



RÉPUBLIQUE
FRANÇAISE

Liberté
Égalité
Fraternité



Document à accès immédiat

Analyse du fonctionnement hydro-sédimentaire de l'étang des Salines en Martinique

Rapport final

BRGM/RP-72289-FR

Version 1 du 23 février 2023

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

C. Bouvier, F. Maldan, M. Lanson, A.L. Tailame et P.A. Reninger

Vérificateur :	
Nom :	Balouin Y.
Fonction :	Expert Littoral
Date :	22/11/2022
Signature :	

Approbateur :	
Nom :	B. Vittecoq
Fonction :	Directeur régional Martinique
Date :	23/02/2023
Signature :	

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

Contact : qualite@brgm.fr

Avertissement

La communicabilité et la réutilisation de ce rapport sont régies selon la réglementation en vigueur et/ou les termes de la convention.

Le BRGM ne saurait être tenu comme responsable de la divulgation du contenu de ce rapport à un tiers qui ne soit pas de son fait et des éventuelles conséquences pouvant en résulter.

Votre avis nous intéresse

Dans le cadre de notre démarche qualité et de l'amélioration continue de nos pratiques, nous souhaitons mesurer l'efficacité de réalisation de nos travaux.

Aussi, nous vous remercions de bien vouloir nous donner votre avis sur le présent rapport en complétant le formulaire accessible par cette adresse <https://forms.office.com/r/yMgFcU6Ctq> ou par ce code :



Mots clés : Lagune côtière, hydrodynamique, morphodynamique, Martinique, Sainte-Anne

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

C. Bouvier, F. Maldan, M. Lanson, A.L. Tailame et P.A. Reninger (2023) – Analyse du fonctionnement hydro-sédimentaire de l'étang des Salines en Martinique. Rapport final V1. BRGM/RP-72289-FR, 58 p.

© BRGM, 2023, ce document ne peut être reproduit en totalité ou en partie sans l'autorisation expresse du BRGM.
IM003-MT008-P2-20/01/2022

Synthèse

Contexte

Situées le long du littoral, les lagunes côtières sont des morphologies communes caractérisées par des eaux marines intérieures dont la profondeur dépasse rarement quelques mètres, généralement orientées parallèlement à la côte, séparées de l'océan par un cordon sableux mais reliées par un ou plusieurs canaux ou bras de mer restreints. Agissant généralement comme des puits nets de matériel sédimentaire, les lagunes évoluent progressivement vers d'autres types d'environnements, nécessitant alors un suivi adapté et parfois l'aménagement de certains secteurs.

En Martinique, la géomorphologie de l'étang des Salines a été façonnée au cours des régressions et transgressions marines. Il y a une dizaine de milliers d'années, lors d'une dernière phase de remontée du niveau marin (remontée Flandrienne), l'érosion du cordon sableux a permis l'inondation de certains secteurs et la formation de l'étang. Ce système lagunaire se situe sur un secteur cultivé et valorisé par de la production agricole depuis de nombreuses années et dont les pratiques ont une incidence directe sur les eaux de ruissellement qui convergent vers l'étang. Avec un plan d'eau dont la superficie est supérieure à 80 ha, ce dernier communiquait avec la mer par le moyen de deux canaux artificiels.

Situé au nord-ouest, un premier canal aurait été creusé au XIX^{ème} siècle afin de drainer les marais pour la production de sel et traverse aujourd'hui une zone de mangrove avant d'aboutir à la mer. Le canal reste très peu profond sur toute sa longueur et ne permet pas les échanges de masse d'eau entre la mer et la lagune. Ainsi, côté mer, l'embouchure du canal reste bouchée de façon quasi-permanente. Situé au sud-est, un second canal permet d'assurer les échanges de masse d'eau entre la mer et la lagune.

Le Conservatoire du Littoral et le BRGM ont souhaité acquérir de nouvelles connaissances sur cette lagune côtière, notamment vis-à-vis de son fonctionnement hydrosédimentaire qui suscite encore aujourd'hui de nombreuses interrogations.

Principaux résultats

a) *Fonctionnement hydrodynamique*

Les apports d'eau douce annuels en transit dans la lagune des Salines sont nettement supérieurs (> 500 %) au volume total de l'étang et constituent un forçage physique et écologique essentiel. Néanmoins, ces apports varient considérablement selon la saison où la recharge théorique mensuelle est deux fois plus importante pendant la saison humide que pendant la saison sèche. En augmentant le niveau d'eau de la lagune et parfois en élargissant le canal d'entrée, les pics saisonniers d'apport d'eau douce ont une incidence profonde sur l'hydrodynamique et la morphologie de l'étang.

Les marées observées dans la lagune sont déterminées par les marées de l'océan côtier et donnent lieu à une dynamique d'écoulement non linéaire. Ainsi, le second canal (sud-est) sert de filtre dynamique qui alterne les courants ainsi que les fluctuations du niveau d'eau dans la lagune. L'amplitude de marée (~ 0.07 m) est nettement inférieure à celle observée en mer (~ 0.60 m) avec un déphasage important (~ 4.5 h).

Des fluctuations saisonnières de niveaux d'eau ont également été observées dans la lagune et sont directement reliées aux variations des niveaux d'eau observés en mer. Entre décembre et juillet, les niveaux en mer sont plus bas que ceux mesurés entre juillet et novembre, forcés par des effets barométriques à l'échelle de la Caraïbe et par la circulation régionale. On observe ainsi à l'échelle saisonnière des variations sur les niveaux d'eau de la lagune dont l'amplitude atteint environ 0.10 m.

Les mesures de température dans l'étang montrent des variations comprises entre 22 et 36°C, largement influencées par l'élévation du soleil qui détermine l'alternance entre le jour et la nuit, la température de l'air et le réchauffement de la colonne d'eau. Les mesures du taux de salinité mettent en évidence des variations comprises entre 10 et 40 PSU (unité de salinité pratique), contrôlées par la circulation tidale (oscillations journalière à hauteur de 5 PSU) et les apports en eau douce, notamment en période de fortes pluies.

b) Evolution morphologique

Une réduction importante de la surface en eau de la lagune a été mise en évidence entre 1992 et 2006 (estimée à ~ 84 000 m² soit ~10% de la superficie actuelle de l'étang). La mise en place d'une retenue collinaire sur le secteur nord-est de la lagune dans les années 80 constitue une ressource mobilisable non négligeable et un obstacle à l'écoulement naturel des eaux de ruissellement. Ainsi, le phénomène d'envasement décrit il y a quelques années ne serait pas directement relié à une mauvaise communication entre la mer et la lagune mais à une réduction des apports en eau douce et la conséquence de l'aménagement du bassin versant. Depuis quelques années (entre 2006 et 2017), il semblerait que la morphologie de l'étang ait retrouvé un certain équilibre réalisé au détriment de certaines portions de la lagune (e.g. fermeture du canal situé au nord-ouest, zone de mangrove exondée).

Aujourd'hui, la lagune des Salines reste un environnement peu profond où 60 % de l'étang est caractérisé par des hauteurs d'eau inférieures à 0.30 m. Le volume total de la surface en eau a été estimé à environ 175 000 m³ (hors canaux). Sur le rivage, les berges de l'étang sont caractérisées par de très faible pente où les variations du niveau d'eau jouent un rôle majeur sur l'inondation ou l'exondation de certaines portions de la lagune. A noter que l'épaisseur de vase non indurée reste conséquente, supérieure en moyenne à l'épaisseur de la colonne d'eau. Les dépôts sédimentaires présents dans la lagune (en particulier sur le secteur nord-ouest) proviendraient en majorité de la sédimentation verticale et des apports terrigènes issus du bassin versant.

Diagnostiques et recommandations

a) Préconisations de gestion

Parmi les principaux résultats obtenus, la réduction de la surface en eau de la lagune, décrite parfois comme un phénomène d'envasement, ne semble pas se poursuivre aujourd'hui. Néanmoins, certaines portions peuvent se trouver temporairement à sec (majoritairement entre décembre et juillet) en raison de leurs faibles profondeurs et des niveaux d'eau en mer relativement bas. Il paraît aujourd'hui nécessaire de mieux évaluer les impacts écologiques et environnementaux potentiels associés à cette dynamique (e.g. mangrove sur la portion nord-ouest).

La communication entre la lagune et la mer fonctionne aujourd'hui avec un certain équilibre et les dépôts sédimentaires présents proviendraient en majorité de la sédimentation verticale et des apports terrigènes issus du bassin versant. Un réaménagement important des canaux perturberait la propagation de l'onde de marée au sein de la lagune et engendrerait une modification de son amplitude et des courants. Avec une amplitude de marée plus importante, le

niveau d'eau à marée haute pourrait devenir supérieur à celui mesuré aujourd'hui entraînant inévitablement l'inondation des berges. A marée basse, le niveau d'eau deviendrait bien inférieur à celui mesuré aujourd'hui entraînant une augmentation des surfaces exondables. Par ailleurs, l'intensification des courants de flot qui résulterait d'une augmentation du volume oscillant pourrait également entraîner l'accumulation de matériaux sédimentaires au niveau de l'exutoire et la formation d'un delta. Au contraire, une réduction de l'amplitude de marée au sein de la lagune influencerait significativement la circulation actuelle, les variations du taux de salinité et à terme sa morphologie.

Les évolutions observées au cours de ces dernières décennies montrent que l'embouchure principale de la lagune est dynamique avec une forte tendance à l'ouverture, suggérant l'expulsion naturelle de matière sédimentaire en mer notamment en période de fortes pluies. La situation géomorphologique actuelle de l'embouchure engendre des problèmes de franchissement et de sécurité pour les usagers au niveau de la passerelle de l'Anse à Prunes. La relocalisation de cet ouvrage doit alors être planifiée en évitant toute perturbation de la dynamique des écoulements dans le secteur de l'embouchure.

Afin d'amplifier les flux sédimentaires dirigés vers la mer au cours d'épisodes de fortes pluies, des actions de gestion simple peuvent être mises en place avec un réaménagement des différentes retenues d'eau en amont du bassin versant. Il faut néanmoins agir avec discernement pour que ces travaux ne favorisent pas au contraire l'apport de matériaux terrigènes supplémentaire et une sédimentation accrue au sein de la lagune.

b) Assurer un suivi de la lagune

L'étang des Salines est dynamique et il est essentiel de comprendre et de suivre son évolution au cours du temps. Aussi, la poursuite du suivi hydrodynamique et morphodynamique de l'étang des Salines doit être envisagé. L'élaboration d'un carnet de bord des évolutions observées pourrait être facilement mis en place. Ces informations, qui sont faciles à renseigner en temps réel, sont généralement inexistantes et difficiles à récupérer à posteriori, mais sont primordiales pour une gestion adaptée.

Si les observations sont indispensables et restent un point clef à tout début d'investigation, l'amélioration de la compréhension des processus hydro-sédimentaires contrôlant l'évolution des systèmes lagunaires doit également associer la modélisation numérique, notamment afin de permettre l'identification des processus moteurs ou l'anticipation des mouvements sédimentaires.

Sommaire

1. Introduction	11
1.1. Cadre de l'étude.....	11
1.1.1. Contexte.....	11
1.1.2. Objectifs.....	12
1.2. Généralité sur les lagune côtières	12
1.2.1. Morphologie	12
1.2.2. Fonctionnement hydro-sédimentaire	13
1.3. Site d'étude	14
1.3.1. Contexte géologique	14
1.3.2. Géomorphologie de la lagune	15
1.3.3. Contexte agricole et exploitation du bassin versant.....	16
1.3.4. Description des canaux.....	17
2. Matériel et méthode.....	18
2.1. Hydrodynamiques	18
2.1.1. Hydrologie et données pluviométriques.....	18
2.1.2. Suivi du niveau d'eau et mesure de débit.....	19
2.2. Evolution de la lagune et contexte morfo-sédimentaire	21
2.2.1. Images aériennes et satellites.....	21
2.2.2. Mesures topo-bathymétriques.....	24
2.2.3. Mesures géophysiques	24
3. Résultats.....	26
3.1. Hydrodynamique de la lagune.....	26
3.1.1. Bilan hydrologique.....	26
3.1.2. Evolution des niveaux d'eau.....	30
3.1.3. Régime de marée et circulation tidale	32
3.1.4. Température et salinité.....	36
3.2. Morphodynamique de la lagune	39
3.2.1. Evolution historique.....	39
3.2.2. Dynamique de l'embouchure (canal sud-est)	Erreur ! Signet non défini.
3.2.3. Analyse géomorphologique.....	44
3.2.4. Morphologie actuelle de la lagune.....	45
3.3. Contexte sédimentaire	46
3.3.1. Epaisseur de sédiment meuble	46
3.3.2. Formations géologiques.....	47
4. Discussions.....	Erreur ! Signet non défini.
4.1. Synthèse des résultats et Diagnostics.....	50
4.1.1. Bilan hydrologique.....	50
4.1.2. Variabilité des niveaux d'eau dans la lagune.....	50
4.1.3. Température et salinité.....	51
4.1.4. Evolution historique et morphologie actuelle	51
4.2. Recommandations	52
4.2.1. Gestion et aménagement de la lagune.....	52
4.2.2. Poursuivre le suivi de la lagune.....	53
4.2.3. Modélisation des processus hydro-sédimentaires	54
5. Conclusion	55
Références.....	56

Liste des figures

Figure 1 : Photographie aérienne du site des Salines prise le 9 juin 2022 par autogyre lors de la campagne de suivi topo-bathymétrique (© Sub-C Marine).....	11
Figure 2 : Sondage géologique n°S2 (localisé en rouge sur la carte) à la tarière mécanique (Deneufbourg, 1970). Les sondages S1 et S4 sont respectivement illustrés en violet et en vert.	15
Figure 3 : carte topo-bathymétrique des salines (LITTO3D) où sont superposés la surface en eau de l'étang (bleu clair) et les différentes zones de vase (V1-V5). Le bassin versant (trait noir en pointillé) ainsi que les principaux cours d'eau (BDTOPO) et canaux sont illustrés par les lignes bleues (traits pleins ou pointillés respectivement). La localisation des différentes stations de mesure est représentée par les triangles jaunes (niveaux d'eau) et par des triangles bleus (pluviométrie). Enfin la location des points de mesure issus du levé électromagnétique hélicopté est présentée par les points roses (HTEM). Fond de carte : BD ORTHO® 2017.	16
Figure 4: Photographies aériennes illustrant le début (côté lagune) et la sortie (côté mangrove) du canal nord-ouest (a et b respectivement). Le panel c présente le canal sud-est, qui constitue le lieu des principaux échanges de masse d'eau entre la mer et la lagune.	17
Figure 5 : installation de la sonde dipper CB1 _{West} au niveau du ponton en bois, sur le secteur Ouest de la lagune à proximité de l'estran.	19
Figure 6 : installation de la sonde CTD diver CB2 _{East} au niveau de l'entrée (côté étang) du canal Sud de la lagune.....	20
Figure 7 : mesures par jaugeage réalisées en juillet 2021 afin d'estimer les débits à l'entrée du canal sud.	21
Figure 8 : exemple d'images aériennes où sont superposés les lignes de limite de végétation (trait noir) et de la surface en eau (trait bleu).....	22
Figure 9 : Evolution du lac supérieur situé au nord de l'étang des Saline, (a) Absence du lac en 1951, (b) présence du lac artificiel aux bords bien délimités en 1988 et (c) lac eutrophisé mise en évidence par le développement important de la végétation en 2017	24
Figure 10 : précipitation annuelle (moyenne entre 1991 et 2017) spatialisée à l'échelle du km ² , (rapport RP-68883-FR).	26
Figure 11 : schéma conceptuel du bilan hydrologique (Mm ³ /an) à l'échelle du bassin versant de la lagune des Salines. La présence de l'étang défini comme une surface en eau n'est pas prise en compte pour la caractérisation de l'évapotranspiration. La pluie efficace est donc estimée directement à l'échelle du bassin versant.....	27
Figure 12 : schéma conceptuel illustrant le bilan hydrologique (Mm ³ /an) à l'échelle du bassin versant de la lagune des Salines. La présence de l'étang défini comme surface en eau est prise en compte pour la caractérisation de l'évapotranspiration.....	28
Figure 13 : précipitation (RR en mm) et recharge théorique mensuel en eau douce (V, en Mm ³) sur l'étang des Salines. Bilan hydrologique réalisé entre 1991 et 2017 (27 ans).	29
Figure 14 : Evolution temporelle des niveaux d'eau dans la lagune. a) Pluviométrie journalière (RR en mm/j) et composante mensuelle du signal (superposée en trait épais discontinu). b) Niveaux d'eau mesurés au Robert (Nz _{Robert} en m) et enveloppe des plus hautes/basses mer. La composante mensuelle du signal est superposée en trait épais discontinu. c) Niveaux d'eau mesurés dans la lagune (Nz _{Lagune} en m) aux stations CB1 _{West} (en bleu) et CB2 _{East} (en rouge) et composantes mensuelles filtrées (traits épais discontinus). d) Asymétrie des marées (durée du flot cumulée sur 30 jours) en mer (traits noirs) et dans la lagune (trait rouge et bleu). Les courants	

du flot sont supérieurs à ceux du jusant lorsque la durée du flot devient inférieure à celle du jusant (< 50 %). 31

Figure 15 : Evolution temporelle des niveaux d'eau dans la lagune. a) Pluviométrie journalière (RR en mm/j). b) Niveaux d'eau mesurés au Robert (en gris) et dans la lagune aux stations CB1_{West} (en bleu) et CB2_{East} (en rouge). Les composantes mensuelles des signaux filtrés sont illustrées en traits clairs discontinus..... 32

Figure 16 : (a1-c2) - Composantes principales diurnes (à gauche) et semi-diurnes (centre) de la marée en mer au Robert (a1-a2) et dans la lagune aux stations CB2_{East} (b1-b2) et CB1_{West} (c1-c2). Présentés sur la droite, les paramètres obtenus aux trois stations de mesure et décrivent respectivement la période (j), l'amplitude (m) et la phase (°) pour chaque composante de la marée. L'amplitude relative de la marée (R) et le déphasage (lag en heure) sont également indiqués..... 33

Figure 17: mesures par jaugeage des vitesses d'écoulement à l'entrée (côté lagune) du canal sud-est. Mesures réalisées à marée descendante le 24 février (a-b) et à marée montante le 9 mai 2022 (c-d). Un débit sortant (lagune vers mer) est indiqué par la symbolique E => M. Au contraire, un débit entrant (mer vers lagune) est indiqué par la symbolique M => E..... 35

Figure 18 : mesures par jaugeage des vitesses d'écoulement à l'entrée (côté lagune) du canal sud-est. Mesures réalisées à marée montante le 23 juin (a-b) et à marée descendante le 4 juillet 2022 (c-d). Un débit sortant (lagune vers mer) est indiqué par la symbolique E => M. Au contraire, un débit entrant (mer vers lagune) est indiqué par la symbolique M => E..... 35

Figure 19 : Evolution temporelle des températures et salinité dans la lagune. (a) Pluviométrie journalière (RR en mm/j), (b) niveaux d'eau mesurées dans la lagune (Nz_{Lagune} en m), (c) température et (d) salinité mesurées aux stations CB1_{West} (en bleu) et CB2_{East} (en rouge). (c) La courbe noire présente l'évolution des températures mesurée en mer au Robert. 37

Figure 20 : Evolution temporelle des températures et salinité dans la lagune. (a) élévation du soleil (en °), (b) niveaux d'eau mesurées dans la lagune (Nz_{Lagune} en m), (c) température et (d) salinité mesurées aux stations CB1_{West} (en bleu) et CB2_{East} (en rouge). (c) La courbe noire présente l'évolution des températures mesurée en mer au Robert. 38

Figure 21: évolution de la largeur de berge moyenne (p1 à p120) dans la lagune des Salines entre 1951 et 2022. a) Cartographie illustrant la limite mouillée de l'étang pour chaque image analysée et où présentées les zones de vasière (V1-V4). Les traits noirs illustrent la localisation des différents profils pour le calcul de largeur (p1 à p120). b) évolution de la largeur de berge par rapport à la situation initiale de 1951 (moyenne sur l'ensemble de la lagune). Fond de carte : BD ORTHO® 2017..... 39

Figure 22 : évolution de la largeur de berge dans la lagune des Salines entre 1951 et 2022 moyennée pour chacune des zones de vasière (V1-V4). Superposés sur les cartographies à droite, les traits noirs illustrent la localisation des différents profils pour le calcul de largeur (p1 à p120). Fond de carte : BD ORTHO® 2017. 41

Figure 23 : évaluation de certains facteurs géomorphologiques de la lagune. Cette appréciation visuelle est retranscrite à partir d'une échelle d'interprétation visuelle (cf. Tableau 3) qui varie entre 0 (nul ou inexistant) et 3 marqué, fortement développé) 44

Figure 24: Morphologie de l'étang des salines. a) Carte topo-bathymétrique avec z (m) la côte du fond par rapport au niveau de référence ngm. b) Analyse par profil de la répartition des côtes du fond où les iso-contours représentent l'extension de l'habitat intertidal défini par les hauteurs d'eau situés entre -0.08 et +0.20 m (ngm). Chacun des profils analysés est illustré sur le panel supérieur par des traits noirs le long des berges. Fond de carte : BD ORTHO® 2017..... 45

Figure 25: Epaisseur de sédiments meubles dans l'étang des salines. Carte topo-bathymétrique de l'épaisseur de vase Z_{vase} (m). Chacun des profils analysés est illustré sur le panel supérieur par des traits noirs le long des berges. Fond de carte : BD ORTHO® 2017..... 47

Figure 26: profil type de la lagune où sont représentées la côte du fond moyenne et sa variabilité (diagramme en boîte) calculé le long des transects (p1 à p120 Figure 25). L'épaisseur de sédiment meuble est illustrée par la surface colorée en vert. Les différents niveaux d'eau sont représentés par les surfaces bleues..... 47

Figure 27 : (à gauche) profil de résistivité selon les lignes de vol L1 à L5 (haut en bas) où sont illustrés les différentes formations géologiques. (à droite) Localisation des lignes de vol et points échantillonnés..... 48

1. Introduction

1.1. CADRE DE L'ETUDE

1.1.1. Contexte

Situé sur la commune de Sainte-Anne au Sud de la Martinique (Figure 3), le site "Des Salines à la Baie des Anglais" est une zone humide remarquable reconnue par la convention *Ramsar* (www.ramsar.fr). Les Salines forment un ensemble naturel encore préservé regroupant à la fois une lagune, un cordon sableux avec des plages, une forêt littorale et une mangrove (Figure 1). Avec plus d'un million de visiteurs par an sur la plage de Grande Anse des Salines, l'ensemble du système lagunaire reste un environnement fragile dans un contexte de changement climatique où les pressions sur le milieu ne cessent d'augmenter.

L'étang¹ des Salines représente une superficie de 105 ha entourée de mangroves, de savane et d'une forêt sèche. Désormais gérée par le Conservatoire du littoral, cette lagune a joué un rôle essentiel dans la production de sel depuis le XVIII^{ème} siècle et constitue un élément important du patrimoine historique martiniquais. En parallèle, la lagune des Salines représente des enjeux environnementaux de reposoir, de reproduction et d'alimentation pour les oiseaux migrateurs et les populations aquatiques.



Figure 1 : Photographie aérienne du site des Salines prise le 9 juin 2022 par autogyre lors de la campagne de suivi topo-bathymétrique (© Sub-C Marine).

¹ étang : Dans le langage courant, le mot « étang » se substitue souvent à l'appellation « lagune »

Le Conservatoire du Littoral et le BRGM ont souhaité acquérir de nouvelles connaissances sur cette lagune côtière, notamment vis-à-vis de son fonctionnement hydrosédimentaire qui suscite encore aujourd'hui de nombreuses interrogations. La lagune pourrait subir un éventuel phénomène d'envasement qui participerait à la dégradation de son état écologique (rapport EGIS, 2017). D'après cette étude, l'envasement de l'étang serait en partie lié à la faible connectivité de la lagune avec le milieu marin, aujourd'hui assuré par deux canaux situés sur ses limites nord-ouest et sud-est (Figure 3). Néanmoins, à notre connaissance, très peu d'études ont été réalisées à ce jour, que ce soit sur l'évolution historique de la lagune et de sa morphologie ou sur son fonctionnement hydrodynamique. En outre, le Conservatoire constate que les embouchures des deux canaux sont fortement impactées par l'érosion côtière avec un transport sédimentaire qui favoriserait la formation d'une ou de plusieurs zones d'accumulation et qui constitueraient des barrières naturelles aux écoulements.

