

**Projet HYDROSED MAR :
Mesures hydro-sédimentaires
complémentaires réalisées
en 2017-2018**

Rapport final

BRGM/RP-68220-FR
Septembre 2018

BRGM/RP-68220-FR
Septembre 2018

Projet HYDROSEDMAR : Mesures hydro-sédimentaires complémentaires réalisées en 2017-2018

Rapport final

BRGM/RP-68220-FR
Septembre 2018

Étude réalisée dans le cadre des opérations
de Service public du BRGM

F. Desmazes, S. Lecacheux, G. Verbiese, A.L. Tailame, M. Lombard, D. Idier, R. Pedreros

Vérificateur :

Nom : O. Cerdan

Fonction : Responsable unité

Date : 30/08/2018

Signature :



Approbateur :

Nom : Benoît Vittecoq

Fonction : Directeur régional
Martinique

Date : 27/09/2018

Signature :



Le système de management de la qualité et de l'environnement
est certifié par AFNOR selon les normes ISO 9001 et ISO 14001.



Géosciences pour une Terre durable

brgm

Remerciements

Ce travail de terrain a été réalisé dans des conditions parfois difficiles et la mise en place des instruments dans la Baie de Fort-de-France pendant une année entière n'aurait pas été possible sans l'aide et la contribution d'un grand nombre de personnes et d'intervenants.

Parmi les aides précieuses reçues pour ce travail, il faut donc citer et remercier :

- **Romaric Verney** et **Matthias Jacquet** de **l'Ifremer** pour le prêt de 2 Altus.
- **Aldo Sottolichio** et **Yann Ripaud** de **l'université de Bordeaux 1** pour l'expertise apportée sur la mise en œuvre des Altus, les premiers travaux de traitement et le prêt de 2 structures pour les capteurs.
- **André Dolle** et **Laurie Vincent** de la société **Nortekmed** pour les échanges durant la campagne d'installation en février et mars 2017 et le prêt de sonde et de matériel.
- **Guillaume Tollu** et **Jérôme Letellier** de la société **Impact Mer** pour leur connaissance de la Baie de Fort-de-France et de ses mangroves, pour leur contribution lors de l'installation, des entretiens, des prélèvements d'eau et surtout de la démobilisation des capteurs.
- La société **Carige** pour les tests de prise de vue par drone.
- A **Damien Welschinger** de la société **Histoire d'Air** qui a assuré la grande majorité des déplacements dans la baie avec son bateau Océan et à **Fabrice**, pêcheur de Californie.

Mots-clés :

En bibliographie, ce rapport sera cité de la façon suivante :

F. Desmazes, S. Lecacheux, G. Verbieze, A.L. Tailame, M. Lombard, D. Idier, R. Pedreros (2018) – Projet HYDROSEDMAR : Mesures hydro-sédimentaires complémentaires réalisées en 2017-2018. Rapport final. BRGM/RP-68220-FR, 69 p., 53 ill., 6 tabl., 1 ann.

Synthèse

Le projet HydroSedMar s'inscrit dans le cadre des actions du contrat de baie de Fort-de-France via une convention de Recherche et Développement partagés entre la CACEM et le BRGM. Ce projet a pour but d'améliorer la compréhension sur le fonctionnement hydrosédimentaire de la baie à travers trois grandes actions : (1) Acquisition et analyse de données, (2) Modélisation hydro-sédimentaire et (3) Diffusion et communication auprès des acteurs de la baie et de la communauté scientifique.

Dans le cadre de l'action 1, deux campagnes de mesures d'un mois chacune ont été réalisées par la société Nortekmed. Parallèlement, l'amélioration des connaissances sur les processus hydro-sédimentaires de la baie et des rivières passe également par des observations et des mesures dédiées.

Ce rapport présente la mise en œuvre et les premiers résultats des mesures réalisées en continu entre février 2017 et janvier 2018 pour observer la turbidité à proximité des embouchures des principales rivières et les dépôts sédimentaires en fond de Baie.

- Evolution des fonds aux abords des mangroves

Le premier type de mesures avait pour but de suivre l'évolution de la sédimentation dans les vasières bordant les mangroves en fond de baie, durant l'année 2017. quatre capteurs NKE Altus ont été installés : 2 dans le Cohé du Lamentin (Californie et Morne Cabrit) et 2 dans la Baie de Génipa (Embouchure de la Rivière Salée et Canal Cocotte).

Ces capteurs permettent de suivre l'évolution de la distance entre un échosondeur fixe et le fond. Pour les secteurs instrumentés près de la mangrove de Californie (Altus 1, Cohé du Lamentin) et de l'embouchure de la Rivière Salée (Altus 4, Baie de Génipa), les capteurs n'ont pas permis de mesurer l'évolution du fond durant l'année. Cette absence de mesure est expliquée par la présence de crème de vase trop épaisse qui a empêché, la plupart du temps, la détection d'une interface de vase plus consolidée.

Pour les secteurs de Morne Cabrit (Altus 2, Cohé du Lamentin) et du Canal Cocotte (Altus 3, Baie de Génipa), les mesures ont donné satisfaction. Les séquences d'évolution du fond ont montré l'alternance de phases de baisse de l'interface, puis de remontée. Les phases de baisse ont été interprétées comme le signe du tassement de la vase fluide. Tandis que les phases de remontée du fond ont été interprétées comme des augmentations de la concentration de la crème de vase superficielle, se transformant rapidement en vase fluide détectable par l'échosondeur de l'Altus.

- Turbidité au niveau des embouchures

Le second type de mesures avait pour but de suivre la turbidité aux environs des embouchures des deux principales rivières de la Baie de Fort-de-France. Les capteurs installés dans la rivière Lézarde (Pont Spitz) et dans la baie de Génipa (à environ 1000 m de l'embouchure de la Rivière Salée) étaient constitués d'un courantomètre ponctuel Aquadopp couplé à un turbidimètre Campbell de type OBS3+ avec balai nettoyant. Parallèlement, un protocole de prélèvement d'eau permettant des mesures de turbidité en laboratoire a été établi pour suivre

l'extension du panache turbide de ces rivières dans la Baie de Fort-de-France, lors d'un épisode de crue.

Dans la Lézarde, le système de mesure a bien fonctionné durant l'année 2017. La turbidité moyenne est de 30 NTU ; mais en dehors de conditions de crue, la turbidité est plutôt comprise entre 10 et 20 NTU. Les pics de turbidité observés sont bien corrélés à l'augmentation du niveau d'eau et du débit en crue. Les périodes de fortes turbidités sont fréquentes : de 3 à 8 pics supérieurs à 100 NTU par mois. Les deux plus forts pics observés en 2017 ont dépassé 1000 NTU.

Dans la Baie de Génipa, à la limite des très petits fonds vaseux qui s'étendent tout autour de l'embouchure de la Rivière Salée, les données collectées par le turbidimètre sont bruitées et de qualité inférieure. La salissure du capteur a nécessité le nettoyage des données et le signal est souvent peu interprétable sans un filtrage préalable. La valeur moyenne de la turbidité est de 3 NTU, globalement très faible. La turbidité évolue dans la journée entre 2 et 6 NTU en fonction du niveau d'eau et à la limite de détection du capteur. Les pics de turbidité bien distincts sont peu fréquents dans les données nettoyées et n'ont pas dépassées 300 NTU.

La campagne de suivi de la turbidité de la Baie de Fort-de-France en crue a été menée environ 48 h après le passage du cyclone Maria (18-19 septembre 2017). Les prélèvements et analyses en laboratoire des échantillons d'eau indiquent que les turbidités étaient faibles à proximité des embouchures et très faibles en s'éloignant. Ces observations montrent qu'assez rapidement après un événement majeur, la turbidité de la Baie de Fort-de-France redevient faible et les eaux claires. Ces observations sont en accords avec les suivis de turbidité opérés simultanément et qui montrent bien que l'épisode turbide, lié au cyclone, a vite diminué d'intensité peu après son passage.

Ces données apportent de nouvelles informations sur les conditions de sédimentation en fond de Baie, près des mangroves et sur la turbidité des rivières et des petits fonds près des embouchures. Ces informations seront à croiser et interprétées avec les mesures des deux campagnes réalisées par Nortekmed. Il s'agira également de mettre en relation ces données avec les forçages (agitation, courant) modélisés pour toute l'année 2017, dans l'ensemble de la Baie. Enfin, ces informations nouvelles seront utiles pour des études ultérieures sur la Baie de Fort-de-France et seront mise à disposition sur le site du projet HydroSedMar.

Sommaire

1. Introduction	11
2. Evolution des fonds aux abords des mangroves.....	13
2.1. CARACTERISTIQUE TECHNIQUE DE LA CAMPAGNE «HSM-ALTUS ».....	13
2.2. DEROULEMENT DE LA CAMPAGNE	14
2.2.1. Installation des capteurs	14
2.2.2. Programmation des Altus.....	17
2.2.3. Entretien régulier des capteurs	18
2.2.4. Déplacement de l'Altus n°4 en août 2018	18
2.2.5. Bilan	19
2.3. MESURES COMPLEMENTAIRES.....	20
2.3.1. Campagne bathymétrique.....	20
2.3.2. Analyses sédimentaires	20
2.4. RESULTATS.....	21
2.4.1. Altus 1, Cohé du Lamentin, Californie	21
2.4.2. Altus 2, Cohé du Lamentin, Morne Cabrit	23
2.4.3. Altus 3, Baie de Génipa, Canal Cocotte	26
2.4.4. Altus 4, Baie de Génipa (Rivière Salée, puis Canal Cocotte)	30
3. Turbidité au niveaux des embouchures	33
3.1. CARACTERISTIQUE TECHNIQUE DES CAMPAGNES «HSM-TURBIDITE » 33	
3.1.1. Généralités	33
3.1.2. Suivi en continu	33
3.1.3. Prélèvements d'eau et suivi de l'extension des panaches turbides	34
3.2. DEROULEMENT DE LA CAMPAGNE DE SUIVI EN CONTINU	34
3.2.1. Implantation des capteurs	34
3.2.2. Programmation des capteurs	38
3.2.3. Entretien régulier des instruments.....	38
3.2.4. Bilan	39
3.3. DEROULEMENT DES CAMPAGNES DE PRELEVEMENTS D'EAU ET DE SUIVI DE L'EXTENSION DES PANACHES TURBIDES	40
3.3.1. Prélèvements autour des Altus	40
3.3.2. Extension des panaches turbide en crue	41
3.3.3. Bilan	42
3.4. RESULTATS.....	44
3.4.1. Suivi en continu	44

3.4.2. Prélèvement d'eau dans la baie.....	48
4. Conclusions	55
Bibliographie.....	59

Liste des figures

Illustration 1 : Capteur Altus NKE installé sur son trépied sur un estran. Le cadre triangulaire présenté ici est plus large que le cadre utilisé pour cette campagne.	13
Illustration 2 : Carte de positionnement des Altus dans la Baie de Fort-de-France. Fond cartographique : IGN.....	14
Illustration 3 : altus 3 les pieds équipés d'hélices sont enfoncés simultanément par vissage	16
Illustration 4 : altus 4 : capteur immergé , altus 3 : capteur légèrement émergé pendant la marée basse, vérification de l'horizontalité.	16
Illustration 5 : Démarrage des acquisitions.....	16
Illustration 6 : Altus 3 implantation GPS centimétrique	17
Illustration 7 : Altus 3 en place, lors de l'entretien du 28/04/2017.	17
Illustration 8 : Position de l'Altus 4 déplacé le 1 ^{er} août à proximité de l'Altus 3, sur la vasière intertidale de la Baie de Génipa, à proximité de l'embouchure du canal Cocotte.	19
Illustration 9 : Cartes des données bathymétriques acquises dans le cadre du projet. Le MNT permet une première visualisation des données de profondeurs brutes collectées.	20
Illustration 10 : Profondeur du fond ou de l'interface sédimentaire détectée par l'Altus 1 (sensibilité de détection maximale : seuil 005) à Californie, dans la Cohé du Lamentin entre février 2017 et janvier 2018. Lors des missions d'entretien, la profondeur du fond observé a également été mesurée approximativement au réglet.....	22
Illustration 11 : Profondeur du fond ou de l'interface sédimentaire détectée par l'Altus 1 (seuils 005 et 045) et hauteur d'eau enregistrées à Californie, dans la Cohé du Lamentin, durant le cyclone Maria.	23
Illustration 12 : Profondeur du fond ou de l'interface sédimentaire détectée par l'Altus 1 (seuils 005 et 045) et hauteur d'eau enregistrées à Californie, dans la Cohé du Lamentin, au début du mois de septembre.	23
Illustration 13 : Profondeur du fond ou de l'interface sédimentaire détectée par l'Altus 2 (sensibilité de détection maximale : seuil 025 puis 005) à Morne Cabrit, dans la Cohé du Lamentin entre février 2017 et janvier 2018. Les données étant bruitées, les interfaces ont été surlignées en jaune manuellement. Lors des missions d'entretien, la profondeur du fond observé a également été mesurée au réglet.	25
Illustration 14 : Profondeur du fond ou de l'interface sédimentaire détectée par l'Altus 2 (seuil 025 et 005 quand disponible) à Morne Cabrit, dans la Cohé du Lamentin, entre février et avril 2017.....	25
Illustration 15 : Profondeur du fond ou de l'interface sédimentaire détectée par l'Altus 2 (seuil 005 et 025) à Morne Cabrit, dans la Cohé du Lamentin, entre juin et fin octobre 2017.	26
Illustration 16 : Vue de détail des données de profondeur enregistrées par l'Altus 2 (seuil 005 et 025) à Morne Cabrit, dans la Cohé du Lamentin, en août 2017.	26

Illustration 17 : Profondeur du fond ou de l'interface sédimentaire détectée par l'Altus 3 (seuil 025) près du Canal Cocotte, dans la Baie de Génipa entre février 2017 et janvier 2018.	28
Illustration 18 : Profondeur du fond ou de l'interface sédimentaire détectée par l'Altus 3 (seuil 025 et 045), dans la Baie de Génipa, entre février et juillet 2017.	28
Illustration 19 : Profondeur du fond ou de l'interface sédimentaire détectée par l'Altus 3 (seuil 025 et 045), dans la Baie de Génipa, entre juin et octobre 2017.	29
Illustration 20 : Profondeur du fond ou de l'interface sédimentaire détectée par l'Altus 3 (seuil 025 et 045) dans la Baie de Génipa, entre septembre 2017 et janvier 2018.	29
Illustration 21 : Profondeur du fond ou de l'interface sédimentaire détectée par l'Altus 4 (seuil 025 et 005), près de l'embouchure de la Rivière Salée, dans la Baie de Génipa entre février 2017 et août 2018.	30
Illustration 22 : Profondeur du fond ou de l'interface sédimentaire détectée par l'Altus 4 (seuil 005), près du Canal Cocotte, dans la Baie de Génipa entre août 2017 et janvier 2018.	31
Illustration 23 : Installation du système de mesure de la turbidité, détail sur le capteur de turbidité OBS3+ équipé d'un balai de nettoyage automatique et sur le principe de mesure ponctuelle du courant par effet Doppler de l'Aquadopp Nortek.	34
Illustration 24 : Carte de situation du Pont Spitz sur la rivière Lézarde.	35
Illustration 25 : Détails du Pont Spitz (Rivière Lézarde)	35
Illustration 26 : Système de mesure mis en place dans la rivière Lézarde.	36
Illustration 27 : carte du secteur de mouillage pour la Rivière Salée.	36
Illustration 28 : Schéma du mouillage permettant le suivi de la turbidité à proximité de l'embouchure de la Rivière Salée.	37
Illustration 29 : Image du mouillage et du capteur avant mise à l'eau (a). Vue de la surface après mise à l'eau (b).	37
Illustration 30 : Etat de salissure du mouillage et du capteur de turbidité le 28/04/17 après 6 semaines.	39
Illustration 31 : Carte de positionnement des turbidimètres OBS dans la Baie de Fort-de-France et la rivière Lézarde. Fond cartographique : IGN.	40
Illustration 32 : Plan de prélèvement des échantillons d'eau pour l'analyse de la turbidité et des MES aux abords des Altus lors de l'installation des capteurs.	41
Illustration 33 : Sonde multiparamètre Aquatroll sur le support installé à proximité de l'Altus 1 et zoom sur le balais nettoyeur intégré.	41
Illustration 34 : Plan d'échantillonnage prévisionnel des campagnes de prélèvements d'eau pour le suivi des panaches turbide en crue a) La Lézarde b) Rivière Salée.	42
Illustration 35 : a) prélèvement d'eau avec la bouteille Niskin et conditionnement en bouteille PVC, puis glacière par Impact Mer et le BRGM b) lancement du drone par Carige pour les test d'images aériennes.	42
Illustration 36 : Carte de positionnement des différents prélèvements d'eau réalisés dans la Baie de Fort-de-France en 2017 et 2018. Fond cartographique : IGN.	43
Illustration 37 : Suivi en continu de la turbidité dans la rivière Lézarde, pont Spitz, entre mars 2017 et janvier 2018.	45
Illustration 38 : Histogramme des pics de turbidité par mois.	45
Illustration 39 : Mesures de turbidité et de hauteurs d'eau sur la Lézarde au mois de septembre. Le pic du 19 septembre correspond au passage du cyclone Maria. Données de pluviométrie : aéroport du Lamentin, source : Météo France.	46

Illustration 40 : Suivi en continu de la turbidité dans la baie de Génipa, à proximité de l'embouchure de la Rivière Salée, entre mars 2017 et janvier 2018. Certaines données acquises ont été supprimées de l'analyse pour cause de salissure du capteur.	47
Illustration 41 : Mesures du turbidité dans la Baie de Génipa, à l'embouchure de la Rivière Salée au mois d'avril 2017.	48
Illustration 42 : Mesures de turbidité et de hauteurs d'eau au mouillage de la Baie de Génipa, embouchure de la Rivière Salée au début du mois d'août 2017.	48
Illustration 43 : Campagne de prélèvements d'eau et d'analyse de la turbidité aux abords des mangroves en février et mars 2017.	49
Illustration 44 : Résultats des 3 campagnes de prélèvement d'eau et d'analyse de turbidité en laboratoire au niveau des capteurs Altus, l'état de la marée lors au moment du prélèvement est mentionné (PM : Pleine Mer / PM+1 : Pleine Mer+ 1h / BM : Basse Mer / BM-1 : Basse Mer -1h).	49
Illustration 45 : Forte salissure d'origine biologique sur les capteurs et le balai de nettoyage de la sonde multiparamètre Aquatroll.	50
Illustration 46 : Enregistrement de la turbidité et du niveau d'eau avec la sondes Aquatroll 6000 au niveau de l'Altus 1 entre le 14 octobre et le 3 novembre 2017.	50
Illustration 47 : Résultat cartographique des analyses de turbidité des prélèvements effectués le 03/03/2017 au matin autour de l'embouchure de la Rivière Salée. Les chiffres du haut, associés aux petits ronds correspondent aux prélèvements de surface, les chiffres du bas, associés aux ronds plus grands correspondent aux prélèvements de fond.	51
Illustration 48 : Résultat cartographique des analyses de turbidité des prélèvements effectués le 21/09/2017 au matin autour de l'embouchure de la Lézarde, après le passage du cyclone Maria. Les chiffres de gauche, associés aux grands ronds correspondent aux prélèvements de fond, les chiffres de droite, associés aux ronds plus petits correspondent aux prélèvements de surface.	52
Illustration 49 : Suivi en continu de la turbidité et du niveau de la rivière Lézarde durant le cyclone Maria et la campagne de prélèvement du 21/09/17. Données de pluviométrie journalière : source Météo France.	52
Illustration 50 : Résultat cartographique des analyses de turbidité des prélèvements effectués le 21/09/2017 après-midi autour de l'embouchure de la Rivière Salée, après le passage du cyclone Maria. Les chiffres du haut, associés aux petits ronds correspondent au prélèvements de surface, les chiffres du bas, associés au ronds plus grands correspondent aux prélèvements de fond.	52
Illustration 51 : Suivi en continu de la turbidité, données de débit de la Rivière Salée et de pluviométrie durant le cyclone Maria et la campagne de prélèvement du 21/09/17. Données de pluviométrie journalière : source Météo France et débit journalier : source DEAL.	53
Illustration 52 : Vue aérienne par drone de l'embouchure de la Lézarde lors de la campagne de prélèvements du 21/09/2017.	53
Illustration 53 : Vues aériennes par drone de l'embouchure de la Rivière Salée lors de la campagne de prélèvements du 21/09/2017.	53

Liste des tableaux

Tableau 1 : Bilan des données Altus collectées entre février 2017 et janvier 2018 dans la Baie de Fort-de-France.	19
Tableau 2 : Paramétrage des 2 capteurs Aquadopp pilotant les capteurs de turbidité OBS3+..	38
Tableau 3 : Date des interventions d'entretien et de récupération des données sur les turbidimètres installés dans la Lézarde et à l'embouchure de la Rivière Salée.	38
Tableau 4 : Bilan des données de turbidités collectées entre février 2017 et janvier 2018 dans la Baie de Fort-de-France et la rivière Lézarde.	39
Tableau 5 : Typologie et classification des pics de turbidité observés par mois dans la rivière Lézarde. Le pourcentage de données exploitable par mois est indiqué en % par mois.	45
Tableau 6 : Typologie et classification des pics de turbidité observés par mois à l'embouchure de la Rivière Salée.....	47

Liste des annexes

5. Annexe 1 Travaux préparatoires à l'installation des capteurs Altus **Erreur ! Signet non défini.**

1. Introduction

L'amélioration des connaissances sur le fonctionnement hydro-sédimentaire de la baie de Fort de France fait partie des actions inscrites dans le contrat de baie de Fort-de-France porté par la Communauté Agglomération Centre Martinique (CACEM). Dans le cadre du volet 4 de la convention de Recherche et Développement partagés CACEM – BRGM (2012-2014), une collecte des besoins a été effectuée par le BRGM auprès des différents acteurs de la baie (Idier et al., 2014). Parmi les besoins identifiés figure notamment la nécessité d'améliorer les connaissances sur les courants, les flux sédimentaires et la turbidité, qui ont des implications sur différentes thématiques à enjeux pour la baie de Fort-de-France telles que la biodiversité, le suivi des polluants ou la modification du trait de côte.

Sur la base de ces besoins, un programme général de caractérisation de la dynamique hydro-sédimentaire, intitulé « projet HydroSedMar » a été défini dans le but d'améliorer de compréhension sur le fonctionnement de la baie. Ce projet vise à la fois à produire des données hydro-sédimentaires par acquisition ou modélisation et à communiquer sur ces données auprès des acteurs de la baie, de la communauté scientifique et de la population. Il est organisé en 3 actions: (1) Acquisition et analyse de données, (2) Modélisation hydro-sédimentaire et (3) Diffusion et communication.

La phase d'acquisition et analyse de données se base sur un programme de campagne de mesures lancée en février 2017. Une partie de ce programme a été réalisé par la société Nortekmed qui a procédé à l'implantation de 5 points de mesures de l'hydrodynamique sédimentaire dans la baie pour deux campagnes d'une durée d'1 mois, en période de Carême et d'hivernage. Ces campagnes sont décrites dans 2 rapports de Nortekmed (Vincent, 2017 a et b).

Le présent rapport détaille les mesures réalisées par le BRGM dans la Baie de Fort de France, en complément de celles réalisées par NortekMed. Il distingue deux principaux types de mesures :

- L'implantation de 4 points de mesures de la profondeur des fonds marins aux abords des mangroves pour une durée d'un an.
- L'implantation de 2 points de suivi de la turbidité au niveau des embouchures des 2 principales rivières de la Baie pour une durée d'un an.

Pour chaque type de mesures, le rapport présente les caractéristiques des systèmes de mesures mis en œuvre, puis le déroulement de la campagne est expliqué avant de présenter les résultats obtenus.

2. Evolution des fonds aux abords des mangroves

2.1. CARACTERISTIQUE TECHNIQUE DE LA CAMPAGNE «HSM-ALTUS »

Les mesures de profondeur du fond permettent de suivre les phases de dépôt et d'érosion avec une précision de quelques millimètres et ainsi mieux comprendre la dynamique sédimentaire aux abords des mangroves. En fonction des taux de sédimentation, il est utile de réaliser les observations sur une période suffisamment longue.

