (ii) l'interface MES-sédiments apparaît déterminante dans le transfert de la molécule en eaux douces (superficielles et souterraines) comme en milieu marin ; (iii) la dynamique de piégeage sédimentaire de la chlordécone ou au contraire sa remise en suspension apparaissent liées à l'effet des fortes pluies et des houles et enfin (iv) l'état de la chlordécone semble évoluer entre forme particulaire et dissoute au cours du transfert eaux douce-eaux marines.

Dans le milieu marin, une étude sédimentologique des différentes matrices physiques susceptibles d'être atteintes permettra de mieux caractériser les phénomènes dans les systèmes de transition, ainsi que les processus physico-chimiques lors du transfert de la contamination. Une attention particulière devra être portée sur la caractérisation des transferts des bassins versants vers le domaine marin par la prise en compte des dynamiques hydrosédimentaire et sédimentaire à l'interface et au débouché des rivières (érosion/dépôt, transport solide, remaniements sédimentaires). Ainsi, cette approche des processus physico-chimiques et sédimentaires devra inclure l'étude des éléments suivants : (i) les flux de MES et leur évolution du bassin versant au milieu marin ; (ii) les phénomènes de floculation et d'agrégation-désagrégation dans la rencontre des différentes eaux (douces/marines) ; (iii) la comparaison des associations particulières organiques et/ou minérales en milieu terrestre (sols-eaux douces) et en milieu marin (sédiments-eaux salées) ; (iv) l'évolution à différentes échelles temporelles des fonds sédimentaires des cours d'eau et côtiers en termes d'érosion et de dépôt, ainsi que leur structuration verticale (compaction, voire tassement), ceci notamment en amont et en aval du débouché des principales rivières des zones ciblées ; (v) les changements morphologiques des lits et des rives au niveau des débouchés, avant et après crues, et enfin (vi), l'influence de la courantomologie locale en fond de baie sur la dynamique sédimentaire incluant les perturbations issues des flux des rivières.

Cette étude sédimentologique aux interfaces devra prendre également en compte les événements météo-climatiques et hydrodynamiques majeurs récents, ainsi que leur impact sur la dynamique sédimentaire dans les baies, mais aussi d'autres facteurs comme l'impact des chantiers d'aménagement terrestres susceptibles d'avoir rejeté de forts flux particuliers en milieu marin et l'influence de certaines morphologies du littoral en mode battu qui, au contraire de mini-baies et anses semi-fermées, favorisent la diffusion et la dispersion des particules terrigènes.

Enfin, les résultats actuellement disponibles laissent ouverte la question des voies et des modalités de transfert de la molécule des bassins versants vers les réseaux trophiques marins. La question est d'autant plus importante que, comparée à celle relevée dans la faune à travers les réseaux trophiques, la contamination sédimentaire marine apparaît très faible au-delà des zones proches des embouchures des cours d'eau. Une étude des faciès biosédimentaires, y compris leurs caractéristiques géomorphologiques et sédimentologiques, dans les principaux types d'écosystèmes littoraux pourra aider à comprendre les mécanismes de l'évolution de la contamination des écosystèmes marins à l'échelle sédiment-faune benthique. Il s'agira alors d'étudier notamment les mangroves (d'ailleurs lieux de piégeage potentiels des contaminations), les herbiers à phanérogames marines et les récifs coralliens.

Compte tenu de l'ampleur du sujet, une première approche pourrait être envisagée sur un système très typé comme la baie du Galion, avant d'envisager les possibles extrapolations des méthodologies d'étude à d'autres écosystèmes littoraux antillais afin de caractériser la contamination de leurs fonds sédimentaires.

Ainsi, d'autres sites antillais peuvent être étudiés par la suite. En Martinique, certaines baies sont intéressantes, comme : (i) la baie du François, en tant que baie 'témoin', avec un bassin versant peu contaminé (Diren, 2005) et des sédiments estuariens dont le niveau de contamination est dans une situation intermédiaire entre ceux des rivières Mansarde et Galion ; (ii) la baie de Fort-de-France, en raison de son intérêt économique, les différentes études sédimentologiques réalisées étant anciennes et



ne prenant pas en compte les contaminations par la chlordécone. En Guadeloupe également, ce type d'études peut être mené en tenant compte des caractéristiques différentes de l'île, la contamination des fonds marins par la chlordécone y étant également présente (Bertrand *et al.*, 2009) quoique plus localisée au sud de Basse-Terre.