1.1.2. Objectifs

L'objectif de cette étude est de réaliser une analyse globale de l'évolution morphologique de l'Etang des Salines afin d'établir un diagnostic plus précis de son fonctionnement hydrosédimentaire et des phénomènes entraînant son potentiel envasement. Des recommandations de gestion et de suivi pourront alors être formulées. Les objectifs spécifiques de ce projet sont les suivants :

- réaliser une synthèse des connaissances existantes de l'étang ;
- collecter des données pour un suivi des niveaux d'eau et de la morphologie passée et actuelle de la lagune ;
- analyser son fonctionnement hydro-sédimentaire sur la base des données collectées ;
- élaborer un diagnostic de son fonctionnement et des recommandations en terme de principe d'aménagement.

1.2. GENERALITE SUR LES LAGUNE COTIERES

1.2.1. Morphologie

Situées le long du littoral, les lagunes côtières sont des morphologies communes caractérisées par des eaux marines intérieures dont la profondeur dépasse rarement quelques mètres, généralement orientées parallèlement à la côte, séparées de l'océan par un cordon sableux mais reliées par un ou plusieurs canaux ou bras de mer restreints (Phleger, 1969). Une lagune peut être soumise ou non à l'action des marées et la salinité peut varier depuis celle d'un lac d'eau douce à celle d'une lagune hypersaline selon l'équilibre hydrologique.

Les lagunes doivent leur origine en grande partie à l'élévation eustatique² du niveau de la mer vers la fin du Pléistocène (~15 000 ans), inondant les vallées fluviales et les zones côtières de faible altitude. L'action des processus marins et fluviaux a engendré par la suite la formation de cordons sédimentaires qui constituent aujourd'hui les frontières de ces lagunes côtières (Lankford, 1976). Agissant généralement comme des puits nets de matériaux (sables, vases), les lagunes évoluent progressivement vers d'autres types d'environnements par le biais du remplissage sédimentaire, de l'activité tectonique, des changements eustatiques du niveau de la mer et des activités humaines. L'échelle de temps de cette transition morphologique est géologiquement rapide (décennies, siècles).

² élévation eustatique : montée du niveau moyen (ou « absolu ») des mers (relative par rapport aux continents supposés stables)

1.2.2. Fonctionnement hydro-sédimentaire

Le fonctionnement hydro-sédimentaire des lagunes côtières dépend principalement de l'action de la marée, des apports d'eau douce et du vent. La réponse hydrodynamique locale à chacune de ces fonctions de forçage dépend systématiquement des caractéristiques des canaux qui régulent les échanges avec l'océan côtier. Ainsi, les lagunes peuvent souvent se différencier selon les volumes d'eau échangés avec l'océan. Alors que certaines lagunes sont caractérisées par un ou plusieurs chenaux d'entrée longs et étroits où le forçage éolien reste dominant, d'autres sont caractérisées par de larges passes où les échanges avec l'océan ne sont pas perturbés.

a) *Les marées*

Si les oscillations du niveau d'eau au sein des lagunes sont souvent réduites par rapport à la marée côtière adjacente, les marées présentes dans les lagunes côtières sont systématiquement déterminées par les marées de l'océan côtier et donnent lieu à une dynamique d'écoulement non linéaire dans le(s) canal(aux) d'entrée (Aubrey & Speer, 1985; Speer & Aubrey, 1985). Ainsi, les canaux servent de filtre dynamique qui alterne ou élimine les courants ainsi que les fluctuations du niveau d'eau au sein de la lagune (Kjerfve, 1986). La réduction de l'amplitude de marée, le déphasage entre les marées océaniques et lagunaires ou encore les échanges sédimentaires entre la mer et la lagune dépendent des caractéristiques morphologiques de ces canaux, qu'ils soient naturels ou artificiels.

Les courants de marée contrôlent généralement la dynamique sédimentaire des lagunes côtières. En transportant des sédiments vers et en dehors de la lagune, en formant des estrans et, au fil du temps, en modifiant l'hydrodynamique de la lagune et de ses chenaux, les courants de marée sont souvent le principal moteur de l'évolution morphologique des lagunes. Une inégalité dans la durée du flot et du jusant³ caractérise généralement une asymétrie de la marée et par conséquent, une inégalité sur les vitesses maximales des courants entrant ou sortant du cycle de marée. L'asymétrie de la marée est par conséquent susceptible de contrôler la direction et l'ampleur des flux nets de sédiments vers la terre ou vers la mer, et donc l'accrétion ou l'érosion des sédiments dans la lagune. La caractérisation de l'asymétrie de la marée au sein d'une lagune côtière est souvent un facteur clé de sa morphologie (Aubrey & Speer, 1985; Fry et al., 1981). L'asymétrie de la marée reflète une dynamique d'écoulement non linéaire due aux changements de profondeur ou de largeur et aux effets de friction (Aubrey & Speer, 1985).

b) *L'eau douce*

Au sein des lagunes côtières, l'apport d'eau douce constitue également un forçage physique et écologique essentiel. L'eau douce pénètre dans les lagunes par le débit des rivières, les précipitations, les résurgences d'eaux souterraines et est perdue par évaporation, échanges gravitationnels ou selon le régime de marée entre la lagune et l'océan. En augmentant le niveau d'eau de la lagune et parfois en élargissant le canal d'entrée, les pics saisonniers d'apport d'eau douce ont une incidence profonde sur la viabilité écologique des lagunes côtières. Par exemple dans de nombreuses lagunes, pendant les périodes de faible ruissellement (qui coïncident avec des précipitations souvent plus faibles que la moyenne), le canal d'entrée se ferme et isole temporairement la lagune de la mer en raison des processus côtiers qui eux sont restés actifs (Aubrey & Speer, 1985).

³ Le courant de marée montante se nomme flux ou flot tandis que le courant de marée descendante se nomme reflux ou jusant.

c) *Le vent*

Le forçage éolien affecte chaque type de lagune et peut provoquer d'importants changements sur les niveaux d'eau et les courants. Les effets du vent sont caractérisés par un forçage local ou un forçage en champ lointain, les deux pouvant jouer un rôle important. Dans les lagunes reliées à la mer par un ou plusieurs chenaux étroits, l'effet du vent reste souvent très localisé.

1.3. SITE D'ETUDE

1.3.1. Contexte géologique

L'environnement géologique de l'étang des Salines est essentiellement composé de roches volcaniques. En effet, le socle sous-jacent est constitué de tuffs andésitiques altérés et d'intrusions basaltiques sous forme d'ancienne coulée de lave (Westercamp et al., 1989).

La géomorphologie de l'étang a été façonnée au cours des différentes régressions et transgressions marines. Pendant l'ère interglaciaire Riss-Würm au Pléistocène (120 000 à 80 000 ans B.P.⁴), une grande partie des terres du sud de la Martinique a été recouverte par la mer (Battistini & Hirschberger, 1989; PRNM, 1976). Le retrait des eaux pendant la période glaciaire suivante (Würm, 80 000 à 10 000 B.P.) laisse place à d'importantes quantités de matériaux détritiques. Les sédiments présents sont alors composés de sables remaniés par les alizés (éolianites) et de débris coquillés formant un cordon dunaire d'une hauteur de 12 m environ qui s'étendait probablement sur une grande distance (plusieurs kilomètres) au nord-est de la lagune actuelle.

Lors d'une dernière phase de remontée du niveau marin (remontée Flandrienne, 10 000 B.P.), l'érosion du cordon sableux permet l'inondation de certains secteurs et la formation de l'étang. Aujourd'hui, les vestiges du cordon sableux induré correspondraient aux différents îlets au nord-est (îlet à Tois Roux, îlets aux Chien), alors que les sédiments remobilisés constituent le lido actuel, à l'interface entre la lagune et la mer (Duncombe, 2008).

La Figure 2 est un exemple de sondage destructif réalisé en 1970 lors d'une campagne de reconnaissance hydrologique (Deneufbourg, 1970). Ces sondages permettent d'observer l'ensemble des formations géologiques énoncées précédemment. Plusieurs niveaux tourbeux sont identifiés et sont interprétés comme ayant une origine végétale terrestre. Sur le sondage S2, l'épaisseur de sédiments entre la surface de la lagune et la base du socle altéré est de 7.2 m. Sur les autres sondages, cette épaisseur varie entre 2 m (S4, Figure 2) et 10 m (S1, Figure 2).

Des études stratigraphiques ont également mis en évidence l'existence d'un dépôt sédimentaire unique sur une période de ~5000 ans à proximité de la plage d'Anse Meunier (Paris et al., 2021). Aucune unité sédimentaire similaire n'a pu être observée sur d'autres carottes, à la fois sur des sites proches (par exemple aux Petites Salines ou directement dans l'étang) et sur des sites de la côte atlantique (Baie du Galion, Baie de Sans-Souci, Pointe Ducassous, Macabou, Cul-de-Sac Ferre, Anse Trabaud). Sur la base des critères sédimentaires et géochimiques associés à la datation réalisée, ce dépôt de sable peut être interprété comme un témoignage du tsunami transatlantique de Lisbonne en 1755. Pendant cet événement, si les plus hautes vagues ont été observées à La Trinité, le secteur d'Anse Meunier, facilement inondable constituait un environnement plus favorable pour capter et préserver les dépôts sédimentaires apportés par le tsunami.

⁴ B.P. : *Before Present* (Avant le présent)

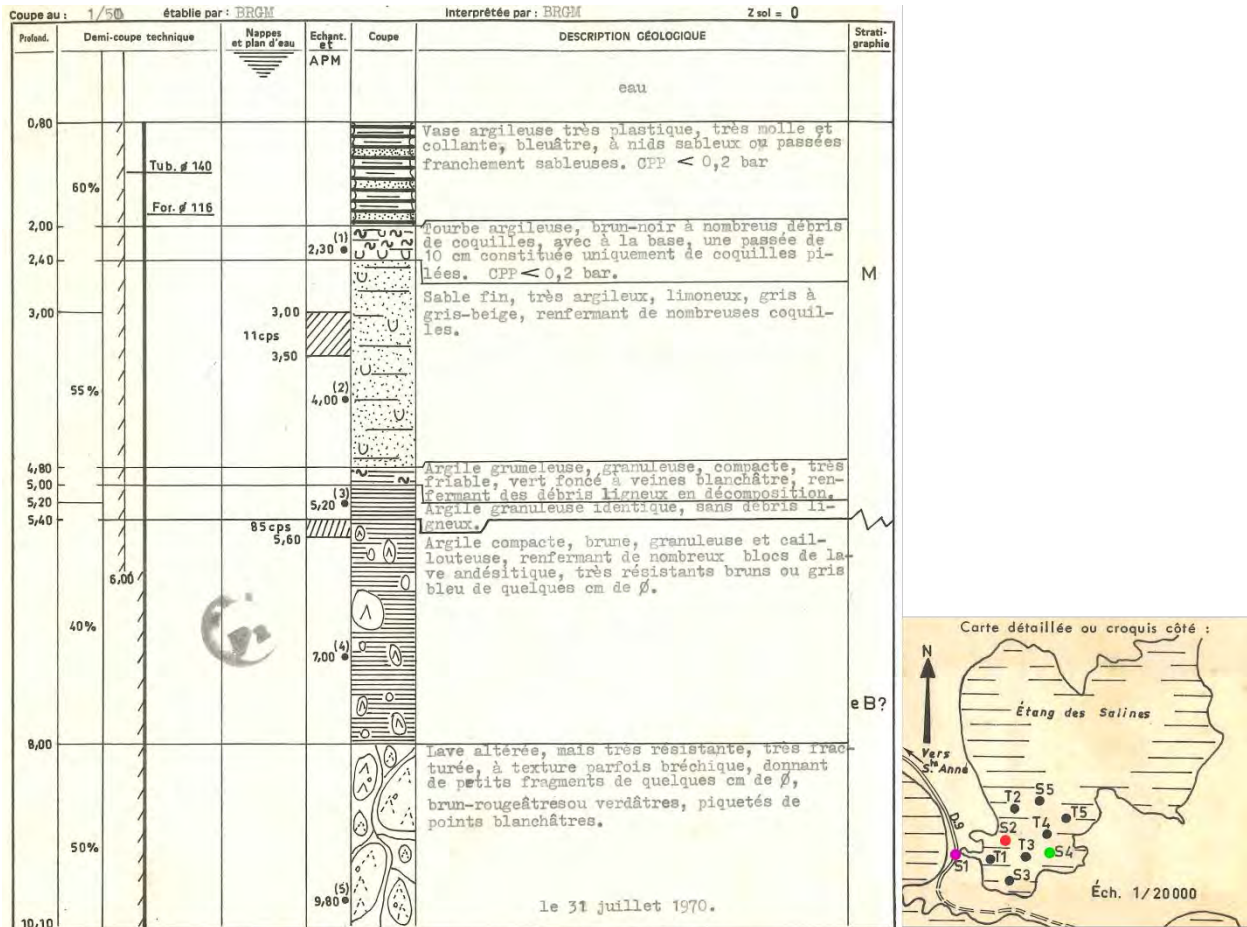


Figure 2 : Sondage géologique n°S2 (localisé en rouge sur la carte) à la tarière mécanique (Deneufbourg, 1970). Les sondages S1 et S4 sont respectivement illustrés en violet et en vert.

1.3.2. Géomorphologie de la lagune

Avec un plan d'eau dont la superficie est estimée à plus de 80 ha, la lagune occupe une grande partie de son bassin-versant (~ 20 %, Figure 3). Les fonds sont sableux ou vaseux, colonisés en partie par la macroflore benthique. La profondeur du plan d'eau atteint environ 0.60 m au niveau de la partie centrale de la lagune et communique avec la mer par le moyen de deux canaux (Figure 3). Plus court et plus large, les échanges entre la lagune et la mer se réalisent essentiellement avec le canal sud-est qui s'étend sur un linéaire d'environ 500 m. Le canal nord-ouest, deux fois plus long, présente un linéaire de 1.2 km (Figure 3).

Les vasières correspondent aux anciennes zones inondées et s'étendent pour l'essentiel à l'ouest de la position actuelle de l'Etang (e.g. au nord de la Grande Anse des Salines). Différentes espèces de palétuviers colonisent les rivages de la lagune et les vasières tandis que les mangroves fixent les sédiments (limons et argiles) en zone intertidale. Les sols restent salés et les mangroves forment un boisement dense qui s'élève sur plusieurs mètres au-dessus du niveau du sol.

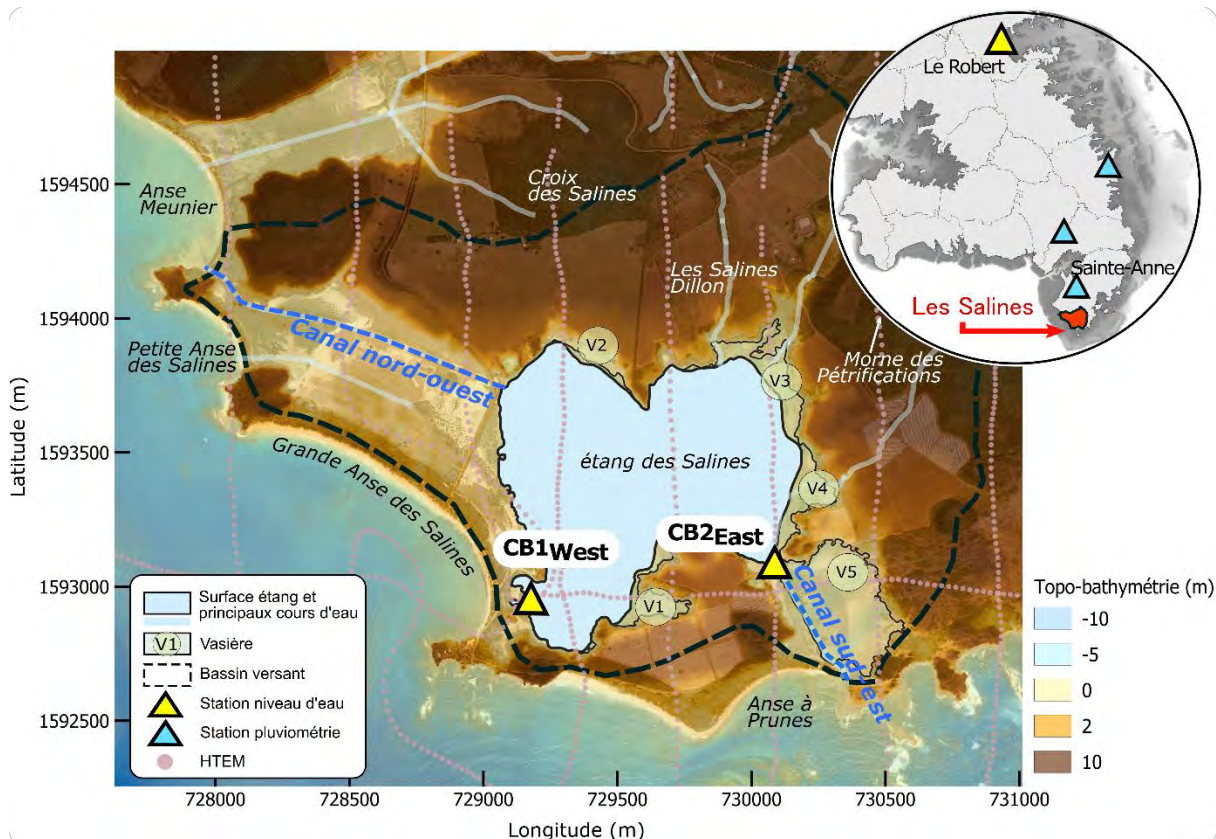


Figure 3 : carte topo-bathymétrique des salines (LITTO3D®) où sont superposées la surface en eau de l'étang (bleu clair) et les différentes zones de vasière (V1-V5). Le bassin versant (trait noir en pointillé) ainsi que les principaux cours d'eau (BDTOPO®) et canaux sont illustrés par les lignes bleues (traits pleins ou pointillés respectivement). La localisation des différentes stations de mesure est représentée par les triangles jaunes et bleus (niveaux d'eau et pluviométrie respectivement). Enfin, les points de mesures du levé électromagnétique sont marqués en rose (HTEM). Fond de carte : BD ORTHO® 2017.

La lagune est séparée de la mer par un étroit cordon sableux sur lequel sont édifiées les plages les plus fréquentées du sud de la Martinique. Exposées vers le sud-ouest, les plages de Petite Anse et de Grande Anse s'étendent respectivement sur 350 m et 1400 m de longueur. Ces plages appartiennent à la même cellule sédimentaire et sont encadrées par des promontoires rocheux d'origine volcanique. Plus au sud, le cordon sédimentaire prend la forme d'une flèche sableuse de 1100 m de long (plage de l'Anse à Prunes) à l'extrémité de laquelle se trouve l'entrée du canal sud. De l'autre côté de la lagune, à la sortie du canal nord-ouest, se trouve la plage de l'Anse Meunier qui constitue une cellule sédimentaire de plus d'un kilomètre de long.

1.3.3. Contexte agricole et exploitation du bassin versant

La lagune se situe sur un secteur qui est cultivé et valorisé par de la production agricole depuis de nombreuses années (SAFER, 2016). On note la présence de plusieurs petits points d'eau (mares) et d'une retenue collinaire située sur le flanc nord-est de la lagune (à proximité de V3, Figure 3). Ces ouvrages sont difficiles à dater, mais il semble que la retenue collinaire ait été mise en place avant l'année 1982. Sa fonction était essentiellement de collecter l'eau en saison des pluies afin de compenser les besoins des producteurs en période de sécheresse. Le taux de sédimentation et de colonisation par les végétaux (plantes flottantes et végétation rivulaire) du fait du manque d'entretien de cette retenue est très préoccupant depuis plusieurs années (SAFER, 2016). Les pratiques agricoles sur la zone d'étude ont une incidence directe sur les eaux de ruissellement naturelles qui convergent vers l'étang.

1.3.4. Description des canaux

A Fond Moustiques (secteur proche de l'anse Meunier, Figure 3), des marais salants furent exploités de manière artisanale dès le début du XIV^{ème} siècle (Bonnissent, 2011). À partir de la Seconde Guerre mondiale, certaines de ces étendues d'eau ont été transformées en salines où l'usine centrale du Marin construira et exploitera 17 hectares de marais salants jusqu'en 1965 (Duncombe, 2008; Paris et al., 2021). Il est difficile de définir précisément la date de création des deux canaux mais la carte la plus ancienne à disposition montre que les canaux situés au nord-ouest et au sud-est de la lagune sont présents dès 1926.

Le canal au nord-ouest aurait donc été creusé au XIX^{ème} siècle afin de drainer les marais de l'Anse Meunier et des Petites Salines pour la production de sel. Un système de vannage permettait de réguler les échanges avec la mer (EGIS, 2017). Le canal présente un linéaire de 1.2 km avec des berges d'une hauteur variable (comprise entre 0.5 m et 1.5 m) et traverse une zone de mangrove avant d'aboutir à la mer (Figure 4a et b). La largeur du lit mineur peut atteindre une dizaine de mètres sur les tronçons où les berges sont les plus marquées. Le canal reste très peu profond sur toute sa longueur (entre 0.1 à 0.2 m) et ne permet pas d'assurer de façon continue les échanges de masse d'eau entre la mer et la lagune. Ainsi, côté mer, l'embouchure du canal reste bouchée de façon quasi-permanente (Figure 4a). Sur la première moitié du canal (côté étang), le lit majeur est occupé par une végétation majoritairement rasante sur un sol sableux. Sur la seconde moitié, une végétation de type mangrove est installée au niveau du lit majeur. Des travaux de dragage ont eu lieu sur ce canal en réponse au comblement par les sédiments, phénomène probablement accentué par la présence de certains ouvrages de franchissement anciennement utilisés pour le transport de bétail (rapport EGIS, 2017).

Le canal sud-est s'étend sur un linéaire d'environ 450 m. La géométrie du canal sud-est est homogène avec des berges relativement basses variant sur une hauteur comprise entre 0.25 m et 1.50 m. La mangrove, bien que moins dense que sur le secteur ouest, occupe les berges sur chaque rive du canal (Figure 4c). Des enrochements ont été placés à son extrémité sud afin de limiter l'érosion latérale des berges et de pérenniser le franchissement piéton mis en place. Au niveau de l'embouchure, un ouvrage de régulation des échanges étang-mer en palplanche et maçonnerie était en fonction. Cet ouvrage est aujourd'hui à l'état de ruine (rapport EGIS, 2017).

Une description plus détaillée des canaux est proposée section 3.2.4 grâce aux levés topobathymétriques récents réalisés en appui, dans le cadre de ce projet (section 2.2.2b).

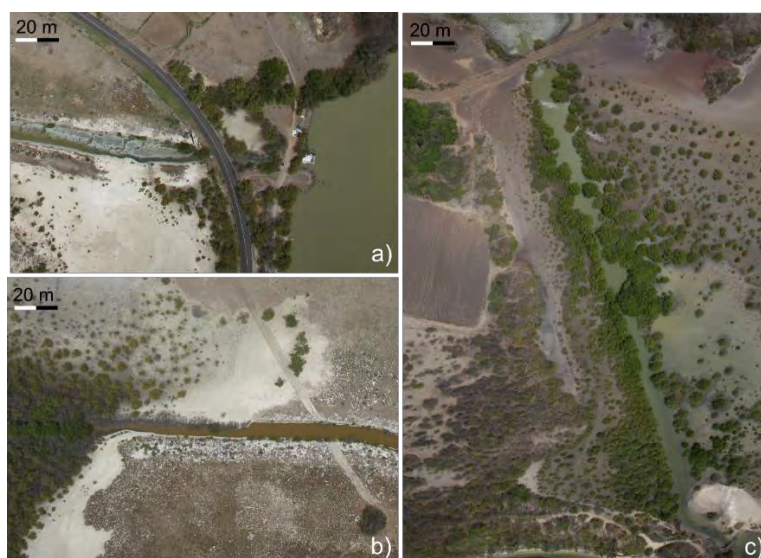


Figure 4: Photographies aériennes illustrant le début (côté lagune) et la sortie (côté mangrove) du canal nord-ouest (a et b respectivement). Le panel c présente le canal sud-est, qui constitue le lieu des principaux échanges de masse d'eau entre la mer et la lagune.