Le capteur NKE Altus permet d'observer des évolutions fines du fond marin sur le long terme, de l'ordre du millimètre (Jestin et al., 1998). Parallèlement, le capteur d'agitation inclus dans l'Altus fournit des informations sur le niveau d'eau voire l'agitation locale. L'altimètre est un échosondeur fixé au-dessus du fond marin dans une structure triangulaire en acier inoxydable formant un trépied. Le trépied est implanté grâce à trois vis métalliques dont la longueur dépend de la densité du fond. Le capteur de pression est intégré dans un autre compartiment qui comporte l'alimentation et la carte mémoire. Cette partie, reliée à l'altimètre par un câble, peut être manipulée et remontée à la surface pour collecter les données enregistrées. Selon la configuration de l'appareil, la fréquence d'acquisition peut atteindre 2Hz, ce qui permet d'avoir des informations sur l'effet des phénomènes de courte fréquence comme les vagues.



Illustration 1 : Capteur Altus NKE installé sur son trépied sur un estran. Le cadre triangulaire présenté ici est plus large que le cadre utilisé pour cette campagne.

Pour optimiser la mise en place de ces mesures, le BRGM a fait appel aux compétences de la société Impact Mer qui connaît très bien les milieux de mangrove de la Baie de Fort-de-France. A. Sottolichio, chercheur à l'université de Bordeaux et spécialiste de la dynamique sédimentaire en milieu côtier et dans les zones d'embouchure, a apporté également son expertise et son expérience du déploiement des Altus. Enfin, le laboratoire DYNECO de l'IFREMER a prêté deux Altus durant un an pour cette campagne de mesure.

Après des échanges avec les différents partenaires et le comité de pilotage, il a été convenu que deux Altus seront implantés au nord de la baie, dans le secteur de la Cohé du Lamentin et deux autres seront installés dans la Baie de Génipa.

2.2. DEROULEMENT DE LA CAMPAGNE

L'occupation temporaire du domaine public maritime a été autorisée par le Préfet de Martinique le 11/01/2017 par l'arrêté R02-2017-01-11-001.

Deux capteurs ont été déployés dans la Cohé du Lamentin (Illustration 2) : l'Altus 1 au niveau de Californie et l'Altus 2 à Morne Cabrit. Les deux autres capteurs Altus ont été installés dans la Baie de Génipa (Illustration 2) : l'Altus 3 à proximité de l'embouchure du Canal Cocotte et l'Altus 4 près de l'embouchure de la Rivière Salée. La position précise est fournie dans le Tableau 1.

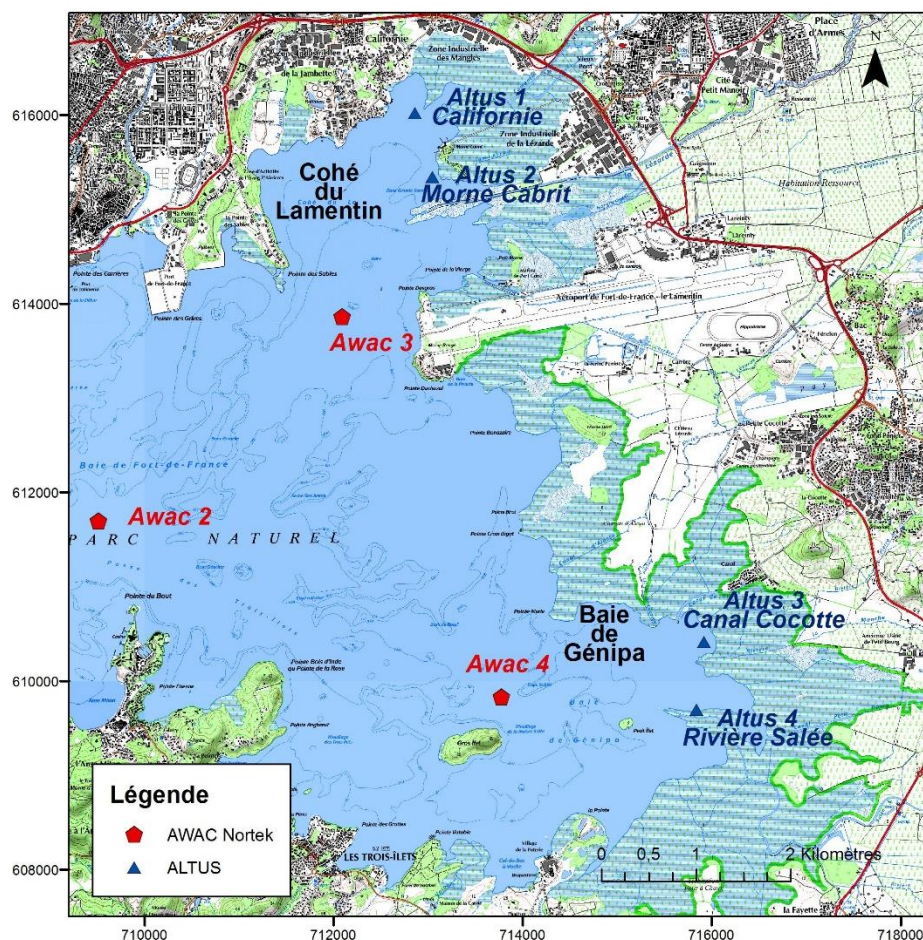


Illustration 2 : Carte de positionnement des Altus dans la Baie de Fort-de-France. Fond cartographique : IGN.

2.2.1. Installation des capteurs

La journée d'installation des altimètres s'est déroulée le vendredi 24 février 2017.

Le protocole suivant a été mis en œuvre pour installer les capteurs Altus :

- Les 3 pieds de 4 m de longueur, équipés d'hélices, sont enfoncés indépendamment dans la vase sur une hauteur d'environ 2,5 m.
- Le cadre triangulaire équipé du capteur est installé sur les 3 pieds.
- Les 3 pieds sont enfoncés simultanément sur environ 1m.
- Lorsque l'enfoncement direct au fond devenait difficile, des poignées adaptées ou des clés ont permis de visser les pieds ; les hélices favorisant la pénétration dans les sédiments plus indurés.
- Lorsque le capteur atteint l'eau, l'horizontalité est surveillée attentivement au fur et à mesure de l'enfoncement de la structure sous l'eau.
- L'enfoncement est adapté pour qu'à marée basse, le sommet de la structure affleure afin de permettre la vérification régulière de l'horizontalité.
- Une fois la structure en place et horizontale, le sommet de la structure, composé de 3 éléments en inox, est mesuré au GPS centimétrique. Chaque élément est observé durant 2 à 3 min pour garantir une donnée d'altitude post-traité de qualité.
- Le datalogger est installé (sur le trépied ou sur une tige indépendante), l'acquisition est lancée à partir d'un PC durci installé sur un kayak.
- La profondeur de l'altimètre et du datalogger sont mesurées et notées.
- Un petit corps-mort équipé d'un flotteur discret (et éventuellement d'une plaque informant de la nature des travaux scientifique en cours) est disposé à environ 5m au large du capteur pour faciliter le repérage et la récupération du matériel.

L'implantation dans une faible profondeur d'eau et en limite d'émersion présente l'avantage d'être très discrète par rapport à une installation sur l'estran. Elle permet également de pouvoir être entretenue à marée basse, sans l'intervention de plongeurs professionnels.

La mise en place du point n°3 (Baie de Génipa, canal Ducos) a présenté des difficultés : les 50 derniers centimètres ont été enfoncés à l'aide d'une masse.

Pour le point n°4, la profondeur d'eau au-dessus de la structure est légèrement plus importante. Le sommet de la structure affleure lors des basses mers de vive-eau.

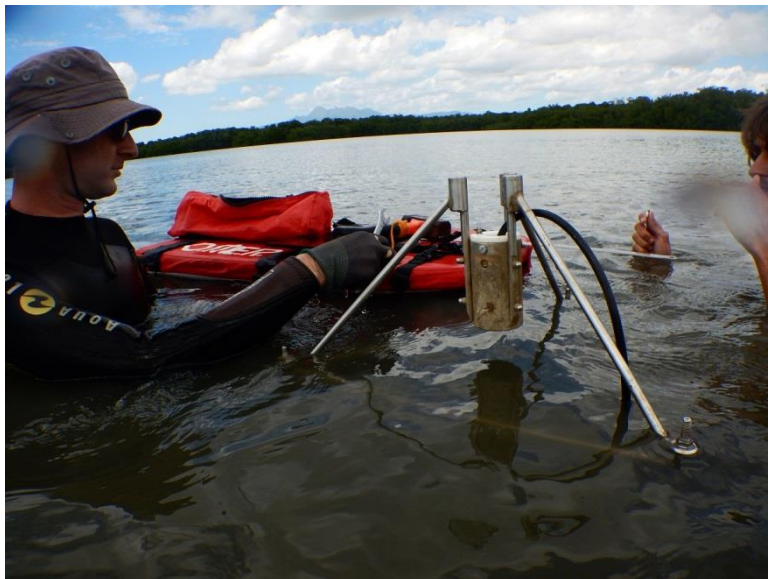


Illustration 3 : altus 3 les pieds équipés d'hélices sont enfoncés simultanément par vissage



a)



b)

Illustration 4 : altus 4 : capteur immergé , altus 3 : capteur légèrement émergé pendant la marée basse, vérification de l'horizontalité.



Illustration 5 : Démarrage des acquisitions

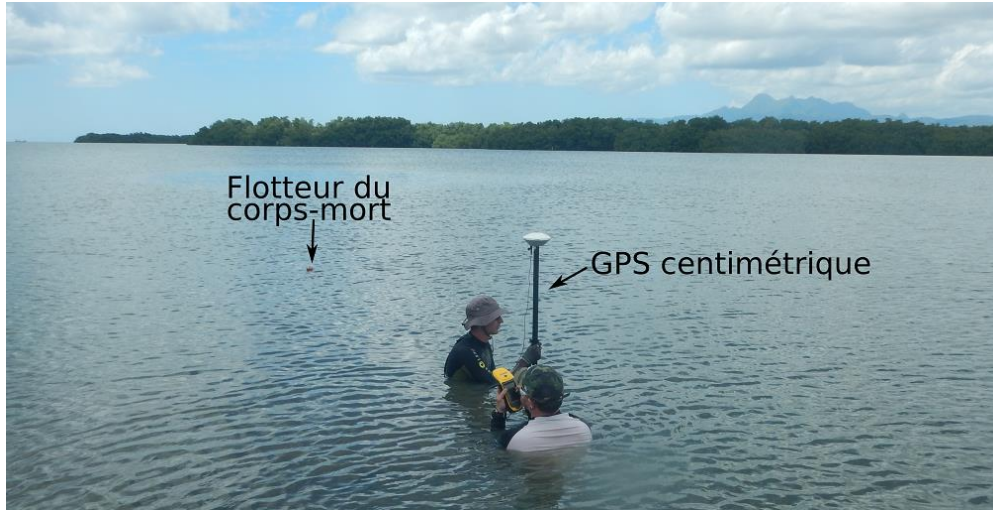


Illustration 6 : Altus 3 implantation GPS centimétrique



Illustration 7 : Altus 3 en place, lors de l'entretien du 28/04/2017.

2.2.2. Programmation des Altus

Les mesures Altus doivent permettre de mesurer simultanément l'évolution du fond sur plusieurs mois et les conditions de niveau d'eau. Pour certaines configurations, il est également possible de suivre l'agitation, bien que ces mesures soient très consommatrices d'espace mémoire et d'énergie.

- Programmation initiale

La programmation initiale de l'Altus visait à mesurer la profondeur et le niveau d'eau toutes les 15min. Dans cette première configuration utilisée, il n'y a pas d'observation de l'agitation du plan d'eau.

La profondeur est mesurée grâce au temps d'aller-retour d'un signal sonore. Cette distance est mesurée sur 4 canaux définis en fonction du taux de signal sonore rétrodiffusé par le fond. Le paramétrage initial établi des seuils de rétrodiffusion pour les valeurs 25 / 45 /90 et 190 (sur 255).

- Amélioration n°1

Un suivi régulier (mensuel) étant réalisé sur les Altus, il a été décidé avec l'aide d'A. Sottolichio (Université de Bordeaux) d'augmenter la cadence de mesure pour mieux suivre l'agitation du plan d'eau et de modifier les seuils de mesures altimétrique pour certains points. Il est convenu de paramétrer les Altus pour réaliser des mesures de 5 min à la cadence de 2Hz, toutes les 20min.

Pour les points pour lesquels l'altimètre ne détecte pas (ou mal) le fond de nouveaux seuils sont définis le 17/03/2017 avec les valeurs : « 5/10/25/45 » pour les points 1, 2, 4 et « 10 / 25 / 45 / 90 » pour le point 3.

- Amélioration n°2

Pour éviter la saturation trop rapide de la mémoire et l'arrêt prématuré des mesures, une option de filtrage interne au capteur a été paramétré pour l'enregistrement des données de profondeur à partir du 08/06/2017 pour les points 2 et 3 : 1 mesure sur 120 est acquise, ce qui correspond à 1 mesure par minute pendant 5 min, toutes les 20 min. La fréquence de mesure du niveau d'eau et de l'agitation est maintenue à 2Hz.

2.2.3. Entretien régulier des capteurs

Un suivi régulier des capteurs est nécessaire pour vérifier leur état de fonctionnement, nettoyer, sauvegarder les données, procéder aux réglages et modification de paramètres si besoin.

La récupération des données et l'entretien des structures des capteurs ont eu lieu les : 03 mars, 17 mars, 28 avril, 8 juin, 1^{er} août, 13 octobre et 11 décembre 2017.

Les actions réalisées lors de ces entretiens sont notées dans une fiche de terrain informatique qui est sauvegardée et fourni avec les données brutes.

Il faut noter que lors du suivi du 13/10/2017, l'Altus 2 situé à Morne Cabrit est apparu endommagé au niveau du datalogger. L'appareil a été ramené au bureau, le câble a été testé et ressoudé avant d'être réinstallé le 18 octobre.

La récupération des capteurs et des structures a été effectués les 15 et 16 janvier 2018.

2.2.4. Déplacement de l'Altus n°4 en août 2018

Les premières données Altus qui ont été collectées lors des missions d'entretiens ont montré que deux capteurs (Altus 1-Californie et Altus 4-Rivière Salée) ne donnaient pas de résultats satisfaisants. Malgré les tests et les différents réglages mis en œuvre, les appareils ne détectent pas le fond, constitué de vase trop fluide pour ce type de capteur. Pour optimiser l'utilisation des structures et des capteurs, des adaptations ont été réalisées :

Pour l'Altus 4 : déplacement de la structure pour une installation à proximité de l'Altus 3, environ 30 m plus haut sur la zone intertidale (Illustration 8).

Pour l'Altus 1 : pas de déplacement de l'appareil, mais installation complémentaire d'un capteur de turbidité sur la structure (voir partie suivante Turbidité au niveaux des embouchures, § 3.3.1 et 3.4.2).

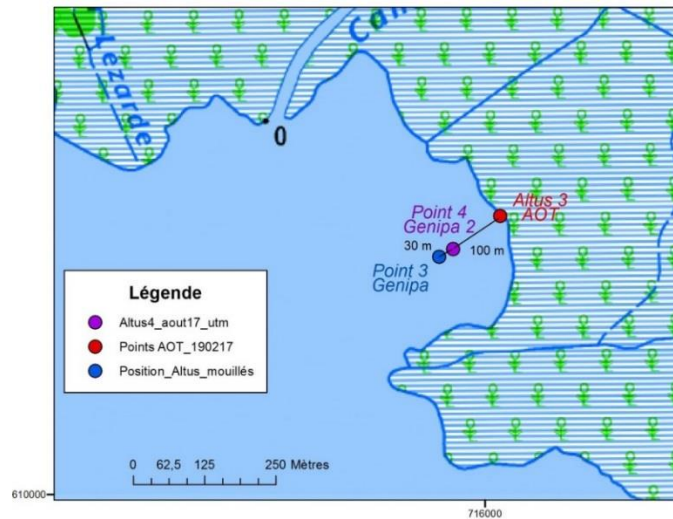


Illustration 8 : Position de l'Altus 4 déplacé le 1^{er} août à proximité de l'Altus 3, sur la vasière intertidale de la Baie de Génipa, à proximité de l'embouchure du canal Cocotte.

2.2.5. Bilan

Point de mesure	Position (UTM20 –IGN87)	Dates disponibles (tout ou partie des mesures)	% données exploitables
Altus 1 Californie	X : 715842,16 y : 1609700,92 z : 0,053 m	du 03/03/2017 au 08/06/2017 du 01/08/2018 au 17/01/2018	77%
Altus 2 Morne Cabrit	x : 713045,15 y : 1615349,33 z : 0,094 m	du 24/02/2017 au 04/04/2017 du 29/04/2017 au 07/05/2017 du 08/06/2017 au 30/09/2017 du 18/10/2017 au 26/10/2017	55%
Altus 3 Canal Cocotte	x : 715919,54 y : 1610415,78 z : 0,138 m	du 24/02/2017 au 22/04/2017 du 29/04/2017 au 15/01/2018	91%
Altus 4 Rivière Salée	X : 715842,16 y : 1609700,92 z : -0,163 m	du 24/02/2017 au 01/08/2017	100%
Altus 4 Canal Cocotte	x : 715944,69 y : 1610429,64 z : 0,270 m	du 01/08/2017 au 17/01/2018	

Tableau 1 : Bilan des données Altus collectées entre février 2017 et janvier 2018 dans la Baie de Fort-de-France.

2.3. MESURES COMPLEMENTAIRES

Pour compléter ces mesures, deux types d'observations complémentaires ont été entreprises sur les secteurs d'intérêts :

- Une campagne bathymétrique pour connaître plus précisément la morphologie des fonds autour de la zone d'implantation des Altus.
- Des prélèvements sédimentaires et analyses sédimentologiques pour mieux connaître la nature des vases constituant les fonds suivis par les Altus.

2.3.1. Campagne bathymétrique

Les mesures ont été réalisées par le BRGM les 22 et 23 août 2017 autour des Altus situés à Californie (Illustration 9a), Morne Cabrit (Illustration 9b) et Canal Cocotte (Illustration 9c).

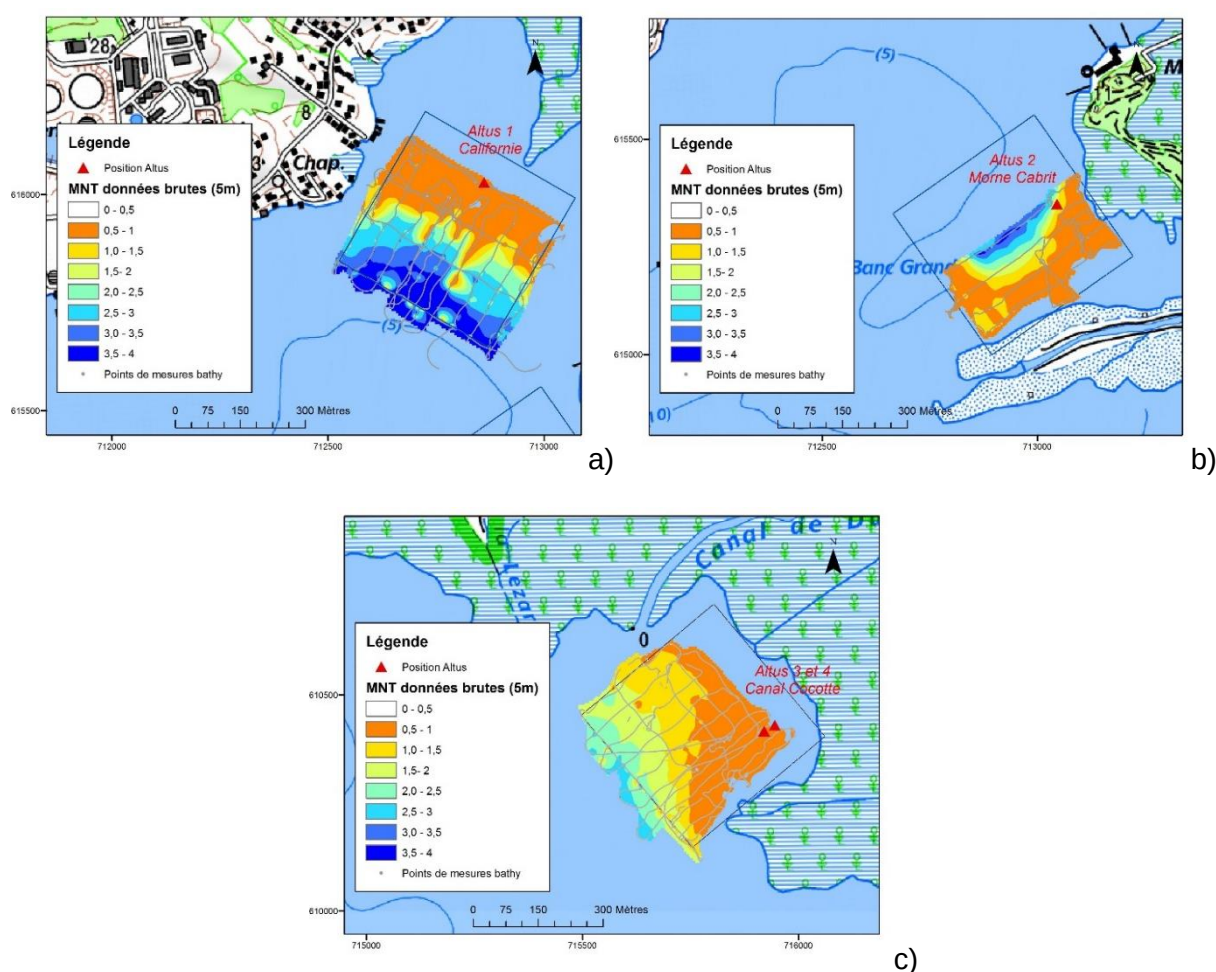


Illustration 9 : Cartes des données bathymétriques acquises dans le cadre du projet. Le MNT permet une première visualisation des données de profondeurs brutes collectées.

2.3.2. Analyses sédimentaires

Des échantillons sédimentaires de vase situés au niveau des différents capteurs Altus ont été prélevés le 8 juin 2017. Les échantillons, placés en glacière, ont été envoyés pour analyse au laboratoire du BRGM à Orléans.

Les analyses pratiquées sur les 4 échantillons sont :

- MES + Teneur en eau
- Granulométrie laser
- Densité sèche
- Calcimétrie
- Carbone organique total par grillage à 550°C
- Identification du cortège argileux par DRX « argile »

Les résultats des analyses sont présentés dans l'annexe 1. Les analyses de MES n'ont pas été réalisées par le laboratoire pour éviter le colmatage des filtres, cependant, les données de teneur en eau et de densité indiquent des concentrations estimées comprises entre 260 et 388 g / L. pour les sédiments prélevés en surface à proximité des Altus. Ces valeurs correspondent à une vase très fluide qui peut être qualifiée de crème de vase (100 à 300 g/l) et de crème de vase consolidée (> 300 g/l ; Desmazes et al., 2010).

2.4. RESULTATS

2.4.1. Altus 1, Cohé du Lamentin, Californie

Les données de profondeur du fond acquises par l'Altus n°1 près de la mangrove de Californie sont peu exploitables pour leur très grande majorité. L'appareil a pourtant bien fonctionné pendant presque toute la campagne de mesure (77% de taux fonctionnement), à l'exception d'un problème de lancement du capteur le 24/02 et d'une panne de batterie entre juin et juillet 2017 (Illustration 10). En effet, les observations faites au mètre (réglet inox) lors des missions d'entretien des capteurs indiquent une distance approximative comprise entre 320 mm et 690 mm entre l'échosondeur et le fond vaseux. Ces distances ne sont pour ainsi dire jamais détectées par l'altimètre, même avec le plus bas seuil de détection (défini à 5 sur 180). Seules 4 périodes très courtes dans le temps ont permis l'observation de possibles interfaces sédimentaires : le 23 mars, le 2 septembre, le 19 septembre durant le cyclone Maria et le 16 janvier 2018, avant le démontage. L'absence de donnée exploitable durant la plus grande partie du temps de mesure est expliquée par la présence de vases fluides ou de crème de vase qui ne permettent pas la réflexion du signal acoustique de l'Altus sur une interface cohérente. L'absence de signal clair dans les données de l'Altus 1 peut s'interpréter également par une absorption importante du signal acoustique dans cette couche vaseuse très fluide. Nous faisons l'hypothèse que c'est l'épaisseur et de la densité de cette crème de vase qui va conditionner la qualité du signal et la capacité de l'appareil à détecter une interface dans la vase en voie de consolidation. Ce type de difficulté a déjà été rencontré dans des environnements de mangroves comparables (bien que beaucoup plus dynamique) en Guyane (Gensac, 2012).