Par ailleurs, les études sédimentologiques appliquées aux contaminations peuvent servir en appui à la politique de surveillance de l'environnement littoral menée en Martinique et en Guadeloupe, notamment en contribuant à l'amélioration des outils de suivi et des indicateurs liés aux fonds sédimentaires.

Enfin, une attention particulière doit être portée à la question des méthodes analytiques. En effet, actuellement la quantification de la chlordécone pour les sols, les cours d'eau et les sédiments marins est effectuée à l'aide de protocoles différents empêchant la comparaison des résultats. De plus, la sensibilité des méthodes actuelles est souvent insuffisante pour quantifier les traces, en dépit de leur intérêt pour caractériser des flux.

## [8] RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Adey W.H., P. Adey, R. Burke & L. Kaufmann, 1977. The Holocene reef systems of Eastern Martinique, French West Indies. *Atoll Research Bulletin* **218** : 1-40.
- Atlan Y., 1990. Contribution à l'étude géotechnique des sols volcaniques tropicaux. Exemple de la Martinique. *Bulletin de l'Association Internationale de Géologie de l'Ingénieur*, **41** : 17-26.
- Augris C. ed 2000. Carte des formations superficielles du plateau insulaire de la Martinique. Cartes 1/25 000<sup>ème</sup> et atlas. Ifremer. ALT-Brest: 4 cartes + 32 p.
- Augris C. ed 2003. Les fonds marins du plateau insulaire de la Guadeloupe et de la Martinique. Carte. 1/100 000<sup>ème</sup> Ifremer & Conseil régional de la Martinique, Plouzané & Fort-de-France.
- Basile-Doelsch I., R. Amundson, W.E.E. Stone, C.A. Masiello, J.-Y. Bottero, F. Colin, F. Masin, D. Borschneck & J.D. Meunier, 2005. Mineralogical control of organic carbon dynamics in a volcanic ash soil on La Réunion. *European Journal of Soil Science.*, **56 (6)** : 689-703.
- Basile-Doelsch, R. Amundson, W.E.E. Stone, D. Borschneck, J.-Y. Bottero, S. Moustier, F. Masin & F. Colin, 2007. Mineral control of carbon pools in a volcanic soil horizon. *Geoderma*, **137, 3-4** : 477-489.
- Bertrand J. A., 2010. Exploration de la relation entre la bathymétrie et la contamination de la faune halieutique par la chlordécone aux Antilles. IFREMER, Note. 14 p.
- Bertrand J. A., A. Abarnou, G. Bocquené, J. F. Chiffolleau & L. Reynal, 2009. Diagnostic de la contamination chimique de la faune halieutique des littoraux des Antilles françaises. Campagnes 2008 en Martinique et en Guadeloupe. IFREMER, Martinique. 136 p <http://archimer.IFREMER.fr/doc/00000/6896/>
- Bocquené G. & A. Franco, 2005. Pesticide contamination of the coastline of Martinique. *Marine Pollution Bulletin* **51**: 612-619.
- Bodiguel X., Bertrand J. A. et J. Fremery, 2011. Devenir de la chlordécone dans les réseaux trophiques des espèces marines consommées aux Antilles (CHLORETRO). Rapport final de Convention Ifremer, ODE Martinique et DSV Martinique. Ifremer, Martinique. 46 p.
- Bosser K., F. Levoy & J.-C. Flageollet, 2000. Hiérarchisation de l'impact morphologique d'événements climatiques contrastés sur la plage de Grand'Rivière (Martinique) – In : VI<sup>èmes</sup> Journées Nationales de Génie Civil-Génie Côtier, Caen, 17-19/05/2000 : 229-236.
- Bosser K. & F. Levoy, 1998. Impact hydro-sédimentaire des périodes de renforcement des alizés sur une plage de la côte nord de la Martinique – In : V<sup>èmes</sup> Journées Nationales de Génie Civil-Génie Côtier, Toulon, 13-15/05/1998 : 111-119.
- Bouysse P., D. Westercamp & P. Andreieff, 1990. The Lesser Antilles island arc. In : Proceedings of the Ocean Drilling Program, Scientific Results (J.-C. Moore, A. Mascle *et al.*, eds), **vol. 110** : 29-44.
- Bouysse P., A. Mascle, A. Mauffret, B. Mercier de Lepinay, I. Jany, A. Leclere-Vanhoeve & M.-C. Montjaret, 1988. Reconnaissance de structures tectoniques et volcaniques sous-marines de l'arc récent des Petites Antilles (Kick'Em Jenny, Qualibou, Montagne Pelée, Nord-Ouest de la Guadeloupe. *Marine Geology*, **81** : 261-287.
- Brugneaux S., L. Pierret & V. Mazataud, 2004. Les agressions d'origine anthropique sur le milieu marin côtier et leurs effets sur les écosystèmes coralliens et associés de la Martinique. Les Cahiers de l'Observatoire n°1, Edition 2004.- Fort-de-France : Observatoire du Milieu Marin Martiniquais, 96 p.  
<http://www.martinique.ecologie.gouv.fr/download/Martiniquomm aggression%20anthropique mars04.pdf>