2. Matériel et méthode

2.1. HYDRODYNAMIQUES

2.1.1. Hydrologie et données pluviométriques

a) Pluviométrie et évapotranspiration

La station pluviométrique de Sainte-Anne (référence 97226004, Météo-France) est située à proximité immédiate de la zone d'étude (Figure 3) et a enregistré le cumul des précipitations journalières sur la période située entre 1991 et 2017 (27 ans). Ces données ont permis de caractériser le bilan hydrologique du bassin versant de la lagune des Salines et de mieux évaluer les apports d'eau douce (section 2.2.1.b). Sur la période d'étude plus récente (2021-2022), les données n'étant plus disponible à cette station, la pluviométrie journalière issue de la station météorologique du Vauclin a été utilisée (entité hydrologiquement homogène d'après Vittecoq et al., 2007).

Les volumes perdus par évaporation de la surface du plan d'eau (EP) ont été estimés à partir des valeurs d'évapotranspiration⁵ (ETP) journalières calculées à la station du Lamentin entre 1991 et 2017, (formule de Penman, données Météo-France) en considérant le rapport ETP/EP proche de l'unité pour l'ensemble de la période considérée (MILLET, 1986). Par ailleurs, le coefficient $\alpha = 1.1$, défini à partir des cartes de l'ETP annuelle (REGUIEG, 1986) permet de rapporter ces valeurs localement sur le secteur de la zone d'étude.

b) Bilan hydrologique

A partir d'une modélisation de type réservoirs (rapport BRGM RP-68883-FR) mise en œuvre ici à l'échelle du bassin versant de la lagune, une analyse des volumes d'eau douce annuels transitant vers l'étang a été réalisée. Le modèle numérique développé peut se décomposer en quatre étapes.

La première phase du travail de modélisation (étape 1) s'appuie sur une méthode de caractérisation du bilan hydrique du sol, appliquée pour estimer la pluie efficace journalière à l'échelle du km². Les pluies (ou précipitations) efficaces (Pe_{eff}) sont égales à la différence entre les précipitations totales et l'évapotranspiration réelle (ETP).

Au sein de chaque maille du modèle, la vidange exponentielle du sol (étape 2) est répartie entre ruissellement (écoulement rapide de surface et sub-surface) et infiltration (écoulement plus lent qui alimente l'aquifère sous-jacent). Les flux de ruissellement et d'infiltration issus des mailles de 1 km² sont moyennés à l'échelle du bassin versant (étape 3).

L'ensemble des paramètres constitue les variables d'entrées du modèle qui calcule les débits à l'exutoire du bassin versant de la lagune (étape 4). Ces calculs sont réalisés en faisant un bilan volumique du réservoir « nappe », dont on suppose qu'il se vidange selon une loi exponentielle. Les résultats obtenus à l'échelle de la lagune des Salines permettront de mieux définir les apports d'eau douce du bassin versant vers l'étang. Ces échanges de masse d'eau constituent un paramètre physique et écologique essentiel des milieux lagunaires. Loin d'être figée, la forme des milieux de transition (lagune, estuaire, delta) dépend d'un équilibre entre les apports terrestres (eau douce, sédiments) et maritimes (marées, vagues).

⁵ Évapotranspiration : processus par lequel l'eau liquide terrestre est renvoyée (e.g. évaporation, transpiration des plantes) dans l'atmosphère sous forme gazeuse.

2.1.2. Suivi du niveau d'eau et mesure de débit

a) Niveaux d'eau

Afin d'évaluer les variations de hauteur d'eau, température et salinité dans la lagune des mesures ont été réalisées de façon continu à deux stations sur une période de 12 mois (entre novembre 2021 et octobre 2022). Ces mesures permettent d'obtenir de nouvelles informations essentielles sur la connectivité de la lagune avec la mer.

La station CB1_{West}, composée d'un dipper PTEC (sonde multiparamétrique pour déterminer la pression, la température et la conductivité de l'eau) et d'un module de télétransmission a été installée au niveau du ponton aménagé par le conservatoire du littoral sur une structure en inox (Figure 3 et Figure 5). La station se situe à proximité de l'estran au niveau de l'extrémité sud-ouest de la lagune. Un point de repère au niveau du ponton a été mesuré pour caler la mesure par rapport au niveau ngm⁶. Sur ce secteur, le fond vaseux se situe environ à -0.20 m (ngm), soit 0.27 m sous la surface de l'eau (Figure 5). Installée à une dizaine de centimètre du fond meuble (vase non indurée), la sonde a été paramétrée pour acquérir des mesures de niveau d'eau avec un pas de temps de 10 mn. Les paramètres de température et de salinité sont enregistrés à chaque demi-heure. La précision de la mesure sur les hauteurs d'eau est estimée à 0.05 % (soit 0.01 m sur plage de mesure de 0.2 m).

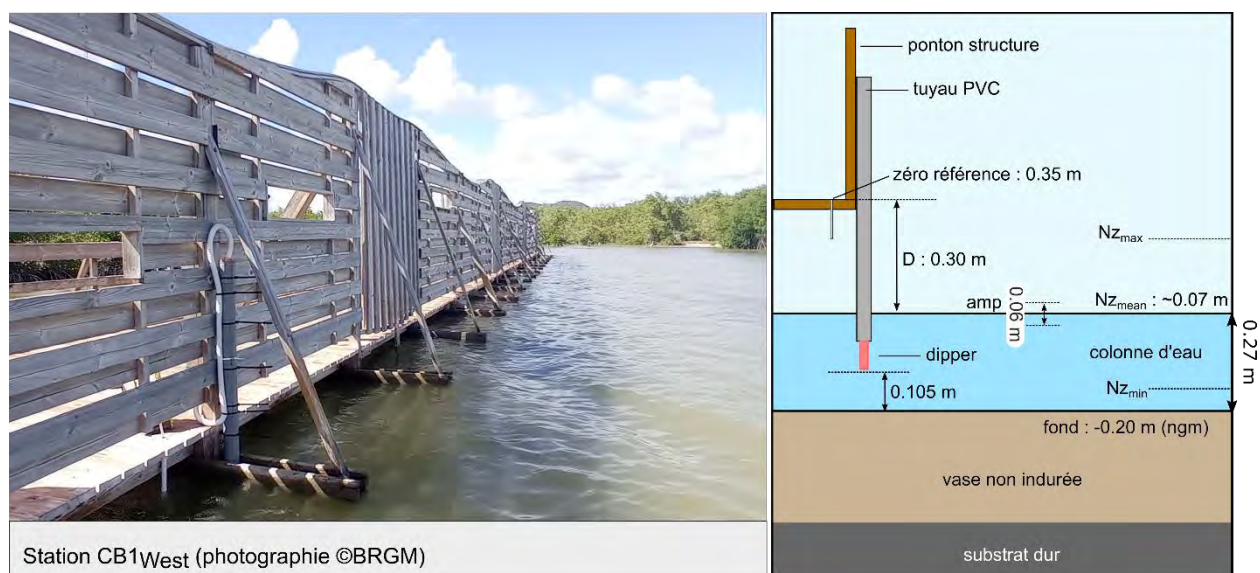


Figure 5 : installation de la sonde dipper CB1_{West} au niveau du ponton en bois, sur le secteur Ouest de la lagune à proximité de l'estran.

La station CB2_{East}, composée d'une CTD diver (sonde multiparamétrique pour déterminer la pression, la température et la conductivité de l'eau) et d'un baro-diver a été installée à l'entrée du canal sud-est de l'étang (Figure 3 et Figure 6) avec une échelle centimétrique qui permet de caler la mesure par rapport au niveau ngm. Ce canal reste le lieu des principaux échanges de masse d'eau entre la mer et la lagune. Au niveau de l'entrée du canal, à l'endroit où a été déployé l'appareil de mesure, la profondeur atteint 1.25 m et correspond au secteur le plus profond de l'étang. La sonde a été est déployée à ~ 85 cm du fond, lui-même situé à -1.18 m (ngm).

⁶ ngm : nivellement général de la Martinique (niveau moyen de la mer à Fort-de-France)

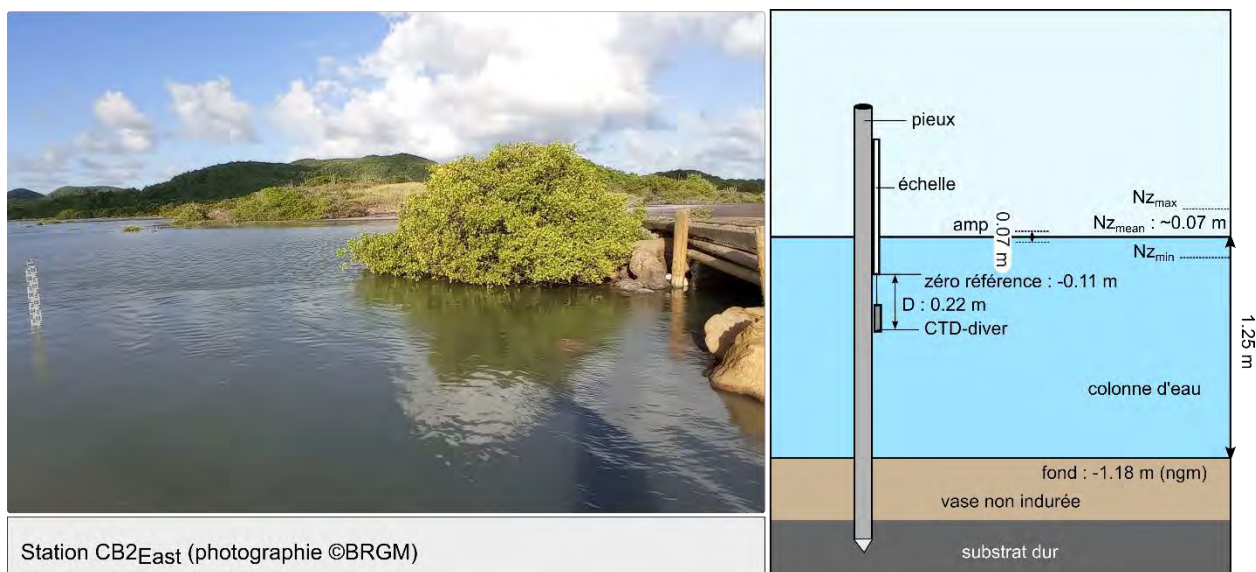


Figure 6 : installation de la sonde CTD diver CB2_{East} au niveau de l'entrée (côté étang) du canal sud-est de la lagune.

b) Débits

Des mesures par jaugeage ont également été réalisées afin d'estimer les débits entrant ou sortant de la lagune. Dans le cadre de cette étude, les jaugeages consistent à mesurer les vitesses d'écoulement sur plusieurs verticales de la section transversale à un instant donné au niveau de l'entrée du canal sud-est. Les mesures conduites ont donc été réalisées à proximité immédiate de la station CB2_{East} permettant de relier directement les débits obtenus aux niveaux d'eau enregistrés. Le nombre et la position des verticales tiennent compte de l'hétérogénéité de la section (hauteur d'eau et vitesses d'écoulement). Ainsi, les verticales sont plus rapprochées aux endroits où la variation des vitesses est grande (en général sur les bords).

Au total, huit campagnes de mesure par jaugeage ont été réalisées entre février et juillet 2022 (Tableau 1) pour des niveaux d'eau compris entre 0.06 m et 0.17 m (ngm).

Tableau 1 : Mesures par jaugeage réalisées à l'entrée du canal sud-est (côté étang), à proximité immédiate de la station CB2_{West} (Figure 5).

Date	Heure début	Heure fin	Débit (l/s)	Niveau moyen (ngm)
24/02/2022	13:00:00	14:00:00	452	0,04
09/05/2022	10:00:00	10:30:00	-603	0,10
23/06/2022	12:00:00	12:32:00	-355	0,12
23/06/2022	13:20:00	13:37:00	-591	0,12
23/06/2022	14:09:00	14:23:00	-563	0,13
04/07/2022	11:56:00	12:30:00	1037	0,14
04/07/2022	13:37:00	13:58:00	1039	0,13
04/07/2022	14:57:00	15:15:00	1016	0,12

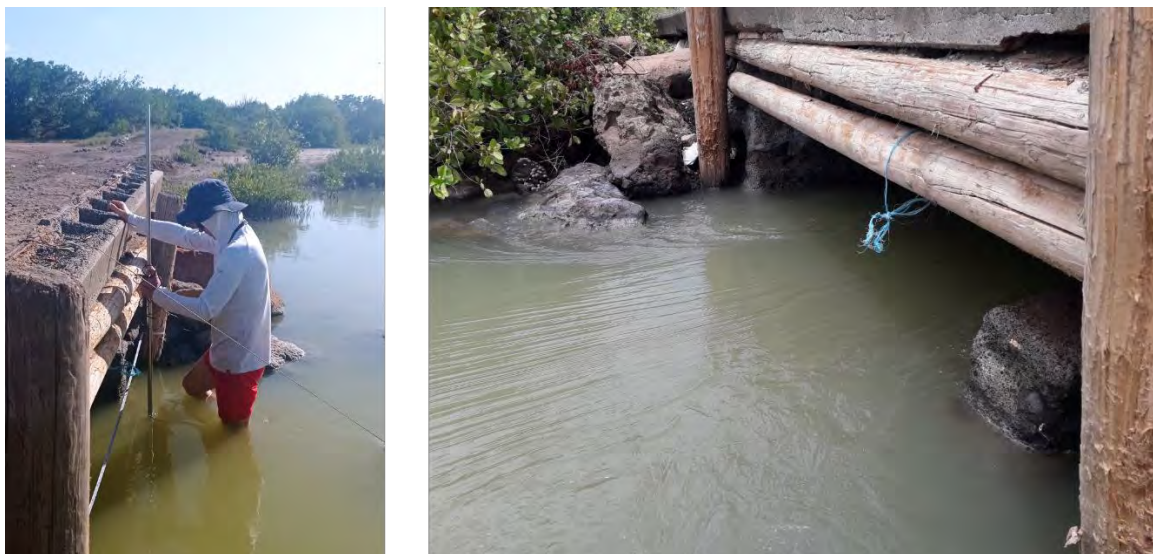


Figure 7 : mesures par jaugeage réalisées en juillet 2021 afin d'estimer les débits à l'entrée du canal sud-est.

2.2. EVOLUTION DE LA LAGUNE ET CONTEXTE MORPHO-SEDIMENTAIRE

2.2.1. Images aériennes et satellites

Les évolutions morphologiques d'une lagune font intervenir un grand nombre de processus physiques agissant sur le moyen et le long terme. La méthodologie adoptée doit alors permettre de couvrir l'ensemble de ces échelles. Les acquisitions topo-bathymétriques traditionnelles ne peuvent pas satisfaire l'ensemble des échelles spatio-temporelles en raison du coût des mesures et des difficultés techniques pouvant être rencontrées sur site. D'autres outils se sont développés avec les méthodes de télédétection qui permettent de suivre à une fréquence élevée certaines caractéristiques morphodynamiques. L'identification des paramètres morphologiques (trait de côte, vase, surface en eau) n'est pas directe mais est estimée par des singularités visibles à la surface de l'eau. Le suivi de l'évolution morphologique de l'étang a été réalisé à partir d'images satellites, de photos aériennes et d'ortho-photographies (Tableau 2). Seules les images où la couverture nuageuse est faible ont été retenues pour l'analyse.

a) Digitalisation et évaluation des incertitudes

La quantification de données physiques requiert un géoréférencement des images collectées. Cela revient à déterminer la relation entre les coordonnées pixels de l'image (u, v) et la position X, Y, Z de chacun d'entre eux dans un repère réel. La relation entre l'image et les coordonnées réelles peut être obtenue en utilisant plusieurs points de références dont les coordonnées images et réelles sont connues. Ainsi, à partir de l'image aérienne de 2004 préalablement ortho-rectifiée et géo-référencée par l'IGN, un premier travail de géoréférencement des photographies aériennes et satellites a d'abord été réalisé lorsque c'était nécessaire.

L'analyse de la mobilité du littoral repose avant tout sur la définition d'indicateur qui puisse être représentatif de l'état global du littoral du point de vue de son évolution sédimentaire (Mallet et Michot, 2012). Le premier indicateur défini dans le cadre de cette étude repose sur la limite de végétation autour de l'étang et a donc été digitalisé sur chacune des images analysées. Le second indicateur est défini comme la limite de surface mouillée et correspond à la limite de la surface en eau. Plusieurs incertitudes affectent la qualité de la digitalisation avec notamment la résolution de la photographie, le géoréférencement de l'image, la présence d'artéfacts diminuant

localement la visibilité sur la photo, le manque de contraste colorimétrique, la présence d'ombre projetées, l'échelle de la digitalisation et l'erreur commise par l'opérateur. Enfin des écarts de niveau d'eau dans la lagune au moment de l'acquisition des images peuvent entraîner des variations importantes de la position de la limite de surface mouillée. Cette source d'erreur est difficile à estimer sans une connaissance précise du niveau d'eau dans la lagune au moment de la prise de vue.

Par conséquent, l'erreur totale est toujours difficile à calculer avec précision mais peut être estimée comme l'erreur quadratique moyenne (RMSE) de toutes les erreurs (Tableau 2). Ainsi, l'erreur de digitalisation a été évaluée entre 1 m et 13 m selon les images analysées.

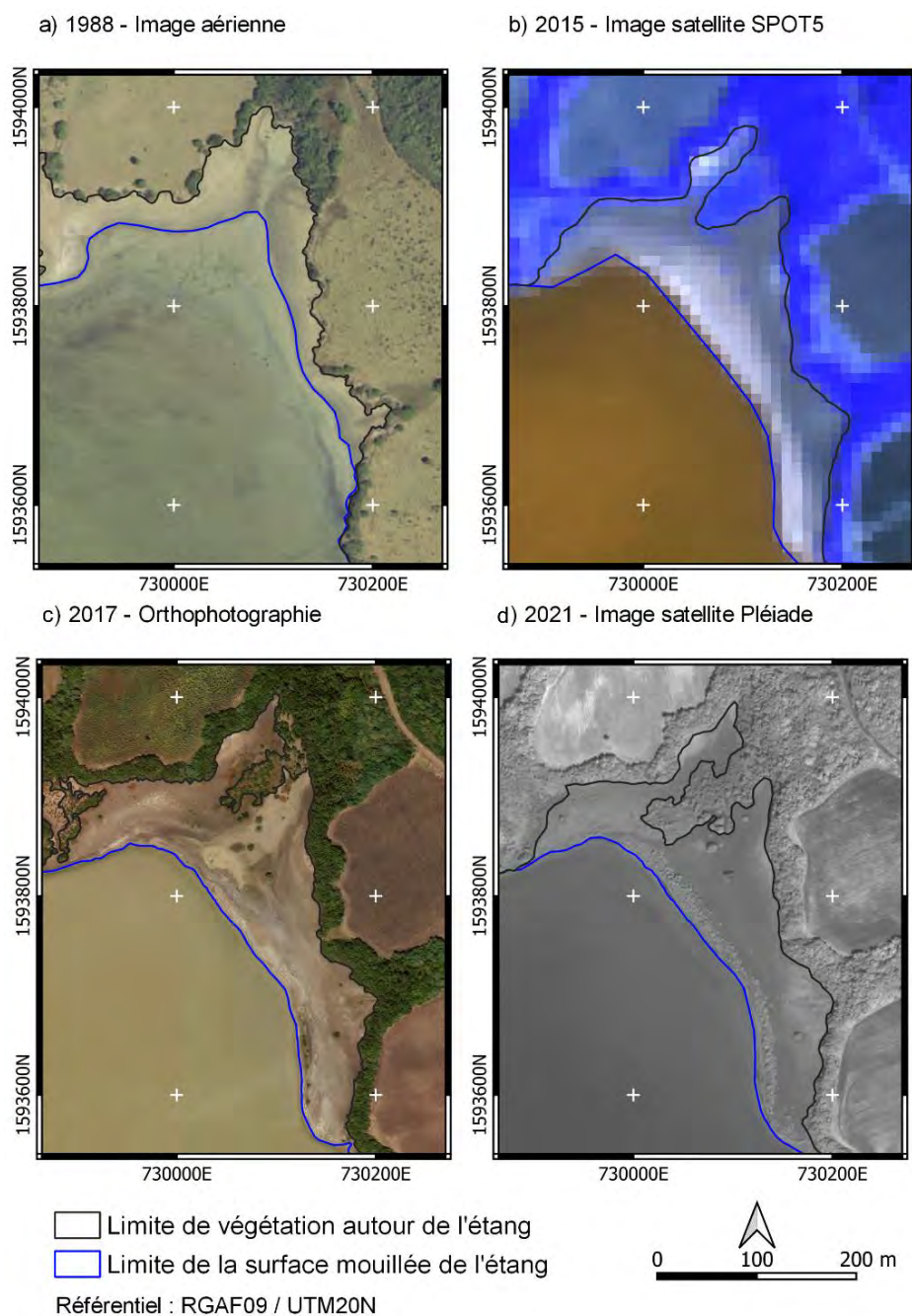


Figure 8 : exemple d'images aériennes où sont superposées les lignes de limite de végétation (trait noir) et de la surface en eau (trait bleu).

Tableau 2 : Liste des images utilisées lors des opérations de digitalisation en fonction de la date d'acquisition, de la sources des images, de la résolution et des erreurs associées.

Date	Sources	Type image	Résolution (m)	Erreur globale (m)
03-1951	IGN ⁷	Orthophotographie	0,5	1
03-1982	Remonterletemps ⁸	Photo aérienne	0,6	4
02-1988	Remonterletemps	Photo aérienne	0,6	3
03-1992	Remonterletemps	Photo aérienne	0,7	4
02-2000	Remonterletemps	Photo aérienne	0,8	5
02-2004	IGN	Orthophotographie	0,5	1
08-2006	DINAMIS ⁹	SPOT5	10	14
02-2010	IGN	Orthophotographie	0,3	1
04-2014	DINAMIS	SPOT5	10	14
02-2015	DINAMIS	SPOT5	10	14
02-2017	IGN	Orthophotographie	0,2	1
03-2018	DINAMIS	Pléiade	2,3	5
01-2019	DINAMIS	Pléiade	2,1	4
09-2020	DINAMIS	Pléiade	2	5
01-2021	DINAMIS	Pléiade	0,5	3
01-2022	DINAMIS	Pléiade	0,5	3

b) Evaluation visuelle des critères géomorphologiques

Une évaluation visuelle de certains facteurs géomorphologiques a également été réalisée. L'objectif est d'identifier qualitativement certains indicateurs autour et dans l'étang pouvant influencer ou témoigner de son fonctionnement hydrosédimentaire. Ainsi, les évolutions de certains secteurs seront décrits plus en détail comme l'état de la retenue collinaire (Figure 9), certaines vasières ou encore la présence de champs cultivés. Cette appréciation visuelle est retranscrite à partir d'une échelle d'interprétation visuelle (Tableau 3).

Tableau 3 : Echelle d'interprétation visuelle appliquée pour suivre les évolutions géomorphologiques sur les images satellites.

Echelle d'interprétation visuelle	
0	Nul ou inexistant
1	Faible
2	Présent - observable mais peu développé
3	Marqué, fortement visible et bien développé

⁷ Remonterletemps : <https://remonterletemps.ign.fr/>

⁸ IGN : Institut Géographique National

⁹ DINAMIS : Dispositif Institutionnel National d'Approvisionnement Mutualisé en Imagerie Satellites

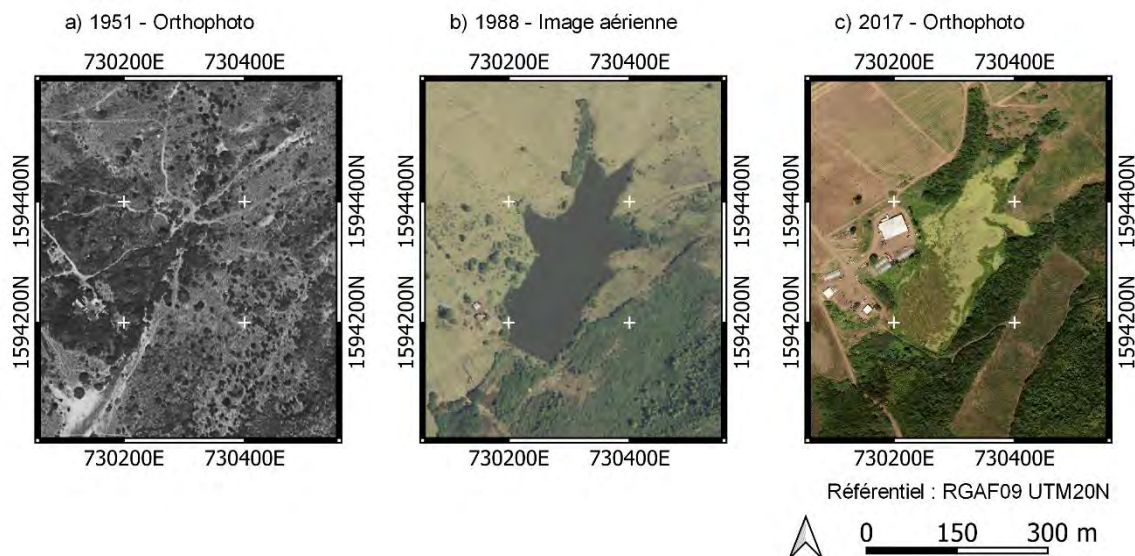


Figure 9 : Evolution de la retenue collinaire située au nord-est de l'étang des Salines, (a) Absence de la retenue en 1951, (b) présence de la retenue avec un rivage bien délimité en 1988 et (c) retenue très eutrophisée mise en évidence par le développement important des algues en surface dès 2017.