En revanche, durant le cyclone Maria, l'Altus a mesuré quelques points à une profondeur de l'ordre de 500 mm, qui semble très cohérente avec les observations et mesures simples mise en œuvre lors des campagnes d'entretien. La séquence mesurée durant Maria avec l'Altus 1 est présentée dans l'illustration 11. Cette figure ne montre pas d'interface stable à une profondeur donnée. Elle indique une profondeur d'interface qui augmente une première fois au cours de la nuit du 18 septembre 2017 pour atteindre 500 mm à 23h30, au moment de la marée haute, avant de remonter puis de disparaître le 19/09 à 4h00. Le signal réapparaît le matin du 19/09 peu après la marée basse, descendant jusqu'à 508 mm. Ces observations sont expliquées par la très forte agitation provoquée par le cyclone. Nous faisons l'hypothèse que cette agitation a permis de remobiliser la crème de vase, de la mettre en suspension ou de la

déplacer ponctuellement comme cela a déjà été observé sur différentes vasières intertidales estuariennes soumises à de l'agitation (Deloffre et al., 2006) ou des domaines d'embouchures méditerranéennes pour des sédiments plus grossiers (Bourrin, 2007) ou des vasières à mangrove soumise à des courants et à l'agitation des vagues en Guyane (Gensac, 2012). Cette dilution ponctuelle de la crème de vase permet la détection d'une interface solidifiée de plus en plus profonde. A titre de comparaison, la séquence enregistrée début septembre (Illustration 12) montre plus clairement une interface située à 400 mm beaucoup plus stable que lors de la tempête Maria, car observée pendant 5h durant une marée basse. L'explication de ce type d'évènement passe par la prise en compte des conditions environnementales de la Baie et notamment l'analyse des données d'agitation et des seuils capable de provoquer une remise en suspension importante.

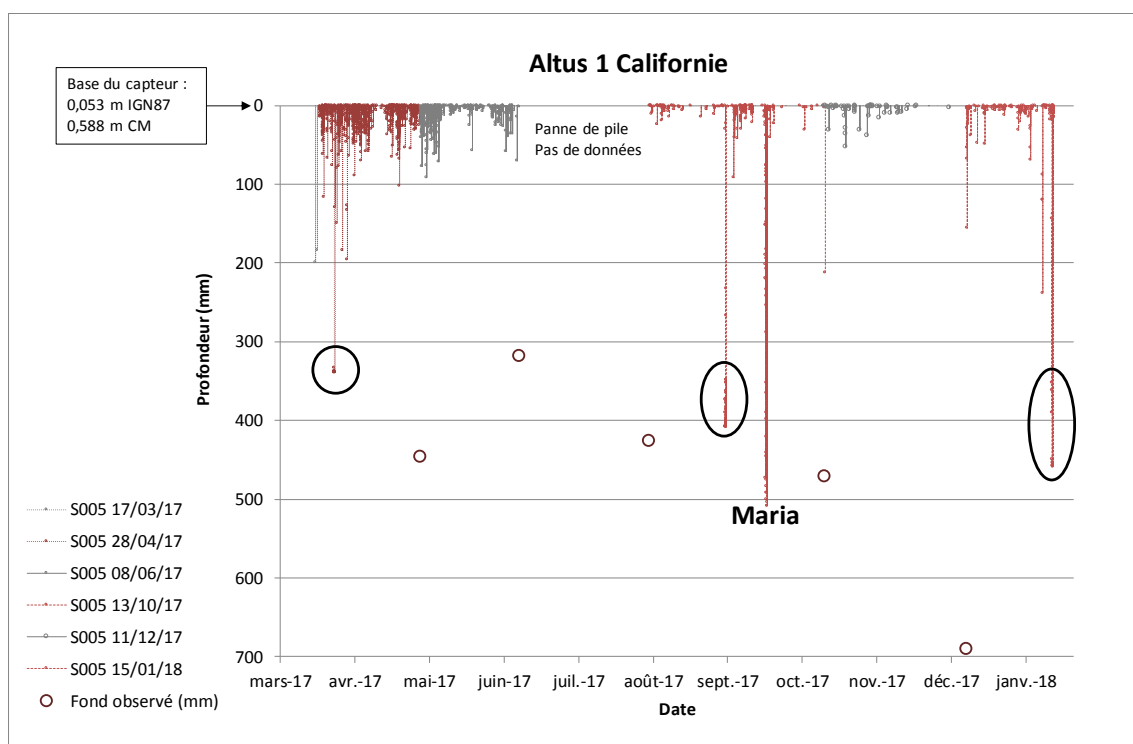


Illustration 10 : Profondeur du fond ou de l'interface sédimentaire détectée par l'Altus 1 (sensibilité de détection maximale : seuil 005) à Californie, dans la Cohé du Lamentin entre février 2017 et janvier 2018. Lors des missions d'entretien, la profondeur du fond observé a également été mesurée approximativement au réglet.

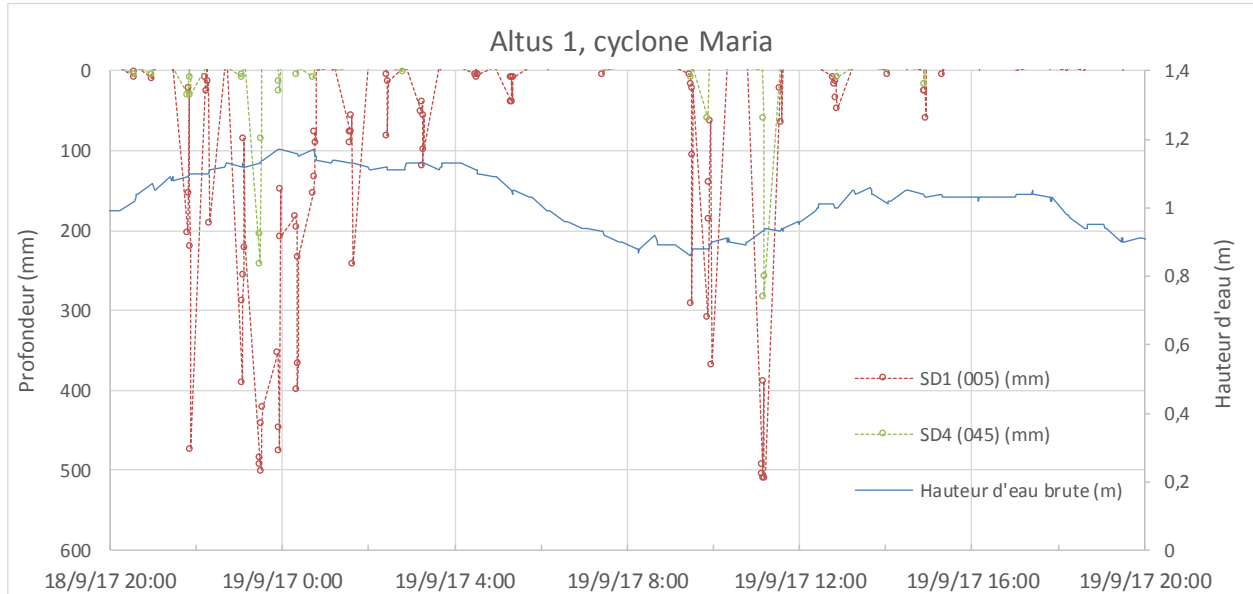


Illustration 11 : Profondeur du fond ou de l'interface sédimentaire détectée par l'Altus 1 (seuils 005 et 045) et hauteur d'eau enregistrées à Californie, dans la Cohé du Lamentin, durant le cyclone Maria.

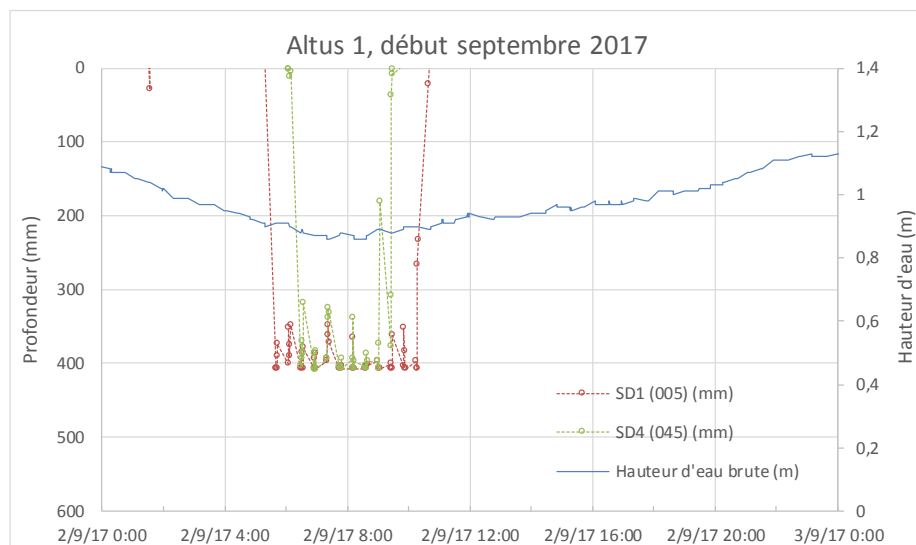


Illustration 12 : Profondeur du fond ou de l'interface sédimentaire détectée par l'Altus 1 (seuils 005 et 045) et hauteur d'eau enregistrées à Californie, dans la Cohé du Lamentin, au début du mois de septembre.

2.4.2. Altus 2, Cohé du Lamentin, Morne Cabrit

L'Altus 2 est situé dans un secteur de la Cohé du Lamentin caractérisé par la présence d'herbiers. Durant la mission, des difficultés d'acquisition ont été rencontrées avec cet appareil. Dans un premier temps, la mémoire saturait très vite à cause d'un bruit trop important. Une fois le réglage trouvé pour éviter ces problèmes, le câble de l'Altus a été retrouvé dégradé en octobre. Au final, le taux d'acquisition de cet appareil est de 55% pour toute la mission. L'illustration 13 montre bien les nombreuses interruptions dans le jeu de données. De plus, le signal très bruité rend l'interprétation difficile, même si les profondeurs maximales atteintes par

les signaux de l'échosondeur montrent une limite en bonne cohérence avec les observations et les mesures réalisées au réglet lors des missions d'entretien. Ainsi, l'interface remonte entre avril et mai avant de redescendre jusqu'à la fin des mesures.

En détail, durant la période de mesure de février et avril 2017 (Illustration 14), le fond apparaît d'abord nettement à 385 mm (seuil 025) jusqu'au 16 mars, date de l'entretien du matériel. A cette date, le seuil 005 est ajouté dans la configuration de l'appareil, mais les mesures ne montrent plus d'interface nette, mais un bruit important dans la colonne d'eau, en liaison avec la présence de végétation (Ganthy, 2012). Cependant, les points mesurés sur le canal dédié au seuil 005 indiquent que l'interface initialement reconnue remonte progressivement jusqu'au 28/03, où des points sont mesurés à 300 mm. Ce bruitage des données, associé à une remontée de l'interface détectée par l'Altus, signent la présence de la végétation et une colonne d'eau très chargée en MES ou une crème de vase qui se densifie en empêchant le passage des ondes acoustiques. Après le 28/03, l'interface n'est plus reconnaissable jusqu'au 05/04 où un point est mesuré plus bas, à 330mm. Cette baisse de l'interface après la phase de remontée et de densification de la crème de vase peut être interprétée soit comme un début d'érosion, soit comme un phénomène de tassement de la vase, processus plutôt associé au dépôt et à la sédimentation. L'hypothèse d'un tassement progressif de la vase fluide et d'une sédimentation active est la plus probable pour expliquer ces mesures car l'environnement de dépôt très protégé de l'agitation et des courants et la présence de grandes épaisseurs de vase.

De juin à octobre (Illustration 15), après une période de coupure dans le jeu de données, la séquence de mesure ressemble à celle observée en mars. Les données sont tout d'abord très bruitées et l'interface mesurée autour de 380 mm de profondeur effectue une légère remontée jusqu'à mi-juillet (de 380 à 350 mm). Puis l'interface descend rapidement jusqu'à 460 mm au début du mois de septembre. Ce phénomène est de nouveau interprété comme un tassement de la vase fluide. L'Illustration 16 : présente plus en détail les données enregistrées durant le mois d'août 2017. On y constate une succession de 3 cycles de remontée de l'interface puis de redescente qui s'étendent sur environ une semaine. L'interprétation de ces observations nécessite la mise en relation avec les conditions de marée, de courant et d'agitation.

Durant le mois de septembre et jusqu'au 13/10 (date de l'entretien du capteur), l'Altus 2 n'a pas enregistré beaucoup de données. Il est possible que les problèmes de câblage détectés lors de l'entretien d'octobre explique ce souci. Il est possible également qu'un fouling important ait pu perturber l'acquisition (présence d'une coquille sur le capteur). Il n'y a donc pas de mesure durant le cyclone Maria. Quelques données ont cependant été enregistrées à la fin du mois de septembre, montrant une interface située à 465 mm, ce qui apparaît cohérent avec les tendances repérées en août.

En octobre, après réparation provisoire du câblage, l'Altus 2 a permis l'acquisition de quelques données supplémentaires entre le 19 et le 26 à une profondeur stable par rapport à fin septembre et cohérente par rapport aux mesures réalisées avec le réglet. Il faut noter dans ces mesures la présence d'une seconde interface très nette située à 225 mm et qui pourrait correspondre au sommet de la végétation (Ganthy, 2012).

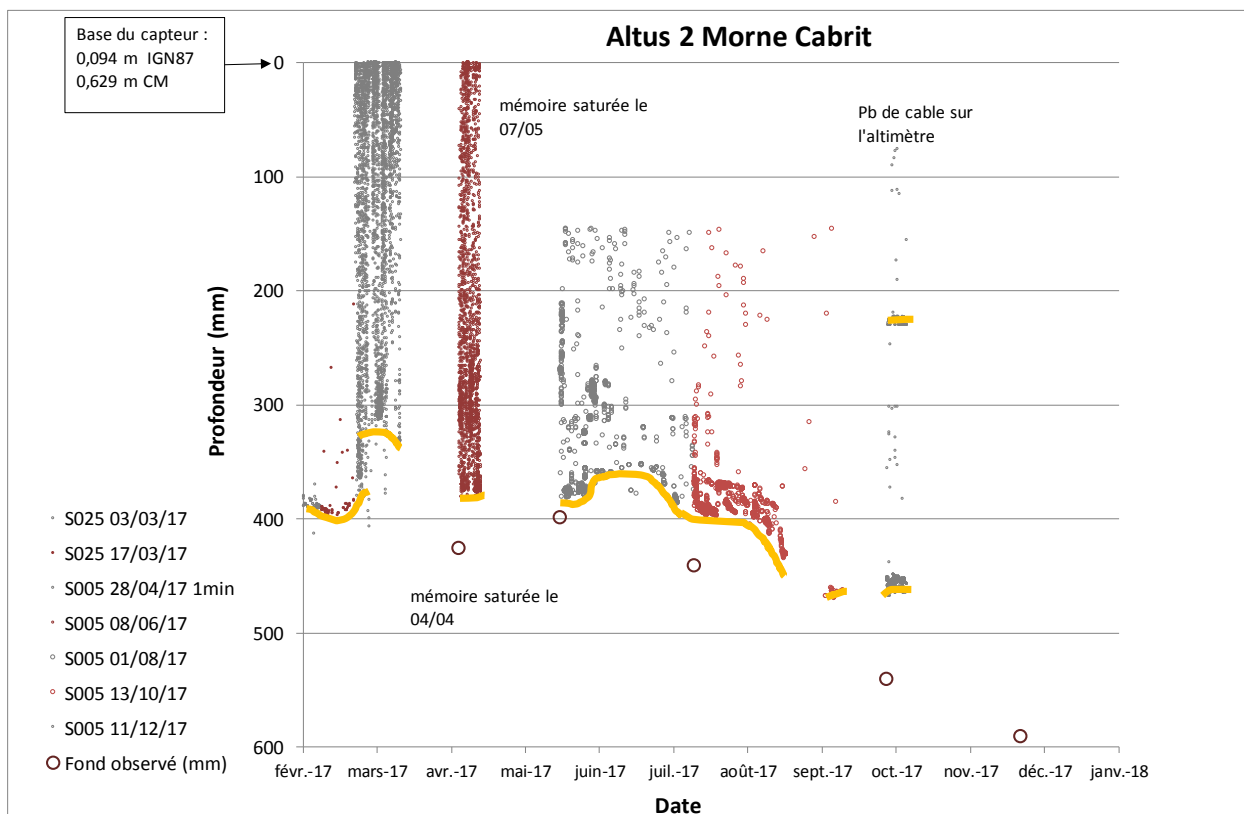


Illustration 13 : Profondeur du fond ou de l'interface sédimentaire détectée par l'Altus 2 (sensibilité de détection maximale : seuil 025 puis 005) à Morne Cabrit, dans la Cohé du Lamentin entre février 2017 et janvier 2018. Les données étant bruitées, les interfaces ont été surlignées en jaune manuellement. Lors des missions d'entretien, la profondeur du fond observé a également été mesurée au régle.

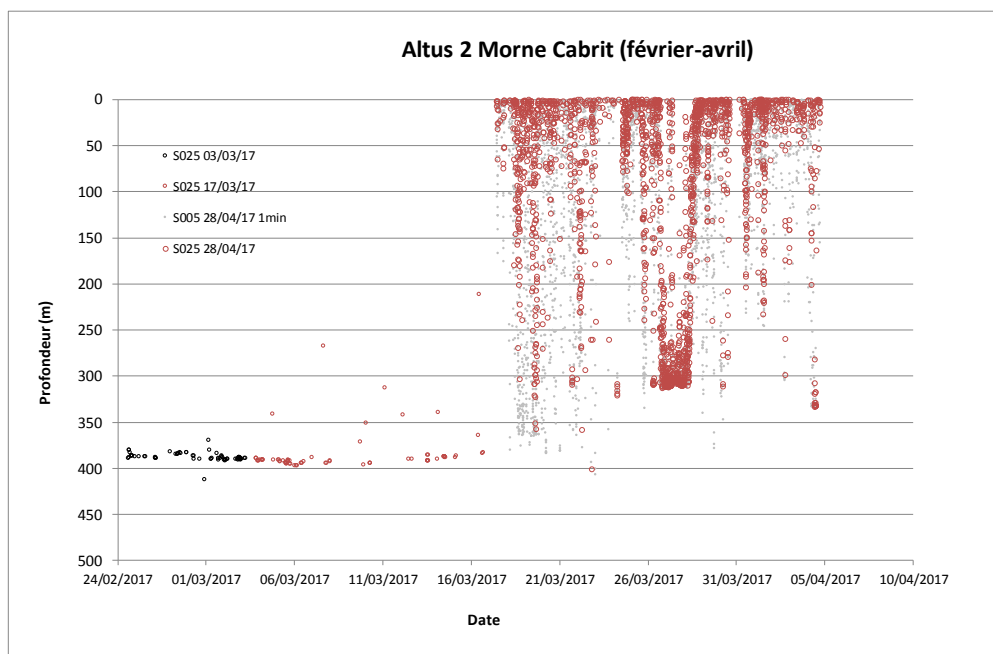


Illustration 14 : Profondeur du fond ou de l'interface sédimentaire détectée par l'Altus 2 (seuil 025 et 005 quand disponible) à Morne Cabrit, dans la Cohé du Lamentin, entre février et avril 2017.

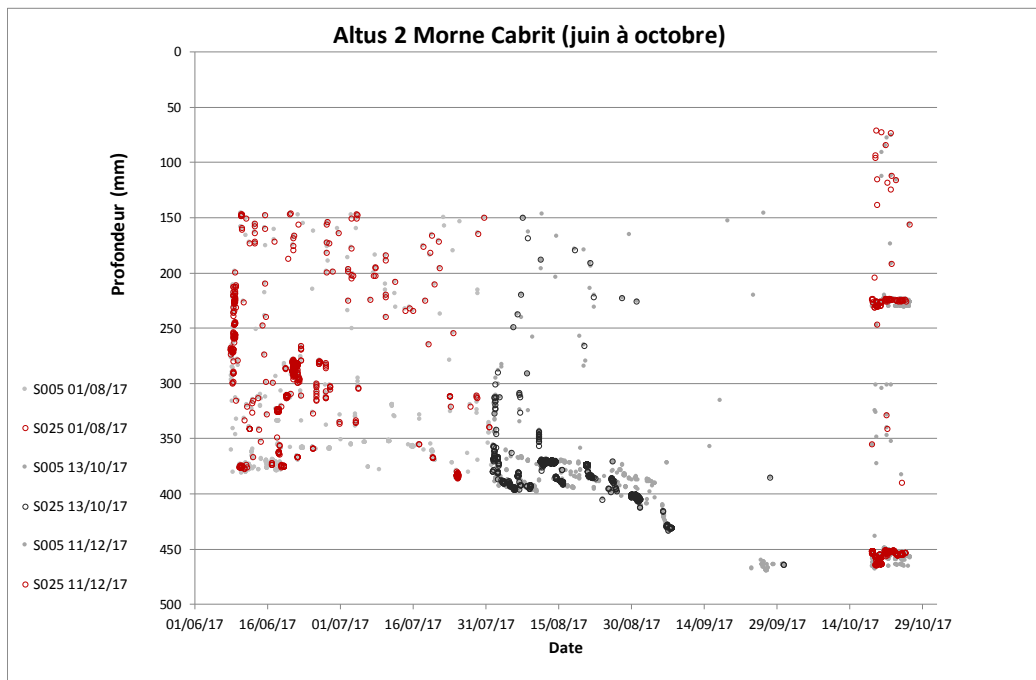


Illustration 15 : Profondeur du fond ou de l'interface sédimentaire détectée par l'Altus 2 (seuil 005 et 025) à Morne Cabrit, dans la Cohé du Lamentin, entre juin et fin octobre 2017.

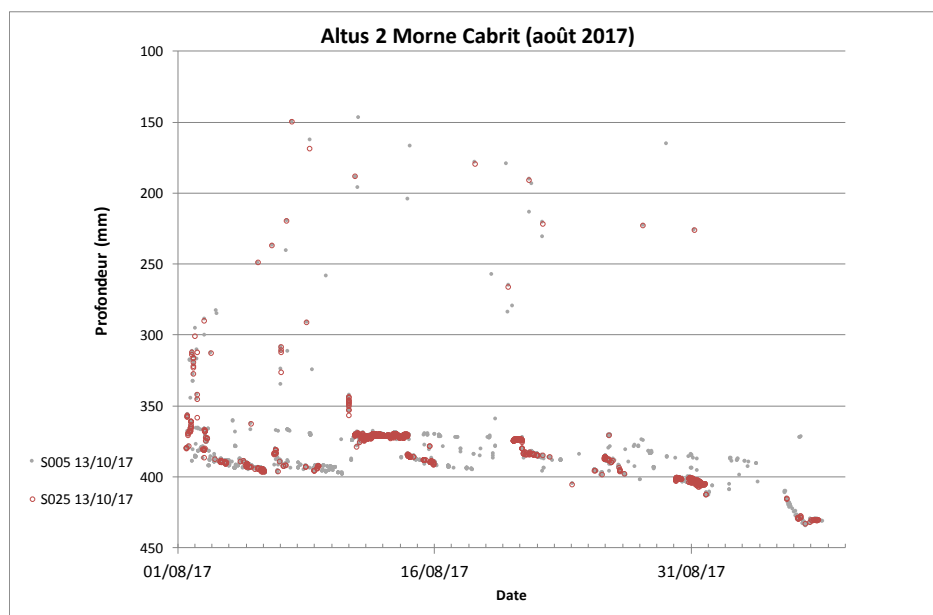


Illustration 16 : Vue de détail des données de profondeur enregistrées par l'Altus 2 (seuil 005 et 025) à Morne Cabrit, dans la Cohé du Lamentin, en août 2017.

2.4.3. Altus 3, Baie de Génipa, Canal Cocotte

L'Altus 3 se situe dans la baie de Génipa, à proximité de l'embouchure du canal Cocotte. Le capteur a particulièrement bien fonctionné durant toute la campagne de mesure (98% de taux d'acquisition), seul un problème de saturation de mémoire est à déplorer durant une semaine en avril 2017.

Sur ces données très complètes et de bonne qualité, une première séquence est observée entre fin février et début juillet 2017 (Illustration 18). L'interface, détectée nettement avec le second seuil choisi (seuil 025 sur 180), descend régulièrement de 440 mm à 570 mm. La baisse régulière de l'interface détectée est interprétée comme l'effet du tassement de la vase fluide, plutôt que comme un effet d'érosion et de départ de matière, car l'environnement très calme, abrité de l'agitation et des courants, apparaît particulièrement favorable au dépôt des particules fines et à la consolidation progressive de la vase. Ces mesures acoustiques sont confirmées par les mesures in situ effectuées avec le réglet inox (mise à part la mesure ponctuelle du 03/03/17). Au début du mois de juillet, la disparition de cette interface sur les données mesurées par l'Altus peut être expliquée par le seuil de détection du capteur qui est limité à 600 mm.