- Cabidoche Y.-M., R. Achard, P. Cattan, C. Clermont-Dauphin, F. Massat & J. Sansoulet, 2009. Long-term pollution by chlordecone of tropical volcanic soils in the French West Indies: A simple leaching model accounts for current residue. *Environmental Pollution* **157**: 1697–1705.
- Cabidoche Y.-M., C. Clermont-Dauphin, R. Achard, A. Caron, P. Cattan, C. Chabrier, A. Lafont, M. Lesueur Jannoyer & J. Sansoulet, 2008. Stockage dans les sols et dissipation dans les eaux de la chlordécone, insecticide organo-chloré autrefois appliqué dans les bananeraies des Antilles françaises. *Les cahiers du PRAM n° 7*. Décembre 2007: 39-44.
- Catlow A., 2008. Etude des transferts de chlordécone depuis les sols vers le réseau hydrographique sur le bassin versant de la ravine Mansarde (Baie du Robert, Martinique). AgroParisTech, PRAM, Cemagref, *Mémoire de stage d'ingénieur agronome*. 91 p.
- Cattan P., E. Barriuso, Y.-M. Cabidoche, J. B. Charlier & M. Voltz, 2008. Quelques éléments clés sur l'origine et le mode de pollution des eaux par les produits phytosanitaires utilisés en agriculture. *Les cahiers du PRAM n° 7*. Décembre 2007: 12-19.
- Cemagref, 2010 - Rapport MOM Gestion agro-environnementale intégrée du risque de contamination de la ressource halieutique par les produits phytopharmaceutiques. Cas du transfert de la chlordécone dans la baie du Robert. 140 p.
- Charlier, J.-B., P. Lachassagne, B. Ladouche, P. Cattan, R. Moussa & M. Voltz, 2011. Structure and hydrogeological functioning of an insular tropical humid andesitic volcanic watershed: a multi-disciplinary experimental approach. *Journal of Hydrology*. **398 (3-4)** : 155-170.
- Coch N. J., 1994. Geologic effects of hurricanes. *Geomorphology*, **10** : 37-63.
- Colmet-Daage F. & P. Lagache, 1965. Caractéristiques de quelques groupes de sols dérivés de roches volcaniques aux Antilles françaises. *Cahiers ORSTOM*, série Pédologie, **III (2)**, 91-122.
- Dao *et al.*, 2008. Etude préalable à l'aménagement intégré de la zone côtière : site atelier de la Baie du Robert / Martinique. Caractérisation des apports terrigènes et du milieu récepteur. Rapport final du programme de recherche financé par le Ministère de l'Outre Mer 2005-2007. 130 p.
- Diren, 2005. Etat des lieux 2005 du district hydrographique de la Martinique. DIREN, Martinique. 369 p.  
<http://www.martinique.ecologie.gouv.fr/download/etatdeslieux%20district%20martinique%202005.pdf>
- Diren, 1999. Synthèse bibliographique et cartographique du milieu marin en Martinique. *Rapport CAREX Environnement*, 97 p.
- Duchauffour P., 1997. Abrégé de pédologie. Sol, végétation, environnement. 5<sup>ème</sup> édition. Ed. Masson, 291p.
- Duncan C.P., S. G. Schladow & W.G. Williams, 1982. Courants de surface à proximité des Grandes et Petites Antilles. *Revue Hydrographique Internationale* (Monaco), **LIX(2)** : 73-85.
- Durand F., 1996. Hydrodynamique sédimentaire sur le plateau insulaire de la Martinique. *Thèse de l'Université Bordeaux I*. 214 p.
- Durand F., G. Vernet & C. Augris, 1997. The cyclonic risk in Martinique and response to hurricane Allen. *In : Island States at risk : Global climate change, development and population. Journal of Coastal Research*, Special Issue **24** : 17-27.
- Durand F., C. Augris & P. Castaing, 1998. Les cyclones David et Allen en Martinique : origine probable des mégarides sur le plateau externe oriental. *Compte-Rendus de l'Académie des Sciences série IIA*, **326** : 863-868.
- Feiss C., P. Bonte, A. Andrieu. & I. Lefevre., 2004. Transfert de matières des bassins versants côtiers au milieu marin; identification, caractérisation et vitesse - L'exemple de la baie du Marin (Martinique). *Géomorphologie* **10(1)** : 81-90.
- Fernandes P., M. Jannoyer-Lesueur, A. Soler, R. Achard & T. Woignier, 2010. Effects of clay microstructure and compost quality on chlordecone retention in volcanic tropical soils: consequences on