2.2.2. Mesures topo-bathymétriques

a) Position du trait de côte aux embouchures

Afin de compléter ces informations obtenues à partir des images aériennes, un suivi de la dynamique du trait de côte (jet de rive) au niveau des deux embouchures côté plage (Anse Meunier et Anse à Prunes) a été mis en place avec l'objectif de mieux caractériser les échanges sédimentaires entre la mer et l'étang.

Deux campagnes de mesures ont été réalisées à partir d'un GPS¹⁰ / (GNSS¹¹) Trimble R6 en mode différentiel RTK¹² connecté en GSM¹³ via le réseau ORPHEON¹⁴.

b) Morphologie et bathymétrie de l'étang

Un levé topographique et bathymétrique a été réalisé sur la lagune en août 2022 par la société Sub-C Marine (<https://subcmarine.com>) afin de produire un plan topo-bathymétrique de l'étang et de fournir une estimation de l'épaisseur de sédiments meubles sur sa partie immergée. Le rapport d'intervention explique les moyens techniques et humains mis en œuvre ainsi que les résultats obtenus (rapport d'intervention SUB-C MARINE, 2022). Les données relatives au levé réalisé sont analysées section 3.2.2.

2.2.3. Mesures géophysiques

La géophysique permet, de manière indirecte, d'imager le sous-sol à travers l'une de ses propriétés et ainsi d'obtenir des informations pertinentes sur l'environnement géologique. La méthode électromagnétique en domaine temporel (TDEM) consiste en l'émission d'un champ magnétique et en l'écoute de la réponse du sous-sol. La mesure informe indirectement sur les variations de la résistivité électrique du sous-sol en fonction de la profondeur.

¹⁰ Global Positioning System

¹¹ GNSS : Global Navigation Satellite System

¹² Real Time Kinematic,

¹³ GSM : Global System for Mobile communications

¹⁴ <http://reseau-orpheon.fr/>

Un levé TDEM hélicoptée haute résolution a été réalisé en 2013 sur la Martinique (projet MarTEM). Celui-ci permet la caractérisation des contrastes de résistivité sur une tranche de profondeur pouvant aller jusqu'à 200 mètres, avec une résolution horizontale de 30 m environ le long des lignes de vol (dépendant de la vitesse de vol et de la séquence d'acquisition) et une résolution verticale de 1 à 5 m environ en surface (en fonction de la résistivité du sous-sol et de la qualité de la mesure). Les données acquises au niveau de l'étang (HTEM, Figure 3) ont été traitées et nettoyées afin de rejeter le bruit les affectant. Les mesures ont ensuite été inversées pour obtenir le modèle de résistivité de la zone d'étude.

Le principe de l'inversion en géophysique est de retrouver les propriétés physiques du sous-sol à l'origine des différents signaux mesurés, affectés par les caractéristiques de celui-ci. Pour ce faire, il est nécessaire de trouver le modèle schématisant le sous-sol qui minimise la différence entre les données mesurées et celles prédites par la théorie. Celui-ci est obtenu, après définition d'un modèle de départ, par itération de modélisations et comparaisons à la donnée mesurée. Les modèles pris en considération à cette étape permettent alors d'imager les contrastes de résistivité dans le sous-sol. Afin de stabiliser le processus, des contraintes spatiales entre les différentes couches des différents modèles sont également appliquées lors de l'inversion.

Une inversion de type « *smooth* » a été réalisée dans le cadre de ce projet (i.e. de nombreuses couches d'épaisseur fixe, dont seule la résistivité peut varier). Ce type d'inversion a l'avantage d'être relativement peu dépendant des paramètres définis pour initialiser le calcul (i.e. reflétant notre appréhension de la géologie) mais le désavantage d'imager des variations lissées de la résistivité selon la profondeur.

3. Résultats

3.1. HYDRODYNAMIQUE DE LA LAGUNE

3.1.1. Bilan hydrologique

Le bassin versant de la lagune des Salines présente une superficie de 4.1 km² (Figure 3) avec une altitude maximale de 115 m (ngm) sur son secteur nord-est (Morne des Pétrifications). Situé à l'extrême sud de la Martinique, ce bassin présente les plus faibles volumes pluviométriques enregistrés sur l'île avec en moyenne 1 175 mm/an (Figure 10). A titre de comparaison, la Martinique reçoit en moyenne deux fois plus d'eau (2 571 mm/an), avec un maximum enregistré au niveau de la Montagne Pelée (6 900 mm/an).

Connaissant la surface du bassin versant de la lagune et la pluviométrie sur ce secteur, les précipitations annuelles ont pu être évaluées et représentent un volume d'eau estimé à 4.81 Mm³. A partir de ce volume, la pluie efficace annuelle, qui représente le volume d'eau atteignant réellement le bassin versant, a été évalué à 0.57 Mm³ (Peff, Figure 11) soit à peine 12 % des précipitations totales sur ce secteur. Elle résulte de la différence entre la pluviométrie (RR) et l'évapotranspiration (ETP), contribuant à alimenter les milieux aquatiques par ruissellement (0.41 Mm³) ou par voies souterraines à travers l'infiltration (0.16 Mm³/an). Une partie des eaux souterraines peut soutenir les rivières ou les plans d'eau en période d'étiage (0.08 Mm³) tandis que le reste s'écoule en mer via des exutoires souterrains (0.08 Mm³). Le cumul annuel des débits aux exutoires de surface, en transit dans la lagune, représente un total de 0.49 Mm³ (Figure 11) soit plus de deux fois le volume de l'étang (0.17 Mm³).

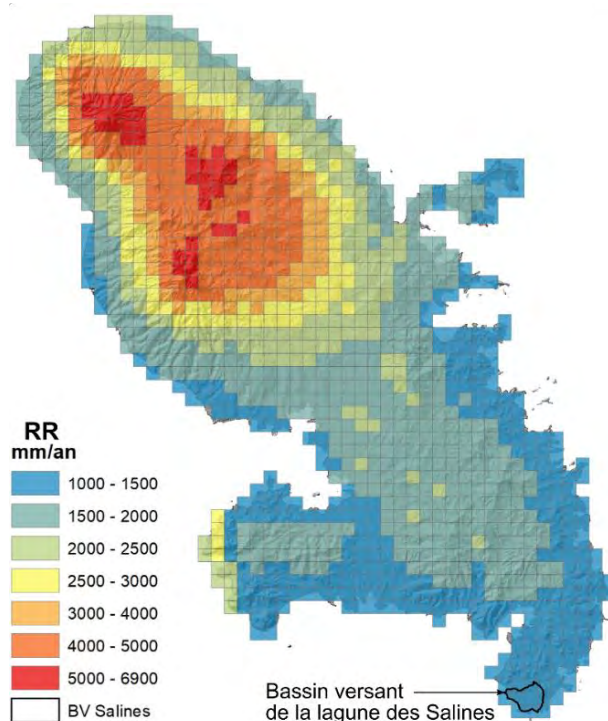


Figure 10 : précipitation annuelle (moyenne entre 1991 et 2017) spatialisée à l'échelle du km², (rapport RP-68883-FR).

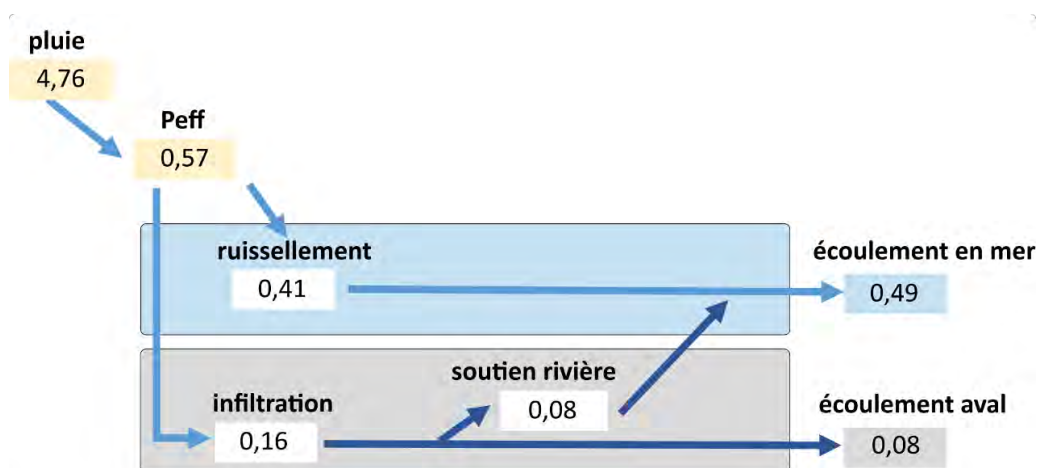


Figure 11 : schéma conceptuel du bilan hydrologique (Mm^3/an) à l'échelle du bassin versant de la lagune des Salines. La présence de l'étang définit comme une surface en eau n'est pas prise en compte pour la caractérisation de l'évapotranspiration. La pluie efficace est donc estimée directement à l'échelle du bassin versant.

En l'absence de stations de mesures hydrométriques et piézométriques au sein même du bassin versant de la lagune, le bilan hydrologique annuel présenté par la Figure 11 s'appuie sur des paramètres issus de bassins versants voisins (rapport BRGM RP-68883-FR) et contient donc certaines incertitudes. En effet l'évapotranspiration est définie de façon homogène à l'échelle du bassin versant et représente une perte de 88 % de la pluie totale. Ce paramètre est probablement surévalué étant donné que la surface en eau de l'étang représente environ 20 % du bassin versant et que sa recharge par pluies directes n'est pas directement concernée par un processus d'évapotranspiration. Par ailleurs, les pertes par évaporation qui concernent l'ensemble de l'étendue d'eau ne sont pas mentionnées dans ce premier bilan.

Afin de prendre en compte les spécificités de la lagune des Salines, un second modèle hydrologique est proposé à l'échelle du bassin versant (Figure 12) qui dissocie la recharge en eau douce et le phénomène d'évaporation. Aussi, le bilan présenté traite de façon séparer les parties terrestres et celles en eau, permettant ainsi une meilleure résolution du processus de recharge par pluie directe. Bien que la surface de l'étang ne représente que 20 % de la superficie du bassin versant, la recharge annuelle par pluie directe est estimée à $\sim 0.97 Mm^3/an$ et reste bien supérieure à la recharge transitant depuis les terres par les cours d'eau ($0.33 Mm^3/an$). La recharge en eau douce par pluie directe est alors trois fois plus importante que celle apportée par ruissellement. Le cumul des apports d'eau douce en transit dans la lagune des Salines est estimé à environ $1,3 Mm^3/an$ (Figure 12) soit l'équivalent de plus de sept fois le volume total de l'étang.

Souvent en opposition à la recharge en eau douce, le phénomène d'évaporation contribue à la perte d'un volume d'eau estimé ici à $\sim 1.64 Mm^3/an$ (soit plus de 5mm/j en moyenne). L'évaporation peut se définir ici comme la transformation progressive d'une fine lame d'eau de surface depuis son état liquide vers un état gazeux. Le processus se réalise alors de façon continue et avec une vitesse variable à la surface de l'étang et se traduit comme la perte d'un volume liquide constitué à la fois d'eau douce (recharge) et d'eau salée (apports maritimes par les canaux). De par l'existence des canaux qui permettent de communiquer avec la mer, le bilan hydrologique de la lagune ne peut pas se traduire simplement comme l'addition entre la recharge annuelle et la perte totale par évaporation. Afin de mieux qualifier les apports d'eau douce, Il reste toutefois intéressant de comparer ces deux quantités bien que celles-ci ne puissent être directement additionnées pour un système non fermé, communiquant avec la mer. On remarque alors que le volume d'eau perdu par évaporation reste en moyenne bien supérieur aux apports en eau douce. Ainsi, en l'absence de moyen de communication avec la mer, le bilan hydrologique

annuel de la lagune des Salines apparaîtrait alors comme largement déficitaire ($- 0.34 \text{ Mm}^3/\text{an}$). D'après ce premier bilan, il apparaît alors que les volumes entrants (mer vers étang) restent en théorie supérieurs aux volumes sortants (étang vers mer). Ce volume d'eau sortant circule vers les canaux pour rejoindre la mer au rythme des marées et avec des fluctuations importantes selon les saisons ou les années.

L'évolution temporelle des précipitations mensuelles montre une forte variabilité saisonnière avec les mois de février et mars qui sont les plus secs (RR, Figure 13). Au contraire les mois d'août, octobre et novembre sont ceux où il pleut le plus. La Martinique connaît un climat tropical, chaud et humide, présentant une saison sèche, le carême (de février à mai) et une saison humide, l'hivernage (de juillet à novembre). Ces conditions climatiques sont directement liées aux positions respectives de l'anticyclone des Açores et de la Zone de Convergence Inter Tropicale (ZCIT). Ainsi, les apports d'eau douce au sein de la lagune varient considérablement selon la saison (Figure 13). La recharge théorique mensuelle présente un bilan estimé à $\sim 0.15 \text{ Mm}^3/\text{mois}$ pendant l'hivernage (entre août et novembre) et négatif pendant le carême ($\sim 0.07 \text{ Mm}^3/\text{mois}$ entre février avril). Ainsi, pendant les mois de février et mars, lorsque les précipitations sont les plus faibles ($\text{RR} < 50 \text{ mm/mois}$, Figure 13), la lagune des salines s'expose à une situation hydrologique (salinité, niveaux d'eau) très différente de celle de la saison des pluies avec un apport d'eau douce largement déficitaire par rapports aux volumes perdus par évaporation.

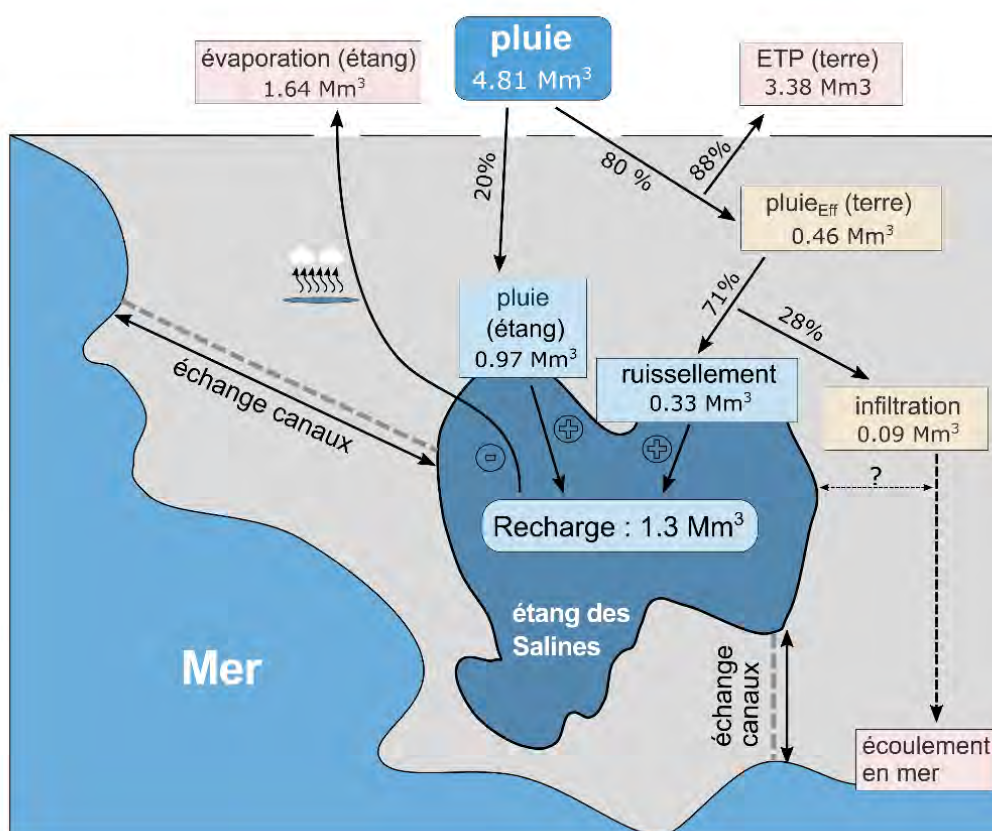


Figure 12 : schéma conceptuel illustrant le bilan hydrologique (Mm^3/an) à l'échelle du bassin versant de la lagune des Salines. La présence de l'étang définit comme surface en eau est prise en compte pour la caractérisation de l'évapotranspiration.

L'évolution temporelle des précipitations (RR) montre également une forte variabilité interannuelle et induit une certaine cyclicité (6-7 ans) sur la recharge en eau douce (Figure 14). Sur les volumes d'eau perdus par évaporation, on note des fluctuations similaires en opposition de phase. Ainsi, certaines années présentent un bilan où les apports en eau douce atteignent plus de 1.6 Mm³ avec parfois une recharge annuelle légèrement supérieure aux volumes perdus par évaporation (1992, 1996, 1998, 2004, 2005). Au cours de ces années caractéristiques, les canaux qui relient la lagune avec la mer permettent l'évacuation de l'excédent d'eau douce vers la mer avec en moyenne un volume d'eau sortant plus important que le volume entrant. Le reste de la période analysée présente une recharge annuelle autour de 1.3 Mm³ et constitue un apport inférieur aux volumes d'eau perdus par évaporation. Les canaux permettent alors le remplissage de la lagune avec en théorie un volume annuelle moyen entrant supérieur au volume annuelle moyen sortant. Certaines années sont plus marquées que d'autres par le manque d'eau avec des records de sécheresse obtenus en 1994, 1997 et 2014 où la recharge annuelle reste inférieure à 1 Mm³.

Les bilans proposés ne tiennent pas compte de l'activité agricole du bassin versant et de la présence de plusieurs retenues d'eau (mares ou retenue collinaire) qui constituent un obstacle à l'écoulement (SAFER, 2016). Si les apports d'eau douce en transit dans la lagune des Salines sont probablement surestimés, il est important de rappeler que les eaux de ruissellement pouvant être impactés par les activités agricoles restent minoritaires au sein de la lagune par rapport aux apports directs par précipitation dans l'étang.

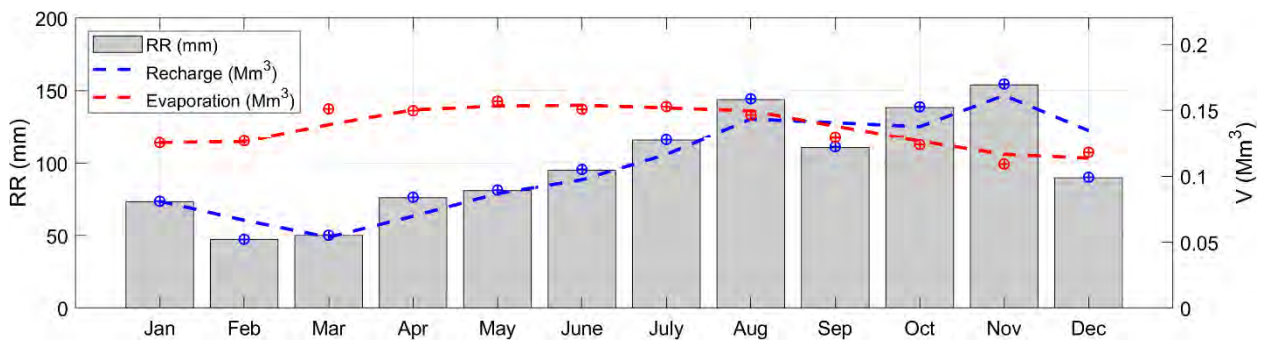


Figure 13 : précipitation (RR en mm) et recharge théorique mensuelle en eau douce (V, en Mm³) sur l'étang des Salines. Bilan hydrologique réalisé entre 1991 et 2017 (27 ans).

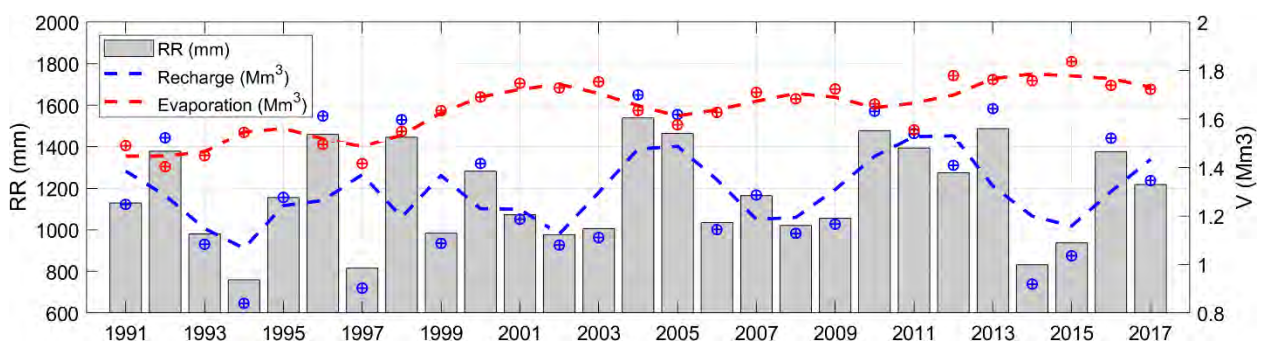


Figure 14 : précipitation (RR en mm) et recharge théorique annuelle en eau douce (V, en Mm³) sur l'étang des Salines. Bilan hydrologique réalisé entre 1991 et 2017 (27 ans).

3.1.2. Evolution des niveaux d'eau

Des mesures de niveaux d'eau ont été réalisées dans la lagune de façon continue sur une période de douze mois (entre novembre 2021 et octobre 2022) et permettent d'obtenir des données essentielles sur le fonctionnement hydrodynamique de l'étang des Salines (Figure 15). Les analyses réalisées sur les variations de hauteur d'eau délivrent de nouvelles informations pour mieux évaluer la sensibilité de la lagune et sa connectivité avec l'océan.

La Figure 15b et c présente l'évolution temporelle des niveaux d'eau en mer et dans la lagune. La composante mensuelle du signal (filtre de *hanning* sur 30 jours) est superposée en trait épais discontinu. La pluviométrie observée au Vauclin est illustrée sur le panel supérieur (Figure 15a). Au cours de la période de suivi, le niveau d'eau moyen mesuré dans la lagune aux stations CB2_{East} et CB1_{West} se situe autour de 0.07 m (ngm) soit quelques centimètres en dessous du niveau moyen de la mer au Robert (Tableau 4). Pendant la durée du suivi (entre novembre 2021 et octobre 2022), le niveau moyen de la mer au Robert (0.153 m [ngm]) est apparu d'ailleurs nettement supérieur (~ 8 cm) au niveau moyen de référence actuel (0.076 m [ngm] ; RAM, 2020).

Les hauteurs d'eau minimales enregistrées aux stations CB2_{East} et CB1_{West} se situent respectivement à -0.081 m et -0.070 m (ngm) soit environ 13 cm sous le niveau moyen de la lagune (Tableau 4). La Figure 15 met en évidence deux périodes distinctes en 2022 au cours desquelles les niveaux d'eau mesurés au sein de la lagune sont particulièrement bas. Ainsi, à la mi-janvier (entre le 8 et le 12 janvier) et début juin (entre le 6 et le 9 juin), le niveau de la lagune décroît rapidement pour atteindre des valeurs inférieures à -0.05 m (ngm). Ces deux périodes coïncident avec celles où le niveau de la mer est également très bas (Figure 15c) et plus particulièrement lorsque les hauteurs des pleines mers restent inférieures à 0.2 m (ngm). Ces observations suggèrent alors que les faibles hauteurs d'eau dans la lagune sont étroitement reliées aux niveaux d'eau en mer, et plus particulièrement aux hauteurs atteintes à marée haute.