A partir de la disparition de la première interface, une seconde séquence est identifiée entre juillet et septembre 2017 (Illustration 19). Ainsi, de début juillet jusqu'à mi-août, les données ne permettent pas d'identifier la présence d'une interface nette. On constate seulement l'absence de bruit au-dessus de 150 mm. Cette phase de mesure est interprétée comme une période où une crème de vase dense et relativement épaisse ne permet pas la pénétration des ondes acoustiques vers une interface plus consolidée. Entre mi-août et début septembre, cette interface apparaît et reste relativement stable, autour de 540 mm. Puis durant la première moitié du mois de septembre, l'interface n'est plus détectée. Quelques points de mesure laissent penser à une rapide remontée du fond vaseux, jusqu'au 18-19 septembre, date du cyclone Maria.

Le 19 septembre et les quelques jours suivants sont marqués par un bruit important dans les signaux de l'Altus entre 150 et 340 mm. Puis une interface apparaît à très faible profondeur (300mm) et baisse rapidement jusqu'à 400 mm. Lors de l'entretien du capteur, la mesure au réglet de la profondeur du fond permet de bien valider la qualité des observations Altus et la séquence de remontée, puis de baisse de l'interface observée après Maria (Illustration 20). L'Illustration 20 montre également les bénéfices du nettoyage du capteur le 13/10/17, montrant une interface plus nette et des points de mesures formant du bruit dans la colonne d'eau ou dans la couche de crème de vase située au-dessus de l'interface.

Entre la fin du mois de septembre 2017 et janvier 2018, l'interface apparue après le cyclone Maria baisse de 18 cm (de 380 à 560 mm), soit environ 1,7mm par jour. Le phénomène ralentit et s'inverse légèrement au début du mois de décembre, mais repart très rapidement, juste après l'intervention de nettoyage et d'entretien du capteur le 11/12/2017.

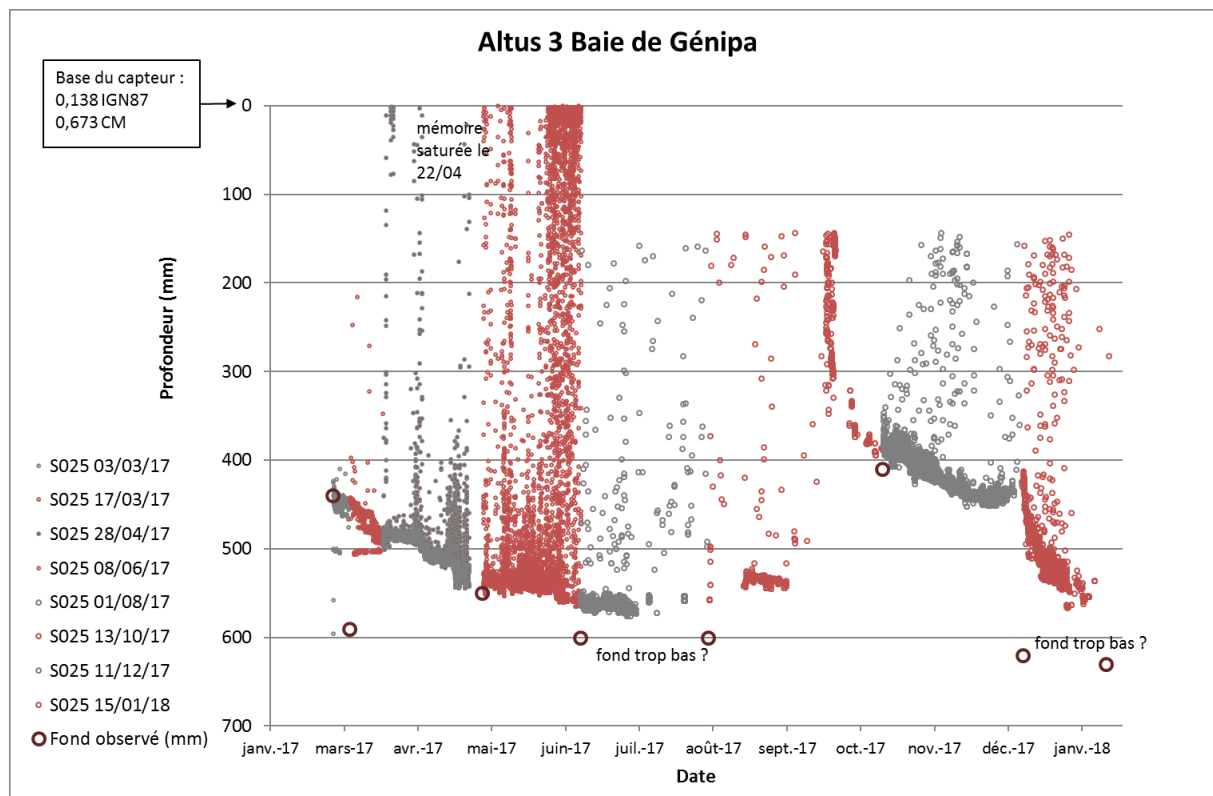


Illustration 17 : Profondeur du fond ou de l'interface sédimentaire détectée par l'Altus 3 (seuil 025) près du Canal Cocotte, dans la Baie de Génipa entre février 2017 et janvier 2018.

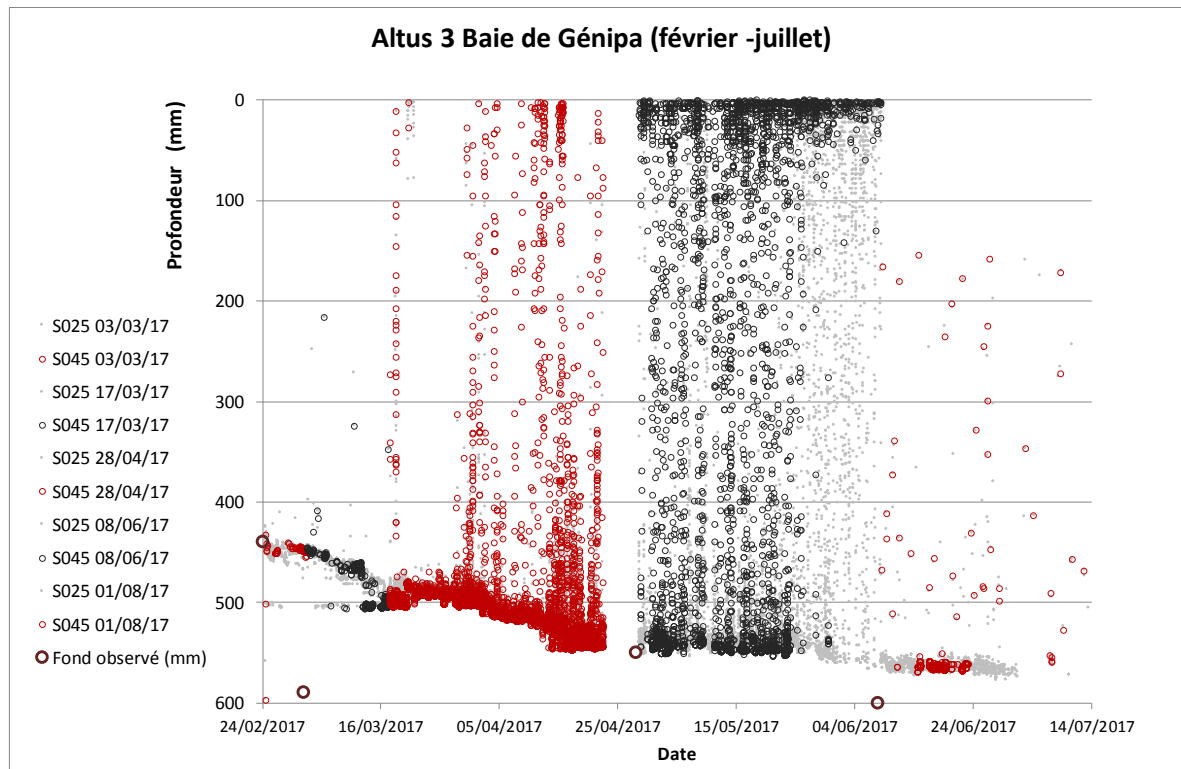


Illustration 18 : Profondeur du fond ou de l'interface sédimentaire détectée par l'Altus 3 (seuil 025 et 045), dans la Baie de Génipa, entre février et juillet 2017.

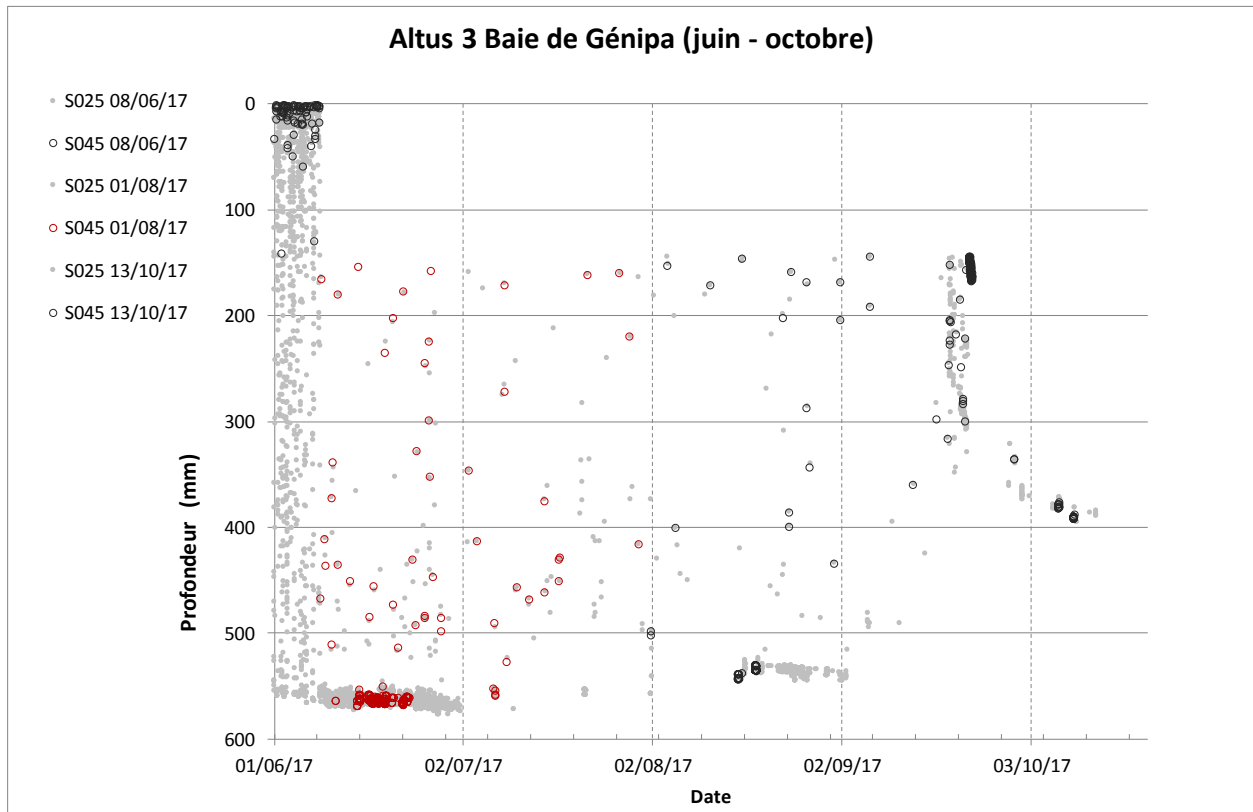


Illustration 19 : Profondeur du fond ou de l'interface sédimentaire détectée par l'Altus 3 (seuil 025 et 045), dans la Baie de Génipa, entre juin et octobre 2017.

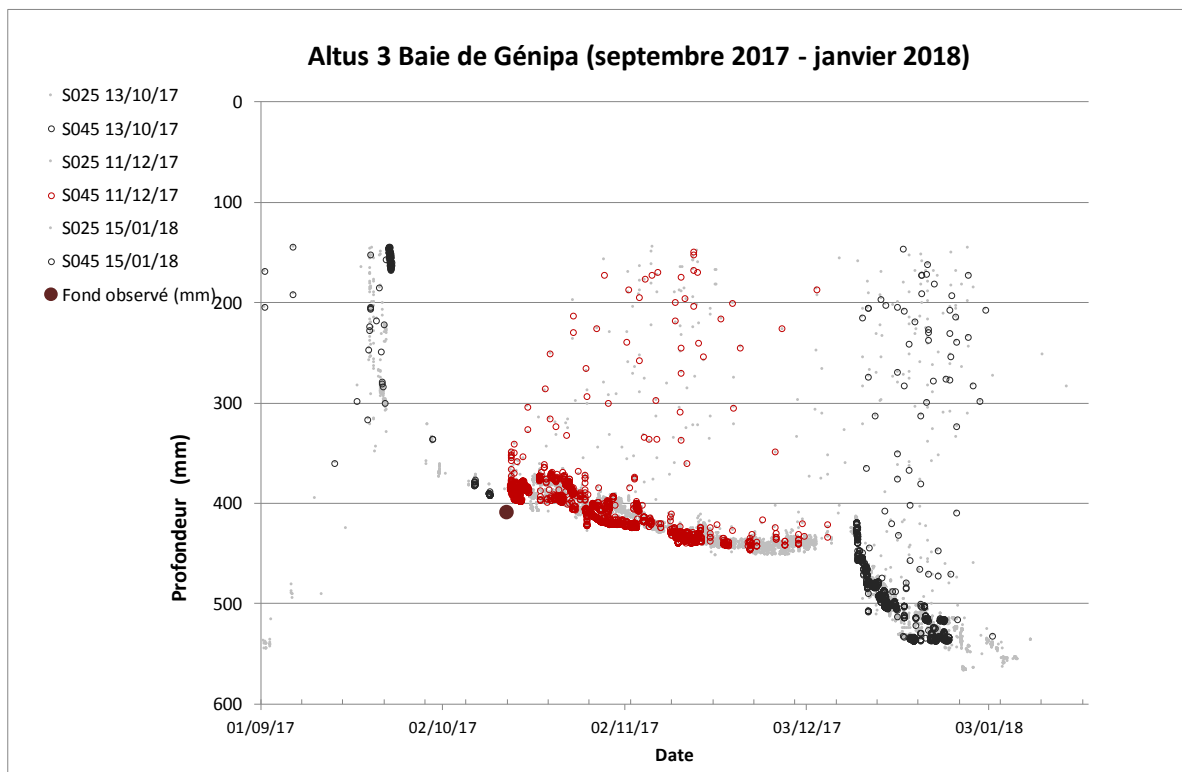


Illustration 20 : Profondeur du fond ou de l'interface sédimentaire détectée par l'Altus 3 (seuil 025 et 045) dans la Baie de Génipa, entre septembre 2017 et janvier 2018.

2.4.4. Altus 4, Baie de Génipa (Rivière Salée, puis Canal Cocotte)

- **Rivière Salée**

Les conditions de mesure de l'Altus 4, situé aux bord de la mangrove délimitant l'embouchure de la Rivière Salée, sont très proches de celles de l'Altus 1. L'échosondeur de l'Altus a très bien fonctionné durant toute la campagne, mais la présence d'une crème de vase trop épaisse ou trop dense n'a pas permis de mesure correcte sur une interface de vase suffisamment consolidée (Illustration 21). Cependant, les quelques très rares points mesurés à des profondeurs supérieures ou proches de 300 mm sont en bon accord avec les mesures ponctuelles réalisées avec le régllet inox lors des visites d'entretien du matériel. Ces observations montrent une tendance à l'abaissement du fond vaseux sur l'ensemble de la période de mesure. Comme pour les autres Altus, cet abaissement n'est pas interprété comme une érosion, mais plutôt comme un effet de tassement des sédiments et donc une action de sédimentation et de consolidation active du fond, ce qui est cohérent avec la tendance locale de croissance de la mangrove. Pour cet Altus, il faut noter que des problèmes de capteur de pression sont apparus à partir de mi-juillet.

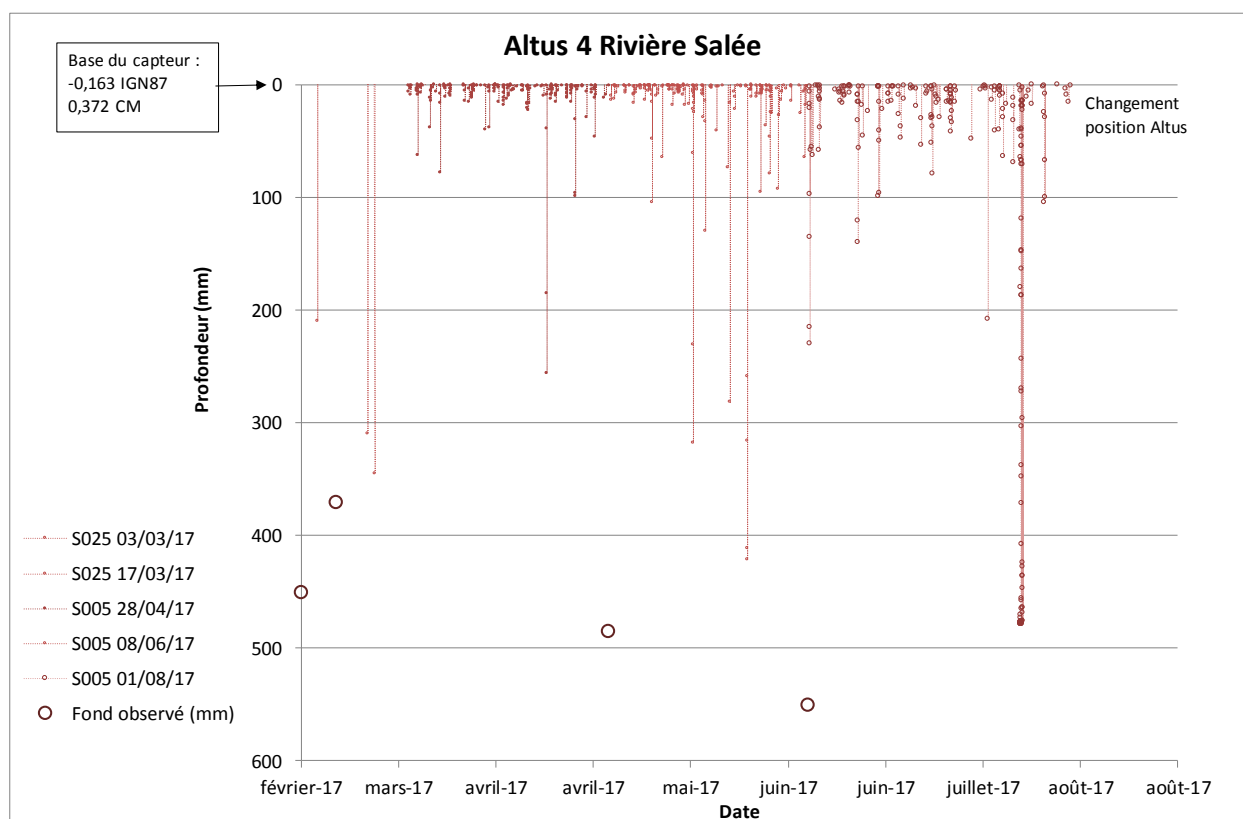


Illustration 21 : Profondeur du fond ou de l'interface sédimentaire détectée par l'Altus 4 (seuil 025 et 005), près de l'embouchure de la Rivière Salée, dans la Baie de Génipa entre février 2017 et août 2018.

- **Canal Cocotte**

Les résultats n'étant pas satisfaisants à l'embouchure de la Rivière Salée. Il a été décidé de déplacer le capteur près de l'Altus 3 dans la baie située à proximité du Canal Cocotte. L'objectif était de réaliser des mesures plus haut sur la vasière intertidale pour y observer la dynamique de la sédimentation.

En raison de difficultés logistiques, il n'a pas été possible de réaliser l'installation suffisamment haut sur l'estran et le capteur a été mis en place à proximité immédiate de l'Altus 3 (30m, voir l'illustration 8). Les données obtenues ne sont malheureusement pas satisfaisantes. Seuls quelques jours de mesures (du 14/10 au 27/10) ont permis d'observer une interface après la visite d'entretien du 13/10/2017. Les mesures Altus montrent un abaissement de l'interface d'environ 1cm en 10 jours. La profondeur mesurée autour de 380mm est en accord avec la mesure manuelle au mètre (390 mm). A noter également que le capteur de pression a cessé de fonctionner correctement à partir du 21 novembre.

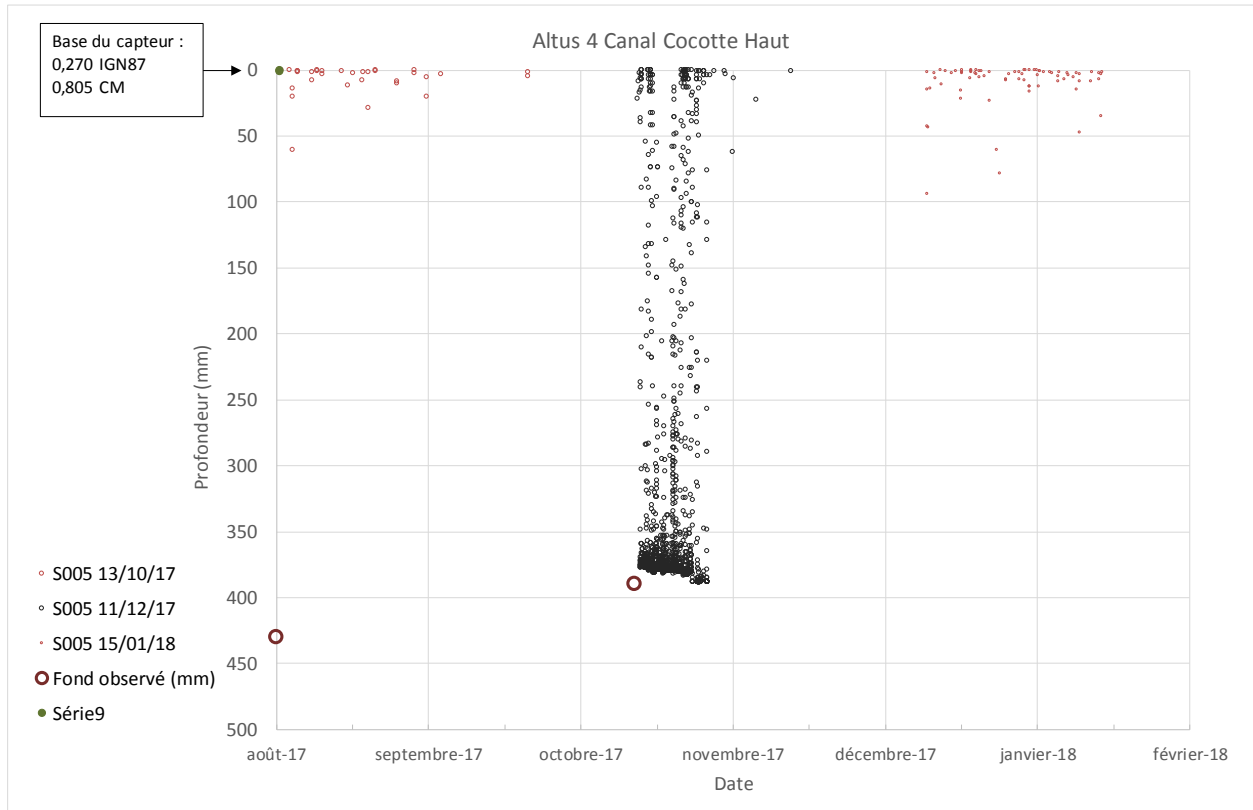


Illustration 22 : Profondeur du fond ou de l'interface sédimentaire détectée par l'Altus 4 (seuil 005), près du Canal Cocotte, dans la Baie de Génipa entre août 2017 et janvier 2018.

3. Turbidité au niveaux des embouchures

3.1. CARACTERISTIQUE TECHNIQUE DES CAMPAGNES «HSM-TURBIDITE »

3.1.1. Généralités

Parmi les besoins identifiés en amont du projet Hydrosedmar, outre la nécessité d'améliorer les connaissances sur les courants et l'agitation, les questions des flux sédimentaires, de turbidité et d'apports issus des rivières ont été mentionnées lors des échanges préalables à la mise en place du projet (Idier et al., 2014). Ces sujets ont des implications sur différentes thématiques à enjeux pour la baie de Fort-de-France telles que la biodiversité, le suivi des polluants ou la modification du trait de côte.