- pesticide lability and plant contamination. *In* : 19<sup>th</sup> World Congress of Soil Science 2010, Australie (Brisbane), 1-6 août 2010.
- Froidefond J.-M., L. Berthois, R. Griboulard, C. Julius & J.-C. Pons., 1985. Terrasses submergées d'origine récifale, variations du niveau marin et activité néotectonique sur le plateau sud et est de la Martinique. *In* : Géodynamique des Caraïbes, Symposium Paris, édition Technip : 143-154.
- Gouleau D., J.M Jouanneau, O. Weber. And P.-G. Sauriau. 2000. Short- and long-term sedimentation on Montportail-Brouage intertidal mudflat, Marennes-Oléron Bay (France). *Continental Shelf Research*, **20**: 1513-1530.
- Henocq C., M. Pujos, J.C. Pons & G.S. Odin, 1990. Sédimentologie du plateau insulaire nord-est de la Martinique : impact du volcanisme en région récifale ; comparaison avec la baie de Fort-de-France. *Bulletin des Sciences Géologiques*, **43 (1)** : 15-28.
- Huggett R. J. & M. E. Bender, 1980. Kepone in the James River. *Environmental Science and Technology* **14 (8)** : 918-923.
- Iedom, 2008. Martinique. Rapport annuel 2007. IEDOM, Paris. 273 p.
- Impact-Mer, 2007. Programme DIACT : sédimentation marine. Ville du Robert – Programme GIZC.31 p
- Impact-Mer, 2005a. Étude de l'eutrophisation, de la sédimentation et cartographie des biocénoses benthiques de la baie du Robert - Site atelier de la Baie du Robert. *Rapport de contrat MEDD Liteau II-Ifremer*. 57p.
- Impact-Mer, 2005b. Étude de la sédimentation, état actuel de la baie. Études de modélisation en trois dimensions de la baie du Robert. *Rapport de contrat de la Ville du Robert – Safège-Caraïbe*. 19p. + annexes.
- Kervella S., S. Robert, A.Pantet & S. Jarny, 2009. Caractérisation des sédiments superficiels de la Baie Marennes-Oléron : Application à la gestion des espaces littoraux de la Charente Maritime. *EJECE*, **13 (4)** : 261-281.
- Khamsouk, 2001. Impact de la culture bananière sur l'environnement. Influence des systèmes de cultures bananieres sur l'érosion, le bilan hydrique et les pertes en nutriments sur un sol volcanique en Martinique (cas du sol brun rouille a halloysite). *Thèse de l'Université de Montpellier (ENSA)*. 231p.
- Le Déault J.Y. & C. Proccacia, 2009. Rapport sur les impacts de l'utilisation de la chlordécone et des pesticides aux Antilles : bilan et perspectives d'évolution. OPECST, Paris. Assemblée nationale N° 1778, Sénat N° 487. 223p.
- Legrand H., 2009. Base de données cartographiques des fonds marins côtiers de la Martinique. OMMM & Diren, Fort-de-France. 73p.
- Lions J., D. Allier, S. Pinson & B. Vittecoq, 2008. Identification des zones à risque de fond géochimique élevé dans les cours d'eau et les eaux souterraines de la Martinique. *Rapport final*. BRGM - Onema, BRGM/RP-56748-FR. 124p.
- Météo France. Le climat en Martinique. Météo France  
 En général : [http://www.meteo.fr/temps/domtom/antilles/pack-public/meteoPLUS/climat/climat\\_mart.htm](http://www.meteo.fr/temps/domtom/antilles/pack-public/meteoPLUS/climat/climat_mart.htm)  
 Pour 2010 : [http://www.meteo.fr/temps/domtom/antilles/pack-public/alaune/bca\\_2010\\_martinique.pdf](http://www.meteo.fr/temps/domtom/antilles/pack-public/alaune/bca_2010_martinique.pdf)
- Nichols M., 1990. Sedimentologic fate and cycling of Kepone in an estuarine system: example of the James river estuary. *Science of The Total Environment*. **97/98** : 407-440.
- Pantet A., Benamar A. & Robert S., 2010. Rhéologie des sédiments : domaines d'applications en baie de Seine. Communication orale et Poster. – *In* : Actes des 23<sup>èmes</sup> RST, 25-29/10/10, Bordeaux.
- Paulmier G. & F. Durand, 1997. Les peuplements benthiques du plateau insulaire de la Martinique et des zones bathyales adjacentes. Cas particulier de la malacofaune. *Rapport Interne Ifremer RI-DRV/RH/RST/97-8*, 74p.