Les hauteurs d'eau maximales enregistrées aux stations CB2_{East} et CB1_{West} se situent respectivement à 0.309 m et 0.288 m (ngm) soit environ 23 cm au-dessus du niveau moyen de la lagune (Tableau 4). Les maxima mesurés pendant la durée du suivi sont ponctuellement observés par épisode de fortes pluies (e.g. 19 juin, 2 juillet, 11 août, 27 septembre). A noter que le niveau de la mer, légèrement plus haut entre juin et octobre (Figure 15b), entraîne une surélévation du niveau de l'étang sur une dizaine de centimètres (Figure 15b) et favorise alors une extension des maxima pendant la saison humide. Entre le 3 et le 21 juin, on observe notamment la croissance rapide (~ 5 mm/j) du niveau de la mer et du niveau de l'étang, qui se produit à priori indépendamment de potentiels apports d'eau douce.

L'analyse basse fréquence des niveaux d'eau mesurés dans la lagune (composante mensuelle) montre une relation évidente avec les niveaux d'eau observés en mer (Figure 15c). Néanmoins, les observations réalisées dans la lagune montrent que certaines périodes présentent une variabilité significative à plus haute fréquence qui semble indépendante des variations du niveau de la mer et qui devraient donc être reliée à d'autres facteurs environnementaux (e.g. apport d'eau douce). Par exemple, au cours de la période située entre juin et octobre, on note plusieurs pics exceptionnels du niveau d'eau dans la lagune (amplitude variant de 0.05 à 0.20 m) qui apparaissent systématiquement suite à d'importantes précipitations (Figure 16). Par exemple, les précipitations enregistrées le 11 août entraînent une surélévation du niveau d'eau (> 0.12 m) dans la lagune aux deux stations de mesure sur une durée de 6 jours. Ces observations suggèrent un délai nécessaire important pour que les deux masses d'eau (lagune et océan) retrouvent une position dite d'équilibre, où la marée joue un rôle prépondérant et permet de réguler les niveaux d'eau de la lagune.

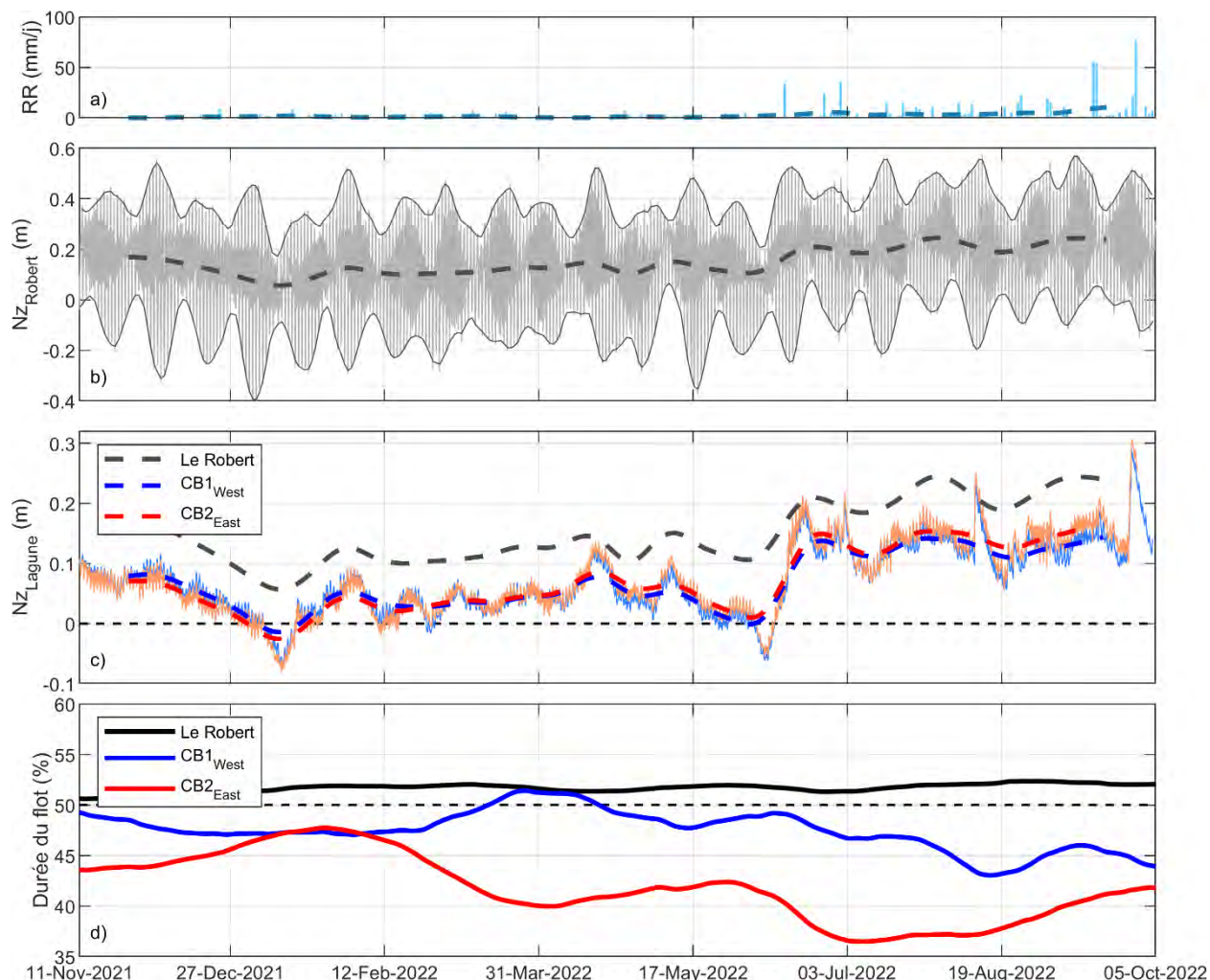


Figure 15 : Evolution temporelle des niveaux d'eau dans la lagune. a) Pluviométrie journalière (RR en mm/j) et composante mensuelle du signal (superposée en trait épais discontinu). b) Niveaux d'eau mesurés au Robert (Nz_{Robert} en m) et enveloppe des plus hautes/basses mer. La composante mensuelle du signal est superposée en trait épais discontinu. c) Niveaux d'eau mesurés dans la lagune (Nz_{Lagune} en m) aux stations $CB1_{West}$ (en bleu) et $CB2_{East}$ (en rouge) et composantes mensuelles filtrées (traits épais discontinus). d) Asymétrie des marées (durée du flot cumulée sur 30 jours) en mer (traits noirs) et dans la lagune (trait rouge et bleu). Les courants du flot sont supérieurs à ceux du jusant lorsque la durée du flot devient inférieure à celle du jusant (< 50 %).

Tableau 4 : paramètres statistiques observées entre novembre 2021 et octobre 2022 en mer (Le Robert) et dans la lagune ($CB2_{East}$ et $CB1_{West}$). Hauteur d'eau moyenne (Nz_{mean}), minimale (Nz_{min}) et maximale (Nz_{max}) aux trois stations. Amplitude de marée (amp), atténuation ($^{amp}/amp_{mer}$), déphasage (lag) et durée moyenne du flot par rapport au jusant (D_{Flot}) calculée sur la période de suivi.

Stations	Secteur	Nz_{mean}	Nz_{min}	Nz_{max}	amp (m)	$^{amp}/amp_{mer}$ (%)	lag (h)	D_{Flot} (%)
Le Robert	Mer ouverte	0.153	-0.401	0.575	0.574	100	—	51
$CB2_{East}$	Lagune (chenal)	0.074	-0.081	0.309	0.068	12	4.2	42
$CB1_{West}$	Lagune (proche estran)	0.072	-0.070	0.288	0.056	10	3.5	48

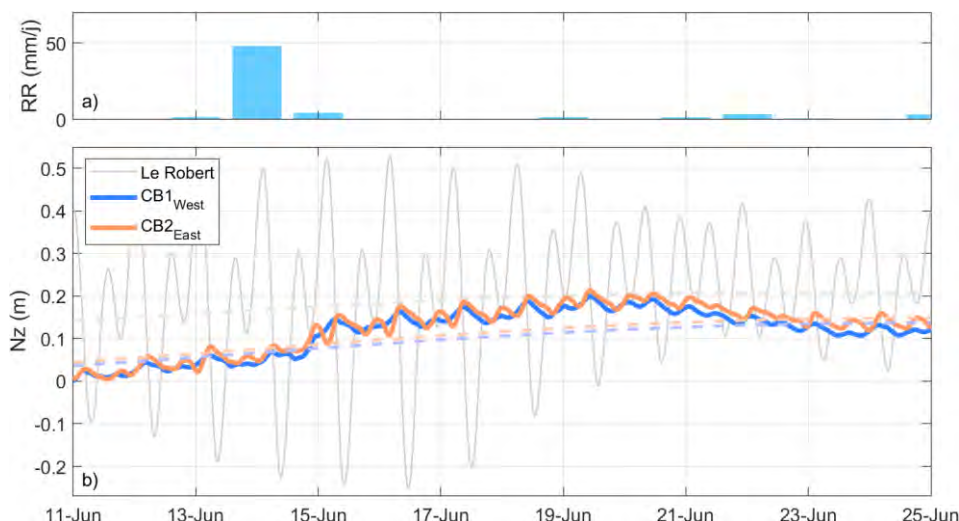


Figure 16 : Evolution temporelle des niveaux d'eau dans la lagune. a) Pluviométrie journalière (RR en mm/j). b) Niveaux d'eau mesurés au Robert (en gris) et dans la lagune aux stations CB1_{West} (en bleu) et CB2_{East} (en rouge). Les composantes mensuelles des signaux filtrés sont illustrées en traits clairs discontinus.

3.1.3. Régime de marée et circulation tidale

a) Analyse des composantes harmoniques de l'onde de marée

Les marées observées dans la lagune des Salines sont déterminées par les marées de l'océan côtier et donnent lieu à une dynamique d'écoulement non linéaire au sein du canal sud-est. Ainsi, ce canal d'entrée sert de filtre dynamique qui alterne les courants ainsi que les fluctuations du niveau d'eau dans la lagune.

Une analyse de la reconstitution des différentes composantes harmoniques de l'onde de marée (Grinsted, 2020) a été réalisée à partir des données collectées au Robert, supposées représentatives de la marée océanique qui force la circulation tidale dans la lagune (Figure 17a1 et a2). La même analyse est répétée aux stations CB2_{East} et CB1_{West} (Figure 17b1-c2). Chacune des ondes qui constituent le spectre de la marée aux différentes stations de mesure est caractérisée par sa période, son amplitude et sa phase (Figure 17, à droite).

D'après les résultats de l'analyse harmonique, l'amplitude totale de la marée au Robert atteint 0.574 m sur la période d'étude (novembre 2021 à octobre 2022). Les principales composantes harmoniques semi-diurnes (M2, S2, N2 et K2, Figure 17a1) et diurnes (K1, O1 et P1 Figure 17a1) contiennent l'essentiel (84 %) du signal de marée. Les résultats obtenus montrent que les composantes les plus importantes sont les composantes semi-diurnes (48 %) avec notamment l'onde M2 (marée générée par la "lune moyenne", 28 %) et l'onde S2 (marée due au "soleil moyen", 10 %). Les composantes diurnes représentent 36 % de l'amplitude totale de marée avec notamment l'onde K1 (variations de déclinaison de la Lune et du Soleil, 16 %) et l'onde O1 (variations de déclinaison de la Lune, 13 %). La marée mesurée au Robert est caractéristique d'un environnement microtidal, mixte à dominante semi-diurne.

L'amplitude de marée calculée au sein de la lagune est nettement inférieure à celle observée en mer ($\frac{amp}{amp_{mer}}(\%) \sim 10 \%$, Tableau 4) avec un déphasage important (~ 4.5 h). Ainsi, la marée océanique subit un amortissement conséquent au cours de sa propagation vers la lagune. Au niveau de la station de mesure située à l'entrée du canal sud-est (CB2_{East}, Tableau 4), l'amplitude de marée atteint environ 0.07 m tandis qu'elle devient légèrement inférieure sur le secteur est de la lagune, à proximité de l'estran (0.06 m, CB1_{West}, Tableau 4).

D'après les résultats de l'analyse, sur les deux stations de mesure on retrouve les principales composantes harmoniques semi-diurnes (M2, S2, Figure 17b2 et c2) et diurnes (K1, O1, Figure 17b1 et c1) qui contiennent l'essentiel du signal de marée. Les résultats obtenus montrent que la composante de l'onde S2 (marée due au "soleil moyen") est mal représentée au niveau de la station CB1_{West} (2 %, Figure 17c2).

D'après les mesures, la marée diurne (K1 et O1) arrive légèrement avant au niveau de la station CB1_{West} (*lag* ~ 20 h en moyenne, Figure 17, à droite) soit un déphasage de ~ 8 h par rapport à la marée mesurée au Robert ou une demi-heure plus tôt par rapport à la station CB2_{East}. De la même façon, la marée semi-diurne (M2 et S2) arrive une heure avant à CB1_{West} par rapport à CB2_{East} (*lag* ~ 8 h en moyenne, Figure 17, à droite) soit un déphasage de ~ 4 h par rapport à la marée mesurée au Robert. Le déphasage observé entre les stations CB1_{West} et CB2_{East} est difficilement explicable lorsque l'on considère que l'onde de marée se propage uniquement par les eaux de surface. En effet, la station CB1_{West} reçoit les différentes composantes de l'onde de marée avant la station CB2_{East} pourtant située à une bien plus grande distance des canaux. Il est alors possible que des échanges aient lieu de façon souterraine où l'onde de marée circule également au sud-ouest, où la bande côtière ne fait que quelques mètres de large, composée majoritairement de sables avec une transmissivité importante.

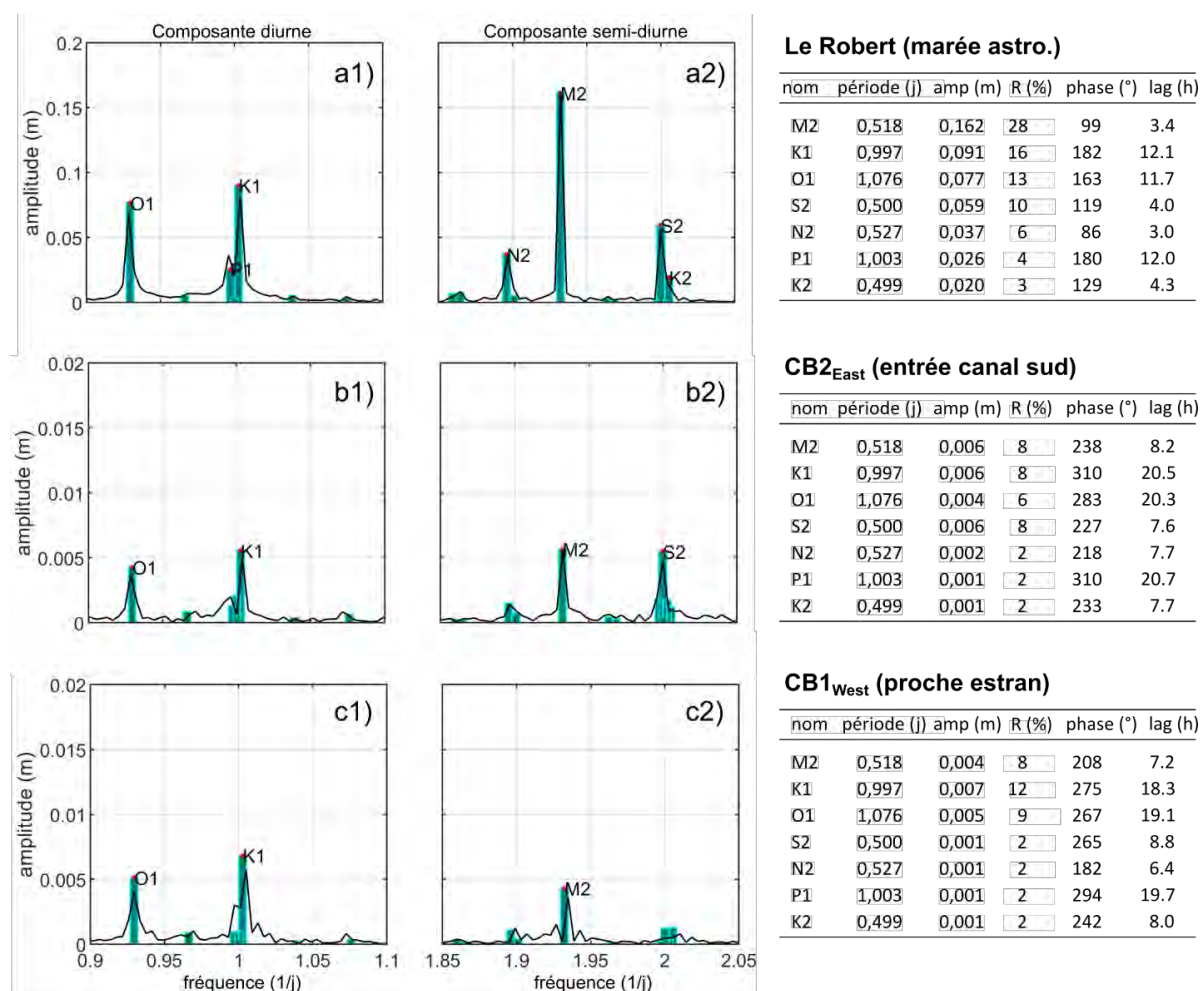


Figure 17 : (a1-c2) - Composantes principales diurnes (à gauche) et semi-diurnes (centre) de la marée en mer au Robert (a1-a2) et dans la lagune aux stations CB2_{East} (b1-b2) et CB1_{West} (c1-c2). Présentés sur la droite, les paramètres obtenus aux trois stations de mesure décrivent respectivement la période (*j*), l'amplitude (*m*) et la phase (°) pour chaque composante de la marée. L'amplitude relative de la marée (*R*) et le déphasage (*lag* en heure) sont également indiqués.

b) *Asymétrie de la marée*

Les courants de marée dominant généralement la géomorphologie d'une lagune côtière. En transportant des sédiments vers et en dehors de la lagune, en formant des estrans et, au fil du temps, en modifiant l'hydrodynamique, les courants de marée sont souvent le principal moteur de l'évolution morphologique d'une lagune. Une inégalité dans la durée du flot et du jusant constitue un bon indicateur pour caractériser une asymétrie de la marée et par conséquent, une inégalité sur les vitesses maximales des courants entrant ou sortant. L'asymétrie de la marée est par conséquent susceptible de contrôler la direction et l'ampleur des flux nets de sédiments vers la terre ou vers la mer, et donc l'accrétion ou l'érosion des sédiments dans la lagune.

La Figure 15d présente la variabilité mensuelle de l'asymétrie des marées, obtenu par le calcul de la durée du flot cumulée (avec une fenêtre de 30 jours) au marégraphe du Robert ainsi qu'aux deux stations de mesure installées dans la lagune. On suppose des courants de flot supérieurs à ceux du jusant lorsque la durée du flot devient inférieure à celle du jusant (< 50 %). Les résultats obtenus montrent une quasi-égalité dans les durées du flot et du jusant à la station du Robert située en mer avec une durée de flot estimée à 52 % en moyenne. Malgré la grande variabilité des régimes météorologiques saisonniers qui caractérise la région, la durée du flot par rapport à celle de jusant présente peu de variabilité au cours de la période de suivi (Figure 15d, courbe noire).

Au contraire, on observe une asymétrie de marée aux deux stations situées dans la lagune où la durée du flot reste inférieure à celle du jusant (45 %, moyenne des deux stations). On note une asymétrie de marée plus importante au sein de la station CB2_{East} située sur le secteur sud-est de la lagune à proximité du canal principal (durée de flot estimée à 42 % en moyenne). Cette transformation de l'onde de marée peut être attribuée aux processus non linéaires qui se produisent lorsque celle-ci se propage dans un canal étroit et au sein d'un système lagunaire peu profond (Jewell et al., 2012). Ces résultats suggèrent alors que les vitesses maximales des courants de flot sont plus fortes que celles du jusant au niveau du canal sud-est où s'effectuent les principaux échanges entre la lagune et la mer (dominance du flot).

La bathymétrie du canal principal induit au moins deux importantes transformations tidales qui affectent l'hydrodynamique et la morphodynamique de la lagune. On observe d'abord une réduction importante de l'amplitude de marée (réduction d'environ 90 % entre la marée observée au Robert et celle mesurée dans la lagune). Ce fort amortissement des marées peut être attribué, au moins en partie, à la transition bathymétrique rapide qui se produit lorsque les marées pénètrent dans le canal étroit et peu profond où la friction est beaucoup plus importante. D'autre part, le canal principal semble jouer un rôle de filtre basse fréquence où la lagune accueille de façon préférentielle l'énergie des ondes basse fréquence de la marée. En effet, on observe au sein de la lagune une réduction plus importante de l'amplitude des composantes semi-diurne M2 et S2 (> 90 %) par rapport au composantes diurnes (< 90 %).

c) *Débits à l'exutoire*

Afin d'estimer les débits entrants ou sortants de la lagune, notamment lié à la propagation de l'onde de marée, des mesures par jaugeage ont également été réalisées (Figure 18 et Figure 19). Le sens et l'intensité des débits mesurés dépendent systématiquement de la différence entre la hauteur d'eau en mer et de celle observée dans l'étang. Ainsi, lorsque le niveau d'eau en mer est supérieur à celui dans la lagune, les débits entrants mesurés varient entre 355 et 603 L/s (Figure 18d et Figure 19b). Au contraire, lorsque le niveau d'eau en mer est inférieur à celui dans la lagune, les débits sortants mesurés varient entre 452 et 1039 L/s (Figure 18d et Figure 19b).

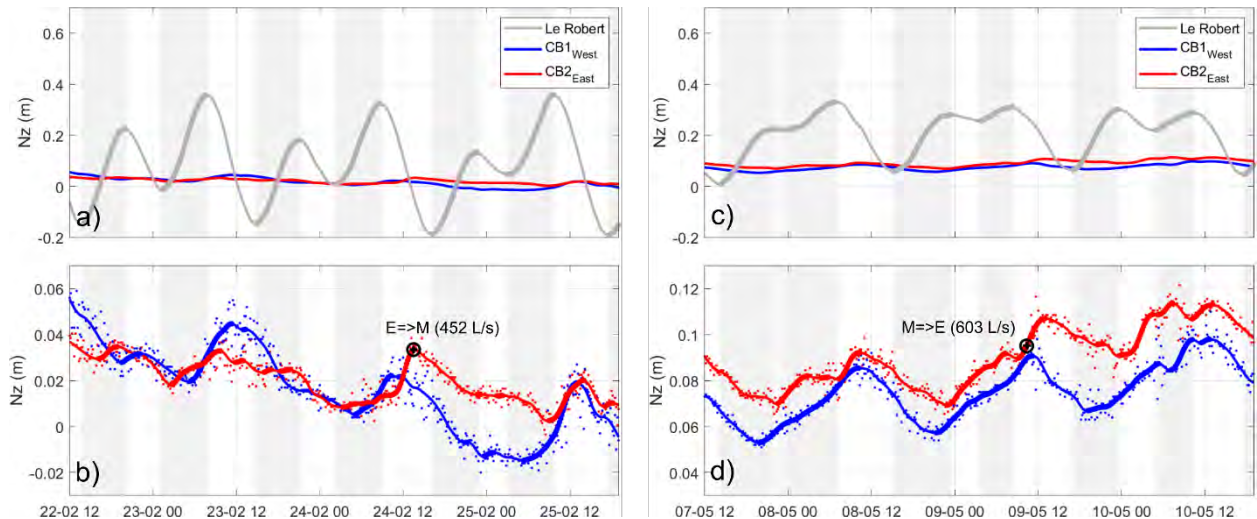


Figure 18: mesures par jaugeage des vitesses d'écoulement à l'entrée (côté lagune) du canal sud-est. Mesures réalisées à marée descendante le 24 février (a-b) et à marée montante le 9 mai 2022 (c-d). Un débit sortant (lagune vers mer) est indiqué par la symbolique E => M. Au contraire, un débit entrant (mer vers lagune) est indiqué par la symbolique M => E.