Les campagnes de Carêmes et d'Hivernage réalisées par NortekMed ont permis d'acquérir des informations sur les conditions hydrodynamiques (courant, agitation), mais également sur la turbidité au fond, et ce en cinq points positionnés dans la baie (Vincent, 2017a, 2017b). En complément, pour améliorer les connaissances sur les aspects liés aux apports sédimentaires et à la turbidité de la baie de Fort de France, des mesures ont été réalisées au niveaux des deux embouchures principales de la Baie : la Lézarde au nord-est et la Rivière Salée au sud-est.

La turbidité a été mesurée en continue pendant un an, au plus près des embouchures. Parallèlement, des essais de suivi des épisodes de crue dans la baie ont été effectués avec pour objectif d'établir un protocole et de réaliser une campagne de prélèvement durant un épisode de crue significative.

3.1.2. Suivi en continu

Le suivi en continu de la turbidité est un marqueur des quantités de Matières En Suspension (MES) qui sont transportées par les rivières et potentiellement exportées vers la Baie au niveau des embouchures. Pour suivre l'évolution de la turbidité dans le temps, l'instrumentation déployée est composée d'un turbidimètre Campbell OBS3+ (du même type que ceux placés sur les 5 points de suivi hydro-sédimentaires (Vincent, 2017a) associé à un courantomètre ponctuel Nortek Aquadopp. La mesure de turbidité est effectuée par rétrodiffusion optique et enregistrée sur le courantomètre qui mesure également la pression et la vitesse du courant en un point devant le capteur. Le capteur OBS3+ permet une mesure sur deux niveaux de turbidité simultanément, il est couplé à l'Aquadopp qui « pilote » les mesures du capteur de turbidité et fait office d'enregistreur. Les appareils disponibles pour cette campagne sont fonctionnels pour une gamme de 250 à 1000 NTU ou 1000 à 4000 NTU. Un balai de nettoyage automatique est également installé sur le turbidimètre optique pour éviter les salissures qui dégradent les mesures.

Les capteurs de turbidité fournissent des valeurs en Volt pour les deux voies de mesures, ces valeurs sont enregistrées par le courantomètre Aquadopp. La conversion entre l'intensité de courant mesurée et les valeurs de turbidité en unité normalisée (NTU Nephelometric Turbidity Unit) est assurée en post-traitement grâce au calibrage préalable des capteurs. Les capteurs étant neufs pour cette campagne, le calibrage utilisé a été fourni par le constructeur.



Illustration 23 : Installation du système de mesure de la turbidité, détail sur le capteur de turbidité OBS3+ équipé d'un balai de nettoyage automatique et sur le principe de mesure ponctuelle du courant par effet Doppler de l'Aquadopp Nortek.

3.1.3. Prélèvements d'eau et suivi de l'extension des panaches turbides

Pour suivre l'extension des panaches turbides engendrés par les crues des rivières, des prélèvements d'eau ont été réalisés au cours d'une campagne ponctuelle. Ces prélèvements d'eau sont ensuite transmis en laboratoire pour analyses. Des essais de prises de vues d'images aériennes par drone ont été tentés simultanément.

3.2. DEROULEMENT DE LA CAMPAGNE DE SUIVI EN CONTINU

3.2.1. Implantation des capteurs

Rivière Lézarde

La DEAL dispose d'une station de mesure du débit située au Lamentin, sur la route D3, au niveau du pont Spitz. La rive équipée avec la station de mesure de la Deal est accessible facilement. Ce pont se situe à environ 3 km de l'embouchure de la rivière dans la baie de Fort de France. Il a donc été décidé d'installer le capteur (turbidité, courant) au niveau du pont Spitz.



Illustration 24 : Carte de situation du Pont Spitz sur la rivière Lézarde.



Illustration 25 : Détails du Pont Spitz (Rivière Lézarde)

L'installation du capteur s'est déroulée le 2 mars 2017. Le premier mouillage réalisé sur un lest lourd ne s'est pas avéré parfaitement adapté au fond très pentu. Le mouillage a été amélioré le 15 mars 2017. Le système de mesure est monté sur une plaque en nylon lestée (Illustration 26a) dont la base a été équipée de deux lests mobile pouvant s'adapter à la pente du fond. Le haut de la plaque est relié à une ancre à vis implanté dans la rive. L'ensemble est mouillée le long des palplanches qui bordent la rivière. Un jeu de cordage permet de maintenir le mouillage contre les palplanches. Une chaîne et un cadenas ont également été mis en place pour sécuriser l'installation (Illustration 26b).



Illustration 26 : Système de mesure mis en place dans la rivière Lézarde.

Rivière Salée

La détermination d'un secteur de mouillage sur la Rivière Salée a été plus délicate. Pour permettre l'installation du système de mesure dans la rivière, il était indispensable que l'accès au capteur soit relativement aisé, que la rive permette une mise en place sécurisée et que la profondeur d'eau soit suffisante pour que le capteur reste immergé en permanence. La reconnaissance des rives de la rivière Salée entre Petit Bourg et le pont de la N5 n'a pas permis de trouver de secteur favorable à l'implantation du système. Le secteur de mangrove entre la N5 et l'embouchure n'est pas facilement accessible et n'a pas été reconnu.



Illustration 27 : carte du secteur de mouillage pour la Rivière Salée.

En l'absence de point d'installation utilisable au bord de la rivière, il a été décidé de placer le système de mesure au droit de l'embouchure de la Rivière Salée, dans des fonds accessibles aisément avec une embarcation. Le dispositif était mouillé à environ 500 m à l'ouest de l'embouchure de la Rivière Salée et à 200 m au nord du Petit Ilet. Le mouillage a été placé à environ 5 m de profondeur, au pied d'une courte pente qui marque une remontée vers les très petits fonds (1 m ou moins) qui entourent l'embouchure de la Rivière Salée et le fond de la baie de Génipa.

Le capteur était situé sous 2 à 3 m d'eau et ne perturbait pas la navigation des bateaux fréquentant le secteur. Le mouillage était fixé au fond par un corps-mort. Le système était maintenu au-dessus du fond grâce à une flottabilité adaptée au poids de la plaque de nylon et des capteurs (Illustration 28). Le mouillage était repéré en surface par un petit flotteur discret placé sur une ligne légère et une plaque indiquant les mesures en cours avec les coordonnées du BRGM. Le mouillage a été réalisé le 3 mars 2017.

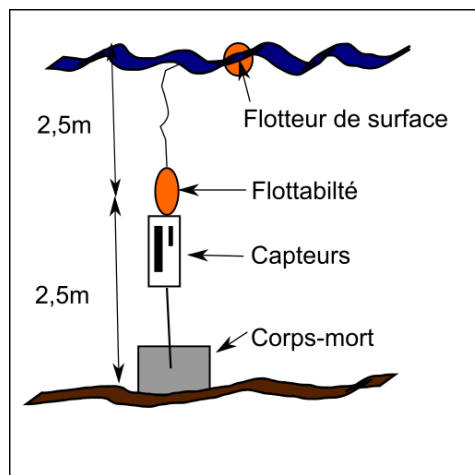


Illustration 28 : Schéma du mouillage permettant le suivi de la turbidité à proximité de l'embouchure de la Rivière Salée.



Illustration 29 : Image du mouillage et du capteur avant mise à l'eau (a). Vue de la surface après mise à l'eau (b).

3.2.2. Programmation des capteurs

Les courantomètres Aquadopp sont programmés pour faire des mesures de courant, hauteur d'eau et turbidité moyennées sur 1 min toutes les 10 min. Les paramétrages spécifiques des deux Aquadopp sont détaillés dans le tableau suivant.

Paramètres Aquadopp Nortek		Rivière Lézarde	Baie Génipa-Rivière Salée
Paramètres standards			
Intervalle de mesure (s)		600	600
Montage		Structure fixe	Ligne de mouillage
Environnement		Eau peu profonde	Eau peu profonde
Géographie		Rivière	Eau côtière
Paramètres avancés			
Configuration	intervalle de moyenne (s)	60	60
	Mode actif	Automatique (4%)	Automatique (4%)
	Distance de mesure (m)	1	0,5
	Période de mesure compas (s)	600	2
	Niveau d'émission	Low+	Low+
Vitesse du son	mesurée / Salinité (ppt)	0	35
Système de coordonnées		XYZ (capteur)	Géographique
Périphérique piloté par l'Aquadopp : OBS3+	Input 1 (Volt)	Analogique (OBS 1000 NTU)	Analogique (OBS 250 NTU)
	Input 2 (Volt)	Analogique (OBS 4000 NTU)	Analogique (OBS 1000 NTU)
	Alimentation	oui	oui

Tableau 2 : Paramétrage des 2 capteurs Aquadopp pilotant les capteurs de turbidité OBS3+.

3.2.3. Entretien régulier des instruments

Un suivi régulier des capteurs est nécessaire pour vérifier leur état de fonctionnement, nettoyer, sauvegarder les données, procéder aux réglages et modification de paramètres si besoin.

Un rythme de suivi mensuel était envisagé en début de mission, éventuellement renforcé en période de crue. Au final, la durée moyenne entre les interventions a été de 45 jours.

Date des interventions	Rivière Lézarde	Rivière Salée
Installation	02/03/2017	03/03/2017
	15/03/2017	17/03/2017
	19/05/2017	28/04/2017
R. Salée, sortie capteur	13/06/2017	08/06/2017
R. Salée, mouillage capteur	07/08/2017	01/08/2017
	10/10/2017	13/10/2017
	07/12/2017	11/12/2017
Démobilisation	16/01/2018	15/01/2018

Tableau 3 : Date des interventions d'entretien et de récupération des données sur les turbidimètres installés dans la Lézarde et à l'embouchure de la Rivière Salée.

Il faut noter l'importance particulière de ces interventions pour le mouillage de la Rivière Salée car celui-ci était très rapidement colonisé par les algues et les organismes (Illustration 30). De plus, un problème de connexion avec l'Aquadopp n'a pas permis la récupération des données

sur le terrain entre le 17 mars et le 24 avril. Le mouillage a donc été relevé entre le 8 juin et le 1^{er} août pour permettre un entretien, une vérification et un reparamétrage du capteur à terre, dans les locaux du BRGM. Enfin, ce mouillage a également été déplacé pour des raisons inconnues le 16 novembre et déposé sur des fonds d'environ 1 m.



Illustration 30 : Etat de salissure du mouillage et du capteur de turbidité le 28/04/17 après 6 semaines.

3.2.4. Bilan

L'illustration 17 présente le positionnement des capteurs de turbidité au sein de l'ensemble du dispositif de mesures continues déployés dans la Baie de Fort-de-France pour la campagne Hydrosedmar. Le Tableau 4 détaille le positionnement et les dates des données collectées, ainsi que le pourcentage de données de turbidité utilisables pour validation et vérification.

Point de mesure	Position (UTM20)	Dates disponibles (tout ou partie des mesures)	% données exploitables
AQD-OBS Lézarde	X : 715631,21 y : 1615670,19	du 02/03/2017 au 26/12/2017	71
OBS-AQD Rivière Salée	x : 715096,85 y : 1609811,58	du 03/03/2017 au 08/06/2017 du 01/08/2017 au 12/10/2017 du 13/10/2017 au 10/12/2017 du 12/12/2017 au 16/01/2018	81

Tableau 4 : Bilan des données de turbidités collectées entre février 2017 et janvier 2018 dans la Baie de Fort-de-France et la rivière Lézarde.

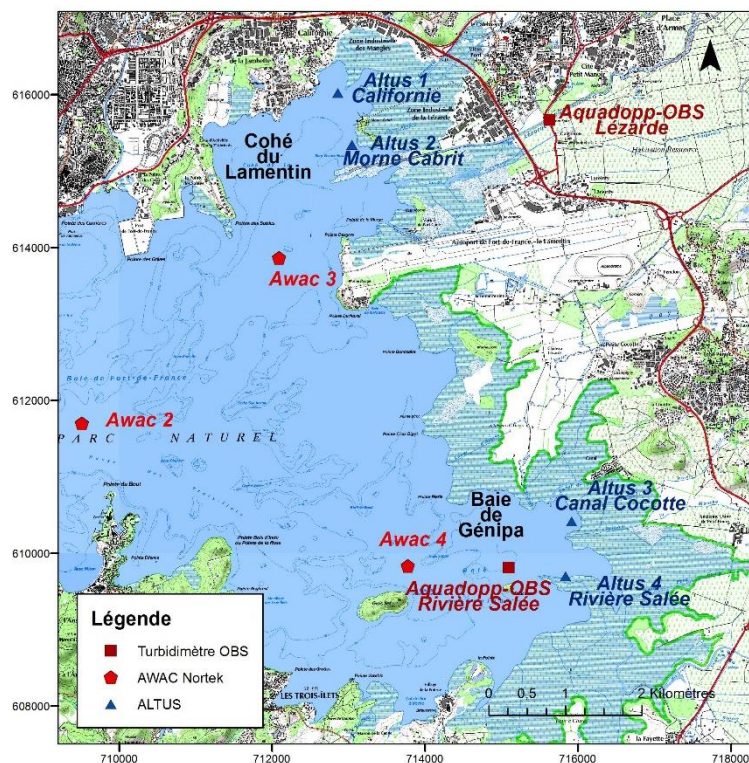


Illustration 31 : Carte de positionnement des turbidimètres OBS dans la Baie de Fort-de-France et la rivière Lézarde. Fond cartographique : IGN.

3.3. DEROULEMENT DES CAMPAGNES DE PRELEVEMENTS D'EAU ET DE SUIVI DE L'EXTENSION DES PANACHES TURBIDES

Pour améliorer la connaissance de la turbidité de la baie, plusieurs campagnes de prélèvements d'eau ont été menées au niveau des points de mesure Altus et dans le prolongement des embouchures. Les prélèvements ont été effectués avec le soutien de la société Impact Mer qui s'est chargée de la transmission des échantillons vers le laboratoire Départemental (LDA) ou le laboratoire de Guadeloupe pour les analyses de turbidité et de MES.

3.3.1. Prélèvements autour des Altus

La première campagne de prélèvement d'eau autour des Altus a eu lieu les 21 février (Altus 1, 3 et 4) et 3 mars (Altus 2), lors de la mission d'installation des capteurs Altus. Pour chaque Altus, plusieurs prélèvements ont été réalisés sur des profils afin d'observer d'éventuels gradients de turbidité de la côte au large (Illustration 32). Pour l'Altus 1 et 2 dans la Cohé du Lamentin, les points de prélèvement ont été réalisés en surface tous les 250 m, jusqu'à 750m des capteurs. Ces profils se rejoignent au point « Lez 500NM » qui est intégré dans un plan d'échantillonnage plus vaste, dédié au suivi du panache turbide de la Lézarde (voir paragraphe suivant, § 3.3.2). Dans la baie de Génipa, les points de prélèvement ont été réalisés tous les 200 m. Les profils se rejoignent au point « RS 500m N », intégré dans le plan d'échantillonnage du panache de la Rivière Salée (voir § 3.3.2).

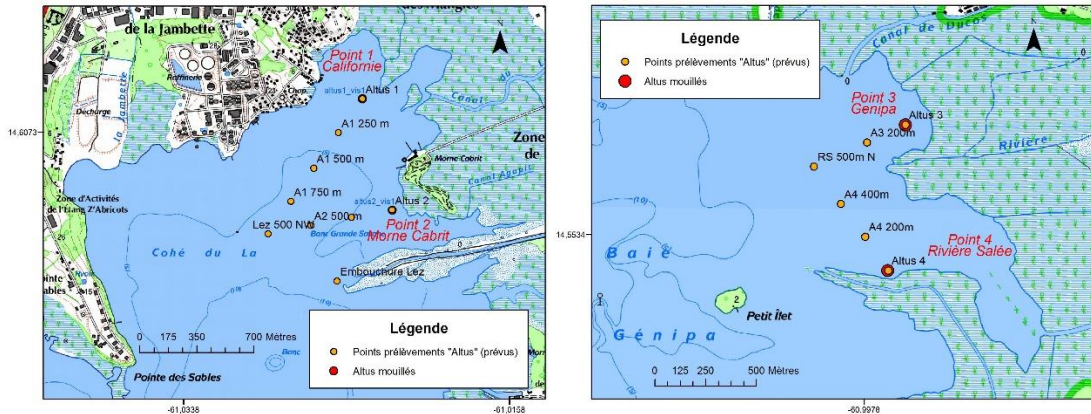


Illustration 32 : Plan de prélèvement des échantillons d'eau pour l'analyse de la turbidité et des MES aux abords des Altus lors de l'installation des capteurs.

Au cours de la campagne de mesure des Altus entre 2017 et 2018, d'autres prélèvements d'eau ponctuels ont été réalisés à proximité des capteurs : le 02/08/2017 et lors de la démobilisation du matériel le 15/01/2018. Le plan d'échantillonnage complet prévu initialement (Illustration 32) n'a pas été renouvelé faute de temps lors de ces missions d'entretien et de démobilisation, seul des prélèvements uniques situés au plus près des 4 Altus ont été réalisés.

De plus, afin de mieux comprendre l'évolution temporelle de la turbidité dans le fond de baie, un test a été réalisé avec une sonde multi-paramètres de type In Situ Aquatroll 6000 (Illustration 33). La sonde a été installée à proximité de l'Altus 1 à Californie.



Illustration 33 : Sonde multiparamètre Aquatroll sur le support installé à proximité de l'Altus 1 et zoom sur le balais nettoyant intégré.

3.3.2. Extension des panaches turbide en crue

Afin de suivre l'extension des panaches turbide des principales rivières lors d'évènements de crues, des plans d'échantillonnage ont été préparés pour la rivière Lézarde et la Rivière Salée (Illustration 34). Pour la Lézarde, à partir du point d'embouchure, deux prélèvements étaient prévus à 500 m de part et d'autre, puis deux points séparés de 400 m étaient identifiés jusqu'au point de l'ADCP n°3 des campagnes de Carême et d'Hivernage. Plus au large, le profil se prolonge par quatre points espacés de 500 m. Pour la Rivière Salée, la structure d'échantillonnage est similaire. Trois points espacés de 500 m étaient définis de l'embouchure jusqu'à l'ADCP n°4, puis quatre points de même espacement vers le large. Pour chaque point suffisamment profond, il était prévu de réaliser un prélèvement en surface et un prélèvement au fond à l'aide d'une bouteille Niskin (Illustration 35).

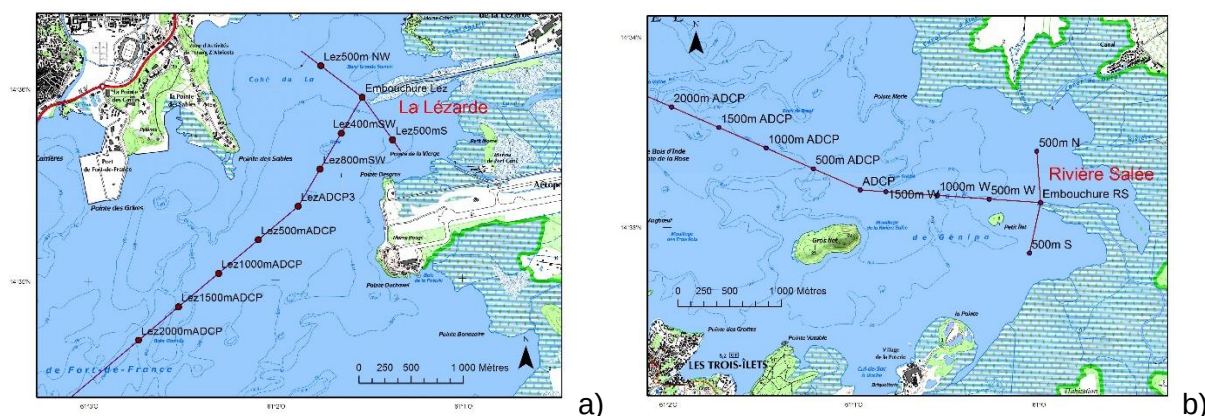


Illustration 34 : Plan d'échantillonnage prévisionnel des campagnes de prélèvements d'eau pour le suivi des panaches turbide en crue a) La Lézarde b) Rivière Salée.

Pour évaluer la faisabilité de ce plan d'échantillonnage, un test a été réalisé le 3 mars 2017 devant la Rivière Salée, en condition de débit faible. Parallèlement aux prélèvements d'eau, des profils de CTD et OBS ont été réalisés avec le matériel de Nortekmed, ainsi que des tests d'acquisition d'images aériennes par drone.



Illustration 35 : a) prélèvement d'eau avec la bouteille Niskin et conditionnement en bouteille PVC, puis glacière par Impact Mer et le BRGM b) lancement du drone par Carige pour les test d'images aériennes.

La campagne de prélèvement d'eau en crue a été réalisée après le passage de l'ouragan Maria, le 22/09/2017. Les prélèvements ont été effectués au droit des deux embouchures avec l'aide de la société Impact Mer, des vols de drones ont été mis en œuvre par Carige et des points de mesures CTD et turbidité ont été réalisés par le BRGM à l'aide d'une sonde InSitu Aquatroll.

3.3.3. Bilan

Les prélèvements d'eau et des analyses de turbidité et MES ont été réalisés pendant la campagne de mesure complémentaires de 2017 à 2018. L'illustration 36 présente le positionnement des différents prélèvements effectué au cours du temps :

- Le 21/02/2017 et le 03/03/2017, les prélèvements ont été réalisés lors de l'installation des Altus, sur des profils s'éloignant de la mangrove.
- Les 03/03/2017, les prélèvements ont été réalisés pour tester le plan d'échantillonnage du suivi de panache turbide en crue de la Rivière Salée.

- Le 02/08/2017, des prélèvements ont été effectués au niveau des 4 Altus implantés.
- Le 21/09/2017, après le passage du cyclone Maria, les prélèvements ont été réalisés sur les profils déterminés à l'embouchure de la Lézarde et de la Rivière Salée.
- Le 15/01/2018, les prélèvements ont été effectués au niveau des 4 Altus avant leur démobilitation.

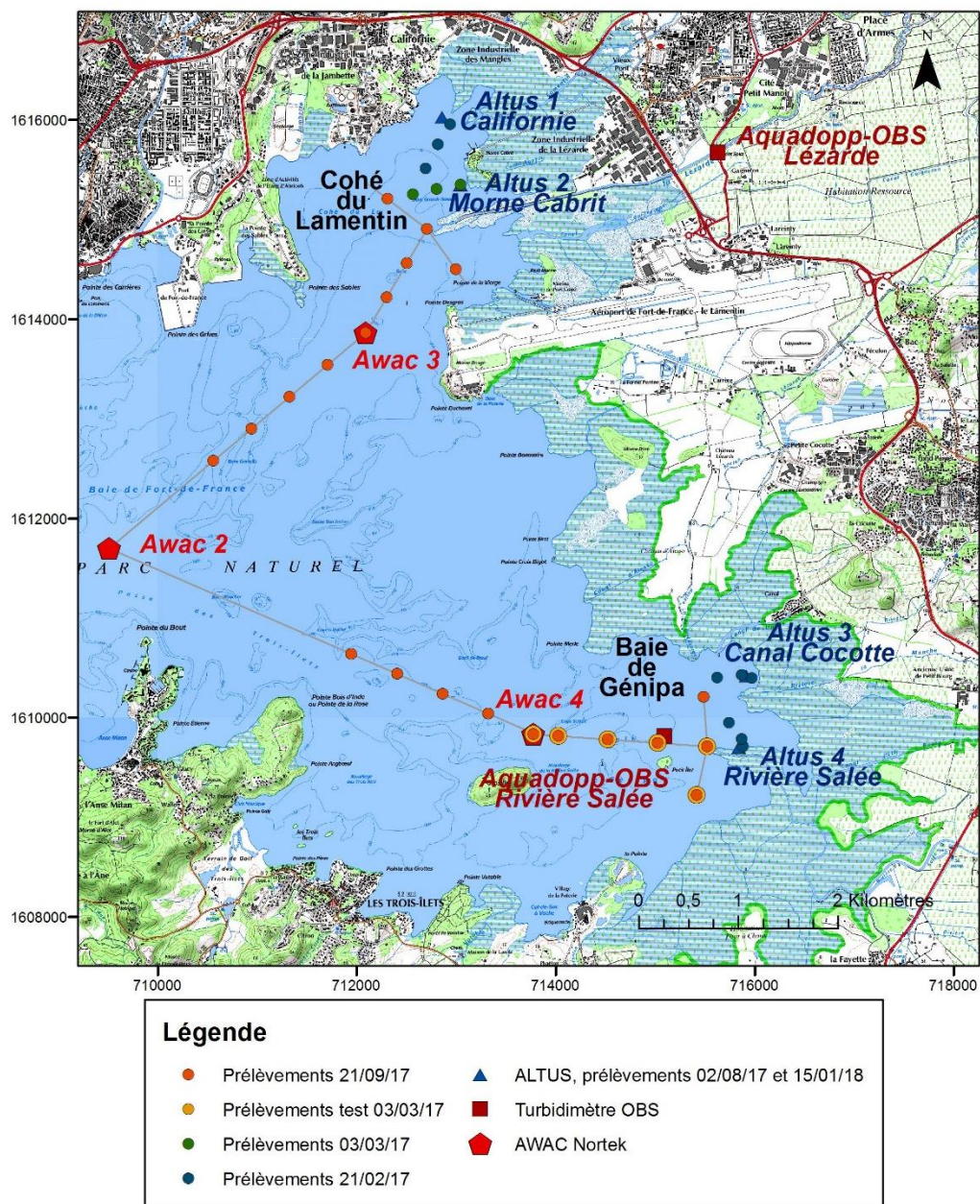


Illustration 36 : Carte de positionnement des différents prélèvements d'eau réalisés dans la Baie de Fort-de-France en 2017 et 2018. Fond cartographique : IGN

3.4. RESULTATS

3.4.1. Suivi en continu

- **Rivière de la Lézarde**

Le système de mesure de turbidité installé dans la rivière Lézarde sous le Pont Spitz a bien fonctionné pendant la majorité de la campagne, entre mars 2017 et janvier 2018. Le taux d'acquisition est de 70% à cause d'une période de plus de 2 mois (mi-mars à fin avril) sans donnée de turbidité (problème de programmation du capteur). Pour les données acquises, la qualité apparaît très bonne avec un signal clair et peu bruité (Illustration 37). Pour rappel, il n'est pas prévu dans ce projet d'estimer les quantités de MES transportées à partir des mesures de turbidités effectuées.