- Pinson S., B. Vittecoq, D. Allier & V. Mardhel, 2008. Système d'information sur les eaux souterraines de Martinique : synthèse cartographique. *Rapport final*. BRGM - Onema, BRGM/RP/56242-FR. 74p.
- 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.
- Pons J.-C., 1987. Genèse et répartition des produits détritiques dans un contexte volcano-sédimentaire tropical : exemple de la Martinique et de ses bassins adjacents. *Thèse de l'Université Bordeaux 1*. 332p.
- PRAM, 2007. Pollution des sols par la chlordécone aux Antilles. Cahiers du PRAM n°7, 2007  
<http://www.pram-martinique.org/actualite/cahiers-pram-n7.pdf>
- Pujos M., J.-C. Pons & M. Parra, 2000. Evolution des métaux lourds dans la sédimentation récente de la baie de Fort-de-France (Martinique). *Oceanologica Acta* **23**: 701-715.
- Pujos M., J.-L. Gonzalez & J.-C. Pons, 1992. Circulation des eaux sur les plateaux insulaires de Martinique et de Guadeloupe. In Symp. PICG 274/ORSTOM, Cayenne (Guyane), 9-14 Nov 1990 : 415-435.  
[http://horizon.documentation.ird.fr/exl-doc/pleins\\_textes/pleins\\_textes\\_6/colloques2/37537.pdf](http://horizon.documentation.ird.fr/exl-doc/pleins_textes/pleins_textes_6/colloques2/37537.pdf)
- Rizand A., P. Marie & K. Pinte, 2006. La place des scientifiques dans un processus de gestion intégrée des zones côtières : évaluation des pressions polluantes d'origine terrestre sur la baie du Robert (Martinique). *VertigO* **7** (3): 1-14.
- Safège, 2006. Modélisation de la baie du Robert. Rapport final (LG-OR/NB011). 45p.
- Saffache P., 2000a. Un engraissement côtier résultant de l'érosion des bassins-versants cultivés : exemple de la baie du Galion à la Martinique. *Oceanologica Acta*, **23** (2) : 159-166.
- Saffache P., 2000b. Erosion des bassins versants et engraissement côtier : le cas de la baie du Galion (Martinique). *Compte-Rendus de l'Académie des Sciences, Science de la Terre et Planète* **330** : 423-428.
- Schmidt S., J.-M. Jouanneau, O. Weber, P. Lecroat, O. Radakovitch, F. Gilbert & D. Jézéquel, 2007. Sedimentary processes in the Thau Lagoon (France) : from seasonal to century time scales. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* **72** : 534-542.
- Skaar D. R., B. T. Johnson, J. R. Jones & J. N. Huckins, 1981. Fate of Kepone and Mirex in a Model Aquatic Environment: Sediment, Fish, and Diet. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* **38** (8): 931-938.
- Westercamp D. & H. Tazieff, 1980. Guides géologiques régionaux : Martinique, Guadeloupe, Saint-Martin, la Désirade. Masson, Paris, 135p.
- Woignier T. *et al.*, 2010. Relation entre la structure poreuse des argiles allophanes et la fixation de la chlordécone dans les sols volcaniques. Rapport final du programme de recherche financé par le Ministère de l'Outre Mer 2007-2009. 105p.
- Woignier T., 2007. Relation entre la structure poreuse des sols à allophanes et le stockage du carbone : caractérisation expérimentale et modélisation Rapport d'avancement du programme de recherche financé par le Ministère de l'Outre Mer. 34p.
- Woignier T, E. Braudeau, & H. Doumenc, 2005. Supercritical drying applied to natural "gels": allophanic soils. *J. Sol-Gel Sci. Techn.* **36** : 61-68.
- Woignier T, J. Primera, L. Duffours, P. Dieudonné & A. Raada, 2007. Preservation of the allophanic soils structure by supercritical drying. *Micropor. Mesopor. Mat.* **109** : 370- 375