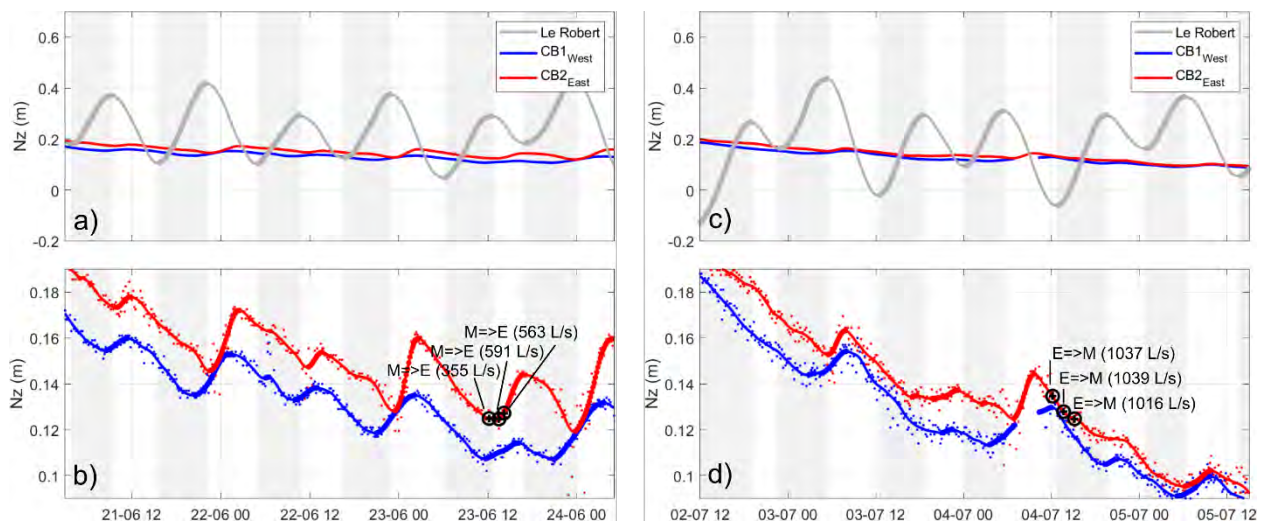


Figure 19 : mesures par jaugeage des vitesses d'écoulement à l'entrée (côté lagune) du canal sud-est. Mesures réalisées à marée montante le 23 juin (a-b) et à marée descendante le 4 juillet 2022 (c-d). Un débit sortant (lagune vers mer) est indiqué par la symbolique E => M. Au contraire, un débit entrant (mer vers lagune) est indiqué par la symbolique M => E.

Afin de mieux concevoir le rôle primordial que joue le canal principal dans la dynamique des écoulements entre la mer et la lagune, le volume d'eau transitant par le chenal a été calculé au cours de la journée du 23 juin (Figure 18b) pendant la marée montante entre 12 h 30 (1^{er} jaugeage) et 14 h 30 (denier jaugeage). On estime entre ces deux intervalles de temps un volume d'eau entrant (de la mer vers la lagune) égal à environ 3 600 m³. Au cours de ce laps de temps, le niveau de la lagune a augmenté sur environ 0.005 m soit un équivalent de 4 000 m³ sur la totalité de la lagune (en considérant une superficie de 822 072 m², voir section 3.2.2). Ainsi, le volume d'eau circulant au sein du canal principal représente ~ 90 % des échanges entre la lagune et la mer.

Le même calcul a été réalisé sur la journée du 4 juillet pendant la marée descendante entre 12 h (1^{er} jaugeage) et 15 h (denier jaugeage). On estime entre ces deux intervalles un volume d'eau

sortant de la lagune vers la mer égale à $\sim 11\,000\text{ m}^3$. Au cours de ce laps de temps, le niveau au sein de la lagune a diminué de 0.02 m soit un équivalent de $16\,000\text{ m}^3$ sur la totalité de la lagune. Ainsi, le volume d'eau circulant au sein du canal principal représente $\sim 70\%$ des échanges entre la lagune et la mer.

Ces résultats suggèrent que d'autres secteurs de la lagune communiquent également avec la mer et permettent des échanges entre les deux masses d'eau (e.g. canal secondaire au nord-ouest, infiltration dans les sols au travers de la bande côtière).

3.1.4. Température et salinité

La conjugaison des entrées maritimes journalières, de l'ensoleillement ou des arrivées intermittentes d'eau douce en provenance du bassin versant ou directement par précipitation génère des températures et des taux de salinité variables. La Figure 20 présente l'évolution de la température et de la salinité mesurée dans la lagune.

a) Température

La température de l'eau reste élevée tout au long de l'année dans la lagune ($28\text{ }^\circ\text{C}$ en moyenne) avec des fluctuations importantes comprises entre 22 et $36\text{ }^\circ\text{C}$ (Figure 20c et Tableau 5). En mer, la température de l'eau présente nettement moins de variabilité et reste légèrement plus basse avec $27.6\text{ }^\circ\text{C}$ en moyenne (Tableau 5). Au sein de la lagune, on observe également une certaine saisonnalité où les températures les plus faibles se situent entre décembre et mars autour de $27\text{ }^\circ\text{C}$. Entre juillet et septembre les températures sont légèrement plus hautes avec $29\text{ }^\circ\text{C}$ en moyenne.

Le signal présente également une variabilité à plus haute fréquence où l'on observe à l'échelle journalière des oscillations importantes qui atteignent en moyenne une amplitude de $5\text{ }^\circ\text{C}$ (Figure 20c). Cette variabilité est largement corrélée avec l'élévation du soleil qui détermine l'alternance entre le jour et la nuit et qui conditionne directement l'ensoleillement et donc la température de la lagune. En réchauffant la colonne d'eau sur son intégralité pendant la journée (Figure 21a et Figure 20c), le soleil joue un rôle primordial au sein de la lagune. On observe une variabilité journalière similaire aux stations CB1_{West} et CB2_{East} dont les capteurs sont pourtant situés à des profondeurs différentes (cf. section 2.1.2) suggérant alors une certaine homogénéité sur le fond de la colonne d'eau entre les profondeurs 0.20 m (station CB1_{West}) et 0.50 m (station CB2_{East}).

b) Salinité

Avec une salinité moyenne variant entre 31 et 37 PSU selon la station de mesure (Tableau 5), la lagune est un milieu saumâtre qui présente une variabilité très importante. Au cours de la période de suivi, on observe des valeurs de salinité inférieures à 10 PSU pendant la saison des pluies et supérieures à 40 PSU pendant le carême où le déficit hydrique lié à l'évaporation peut générer des taux de salinité très élevés (Figure 20d). Ainsi la salinité de la lagune est largement influencée par les apports en eau douce issus des précipitations directes ou des différents cours d'eau. Suite à la succession d'épisodes de fortes pluies (Figure 20a), on observe systématiquement la chute brutale du taux de salinité dans la lagune (diminution supérieure à 5 PSU en quelques jours). Ces événements (e.g. 19 juin, 2 juillet, 11 août, 27 septembre, Figure 20a et d) entraînent une baisse de la salinité non homogène à l'échelle de la lagune avec une réduction plus importante au niveau de la station $\text{CB1}_{\text{Ouest}}$. Ces résultats suggèrent que l'apport en sel, réalisé par l'entrée d'eau de mer, grâce à la circulation tidale sont plus importants sur le secteur sud-est de la lagune, à proximité du canal principal.

Le signal de l'évolution du taux de salinité dans la lagune présente également une variabilité à plus haute fréquence où l'on observe à l'échelle journalière des oscillations importantes qui

atteignent en moyenne une amplitude de 4 PSU (Figure 20d). Ces fluctuations sont introduites par la circulation tidale qui permet l'intrusion d'eau salée en provenance de la mer dans la lagune. Ainsi, hors période de forte pluie, on observe une baisse de la salinité pendant le flot (marée montante) et au contraire une augmentation de la quantité de sel pendant le jusant. Ces observations suggèrent alors que l'eau de la lagune qui s'évacue vers la mer pendant la marée descendante est moins salée que celle présente en moyenne dans l'étang. L'eau de surface, plus légère et donc moins salée, aurait alors plus de facilité à être évacuée en mer que les eaux de fond (plus denses et donc plus salées). Entre les périodes de flot et de jusant qui permettent de rééquilibrer la quantité de sel présente dans la lagune, on observe une certaine stabilité du taux de salinité qui dure en générale le temps de la marée haute ou de la marée basse (quelques heures).

Comme pour les variations de température, on observe une variabilité journalière similaire aux stations CB1_{West} et CB2_{East} confirmant alors une certaine homogénéité sur les dernières dizaines de centimètres de la colonne d'eau (entre 0.20 et 0.50 m de fond).

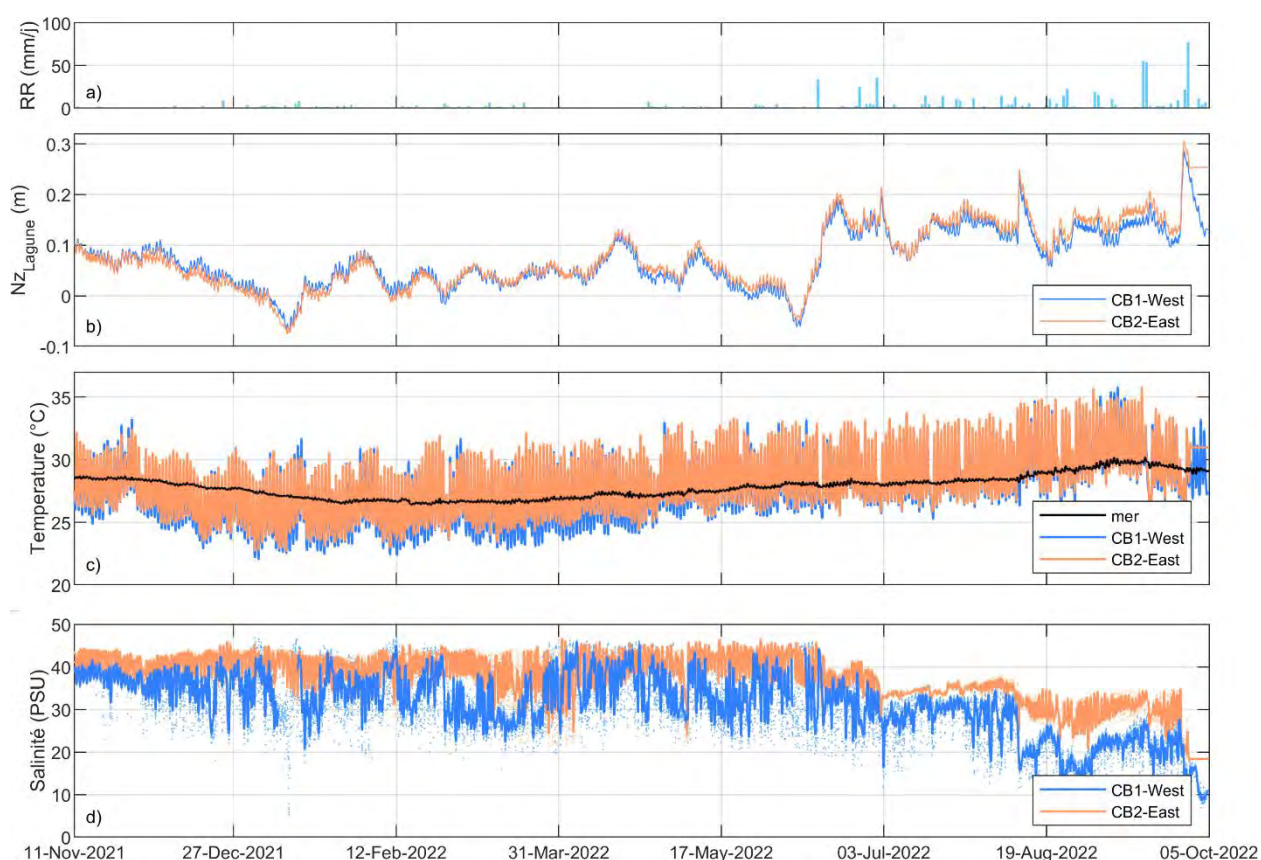


Figure 20 : Evolution temporelle des températures et salinité dans la lagune. (a) Pluviométrie journalière (RR en mm/j), (b) niveaux d'eau mesurés dans la lagune (Nz_{Lagune} en m), (c) température et (d) salinité mesurées aux stations CB1_{West} (en bleu) et CB2_{East} (en rouge). (c) La courbe noire présente l'évolution des températures mesurées en mer au Robert.

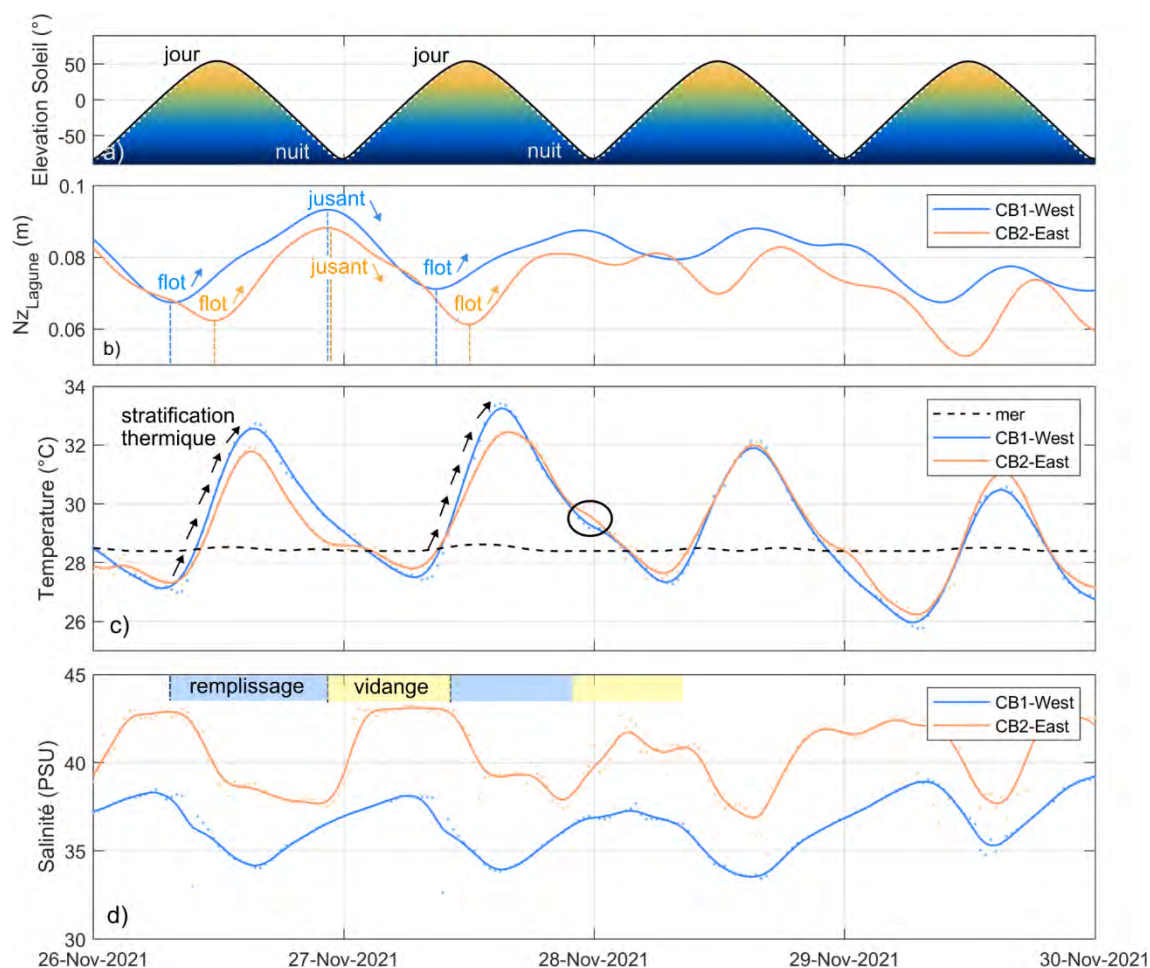


Figure 21 : Evolution temporelle des températures et salinité dans la lagune. (a) élévation du soleil (en °), (b) niveaux d'eau mesurés dans la lagune (Nz_{Lagune} en m), (c) température et (d) salinité mesurée aux stations $CB1_{West}$ (en bleu) et $CB2_{East}$ (en rouge). (c) La courbe noire présente l'évolution des températures mesurées en mer au Robert.

Tableau 5 : paramètres statistiques observées entre novembre 2021 et octobre 2022 en mer (Fort-de-France, station 4100097, <https://map.emodnet-physics.eu>) et dans la lagune ($CB2_{East}$ et $CB1_{West}$). Salinité moyenne (S_{mean}), minimale (S_{min}) et maximale (S_{max}) aux trois stations en quantité de sel (g) par kilogramme d'eau de mer (PSU). Température moyenne (T_{mean}), minimale (T_{min}) et maximale (T_{max}) aux trois stations en degré Celsius (°).

Stations	Secteur	Salinité (PSU)			Température (°C)		
		S_{mean}	S_{min}	S_{max}	T_{mean}	T_{min}	T_{max}
Fort de France	Mer ouverte	-	-	-	27.8	26.4	30.2
$CB2_{East}$	Lagune (chenal)	37.4	17.9	46.8	28.2	22.6	35.8
$CB1_{West}$	Lagune (proche estran)	31.2	7.5	46.0	27.8	22.0	35.8

3.2. MORPHODYNAMIQUE DE LA LAGUNE

3.2.1. Evolution historique

Le suivi de l'évolution morphologique de la lagune permet de mieux caractériser sa dynamique globale au cours de ces dernières années et de mettre en évidence certaines problématiques comme son potentiel envasement. A partir d'images satellites, de photos aériennes et d'orthophotographies (Tableau 2), la position de la limite mouillée de l'étang a été digitalisée et suivi au cours du temps. La Figure 22 présente l'évolution moyenne (p1 à p120) de la largeur des berges de la lagune depuis 1951 où une augmentation de la largeur (Δx_{tdc}) indique un gain de terre et une réduction de la surface de l'étang (et inversement).

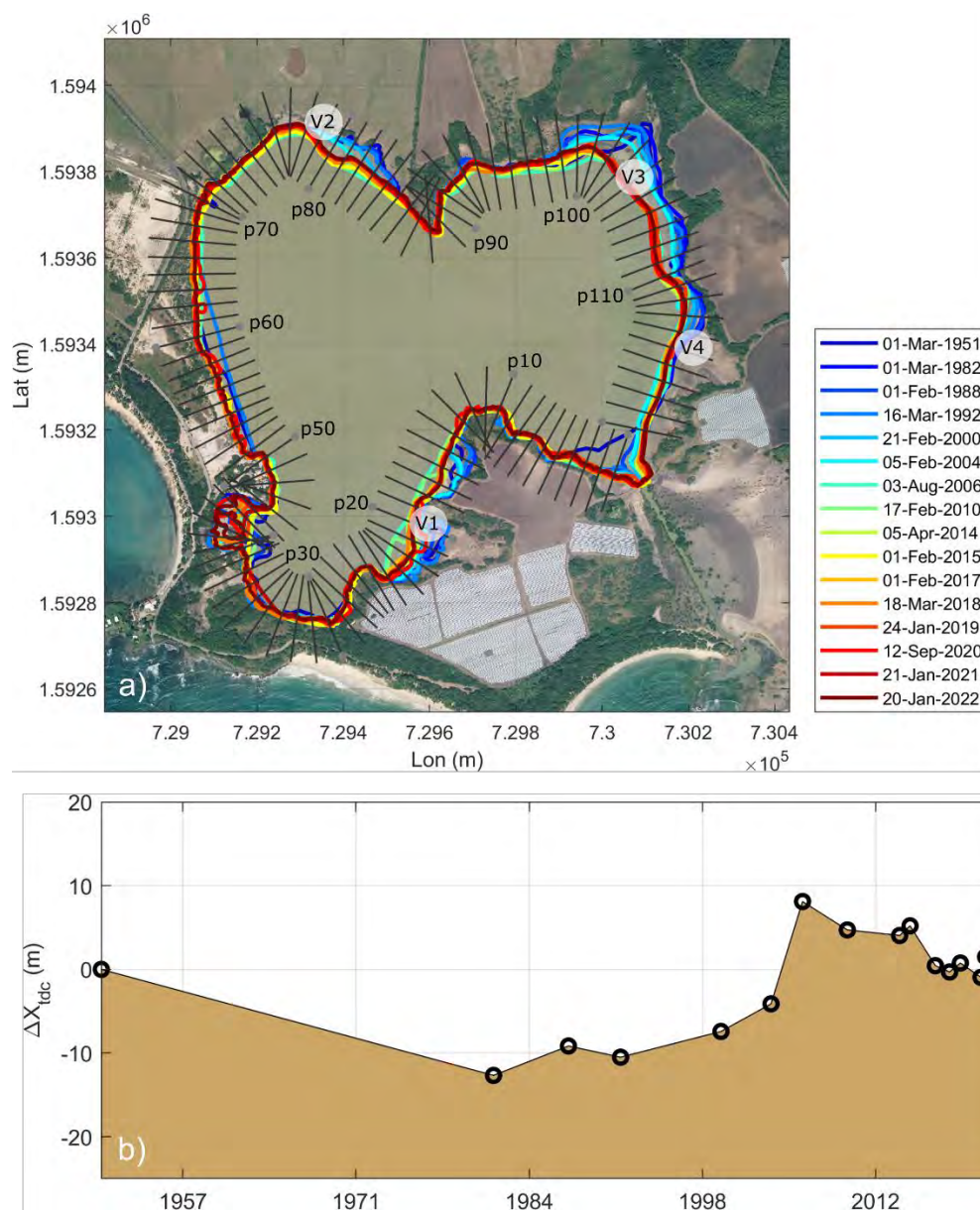


Figure 22: évolution de la largeur de berge moyenne (Δx_{tdc}) dans la lagune des Salines entre 1951 et 2022. a) Cartographie illustrant la limite mouillée de l'étang à différentes dates où sont présentées les zones de principales vasières (V1-V4). Les traits noirs illustrent la localisation des différents profils pour le calcul de largeur moyenne (p1 à p120). Fond de carte : BD ORTHO© 2017. b) Evolution de la largeur de berge par rapport à la situation initiale de 1951 (moyenne sur l'ensemble de la lagune).

Pour rappel, les évolutions observées sont à interpréter avec précaution au vu des potentiels écarts de niveau d'eau dans la lagune au moment de l'acquisition des images (section 2.2.1). Cette source d'erreur est difficile à estimer sans une connaissance précise du niveau d'eau dans la lagune au moment de la prise de vue. Au vu des faibles pentes sur le pourtour des rivages de l'étang, une variation de niveau d'eau à hauteur de ± 0.05 m (variabilité saisonnière, Figure 15) peut entraîner un écart dans la position de la limite de surface mouillée de ± 10 m. Néanmoins les images ont été capturées majoritairement pendant la saison sèche, entre janvier et mars (mis à part l'image de 2006 et de 2020) et à notre connaissance hors épisode de forte pluie.

Ainsi, on observe en moyenne entre 1951 et 1982 une diminution de la largeur de berge (> 10 m en 31 ans) puis une certaine stabilité jusqu'en 1992 (Figure 22b). A partir de cette année on observe une augmentation de la largeur des berges avec notamment une accélération brutale du phénomène entre 2000 et 2006 (> 10 m en 6 ans), indiquant le comblement de certaines vasières et par conséquent une réduction de la surface en eau de la lagune. Au cours de cette période (2000-2006), la surface mouillée de l'étang diminue sur $\sim 45\,000$ m² soit $\sim 5\%$ de sa surface actuelle. Le phénomène est d'autant plus marqué étant donné que l'image de 2006 a été capturée pendant le mois d'août où le niveau d'eau de la lagune est supposé maximal (section 3.1.2). Entre 2006 et 2017, les résultats de l'analyse montrent au contraire une réduction de la largeur de berge indiquant un recul de la limite mouillée de l'étang dans les terres et une augmentation de la surface en eau la lagune. Il est intéressant de constater que depuis 2017 les berges ont retrouvées en moyenne une largeur similaire à celle qu'avait la lagune en 1951 (Figure 22b). Ces résultats mettent en évidence que la surface en eau de la lagune entre 1951 et 2017 est finalement peu différente ($830\,000$ m² contre $815\,000$ m² respectivement) malgré des évolutions importantes entre ces deux dates. Entre 2017 et 2022 les évolutions constatées sur l'ensemble de la lagune restent modérées suggérant une certaine stabilité de la morphologie de l'étang.

Ces évolutions ne sont pas homogènes spatialement sur l'ensemble de la lagune. Alors que la variabilité est importante sur chacune des vasières (V1 à V4, Figure 22b), les lignes colorées qui illustrent la limite de surface mouillée à différentes dates sont quasiment superposées sur le reste de la lagune (e.g. p5 à p13, p23 à p34, p64 à p77 ou p84 à p100 Figure 22b). Ces secteurs de l'étang sont alors caractérisés par une certaine stabilité sur les 70 dernières années.