La turbidité moyenne observée pendant les périodes de mesures valables (Tableau 4 et Tableau 5) entre mars 2017 et janvier 2018 est de 30 NTU, l'écart-type est de 70. Le signal est marqué par l'enchaînement de nombreux pics de turbidité. Ces pics sont associés très clairement à une montée du niveau d'eau observée grâce au capteur de pression. Le Tableau 5 :Tableau 5 présente une typologie des pics de turbidité observés en fonction de seuils établis arbitrairement : entre 100 NTU et 250 NTU, 250 NTU et 500 NTU, 500 NTU et 1000 NTU, au-dessus de 1000 NTU. Les pics de turbidité ont été plus nombreux en août, septembre et octobre ; avec respectivement 6, 6 et 8 pics supérieurs à 100 NTU dénombrés. Les plus forts pics de turbidité ont été observés en mai et en septembre, avec respectivement 1250 NTU et 1275 NTU. Durant la première partie de l'année jusqu'à juillet, les pics sont relativement réguliers (1 à 3 par mois) mais faibles, généralement inférieurs à 500 NTU (Illustration 38). A partir du mois d'août, les pics sont plus fréquents (3 à 6 par mois) et plus intenses, avec des valeurs maximales comprises entre 500 NTU et 1000 NTU.

De façon générale, les pics de turbidité sont associés à des pluviométries importantes précédant l'observation, comme le montre l'Illustration 39 en septembre 2017. Il faut noter cependant que le pic de turbidité du 7 septembre (658 NTU), 2 jours après 41mm de pluie, est plus fort que celui enregistré durant le cyclone Maria le 19 septembre (600 NTU), malgré 3 jours de pluies plus intenses (45, 55 et 30mm). Dans la rivière Lézarde, il faut noter aussi que certains pics pourraient être liés à des effets artificiels et notamment des relargages de la station d'épuration située en amont.

L'enregistrement du capteur de pression sur l'Illustration 39 montre bien l'effet de la marée sur le niveau d'eau dans la rivière. Mais ce cycle tidal n'a aucun effet sur la turbidité locale observée qui reste très faible. En revanche, dès que le niveau d'eau augmente et dépasse sensiblement le niveau moyen de pleine-mer, les turbidités croissent fortement.

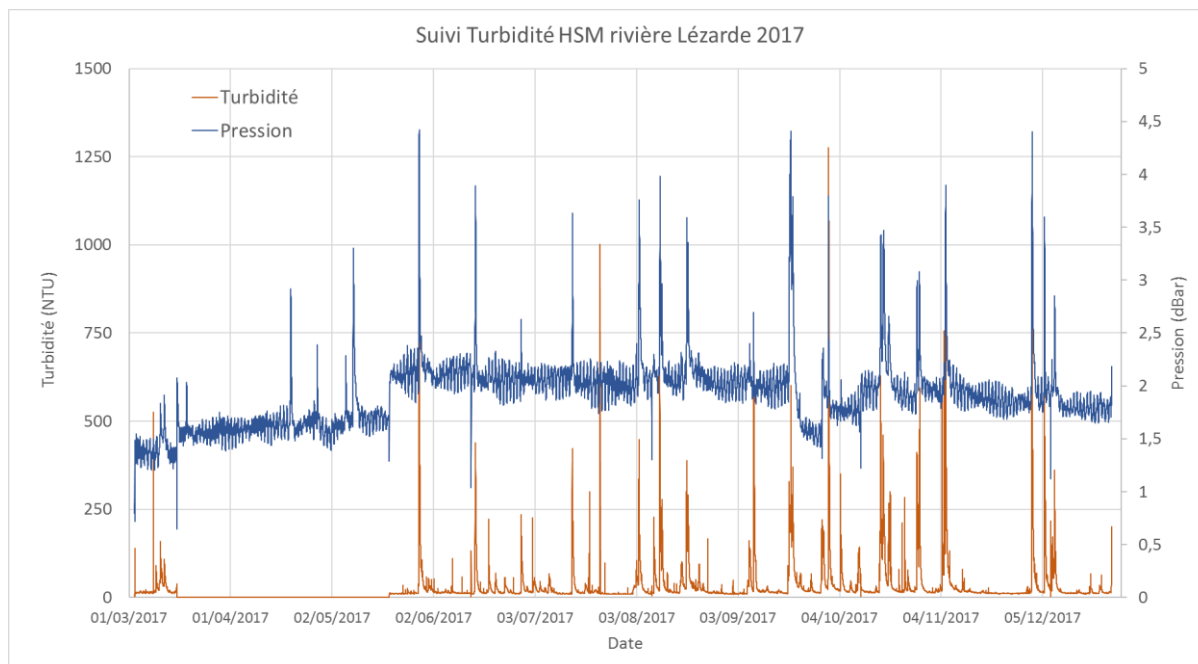


Illustration 37 : Suivi en continu de la turbidité dans la rivière Lézarde, pont Spitz, entre mars 2017 et janvier 2018.

	mars	avril	mai	juin	juillet	août	septembre	octobre	novembre	décembre	sommes
% données	42	0	39	100	100	100	100	100	100	81	
100<Pic <250 NTU	3			2		1	2	1		1	10
Pic <500 NTU				1	1	4	1	5		1	13
Pic <1000 NTU						1	2	2	3	2	10
Pic >1000 NTU			1				1				2
sommes	3	0	1	3	1	6	6	8	3	4	

Tableau 5 : Typologie et classification des pics de turbidité observés par mois dans la rivière Lézarde. Le pourcentage de données exploitable par mois est indiqué en % par mois.

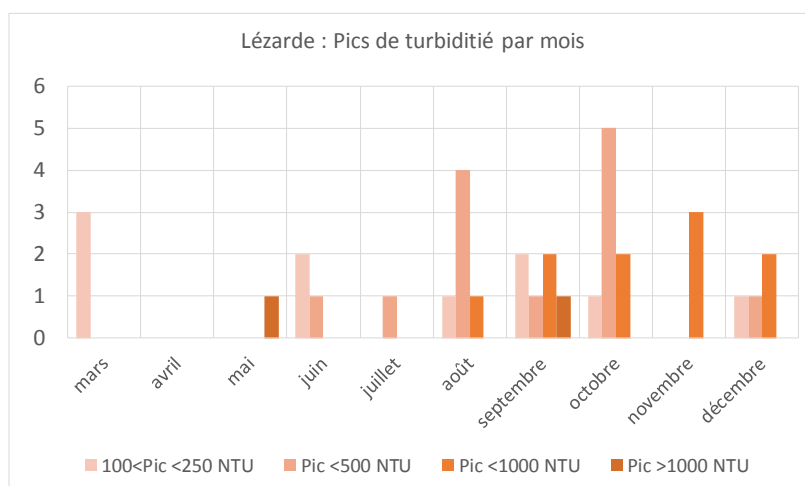


Illustration 38 : Histogramme des pics de turbidité par mois.

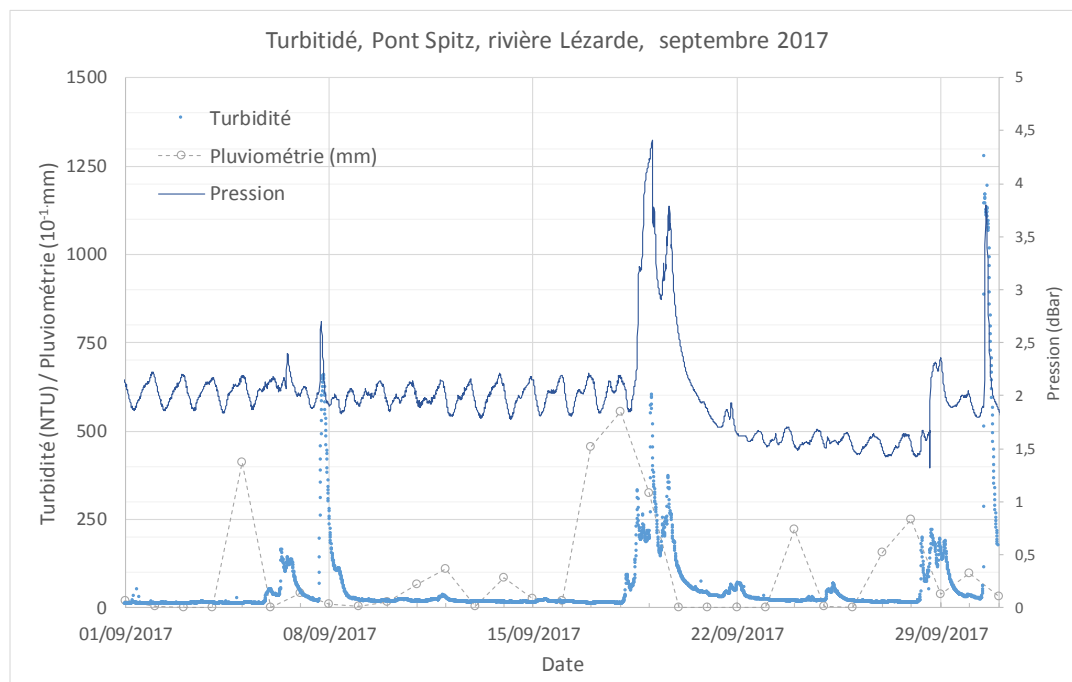


Illustration 39 : Mesures de turbidité et de hauteurs d'eau sur la Lézarde au mois de septembre. Le pic du 19 septembre correspond au passage du cyclone Maria. Données de pluviométrie : aéroport du Lamentin, source : Météo France.

• Rivière Salée

Le mouillage permettant les mesures de turbidité installé dans la baie de Génipa à proximité de l'embouchure de la Rivière Salée a fonctionné pendant la majorité de la campagne, entre mars 2017 et janvier 2018. Le taux d'acquisition est de 80% à cause d'une période d'un mois et demi (mi-juin à août) où le capteur a été démonté pour régler un problème de connexion avec le PC permettant la récupération des données lors des phases d'entretien.

Pour les données acquises, la qualité est très hétérogène car le signal est bruité et les enregistrements bruts présentent également des biais liés à la salissure du capteur de turbidité (Illustration 40). Les données biaisées pour cause de salissure ont été supprimées de l'analyse. Le pourcentage de données exploitables par mois est indiqué dans le Tableau 6.

La turbidité moyenne observée a été calculée pour les périodes de mesures comprises entre mars 2017 et janvier 2018 à partir des données nettoyées des périodes biaisées. Cette turbidité moyenne est très faible : 3,8 NTU pour un écart-type de 7. De plus, le signal mesuré étant très bruité, les données ont été lissées par une moyenne glissante sur une heure pour faciliter l'interprétation des informations collectées. Ces données nettoyées et lissées ont ensuite permis la détection des pics de turbidité. Le Tableau 6 présente un décompte pour les pics compris entre 50 NTU et 100 NTU et ceux au-dessus de 100 NTU. Des pics de turbidité ont été identifiés en avril, août et septembre.

La turbidité a été plus importante au mois d'avril avec 4 pics inférieurs à 100 NTU et 2 pics supérieurs à 100 NTU. Une fois les pics significatifs repérés grâce aux signal filtré, les valeurs non filtrées permettent de déterminer les valeurs maximales en pics : 200 NTU et 264 NTU pour les 2 pics d'avril supérieurs à 100 NTU (Illustration 41).

La plus forte valeur observée correspond au pic de septembre et atteint 730 NTU. Il ne s'agit pas du cyclone Maria, qui forme un pic bien distinct, mais de valeur inférieure à 100 NTU.

Des mises en relation entre les pics de turbidités observées, les débits de la Rivière Salée à Coulisse, la pluviométrie et les courants mesurés ont été tentés sans permettre de mettre en évidence des tendances claires entre ces forçages et la turbidité. Un travail avec des données d'agitation au cours de l'année 2017 sera à mener grâce aux résultats de la phase de modélisation des vagues. En revanche, l'étude de détail des enregistrements (en dehors des périodes de pic de turbidité) indique un lien avec la marée (Illustration 42). A l'échelle d'une journée, la turbidité varie entre 1 et 6 NTU environ. Elle est minimale en fin de jusant et à marée basse, puis elle augmente rapidement au début du flot. La turbidité semble diminuer au cours du flot, avant la plus grande marée haute du jour.

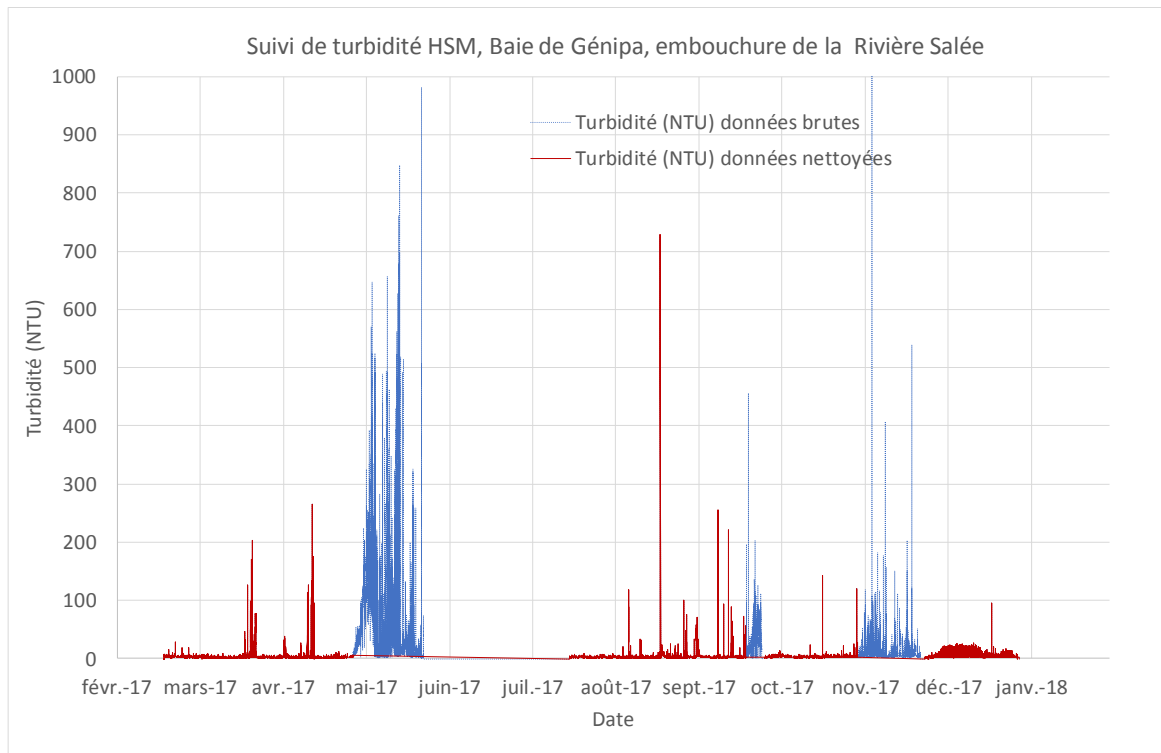


Illustration 40 : Suivi en continu de la turbidité dans la baie de Génipa, à proximité de l'embouchure de la Rivière Salée, entre mars 2017 et janvier 2018. Certaines données acquises ont été supprimées de l'analyse pour cause de salissure du capteur.

	mars	avril	mai	juin	juillet	août	sept.	octobre	nov.	déc.	janv-18
Dispo. données (%)	100	100	39%	0	0	100	100	74%	53%	61%	52%
50 < Pic > 100 NTU		4				1	1				
Pic > 100 NTU		2					1				

Tableau 6 : Typologie et classification des pics de turbidité observés par mois à l'embouchure de la Rivière Salée.

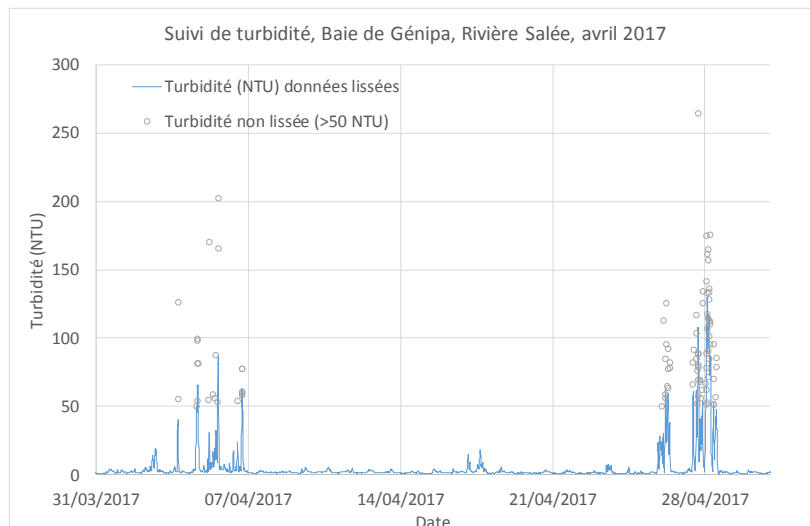


Illustration 41 : Mesures du turbidité dans la Baie de Génipa, à l'embouchure de la Rivière Salée au mois d'avril 2017.

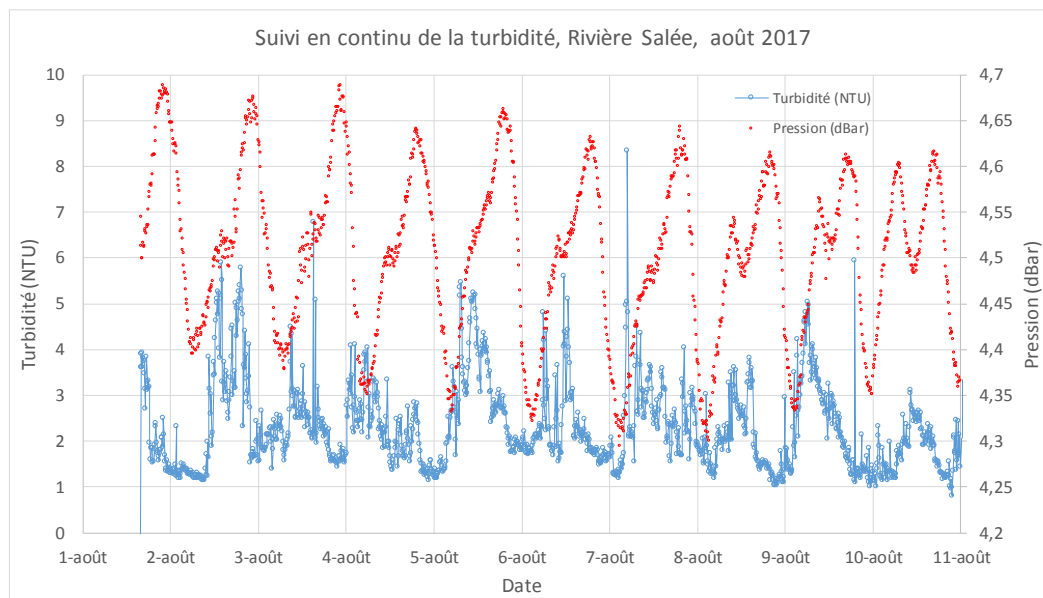


Illustration 42 : Mesures de turbidité et de hauteurs d'eau au mouillage de la Baie de Génipa, embouchure de la Rivière Salée au début du mois d'août 2017.

3.4.2. Prélèvement d'eau dans la baie

Afin de compléter les suivis continus de turbidité en un point fixe, des prélèvements sur différents points de la baie de Fort de France ont été réalisés.

- **Abords des mangroves**

Dans les fonds de baie, la turbidité de surface augmente aux abords des mangroves, dans les secteurs d'installation des Altus (Illustration 43). Les prélèvements effectués lors de la campagne d'installation indiquent que dans la Cohé du Lamentin, la turbidité atteint 21 NTU près de l'Altus 1 à Californie et 4,5 au niveau de Morne Cabrit et de l'Altus 2 (Illustration 43a). Elle décroît rapidement vers le large et l'eau devient très claire non loin de la mangrove.

Le constat est strictement similaire dans la Baie de Génipa. La turbidité atteint 13 NTU au niveau de l'Altus 3 (Canal Cocotte) et 7,6 NTU aux abords de la Rivière Salée (Altus 4). L'installation des Altus en bas de zone intertidale et à proximité des mangroves a donc bien été réalisée dans des zones où la turbidité est plus élevée que dans les petits fonds subtidaux adjacents, il s'agit donc de secteurs ayant un fort potentiel de sédimentation rapide.

Durant l'année de mesure, les prélèvements d'eau ont été renouvelés en août et lors de la démobilisation au niveau de chaque Altus (Illustration 44). On constate que la turbidité est plus faible au niveau de l'Altus 2 qui est installé dans un herbier. Au contraire, la turbidité est plus forte (supérieure à 35 NTU en janvier 2018) au niveau de l'Altus 3 où des séquences associées à une sédimentation active et rapide ont été observées avec l'échosondeur du capteur. Les prélèvements d'août 2017 et de janvier 2018 ayant été fait dans un intervalle de temps relativement court, les niveaux d'eau et de marée étaient comparables pour ces prélèvements, ce qui permet de faire cette hypothèse de variabilité spatiale de la turbidité. En revanche, pour expliquer les différences constatées entre les différentes dates, il conviendrait de prendre en compte les conditions d'agitations en plus des niveaux de marées.

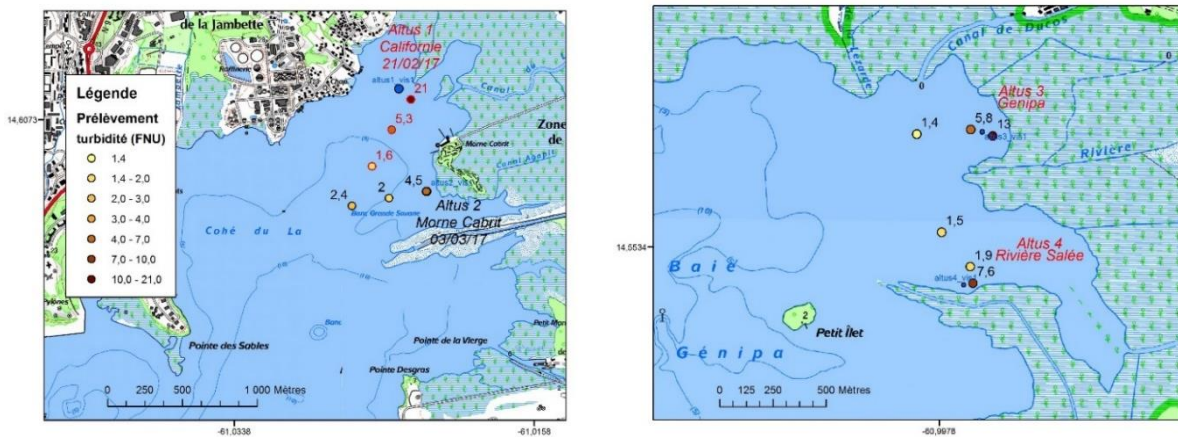


Illustration 43 : Campagne de prélèvements d'eau et d'analyse de la turbidité aux abords des mangroves en février et mars 2017.