La Figure 23, présente la même analyse que celle illustrée précédemment en moyennant cette fois-ci la largeur de berge indépendamment sur chacune des vasières. Localisée sur le secteur sud-est de la lagune, l'évolution de la vasière V1 présente une forte variabilité au cours du temps avec une première phase où la largeur de berge diminue entre 1951 et 1992 (~ 20 m en 40 ans, Figure 23a). De façon spectaculaire, on observe une augmentation brutale de sa largeur entre 1992 et 2006 (60 m en 14 ans), indiquant le comblement de cette vasière et entraînant une réduction de la surface en eau sur ce secteur. Entre 2006 et 2022, la position de la limite mouillée recule dans les terres (20 m en 16 ans) et la morphologie de la lagune reprend une morphologie similaire de celle de 2004 sur ce secteur.

Située au nord-ouest de la lagune, la vasière V2 présente une dynamique similaire avec néanmoins une plus grande stabilité entre 1951 et 2000 (Figure 23b). Comme indiqué précédemment sur V1, on observe une augmentation brutale de sa largeur depuis la fin des années 2000 jusqu'en 2006 (25 m en 6 ans), correspondant au comblement partiel de cette vasière. Suite à cette épisode très dynamique, entre 2006 et 2022, la position de la limite mouillée recule dans les terres sur ~ 15 m en 16 ans, indiquant une augmentation de la surface en eau dans ce secteur et le retour à une morphologie proche de celle de 2004.

Les évolutions observées sur le secteur nord-est de la lagune (V3, Figure 23c) sont semblables à celles décrites sur V1. La dynamique de cette vasière montre une réduction importante de la surface en eau entre 1992 et 2006, provoquée par son comblement (la largeur des berges augmente en moyenne de 55 m en 14 ans). Entre 2006 et 2022, la position de la limite mouillée

présente en revanche plus de stabilité que précédemment observée sur V1 et V2 indiquant que la vasière n'a pas retrouvé sa morphologie initiale.

Toujours sur le secteur nord-est (V4, Figure 23d), à proximité immédiate de V3, on observe plus de stabilité sur l'ensemble de la période de suivi. On note toutefois une augmentation de la largeur de berge de 20 m en 14 ans entre 1992 et 2006, période sur laquelle on observe un comblement de l'ensemble des vasières de la lagune.

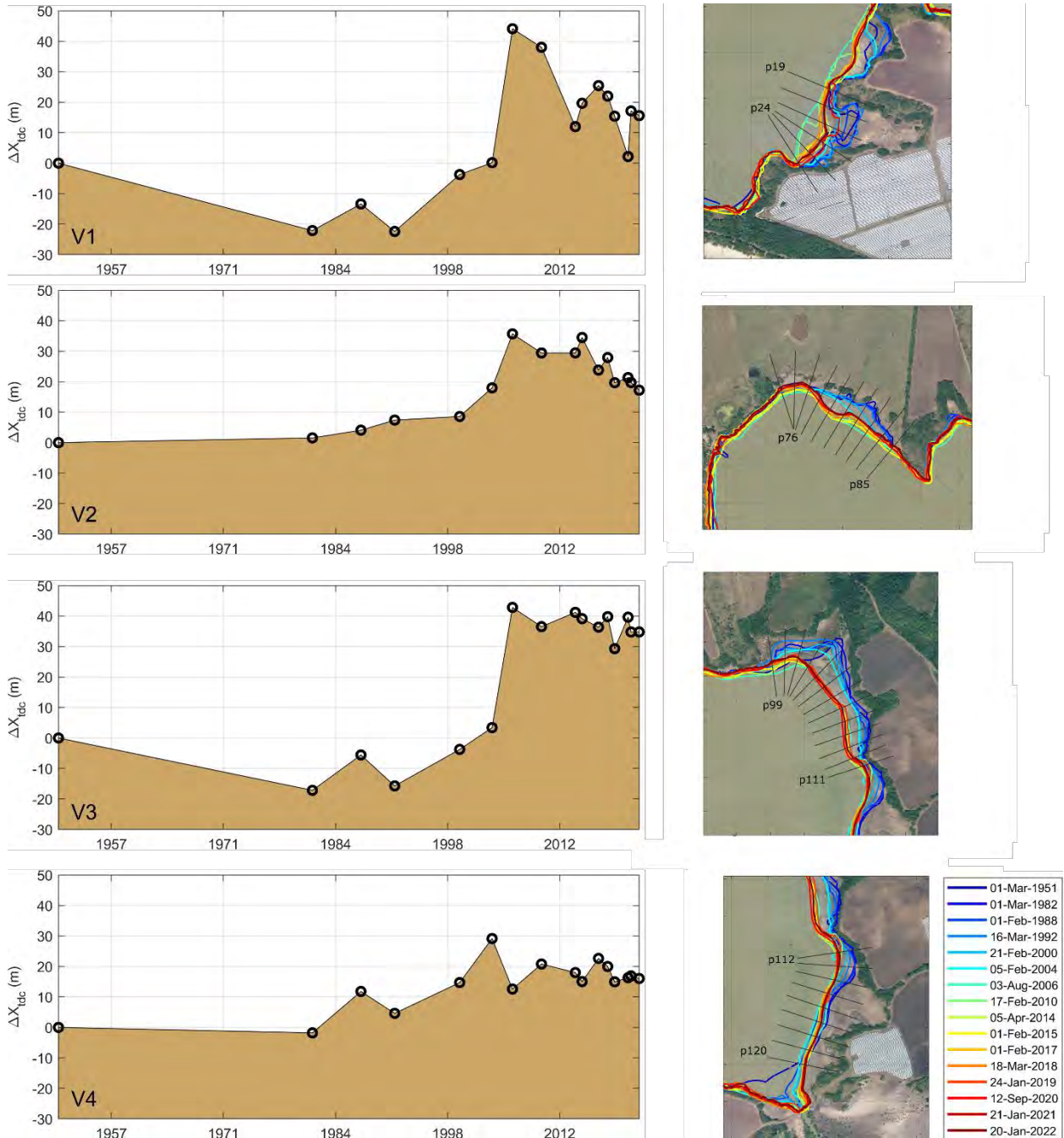


Figure 23 : évolution de la largeur de berge (Δx_{tdc}) dans la lagune entre 1951 et 2022 moyennée indépendamment pour chacune des zones de vasière (V1-V4). Superposés sur les cartographies à droite, les traits noirs illustrent la localisation des différents profils pour le calcul de largeur (p1 à p120). Fond de carte : BD ORTHO® 2017.

Ainsi, sur l'ensemble des secteurs analysés, on observe systématiquement, de façon plus ou moins importante, une augmentation rapide de la largeur de berge entre 1992 et 2006, conduisant au comblement de chacune des vasières et provoquant une réduction importante de la surface en eau, estimée à 84 000 m² environ. Depuis 2006, on observe au contraire une réduction de la largeur des berges indiquant une augmentation de la surface de l'étang. Entre 2006 et 2022, la surface en eau de la lagune a augmenté sur plus de 11 000 m². Une corrélation entre ces évolutions morphologiques et la recharge théorique annuel en eau douce présentée par la Figure 14 reste difficile à mettre en évidence sur ces échelles de temps.

3.2.2. Dynamique de l'embouchure (canal sud-est)

Située au niveau de l'embouchure de la lagune, à la sortie du canal sud-est, une passerelle permet de rejoindre le sentier pédestre de la savane des pétrifications. Cette passerelle est prolongée par des roches servant de pas japonais entre l'ouvrage et les parties terrestres du sentier. Cependant, la situation géomorphologique actuelle de l'embouchure engendre des problèmes de franchissement et de sécurité pour les usagers (roches glissantes et en partie immergées à marée haute).

La Figure 24 présente l'évolution de l'embouchure entre 1951 et 2022. Cette séquence montre l'ouverture progressive de l'embouchure, compensant probablement en partie la fermeture partielle du canal secondaire qui alimentait l'ancienne salines sur le secteur nord-ouest. Entre 1982 et 1992, on observe un élargissement du canal d'écoulement en amont et la création d'un chenal de communication étroit entre la mer et la lagune au niveau de l'embouchure (flèches vertes, Figure 24). En 1992, le chenal est devenu plus large (agrandissement sur une dizaine de mètres) et paraît alors mieux défini qu'en 1988 au détriment de la plage qui longeait la côte auparavant (polygone jaune, Figure 24).

Par la suite entre 1992 et 2000, depuis la construction de la passerelle (rectangle blanc, Figure 24), l'embouchure s'est élargie sur une trentaine de mètres, formant un demi-cercle au nord-est de la passerelle, modifiant significativement la morphologie de l'exutoire (flèches noires, Figure 24). Cette évolution semble s'être poursuivie jusqu'en 2017 jusqu'à atteindre plus de stabilité avec l'apparition de la végétation le long de la frange littorale. Située à proximité immédiate de la passerelle, toujours sur le secteur nord-est, des enrochements ont été mis en place et permettent de prolonger l'ouvrage vers la terre ferme et le franchissement des usagers (point blanc, Figure 24). On observe alors peu d'évolution très localement sur ce secteur depuis les années 2000.

Au contraire, l'extrémité sud-ouest de la passerelle a connu des évolutions significatives entre 2010 et 2017 avec la formation d'un chenal secondaire, isolant la passerelle de la terre ferme (flèches bleues, Figure 24). Ces évolutions ont alors conduit à la mise en place d'enrochements afin de permettre l'accès à l'ouvrage (roches servant de pas japonais). Depuis 2017, la formation de ce chenal secondaire semble se poursuivre et une quantité importante de matériaux sédimentaires a été expulsée en mer.

Les évolutions observées au cours de ces dernières décennies montrent que l'embouchure de l'étang est dynamique avec une forte tendance à l'élargissement et à l'expulsion de matière sédimentaire en dehors de la lagune. Pourtant les analyses réalisées précédemment basées sur la durée (section 3.1.3b) suggéraient une dominance du flot au sein de la lagune avec des courants plus forts en moyenne pendant la marée montante. Ces nouveaux résultats montrent que le débit et les vitesses de courant associées sont localement intenses (au niveau de l'exutoire) pendant la marée descendante, allant jusqu'à provoquer l'ouverture de l'embouchure et un transport sédimentaire dirigé vers la mer.

Les mesures réalisées montrent qu'au cours d'un événement de forte précipitation le niveau d'eau de l'étang augmente pendant plusieurs jours sous l'influence de la pluie directe mais aussi les jours suivants par les apports issus du bassin versant. Au cours de ces épisodes de fortes pluies, nos observations corroborent que l'expulsion de matière sédimentaire en dehors de la lagune peut être importante (particulièrement au niveau de l'embouchure du canal sud-est, Figure 25) suggérant alors des courants de jusant intenses et un transport sédimentaire dirigé vers la mer. Ainsi, le rôle joué par le bassin versant sur le transport sédimentaire, notamment en période de forte pluie paraît fondamental, favorisant l'expulsion de matériaux vers la mer et empêchant l'envasement et le comblement de la lagune.

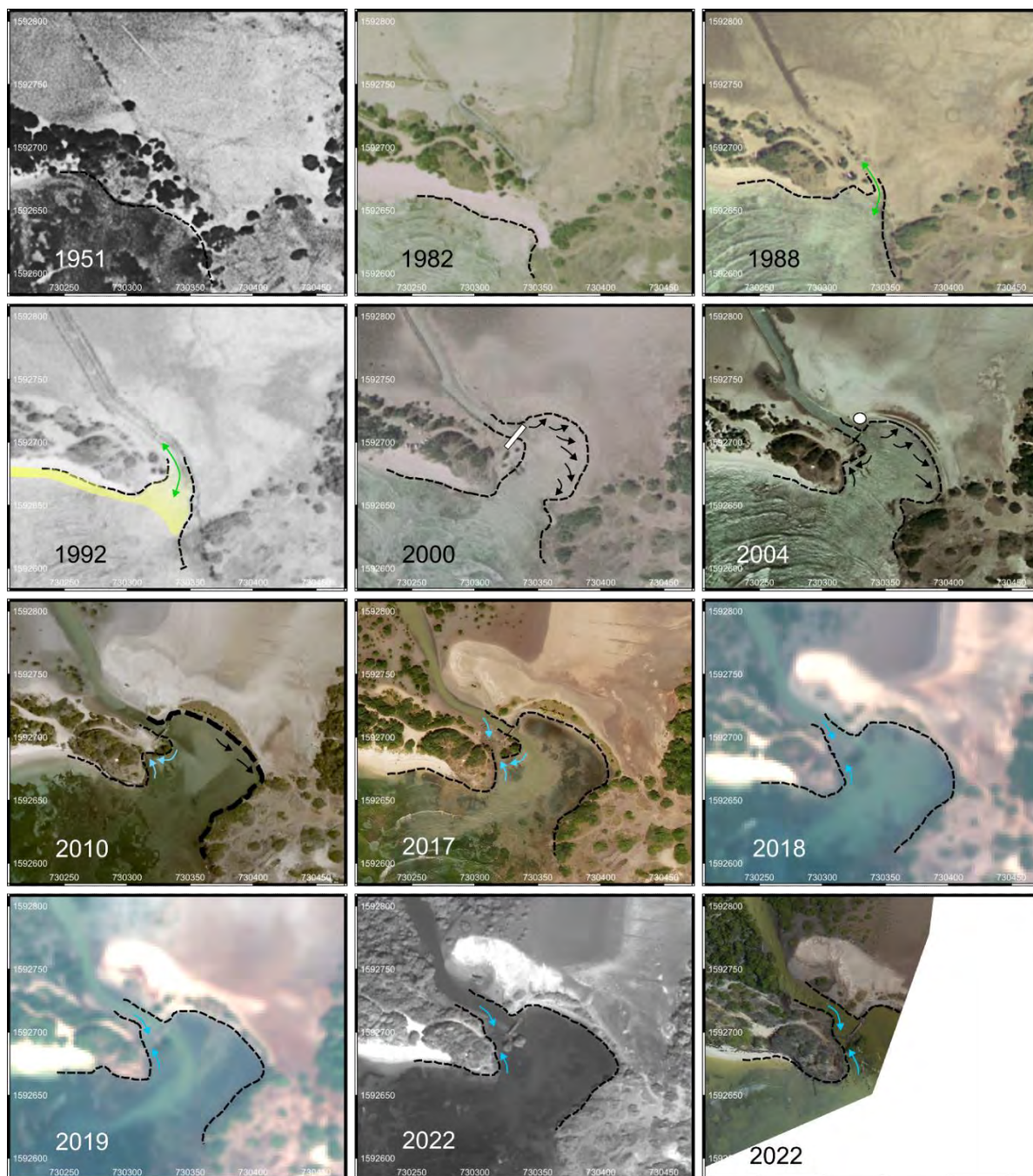


Figure 24 : Séquence d'images (cf. Tableau 2) illustrant l'évolution de l'embouchure de la lagune (sortie du canal sud-est). L'exutoire est équipé d'une passerelle (sentier pédestre) qui permet de rejoindre la savane des pétrifications. La dernière image de la séquence est celle acquise par © Sub-C Marine en août 2022.



Figure 25 : Images satellites (planetScope scene) suite à l'épisode de forte pluie du 11 août (section 3.1.2) illustrant l'expulsion d'une quantité importante de sédiments en dehors de la lagune. <https://www.planet.com/explorer/>.

3.2.3. Analyse géomorphologique

Afin d'identifier qualitativement les différents facteurs ayant pu contribuer à la réduction de la surface en eau de la lagune entre 1992 et 2006, une évaluation visuelle de certains critères géomorphologiques a également été réalisée. Ainsi, les évolutions de certains secteurs ont été décrits plus en détail comme l'état de la retenue collinaire (Figure 9), certaines vasières ou encore la présence de champs cultivés. Cette appréciation visuelle est retranscrite à partir d'une échelle d'interprétation visuelle qui varie entre 0 (nul ou inexistant) et 3 (marqué, fortement développé).

La retenue collinaire située au nord-est de la lagune est le plus grand plan d'eau de la zone étudiée (Figure 9) et constitue sans conteste une ressource mobilisable non négligeable. Cette retenue collinaire est un obstacle à l'écoulement naturel des eaux de ruissellement mais peut également être perçue comme un dispositif de piégeage des atterrissements liés aux activités anthropiques. Le taux de sédimentation et de colonisation par les végétaux (plantes flottantes et végétation rivulaire) est aujourd'hui très préoccupant (SAFER, 2016).

La présence de cette retenue collinaire et la mobilisation de la ressource en eau du bassin versant a pu entraîner une perturbation dans l'équilibre entre les apports terrestres (eau douce, sédiments) et maritimes (marées, vagues), provoquant l'augmentation de la surface des vasières et une réduction de la surface en eau de la lagune. Depuis quelques années, il semble que la morphologie de l'étang ait retrouvée un certain équilibre où l'on observe même une augmentation de sa surface en eau. Ce nouvel équilibre est certainement réalisé au détriment de certaines portions de la lagune (e.g. fermeture du canal situé au nord-ouest, zone de mangrove).

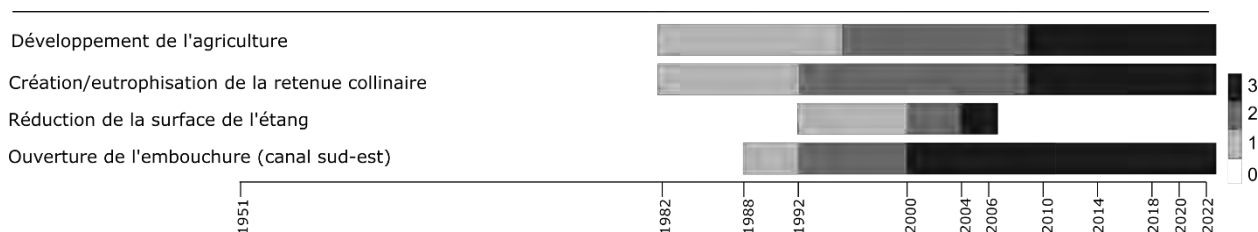


Figure 26 : évaluation de certains facteurs géomorphologiques de la lagune. Cette appréciation visuelle est retranscrite à partir d'une échelle d'interprétation (cf. Tableau 3) qui varie entre 0 (nul ou inexistant) et 3 marqué, fortement développé)

3.2.4. Morphologie actuelle de la lagune

Avec une hauteur d'eau moyenne de 0.32 m, la lagune des Salines est peu profonde (60 % de l'étang est caractérisée par des hauteurs d'eau inférieures à 0.30 m, Figure 27a), représentant un volume total estimé à environ 175 300 m³ (hors canaux). Légèrement plus profonde sur son secteur sud-est, la hauteur d'eau maximale peut atteindre localement 0.70 m. L'étendue d'eau est bordée par des berges de faible pente (0.5 %) dont la hauteur est comprise entre 0.2 et 0.6 m.

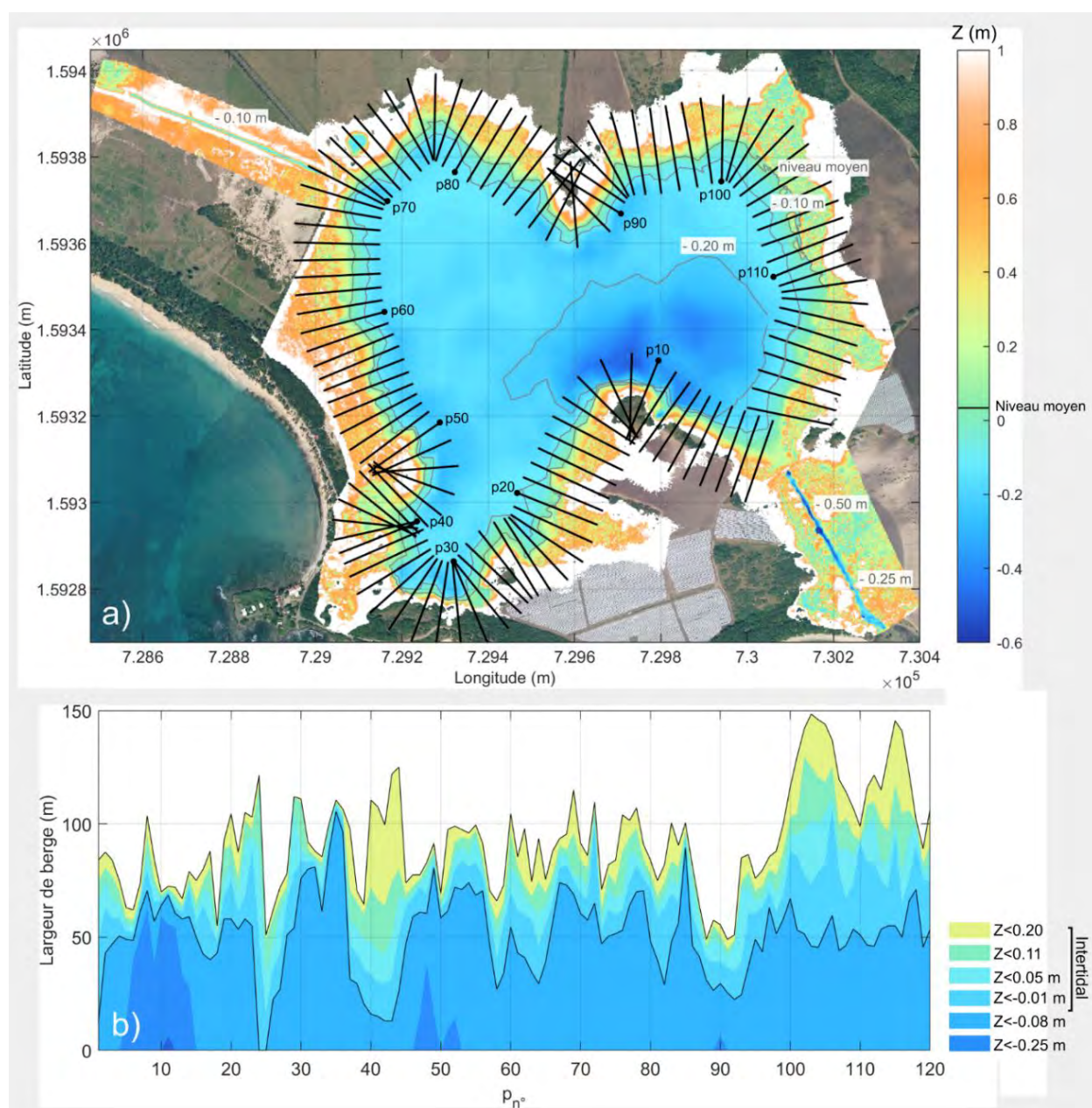


Figure 27: Morphologie de l'étang des salines. a) Carte topo-bathymétrique avec z (m) la côte du fond par rapport au niveau de référence ngm. b) Analyse par profil de la répartition des côtes du fond où les iso-contours représentent l'extension de l'habitat exposé aux variations de marée et de niveaux d'eau définis par les hauteurs d'eau situés entre -0.08 et +0.20 m (ngm). Chacun des profils analysés est illustré sur le panel supérieur par des traits noirs le long des berges. Fond de carte : BD ORTHO® 2017.

Le volume « mort » de la lagune (i.e. non soumis au balancement des marées), considérant une amplitude de marée moyenne de 0.07 m (Tableau 4) a été estimé à environ 156 000 m³ soit un volume oscillant estimé à environ 19 300 m³ (11 % du volume total de la lagune). A noter que le volume oscillant correspond ici à la masse d'eau se déplaçant alternativement vers et en dehors de la lagune au rythme des marées. Le volume induit par les variations du niveau de la mer à l'échelle des saisons peut être quant à lui beaucoup plus conséquent.

Le long du rivage, la distribution des largeurs de sections cumulées par classe bathymétrique (surface colorée, Figure 27b) a pour objectif de vérifier que les côtes du fond sont bien réparties au sein de la lagune. Ainsi, les berges de l'étang montrent une certaine disparité où quelques classes de hauteur d'eau sont parfois mal représentées. Par exemple, le long des profils p5 à p12, p30 à p36, l'habitat intertidal est faiblement représenté par rapport à l'ensemble de la lagune (largeur inférieure à 5 m). Au contraire, certaines portions montrent une largeur plus étendue (supérieure à 10 m) de cet habitat, notamment sur les secteurs sud-ouest ou est de la lagune (e.g. p36 à 43 ou p100 à 120, respectivement).