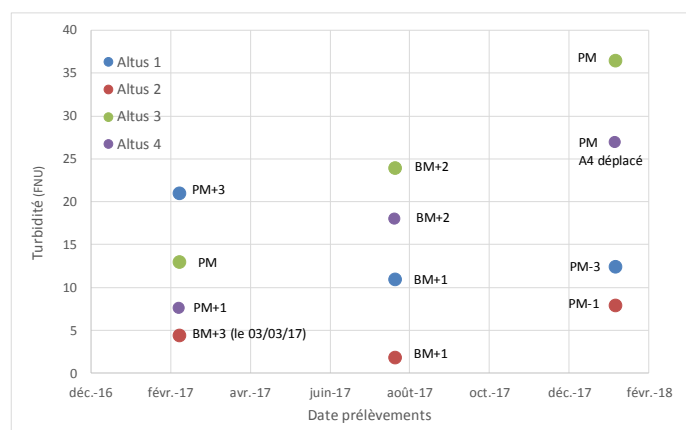


Illustration 44 : Résultats des 3 campagnes de prélèvement d'eau et d'analyse de turbidité en laboratoire au niveau des capteurs Altus, l'état de la marée lors au moment du prélèvement est mentionné (PM : Pleine Mer / PM+1 : Pleine Mer+ 1h / BM : Basse Mer / BM-1 : Basse Mer -1h).

En complément également, pour suivre l'évolution de la turbidité autour de l'Altus n°1 à California, l'implantation d'une sonde multi-paramètres a été testée en acquisition continue.

Mais le capteur de turbidité, pourtant équipé d'un balai de nettoyage, a malheureusement présenté des signes de salissure très rapide, au bout de 15 jours (Illustration 45, Illustration 46). Cependant, les deux semaines de données exploitables confirment la variabilité des turbidités observées à partir des prélèvements (Illustration 44). Ces mesures montrent une variabilité tidale de la turbidité, entre 3 NTU au minimum et 30 à 40 NTU au maximum. L'évolution quotidienne de la turbidité est plus ample que celle observée à l'embouchure de la Rivière Salée, mais la cyclicité est semblable : elle est minimale en fin de jusant et à marée basse, puis elle augmente rapidement au début du flot. Sur les données lissées sur une heure, des pics de turbidité très ponctuels (entre 50 et 150 NTU) sont fréquents (4 pics détectés les 15, 17, 20 et 30 octobre).



Illustration 45 : Forte salissure d'origine biologique sur les capteurs et le balai de nettoyage de la sonde multiparamètre Aquatroll.

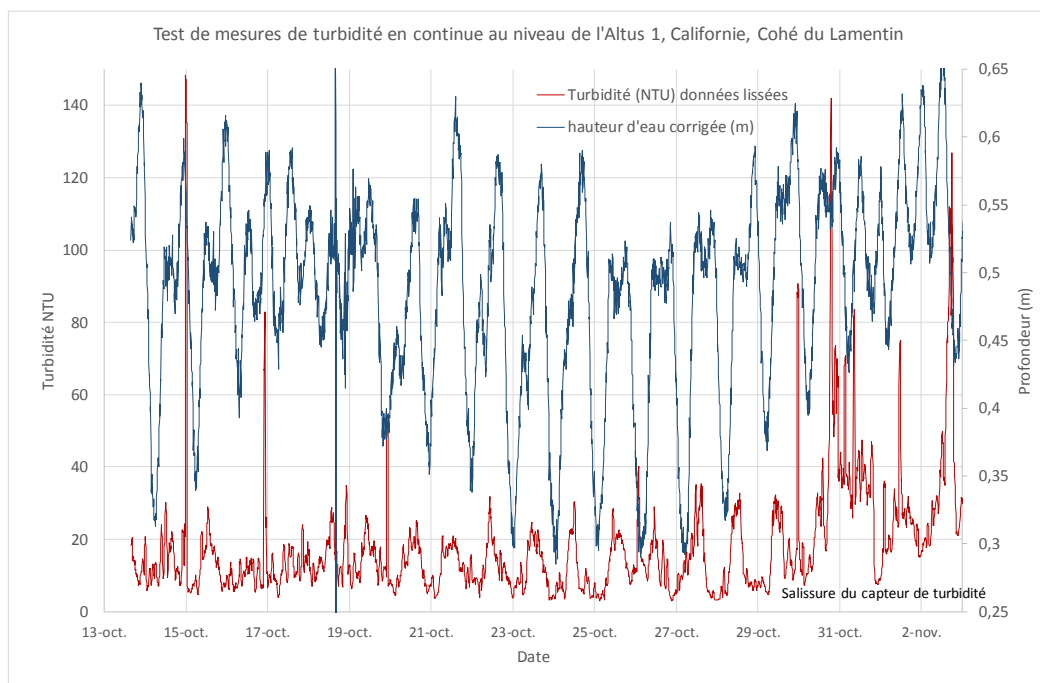


Illustration 46 : Enregistrement de la turbidité et du niveau d'eau avec la sonde Aquatroll 6000 au niveau de l'Altus 1 entre le 14 octobre et le 3 novembre 2017.

- **Extension des panaches turbides**

Le protocole élaboré afin de suivre l'extension des panaches turbides des rivières dans la Baie de Fort de France a été testé en mars 2017. Il s'agissait de repérer les secteurs dont la sédimentation est sous l'influence directe des apports des deux principales rivières en crue et de faire le lien éventuel avec les évolutions de la sédimentation suivie avec les Altus.

Le test de mars 2017 a été réalisé en l'absence de crue et sur un ensemble limité de points de prélèvement. Les turbidités mesurées sont faibles à très faibles, comprises entre 0,6 et 3,6 NTU (Illustration 47).

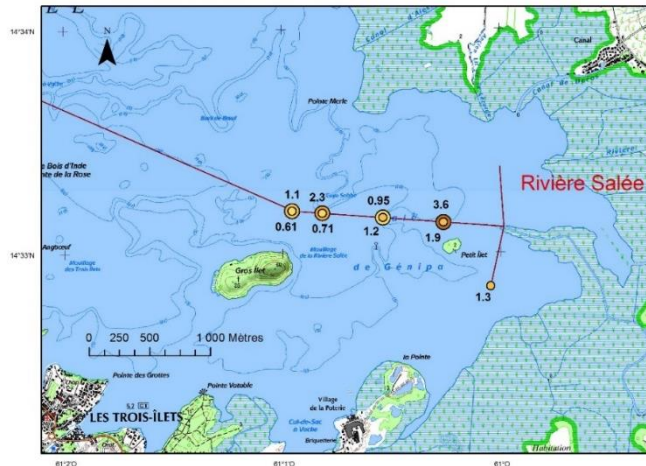


Illustration 47 : Résultat cartographique des analyses de turbidité des prélèvements effectués le 03/03/2017 au matin autour de l'embouchure de la Rivière Salée. Les chiffres du haut, associés aux petits ronds correspondent aux prélèvements de surface, les chiffres du bas, associés aux ronds plus grands correspondent aux prélèvements de fond.

Par la suite, ce suivi de crue a été activé juste après le passage du cyclone Maria (18-19 septembre 2017). Les prélèvements ont été réalisés dans la journée du 21/09/2017, environ 48 h après le passage du cyclone. Autour de la Lézarde, les prélèvements ont été effectués le matin, les turbidités observées étaient faibles à très faibles : 3,8 NTU à l'embouchure, moins de 2 NTU de part et d'autre de l'embouchure, et moins de 1 NTU à distance. Les données mesurées dans la rivière indiquent que la crue s'est terminée dans la nuit du 20 au 21/09/17 (Illustration 49).

Le constat est similaire dans la baie de Génipa où les prélèvements ont été réalisés l'après-midi au niveau de la Rivière Salée. La turbidité atteint 4 NTU à l'embouchure, moins de 3 NTU à 500 m de part et d'autre, et moins de 1 NTU en s'éloignant de l'embouchure. Dans ce secteur, le suivi en continu a montré que la turbidité est revenue à la normale dès le matin du 19/09/17 (Illustration 51).

Ces résultats montrent qu'il n'y a pas eu de turbidité résiduelle dans la baie et autour des embouchures après le passage du cyclone Maria. Les images de drones acquises pendant la mission par la société Carige illustrent ces observations en apportant quelques prises de vues directement au niveau de l'embouchure. Pour la Lézarde, la zone de turbidité apparaît effectivement strictement cantonnée à l'embouchure et à quelques dizaines de mètres autour (Illustration 52). Au niveau de la Rivière Salée, le constat est similaire sur la vue prise au-dessus de l'embarcation utilisée pour les prélèvements (Illustration 53 a). A plus haute altitude, la seconde image sélectionnée montre toutefois l'extension d'un panache orienté vers l'ouest. Mais cette image montre qu'il s'agit d'un panache très superficiel car il est nettement entrecoupé par le sillage d'un bateau, où l'eau apparaît moins turbide. De plus, les analyses des points en surface ont bien montré la faible charge en MES (Illustration 51).

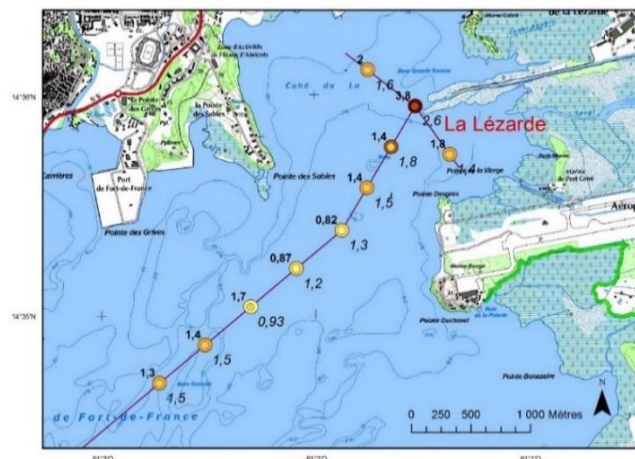


Illustration 48 : Résultat cartographique des analyses de turbidité des prélèvements effectués le 21/09/2017 au matin autour de l'embouchure de la Lézarde, après le passage du cyclone Maria. Les chiffres de gauche, associés aux grands ronds correspondent aux prélèvements de fond, les chiffres de droite, associés aux ronds plus petits correspondent aux prélèvements de surface.

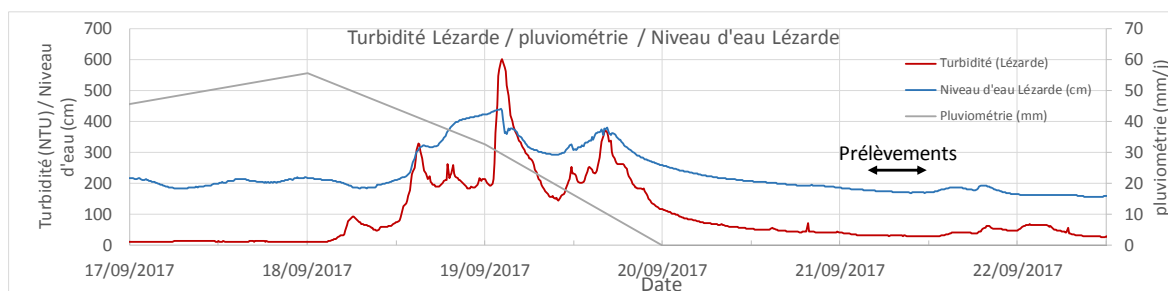


Illustration 49 : Suivi en continu de la turbidité et du niveau de la rivière Lézarde durant le cyclone Maria et la campagne de prélèvement du 21/09/17. Données de pluviométrie journalière : source Météo France.

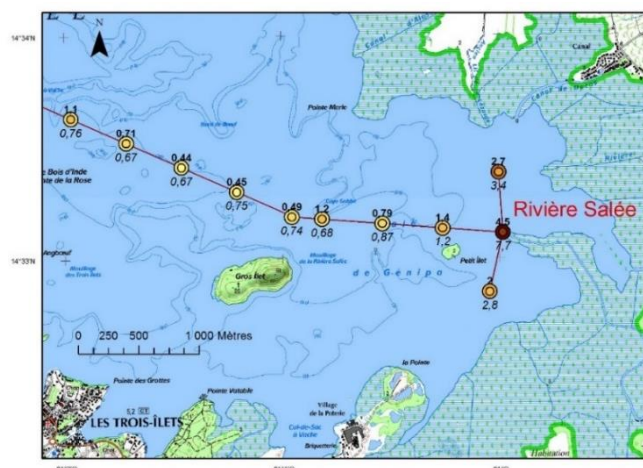


Illustration 50 : Résultat cartographique des analyses de turbidité des prélèvements effectués le 21/09/2017 après-midi autour de l'embouchure de la Rivière Salée, après le passage du cyclone Maria. Les chiffres du haut, associés aux petits ronds correspondent au prélèvements de surface, les chiffres du bas, associés au ronds plus grands correspondent aux prélèvements de fond.

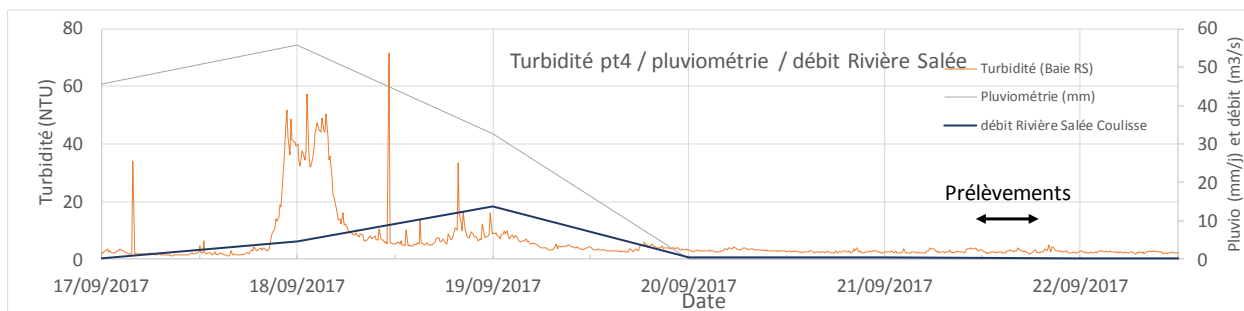


Illustration 51 : Suivi en continu de la turbidité, données de débit de la Rivière Salée et de pluviométrie durant le cyclone Maria et la campagne de prélèvement du 21/09/17. Données de pluviométrie journalière : source Météo France et débit journalier : source DEAL.

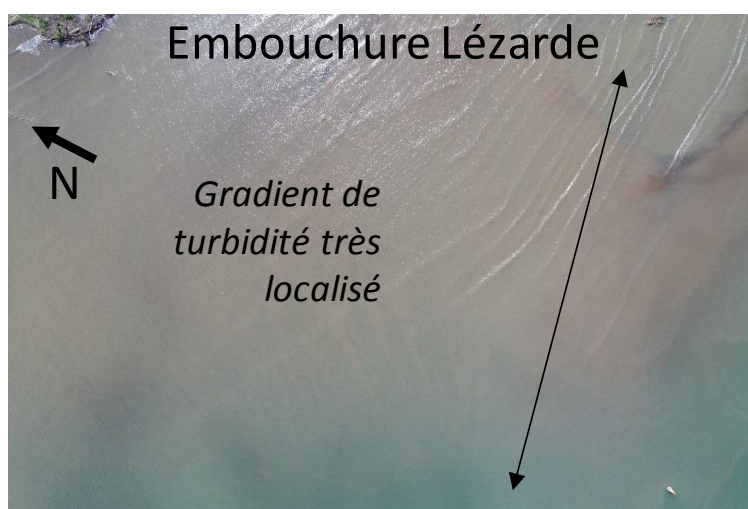
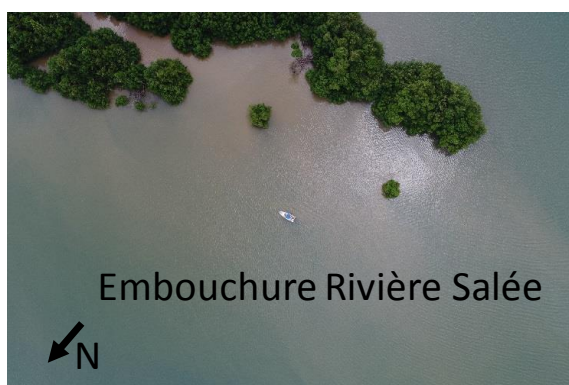
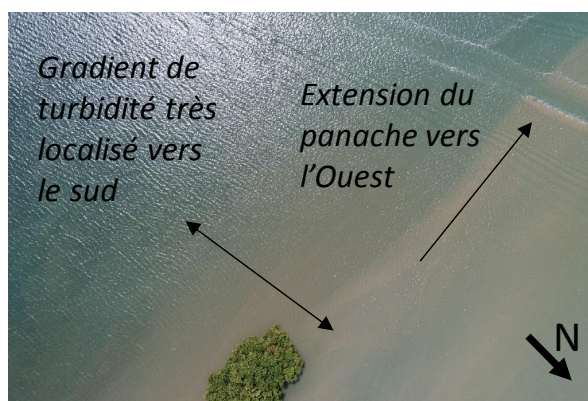


Illustration 52 : Vue aérienne par drone de l'embouchure de la Lézarde lors de la campagne de prélèvements du 21/09/2017.



a)



b)

Illustration 53 : Vues aériennes par drone de l'embouchure de la Rivière Salée lors de la campagne de prélèvements du 21/09/2017.

4. Conclusions

Afin de répondre aux besoins de connaissance des processus hydro-sédimentaires de la Baie de Fort-de-France, deux campagnes de mesures de un mois ont été programmées en 2017 pendant les périodes de Carême et d'hivernage. Ces campagnes de mesures ont été mises en œuvre par la société Nortekmed pour collecter des mesures de courantométrie dans la colonne d'eau, d'agitation, de turbidité, de température et de salinité au fond. Parallèlement aux campagnes de courantométrie et d'agitation de Nortekmed, le BRGM a mis en place deux campagnes de mesures complémentaires sur la période allant du 21/02/2017 au 16/01/2018.

- Evolution des fonds aux abords des mangroves

La première campagne de mesure avait pour but de suivre l'évolution de la sédimentation dans les vasières bordant les mangroves en fond de baie, durant l'année 2017. 4 capteurs NKE Altus ont été installés : 2 dans la Cohé du Lamentin (Californie et Morne Cabrit) et 2 dans la Baie de Génipa (Embouchure de la Rivière Salée et Canal Cocotte). Ces capteurs permettent de suivre l'évolution de la distance entre un échosondeur fixe et le fond. Le niveau d'eau et potentiellement l'agitation sont également mesurés grâce à un capteur de pression.

Pour les secteurs instrumentés près de la mangrove de Californie (Altus 1, Cohé du Lamentin) et de l'embouchure de la Rivière Salée (Altus 4, Baie de Génipa), les capteurs n'ont pas permis de mesurer l'évolution du fond durant l'année. Malgré un bon fonctionnement des instruments, la présence de crème de vase trop épaisse a empêché la plupart du temps la détection d'une interface de vase plus consolidée. A Californie, des mesures cohérentes ont cependant été acquises durant le cyclone Maria, tandis que près de la Rivière Salée, les quelques mesures ponctuelles sont également cohérentes avec les observations in situ réalisées lors des phases d'entretien du matériel.

Pour les secteurs de Morne Cabrit (Altus 2, Cohé du Lamentin) et du Canal Cocotte (Altus 3, Baie de Génipa), les mesures ont donné satisfaction. A Morne Cabrit, dans une zone caractérisée par la présence d'herbiers, le signal très bruité a saturé plusieurs fois la mémoire de l'appareil, puis le capteur a été endommagé à la fin du mois de septembre. Cependant, 2 séquences de baisse du fond puis de remonté ont été observées. La baisse du fond est interprétée comme le tassement de l'interface de vase fluide observée par l'Altus. Les phases de remonté du fond, qui se sont déroulées en mars et en juillet, sont interprétées comme des augmentations de la concentration de la crème de vase superficielle se transformant rapidement en vase fluide, détectable par l'échosondeur de l'Altus.

Dans la baie de Génipa, les données acquises par l'Altus situé à proximité du Canal Cocotte ont montré encore plus nettement le même type de séquence que dans la Cohé du Lamentin. Les séquences sont caractérisées par une baisse de l'interface de février à juillet, une phase de remonté relative du fond entre juillet et septembre, suivi d'une nouvelle phase de tassement rapide.

- Turbidité au niveau des embouchures

La seconde campagne de mesure avait pour but de suivre la turbidité au niveau des embouchures des deux principales rivières de la Baie de Fort-de-France. Les capteurs installés étaient constitués d'un courantomètre ponctuel Aquadopp couplé à un turbidimètre Campbell de type OBS3+ et d'un balai nettoyant.

Pour la rivière Lézarde, le système de mesure a été installé sous le pont Spitz, à 3 km en amont de l'embouchure. Pour la Rivière Salée, l'installation dans la rivière n'a pas été possible. Le système a donc été mouillé dans la Baie de Fort-de-France, à environ 1 km de l'embouchure. Parallèlement, un protocole de prélèvement d'eau permettant des mesures de turbidité en laboratoire a été établi pour suivre l'extension du panache turbide des rivières dans la Baie lors d'un épisode de crue.

Dans la Lézarde, le système de mesure a bien fonctionné, le signal mesuré est globalement de très bonne qualité. La turbidité moyenne est de 30 NTU, mais hors condition de crue, la turbidité est plutôt comprise entre 10 et 20 NTU. Au point de mesure, la marée affecte le niveau d'eau, mais n'a aucun effet sur la turbidité. En revanche, les pics de turbidité sont bien synchronisés avec l'augmentation du niveau d'eau et du débit en crue. Les périodes de fortes turbidités sont fréquentes : de 3 à 8 pics supérieurs à 100 NTU par mois. Les deux plus forts pics observés en 2017 ont dépassé 1000 NTU.

Dans la Baie de Génipa, à la limite des très petits fonds qui s'étendent tout autour de l'embouchure de la Rivière Salée, les données collectées par le turbidimètre sont bruitées et de qualité inférieure. La salissure du capteur a nécessité le nettoyage des données et le signal est souvent peu interprétable sans un filtrage préalable. La valeur moyenne de la turbidité est de 3 NTU, globalement très faible. La turbidité évolue dans la journée entre 2 et 6 NTU en fonction du niveau d'eau et à la limite de détection du capteur. Les pics de turbidité bien distincts sont peu fréquents dans les données nettoyées et n'ont pas dépassé 300 NTU. Des essais de corrélation entre le débit de la Rivière Salée, la pluviométrie et les observations de turbidité n'ont pas donné de résultats probants, laissant penser que le point de mouillage instrumenté est relativement peu affecté par les apports turbides de la Rivière Salée dans la Baie.

La campagne de suivi de la turbidité de la Baie de Fort-de-France en crue a été menée environ 48 h après le passage du cyclone Maria. Les prélèvements et analyses en laboratoire des échantillons d'eau indiquent que les turbidités étaient faibles à proximité des embouchures et très faibles en s'éloignant. Ces observations montrent que 48 h après le cyclone Maria, la turbidité de la Baie de Fort-de-France redevient faible et les eaux très claires. Ces observations sont en accord avec les suivis de turbidité opérés simultanément et qui montrent bien que l'épisode turbide lié au cyclone a vite diminué d'intensité peu après son passage.

- Perspectives

Sur la base des nombreuses données collectées lors de ces campagnes de mesures, la première perspective d'étude consiste à poursuivre les interprétations en couplant ces données avec les différents paramètres environnementaux disponibles comme le vent, le débit des différentes rivières, l'agitation, les courants, les mesures collectées par Nortekmed lors des deux campagnes d'un mois. Ces travaux pourront aussi être menés plus particulièrement avec les données produites lors de la phase de modélisation.

Les campagnes de mesures décrites dans ce rapport ont apporté des connaissances nouvelles sur la sédimentation des vasières du fond de la Baie de Fort-de-France. Cependant certains points de mesures des Altus n'ont pas donné entière satisfaction dans les zones où la crème de vase est trop épaisse. La mise en place d'échosondeurs plus puissants et plus pénétrants permettrait probablement un meilleur suivi de ces sites. De même, il serait pertinent de compléter ces suivis opérés en secteurs essentiellement subtidiaux par des mesures d'évolution du fond située en milieu d'estran et en haut d'estran, dans les mangroves. Le couplage avec des mesures de turbidité en continue et un protocole permettant de qualifier la densité de la crème de vase permettrait de compléter l'analyse des processus sédimentaires.

Pour le suivi de la turbidité en continue, les systèmes de mesure mis en place ont donné satisfaction. Un protocole plus complet pourrait être envisagé pour acquérir des données dans les rivières et à proximité très immédiate des embouchures. Le suivi de la Rivière Salée et les prélèvements d'eau après le cyclone Maria ont en effet montré que la turbidité était faible autour de ces embouchures et diminuait très rapidement en s'éloignant. De plus, afin de mieux cerner l'extension maximale des panaches turbides, le protocole établi pour le suivi des crues pourrait être redéployé dans le cadre d'un suivi très fin de la pluviométrie et du débit des rivières. Enfin, les perspectives d'étude peuvent également consister à coupler les mesures de turbidité en continue à des estimations de transport de MES, afin de réaliser des bilans d'apport et d'érosion. Dans cet objectif, il conviendrait de compléter les mesures par des calibrages réguliers, et des études sur les colloïdes et les composés organiques locaux pouvant colorer l'eau des rivières et de la Baie de Fort-de-France.

Bibliographie

Bourrin F. (2007) - Variabilité et devenir des apports sédimentaires par les fleuves côtiers : cas du système Têt- Littoral roussillonnais dans le Golfe du Lion. Thèse de l'Université de Perpignan. 305 p.

Deloffre J., Lafite R., Lesueur P., Verney R., Lesourd S., Cuvillier A., Taylor J. (2006) - Controlling factors of rhythmic sedimentation processes on an intertidal estuarine mudflat. Role of the turbidity maximum in the macrotidal Seine estuary, France. *Marine Geology*, 235, pp 151-164.

Desmazes F., Sottolichio A., Bertier C., Libaud J.B., Bêché M. (2010) - Dynamique de la crème de vase dans l'estuaire de la Loire. 11ème Journées Nationales du Génie Civil - Génie Côtier, Les Sables d'Olonnes.

Idier D., Le Roy M., Gervais M. et Cayocca F. (2014) – Modélisation hydro-sédimentaire de la baie de Fort-de-France : besoins des acteurs et programme technique. Rapport final. BRGM/RP-63433-FR, 87 p., 19 fig., 2 tabl., 7 ann

Ganthy F. (2012) - Rôle des herbiers de zostères (*Zostera noltii*) sur la dynamique sédimentaire du Bassin d'Arcachon. Thèse de l'université de Bordeaux 1. 284 p.

Gensac E. (2012) Dynamique morpho-sédimentaire d'un littoral sous influence amazonienne. Impact des forçages hydrosédimentaires sur la migration des bancs de vase et la mangrove côtière : Le cas de la Guyane française. Thèse de Géomorphologie. Université du Littoral Côte d'Opale, 187 p.

Impact Mer (2011) - Evolution spatiale des mangroves de Martinique depuis 1951, Rapport d'étude. Deal Martinique. 117 p.

Jestin H., Bassoulet P., Le Hir P., L'Yavanc J., Degres Y. (1998) - Development of ALTUS, a high Frequency acoustic submersible recording altimeter to accurately monitor bed elevation and quantify deposition or erosion of sediments. *Conference Oceans'98*, vol.1/3, pp 189-194.

Vincent, L. (2017 a) – Mesures hydro-sédimentaires dans la baie de Fort-de-France en Martinique. Période Carême du 22/02/2017 au 04/04/2017. EON1496_Rapport_HydroSed_Careme_2017. 180 p.

Vincent, L. (2017 b) – Mesures hydro-sédimentaires dans la baie de Fort-de-France en Martinique. Période hivernale du 13/09/2017 au 18/10/2017. EON1496_Rapport_HydroSed_Hiver_2017_00A. 230 p.

5. Annexe 1

Caractérisation des 4 échantillons de vase de la Baie de Fort-de-France

Extraits du rapport d'essais BRGM n° 17-6-031-A***Teneur en eau***

La teneur en eau est calculée sur la base de la masse initiale humide, et un séchage à 150 °C durant 24h.

Référence échantillons	Teneur en eau %
Altos 1	68,39
Altos 2	69,70
Altos 3	77,40
Altos 4	74,23

La valeur de MES n'a pas été déterminé, car les échantillons ont été considéré comme trop épais pour faire une filtration.

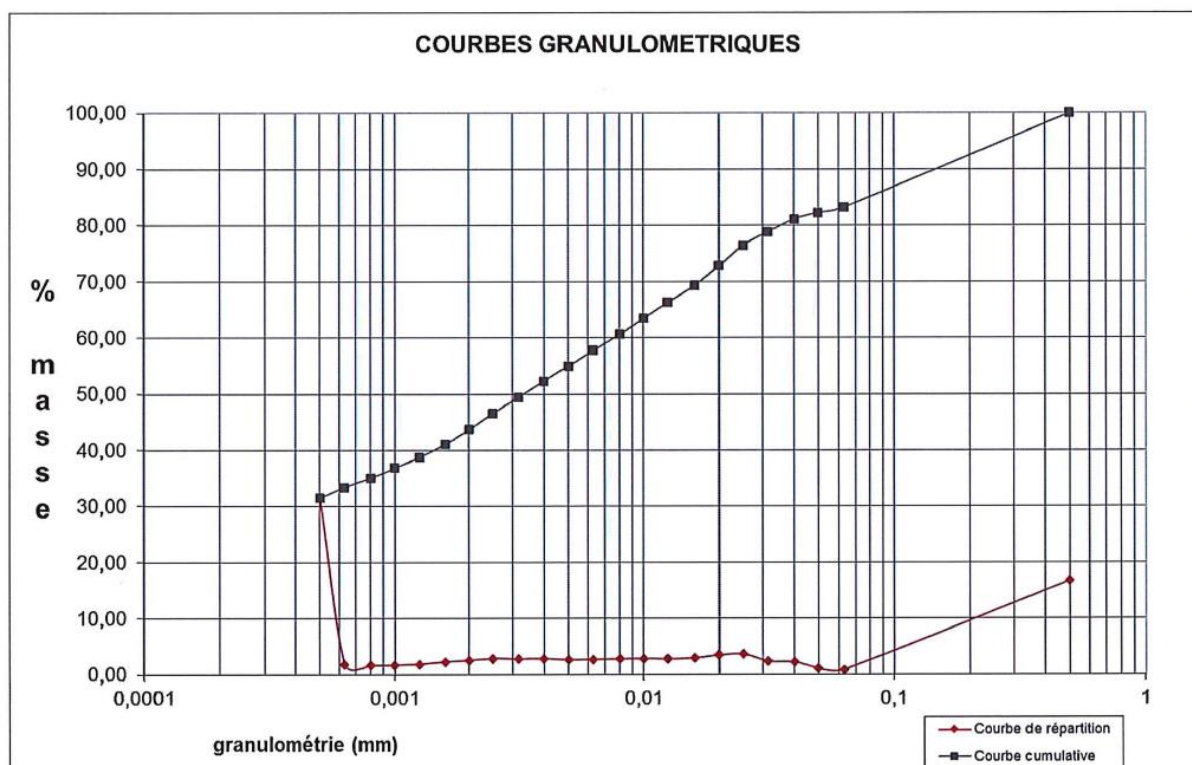
Masse volumique sèche

Les mesures ont été réalisées sur les échantillons par pycnométrie à l'eau (procédure de la norme NF EN 1097-7).

Références Echantillons	MASSE VOLUMIQUE REELLE (g / cm ³)
Altos 1	2,432
Altos 2	2,473
Altos 3	2,384
Altos 4	2,393

Granulométrie laser

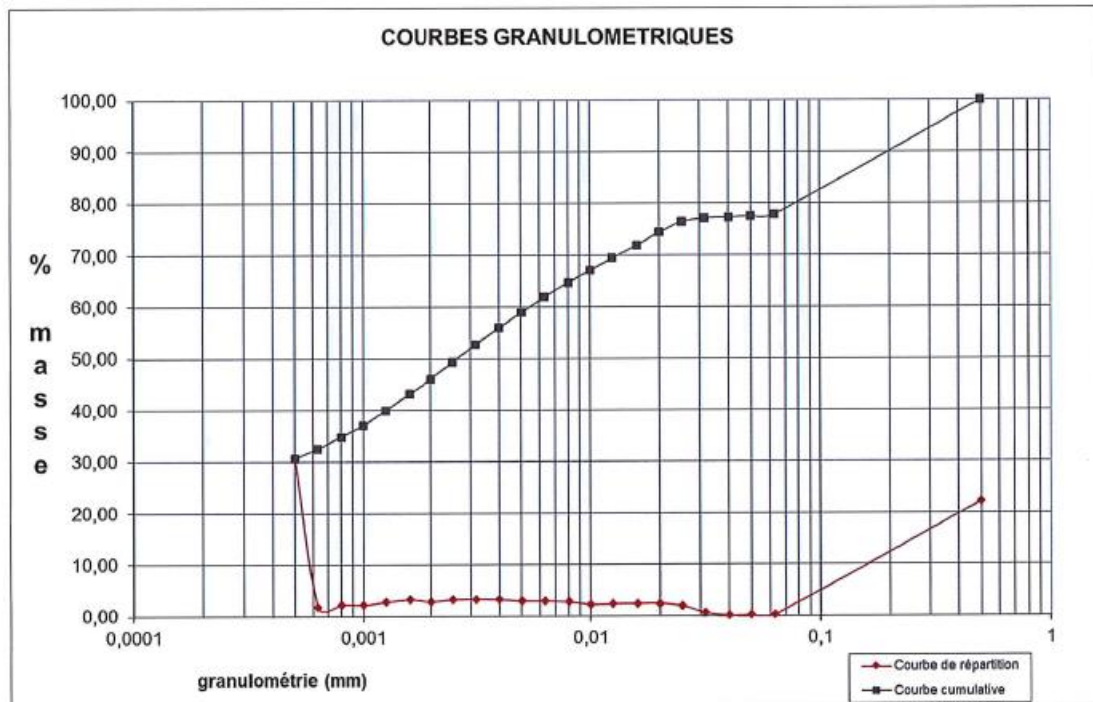
- Altus 1



Intervalle granulométrique	Granulométrie (mm)	% dans l'intervalle	% cumulés
> 63 μm	0,50000	16,76	100,00
de 50 à 63 μm	0,06300	0,92	83,24
de 40 à 50 μm	0,05000	1,17	82,33
de 31,5 à 40 μm	0,04000	2,25	81,16
de 25 à 31,5 μm	0,03150	2,41	78,92
de 20 à 25 μm	0,02500	3,66	76,50
de 16 à 20 μm	0,02000	3,50	72,84
de 12,5 à 16 μm	0,01600	3,00	69,34
de 10 à 12,5 μm	0,01250	2,83	66,35
de 8 à 10 μm	0,01000	2,91	63,52
de 6,3 à 8 μm	0,00800	2,83	60,60
de 5 à 6,3 μm	0,00630	2,75	57,77

Intervalle granulométrique	Granulométrie (mm)	% dans l'intervalle	% cumulés
de 4 à 5 μm	0,00500	2,66	55,02
de 3,15 à 4 μm	0,00400	2,91	52,36
de 2,5 à 3,15 μm	0,00315	2,83	49,45
de 2 à 2,5 μm	0,00250	2,91	46,62
de 1,6 à 2 μm	0,00200	2,58	43,70
de 1,25 à 1,6 μm	0,00160	2,33	41,12
de 1 à 1,25 μm	0,00125	1,91	38,79
de 0,8 à 1 μm	0,00100	1,75	36,88
de 0,63 à 0,8 μm	0,00080	1,66	35,13
de 0,5 à 0,63 μm	0,00063	1,91	33,46
< 0,5 μm	0,00050	31,55	31,55

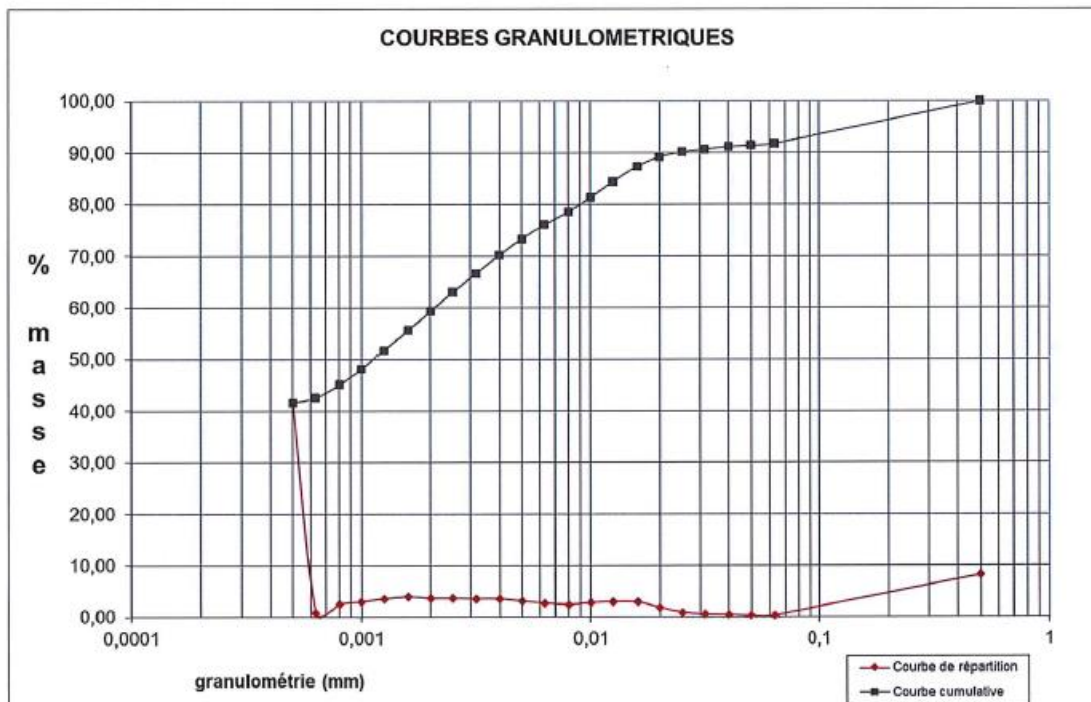
- Altus 2



Intervalle granulométrique	Granulométrie (mm)	% dans l'intervalle	% cumulés
> 63 μm	0,50000	22,16	100,00
de 50 à 63 μm	0,06300	0,31	77,84
de 40 à 50 μm	0,05000	0,23	77,52
de 31,5 à 40 μm	0,04000	0,16	77,29
de 25 à 31,5 μm	0,03150	0,70	77,13
de 20 à 25 μm	0,02500	2,02	76,43
de 16 à 20 μm	0,02000	2,49	74,41
de 12,5 à 16 μm	0,01600	2,49	71,92
de 10 à 12,5 μm	0,01250	2,41	69,43
de 8 à 10 μm	0,01000	2,34	67,02
de 6,3 à 8 μm	0,00800	2,80	64,68
de 5 à 6,3 μm	0,00630	2,96	61,88

Intervalle granulométrique	Granulométrie (mm)	% dans l'intervalle	% cumulés
de 4 à 5 μm	0,00500	2,96	58,92
de 3,15 à 4 μm	0,00400	3,27	55,96
de 2,5 à 3,15 μm	0,00315	3,35	52,69
de 2 à 2,5 μm	0,00250	3,27	49,35
de 1,6 à 2 μm	0,00200	2,88	46,08
de 1,25 à 1,6 μm	0,00160	3,27	43,20
de 1 à 1,25 μm	0,00125	2,80	39,93
de 0,8 à 1 μm	0,00100	2,26	37,13
de 0,63 à 0,8 μm	0,00080	2,34	34,87
de 0,5 à 0,63 μm	0,00063	1,87	32,54
< 0,5 μm	0,00050	30,67	30,67

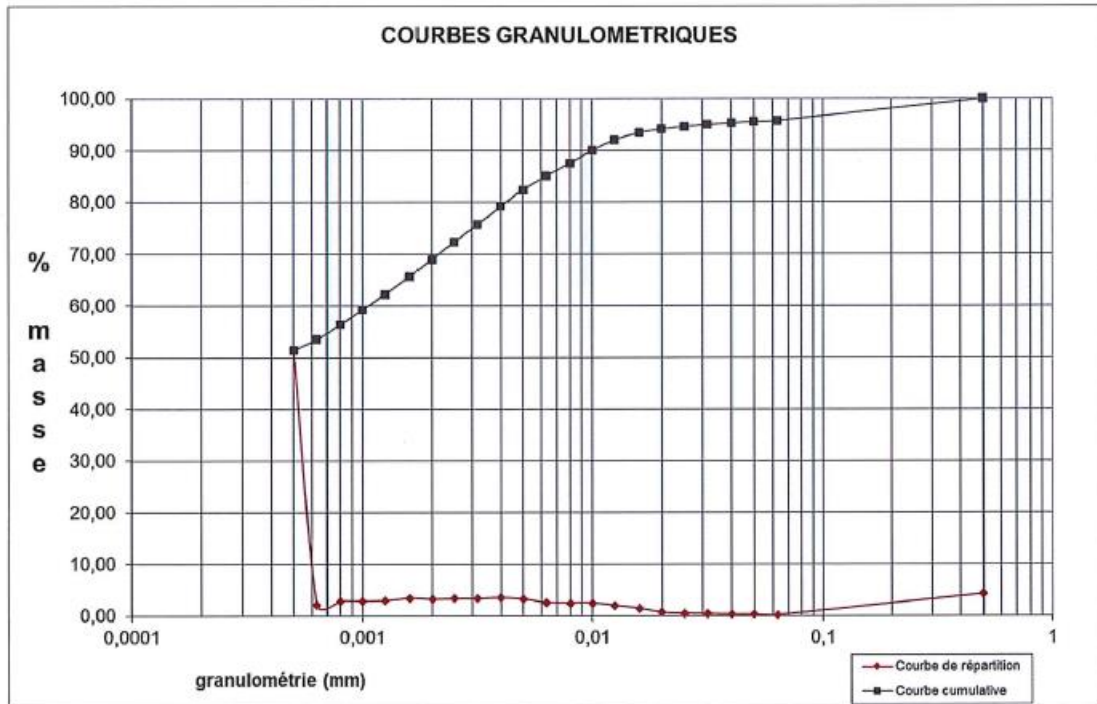
- Altus 3



Intervalle granulométrique	Granulométrie (mm)	% dans l'intervalle	% cumulés
> 63 μ m	0,50000	8,20	100,00
de 50 à 63 μ m	0,06300	0,37	91,80
de 40 à 50 μ m	0,05000	0,28	91,43
de 31,5 à 40 μ m	0,04000	0,46	91,16
de 25 à 31,5 μ m	0,03150	0,55	90,70
de 20 à 25 μ m	0,02500	0,92	90,15
de 16 à 20 μ m	0,02000	1,84	89,23
de 12,5 à 16 μ m	0,01600	2,94	87,39
de 10 à 12,5 μ m	0,01250	3,03	84,46
de 8 à 10 μ m	0,01000	2,85	81,43
de 6,3 à 8 μ m	0,00800	2,48	78,58
de 5 à 6,3 μ m	0,00630	2,75	76,10

Intervalle granulométrique	Granulométrie (mm)	% dans l'intervalle	% cumulés
de 4 à 5 μ m	0,00500	3,12	73,35
de 3,15 à 4 μ m	0,00400	3,58	70,23
de 2,5 à 3,15 μ m	0,00315	3,58	66,65
de 2 à 2,5 μ m	0,00250	3,67	63,07
de 1,6 à 2 μ m	0,00200	3,67	59,40
de 1,25 à 1,6 μ m	0,00160	3,95	55,72
de 1 à 1,25 μ m	0,00125	3,58	51,78
de 0,8 à 1 μ m	0,00100	3,03	48,20
de 0,63 à 0,8 μ m	0,00080	2,57	45,17
de 0,5 à 0,63 μ m	0,00063	0,92	42,60
< 0,5 μ m	0,00050	41,68	41,68

- Altus 4



Intervalle granulométrique	Granulométrie (mm)	% dans l'intervalle	% cumulés
> 63 μm	0,50000	4,22	100,00
de 50 à 63 μm	0,06300	0,19	95,78
de 40 à 50 μm	0,05000	0,29	95,59
de 31,5 à 40 μm	0,04000	0,29	95,30
de 25 à 31,5 μm	0,03150	0,38	95,02
de 20 à 25 μm	0,02500	0,48	94,63
de 16 à 20 μm	0,02000	0,67	94,15
de 12,5 à 16 μm	0,01600	1,44	93,48
de 10 à 12,5 μm	0,01250	2,01	92,05
de 8 à 10 μm	0,01000	2,49	90,04
de 6,3 à 8 μm	0,00800	2,49	87,54
de 5 à 6,3 μm	0,00630	2,59	85,05

Intervalle granulométrique	Granulométrie (mm)	% dans l'intervalle	% cumulés
de 4 à 5 μm	0,00500	3,26	82,47
de 3,15 à 4 μm	0,00400	3,54	79,21
de 2,5 à 3,15 μm	0,00315	3,35	75,67
de 2 à 2,5 μm	0,00250	3,35	72,32
de 1,6 à 2 μm	0,00200	3,26	68,96
de 1,25 à 1,6 μm	0,00160	3,45	65,71
de 1 à 1,25 μm	0,00125	2,97	62,26
de 0,8 à 1 μm	0,00100	2,87	59,29
de 0,63 à 0,8 μm	0,00080	2,87	56,42
de 0,5 à 0,63 μm	0,00063	2,11	53,54
< 0,5 μm	0,00050	51,43	51,43

Teneur en carbonate de calcium

Pour la réalisation des analyses, les échantillons ont été préalablement séchés et broyés en poudre de granulométrie inférieure à 80 µm.

La détermination est effectuée par calcimétrie suivant la procédure de la norme NF P 94-048 (Mode Opératoire BRGM 089).

Référence échantillons	CALCITE / CO₃Ca %
Altos 1	2,1
Altos 2	10,9
Altos 3	3,3
Altos 4	1,1

Teneur en carbone total

Pour la réalisation des analyses, les échantillons ont été préalablement séchés et broyés en poudre de granulométrie inférieure à 80 µm.

La détermination est effectuée par calcination à 550 °C.

Référence échantillons	Teneur en carbone total %
Altos 1	19,73
Altos 2	18,16
Altos 3	22,08
Altos 4	20,04

Caractérisation minéralogique de la fraction argileuse par diffractométrie des rayons X

Extraits du rapport d'essais 17-6-031-B

- Nature de l'essai

La fraction phylliteuse des échantillons est déterminée par diffractométrie des rayons X à partir de lames orientées normales, glycolées pendant 12 heures en tension de vapeur puis chauffées à 490°C pendant 4 heures. Les proportions sont estimées à partir de l'aire des pics. Il faut bien tenir compte que les pourcentages indiqués sont des valeurs relatives des phases phylliteuses présentes dans la fraction dite « < 2 microns » de l'échantillon.

- Appareillage et conditions expérimentales

Analyses sur lame orientée (fraction < 2µm) :

Appareillage : Diffractomètre Bruker D8 Advance Da Vinci

Conditions expérimentales :

- Balayage de 2.5 à 35°2θ
- Vitesse de balayage de 0,02°2θ/seconde
- Temps de comptage : 130.5 secondes par pas
- Echantillon fixe
- Tube au Cuivre (λ K α 1 $\approx$ 1,5406 Å)

Traitement des diagrammes : Logiciel DIFFRAC Suite

Préparation des échantillons pour lame orientée:

- Saturation des minéraux argileux en Ca²⁺ à l'aide d'une solution de chlorure de calcium à 0.01M

Lavage des suspensions avec de l'eau déminéralisée

Traitement des diffractogrammes : Logiciel DIFFRAC Suite

- Résultats

%	Altus 1	Altus 2	Altus 3	Altus 4
Smectite	51	63	55	64
Kaolinite	49	37	45	36



Géosciences pour une Terre durable

brgm

Centre scientifique et technique
3, avenue Claude-Guillemin
BP 36009
45060 Orléans Cedex 2 - France
Tel. 02 38 64 34 34

Direction Régionale Martinique
4 Lot. Miramar
Route Pointe des Nègres
97200 – Fort de France – France
Tél. : 05 96 71 17 70