3.3. CONTEXTE SEDIMENTAIRE

3.3.1. Epaisseur de sédiment meuble

Au sein de la lagune, l'épaisseur de sédiment meuble a été évalué en moyenne à 0.48 m (Figure 28). Cette couche sédimentaire, pouvant souvent être associée à de la vase non indurée, est répartie inégalement sur la lagune. Au niveau du secteur nord-ouest, le dépôt est plus important avec une épaisseur comprise entre 0.4 m et 0.6 m. Au contraire, sur le secteur est de l'étang, cette couche sédimentaire est moins présente, caractérisée par une épaisseur inférieure à 0.25 m. Le long du rivage, on retrouve une répartition similaire où l'épaisseur de sédiments meubles est maximale sur l'ensemble du pourtour ouest de l'étang avec ponctuellement plus de 0.60 m. Cette disparité se retrouve également au niveau des canaux avec une épaisseur plus importante sur le canal nord-ouest (~ 0.30 m) que sur le canal sud-est (entre 0.10 et 0.20 m).

A partir de ces nouvelles données, un profil « type » peut être défini afin d'illustrer la géomorphologie de la lagune. La Figure 29 représente l'évolution de la côte du fond moyenne et de sa variabilité (calculée le long des transects p1 à p120, Figure 28) en fonction de la distance par rapport à la tête de profil (côté terre). L'épaisseur de sédiment meuble est illustrée par la surface colorée en vert et reste significative sur l'ensemble des profils.

Sur la partie immergée de la lagune, le long du rivage, la variabilité des côtes du fond est plus faible impliquant une plus grande hétérogénéité à terre, sur sa partie émergée. L'ensemble des profils analysés présentent une très faible pente malgré tout où la variabilité du niveaux d'eau dans l'étang joue un rôle majeur sur la mise en eau de certaines portions de la lagune. Lorsque le niveau d'eau au sein de l'étang est à son minimum, certains profils sont susceptibles de se trouver à sec sur plusieurs dizaines de mètre. A noter que par rapport à la morphologie du profil type de la lagune et aux profondeurs mesurées (Figure 29), l'épaisseur moyenne de vase non indurée reste conséquente, supérieure sur l'ensemble du profil à l'épaisseur de la colonne d'eau (pour un niveau moyen).

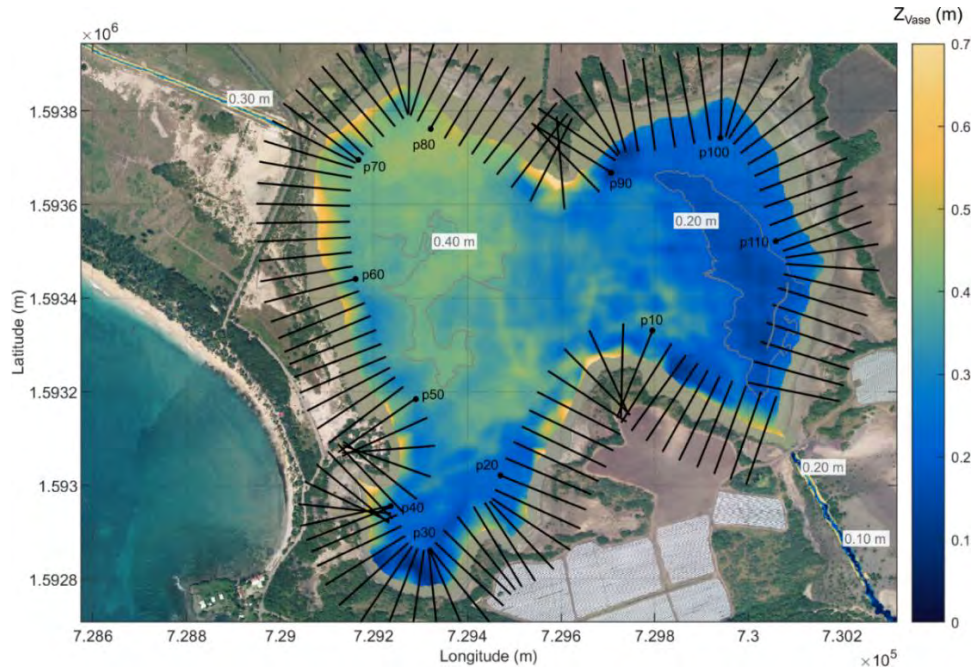


Figure 28: Epaisseur de sédiments meubles dans l'étang des salines. Carte topo-bathymétrique de l'épaisseur de vase z_{vase} (m). Chacun des profils analysés est illustré sur le panel supérieur par des traits noirs le long des berges. Fond de carte : BD ORTHO® 2017.

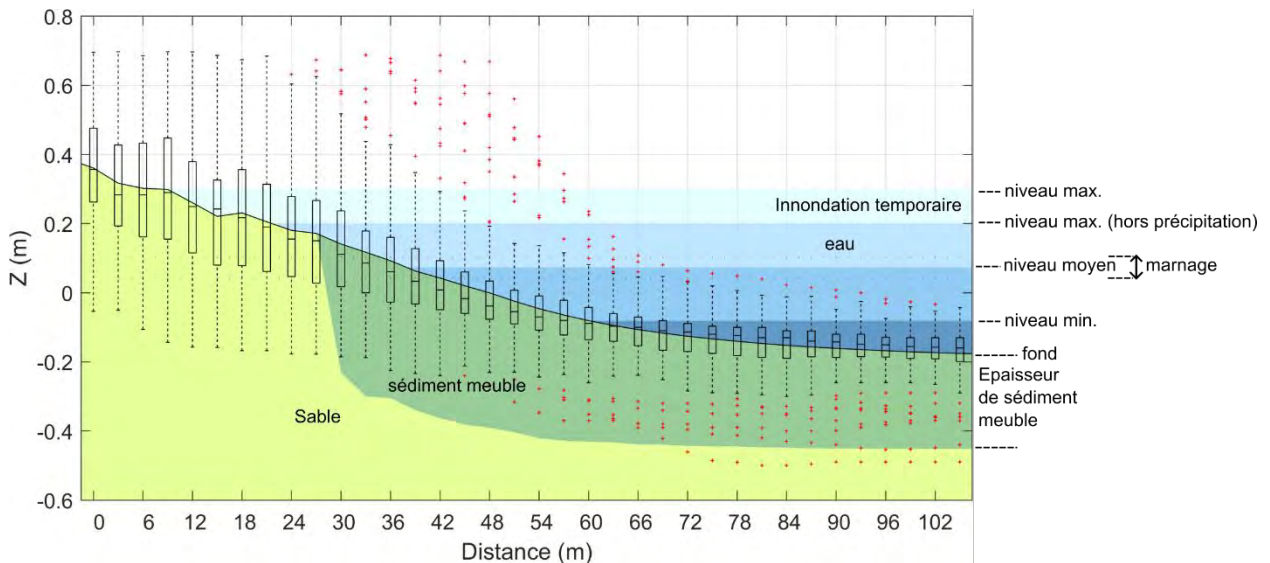


Figure 29: profil type de la lagune où sont représentées la côte du fond moyenne et sa variabilité (diagramme en boîte) calculé le long des transects (p1 à p120 Figure 28). L'épaisseur de sédiment meuble est illustrée par la surface colorée en vert. Les différents niveaux d'eau sont représentés par les surfaces bleues.

3.3.2. Formations géologiques

Les valeurs de résistivité obtenues le long des lignes de vol ont été confrontées aux observations stratigraphiques réalisées par le passé (cf. section 1.3.1). Trois grandes formations géologiques ont ainsi été repérées sur les profils de résistivité. De façon générale, une très bonne corrélation a été observée entre les contrastes de résistivité et les limites des formations repérées sur le terrain (S2, T2 et T3, Figure 30).

Une formation de sables présente à faibles profondeurs, définie par des résistivités assez basses (entre 0.3 et 0.6 Ohm.m) a pu être identifiée sur l'ensemble des profils (L1 à L5, Figure 30). Cette formation géologique semble majoritairement présente sur les portions sud-est de la lagune où elle peut atteindre jusqu'à 4 m d'épaisseur (L3, Figure 30). Cette couche sédimentaire est moins visible sur la partie centrale de la lagune (L4 et L5, Figure 30).

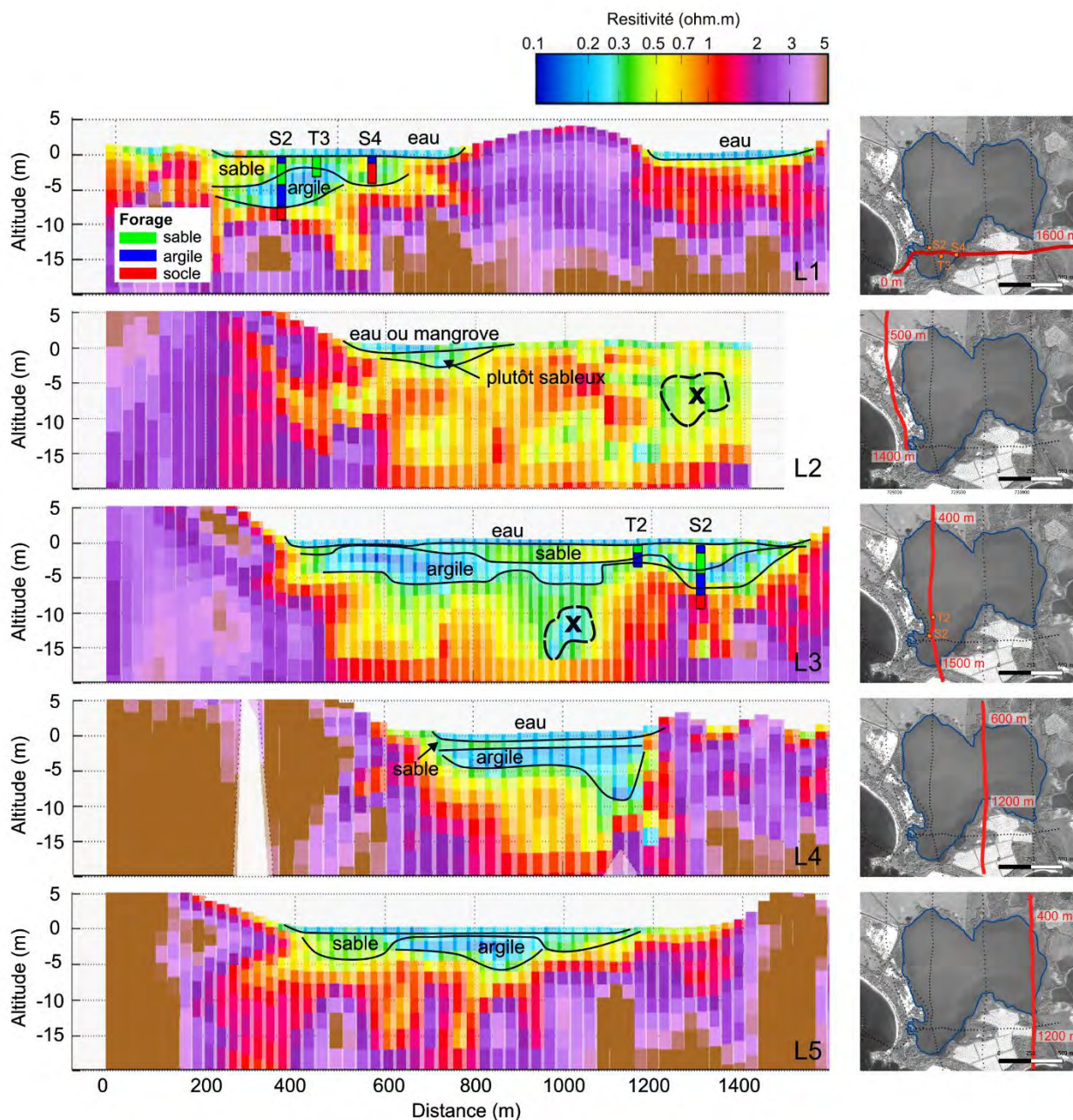


Figure 30 : (à gauche) profil de résistivité selon les lignes de vol L1 à L5 (haut en bas) où sont représentés les différentes formations géologiques. (à droite) Localisation des lignes de vol et points échantillonnés. La distance parcourue le long de chaque ligne de vol est indiquée en rouge (e.g. L1 entre 0 et 1600 m).

Située généralement sous la formation sableuse, une formation d'argile est représentée par des résistivités plus faibles (entre 0.2 et 0.3 Ohm.m) et une épaisseur souvent inférieure à 3 m. L'épaisseur de cette formation peut atteindre localement jusqu'à 5 m et reste majoritairement présente sur les sections mouillées de la lagune (L1, L3, L4 et L5, Figure 30). Située à une plus grande profondeur (entre 5 et 15 m selon la ligne de vol) on observe la présence d'une formation qui pourrait correspondre à des argiles sur le secteur sud-est de la lagune (L1-L4, Figure 30). Cette formation semblerait correspondre à la présence d'une intrusion haline ancienne et participe probablement aux échanges entre la mer et le système lagunaire. On note que l'on retrouve cette formation à proximité de la station de mesure CB1_{West} qui reçoit les différentes composantes de l'onde de marée souvent plusieurs dizaines de minutes avant la station CB2_{East} (pourtant située à une bien plus faible distance des canaux). Ces résultats viennent appuyer l'hypothèse que des échanges entre la mer et la lagune pourraient également avoir lieu de façon souterraine par cette formation géologique.

A une plus grande profondeur (Altitude > 5 m, Figure 30), une formation correspondant à une coulée de basalte plus ou moins altérée constituant le socle de la lagune est représenté par des résistivités plus fortes (> 1 Ohm.m).

4. Synthèse, diagnostics et recommandations

4.1. SYNTHÈSE DES RESULTATS ET DIAGNOSTICS

Les observations et les analyses réalisées permettent d'améliorer la connaissance du fonctionnement hydro-sédimentaire de la lagune des Salines et de mieux comprendre son évolution historique au cours de ces dernières années. Le chapitre suivant propose une synthèse des résultats obtenus et un diagnostic du fonctionnement actuel de la lagune.

4.1.1. Bilan hydrologique

Un modèle hydrologique a été proposé à l'échelle du bassin versant où les apports d'eau douce annuel en transit dans la lagune des Salines sont nettement supérieurs ($> 500\%$) au volume total de l'étang. Néanmoins, ces apports d'eau douce varient considérablement selon la saison où la recharge théorique mensuelle est deux fois plus importante pendant l'hivernage que pendant le carême. Ainsi, entre février et mars, lorsque les précipitations sont les plus faibles, la lagune des salines s'expose à une situation hydrologique (salinité, niveaux d'eau) très différente de celle de la saison des pluies (entre août et novembre) avec un apport d'eau douce mensuel largement inférieur (évaluée à environ 35%) au volume totale de l'étang.

4.1.2. Variation des niveaux d'eau

L'analyse des niveaux d'eau mesurés dans la lagune montre une relation directe avec les niveaux d'eau observés en mer. Entre décembre et juillet, les niveaux en mer sont plus bas que ceux mesurés entre juillet et novembre, forcés par des effets barométriques à l'échelle de la caraïbe et par la circulation régionale (Torres et al., 2012). On observe ainsi à l'échelle saisonnière des écarts sur les niveaux d'eau dont l'amplitude atteint 0.10 m et qui se répercute directement avec la même intensité sur le niveau d'eau de la lagune.

Les marées observées dans l'étang sont déterminées par les marées de l'océan côtier et donnent lieu à une dynamique d'écoulement non linéaire au sein du canal sud-est. Ainsi, ce canal d'entrée sert de filtre dynamique qui alterne les courants ainsi que les fluctuations du niveau d'eau dans la lagune. L'amplitude de marée ($\sim 0.07\text{ m}$) est nettement inférieure à celle observée en mer ($\sim 0.60\text{ m}$) avec un déphasage important ($\sim 4.5\text{ h}$). D'après les observations réalisées, le canal situé au sud-est joue un rôle primordial pour assurer les échanges entre la lagune et la mer. Une partie des échanges entre la mer et la lagune (estimé à $\sim 20\%$) pourrait être également assurée par d'autres secteurs (e.g. canal secondaire au nord-ouest de façon épisodique, circulation souterraine au travers du cordon dunaire).

Les résultats obtenus montrent une asymétrie de marée importante avec en moyenne une durée du jusant supérieure à celle du flot, en particulier pendant la période située entre juin et octobre, lorsque le niveau de l'étang est plus haut que pendant le reste de l'année. Au cours de cette période, la lagune passe alors plus de temps à se vider (jusan) qu'à se remplir (flot) suggérant en moyenne des courants plus forts à marée montante (mer vers étang) et favorisant alors en théorie un flux net de sédiments dirigé vers la lagune et une tendance à l'accrétion.

Néanmoins au cours de la même période, plusieurs événements de forte pluie agissent ponctuellement sur le niveau d'eau au sein de la lagune. Au cours d'un tel événement, le niveau d'eau de l'étang augmente instantanément sous l'influence de la pluie directe mais aussi les jours suivants par des apports issus du bassin versant. Quelques jours plus tard ($\sim 5\text{ jours}$), le niveau

d'eau dans la lagune redescend puis se stabilise pour retrouver une position dite d'équilibre avec le niveau de la mer. Au cours de ces épisodes de fortes pluies, nos observations montrent que l'expulsion de matière sédimentaire en dehors de la lagune peut être importante (particulièrement au niveau de l'embouchure du canal sud-est) suggérant alors des courants de jusants intenses et un transport sédimentaire dirigé vers la mer. Ainsi, le rôle joué par le bassin versant sur le transport des particules, notamment en période de forte pluie paraît fondamental, favorisant l'expulsion de matériaux vers la mer et compensant alors leurs accumulations dans la lagune et son comblement.

4.1.3. Température et salinité

La température au sein de la lagune (variations comprises entre 22 et 36 °C) est largement influencée par l'élévation du soleil qui détermine l'alternance entre le jour et la nuit, la température de l'air et le réchauffement de la colonne d'eau. Le taux de salinité (variations comprises entre 10 et 40 PSU) est contrôlé par la circulation tidale (oscillations journalières de 5 PSU) qui permet l'intrusion d'eau salée en provenance de la mer contrastant avec les apports d'eau douce (notamment en période de forte pluie).

4.1.4. Evolution historique et morphologie actuelle

D'après les résultats obtenus, on observe une augmentation rapide de la largeur de berge entre 1992 et 2006, conduisant notamment au comblement des vasières et provoquant une réduction importante de la surface en eau de la lagune (estimée à ~ 84 000 m²). La mise en place d'une retenue collinaire au nord-est de la lagune constitue sans conteste une ressource mobilisable non négligeable et un obstacle à l'écoulement naturel des eaux de ruissellement. La présence de cette retenue collinaire et la mobilisation de la ressource en eau du bassin versant a pu entraîner une perturbation dans l'équilibre entre les apports terrestres (eau douce, sédiments) et maritimes (marées, vagues), provoquant la réduction de la surface en eau de la lagune.

Ainsi, les apports du bassin versant semblent jouer un rôle important et conditionnent l'équilibre morphologique de la lagune. Le phénomène de comblement décrit il y a quelques années (EGIS, 2017) n'est donc pas directement relié à une mauvaise communication entre la mer et la lagune mais peut être expliqué par une réduction des apports en eau douce. Depuis quelques années (entre 2006 et 2017), il semblerait que la morphologie de l'étang ait retrouvée un équilibre réalisé au détriment de certaines portions de la lagune (e.g. fermeture du canal situé au nord-ouest, zone de mangrove).

Aujourd'hui, la lagune des Salines reste un environnement peu profond où 60 % de l'étang est caractérisé par des hauteurs d'eau inférieures à 0.30 m. Le volume total de la surface en eau a été estimé à environ 175 000 m³ (hors canaux). Sur le rivage, les berges de l'étang sont caractérisées par de très faible pente où les variations du niveau d'eau jouent un rôle majeur sur l'inondation ou la mise à sec de certaines portions de la lagune. Ainsi, lorsque le niveau d'eau au sein de l'étang est bas (entre décembre et juillet), certains secteurs de la lagune sont mis à sec. A noter que l'épaisseur de vase non indurée reste conséquente, supérieure en moyenne à l'épaisseur de la colonne d'eau. Ces dépôts sédimentaires présents dans la lagune (en particulier sur le secteur nord-ouest) proviendraient en majorité de la sédimentation verticale et des apports terrigènes issus du bassin versant.

4.2. RECOMMANDATIONS

4.2.1. Gestion et aménagement de la lagune

La gestion des surfaces exondables

La réduction de la surface en eau de la lagune ou phénomène d'envasement ne semble pas se poursuivre mais certaines portions peuvent se trouver à sec (majoritairement entre décembre et juillet) en raison de leurs faibles profondeurs et des niveaux d'eau en mer relativement bas. Ainsi, il paraît aujourd'hui nécessaire de mieux évaluer les impacts écologiques et environnementaux associés (e.g. mangrove sur la portion nord-ouest).

Si les habitats présents sur ces surfaces exondables présentent véritablement une difficulté écologique majeure reliée au manque d'eau alors le curage régulier du canal nord-ouest pourrait être discuté (en assurant notamment la continuité des écoulements depuis l'embouchure sur le secteur nord-ouest à Anse Meunier jusqu'à l'étang en alimentant les zones de mangroves à proximité). Néanmoins, une attention particulière doit être portée sur l'aménagement des canaux qui constituent (quasiment) le seul lien entre la mer et la lagune (cf. ci-dessous).

L'entretien des canaux

La communication entre la lagune et la mer fonctionne aujourd'hui avec un certain équilibre même si l'on note une asymétrie de marée avec une dominance des courants de flot. La présence d'un delta¹⁵ de flot n'a toutefois pas été mis en évidence par les relevés bathymétriques. Ainsi, les dépôts sédimentaires présents dans la lagune (en particulier sur le secteur nord-ouest) proviendraient en majorité de la sédimentation verticale et des apports terrigènes issus du bassin versant.

Si le curage des canaux pourrait permettre de rééquilibrer la propagation de l'onde de marée dans la lagune en diminuant les effets de friction, l'augmentation du débit oscillant résultant, pourrait favoriser la formation d'un delta de flot plus conséquent et l'accumulation sédimentaire au sein de la lagune.

Aussi, une intervention significative sur la géométrie des canaux influencera la propagation de l'onde marée et une modification de son amplitude au sein de la lagune. Avec une amplitude de marée plus importante, le niveau d'eau à marée haute pourrait devenir bien supérieure à celui mesuré aujourd'hui entraînant inévitablement l'inondation des berges. A marée basse, le niveau d'eau deviendra bien inférieur à celui mesuré aujourd'hui entraînant inévitablement une augmentation des surfaces exondables. Au contraire, une réduction de l'amplitude de marée au sein de la lagune influencera significativement les niveaux d'eau, le taux de salinité, la circulation actuelle et à terme sa morphologie.

Réaménagement de l'embouchure (canal sud-est)

Les évolutions observées au cours de ces dernières décennies montrent que l'embouchure de l'étang (extrémité du canal sud-est) est dynamique avec une forte tendance à l'élargissement. L'évolution de l'embouchure est un phénomène naturel, permettant naturellement l'expulsion de matière sédimentaire en dehors de la lagune.

¹⁵ Un delta correspond à l'embouchure d'un cours d'eau où les alluvions fluviales s'accumulent au lieu d'être redistribuées

Aussi, l'implémentation de tout ouvrage contraignant l'évolution naturelle de l'embouchure ou modifiant les flux entrants ou sortants n'est pas préconisée. Si la situation géomorphologique actuelle de l'embouchure engendre des problèmes de franchissement et de sécurité pour les usagers (roches glissantes et en partie immergée à marée haute), les nouvelles installations ne doivent pas provoquer de modification de la dynamique actuelle ou le blocage du transport sédimentaire.

Le nouvel ouvrage de franchissement pourrait être déplacé vers des secteurs qui montrent peu d'évolution sur les dernières décennies (e.g. zone de substrats durs) et doit rester au maximum transparent pour les débits entrants ou sortants de la lagune et vis à vis de la dynamique sédimentaire. La suppression des enrochements existants pourrait être également envisagée.

La gestion du bassin versant

Afin de limiter l'impact des aménagements anthropiques sur le cycle naturel de l'eau, des actions de gestion pourraient être envisagées avec notamment un réaménagement des différentes retenues d'eau en amont du bassin. Il faut néanmoins agir avec précaution pour que ces travaux, sur certaines retenues aujourd'hui encombrées, ne favorisent pas l'expulsion de matière sédimentaire et une sédimentation verticale accrue au sein de la lagune.

Aussi, la possibilité d'un entretien ou d'une action spécifique de la retenue collinaire située au nord-est de l'étang pourrait être examinée. Cette retenue constitue un obstacle à l'écoulement naturel des eaux de ruissellement mais peut également être perçue comme un dispositif de piégeage des atterrissements liés aux activités anthropiques. Le taux de sédimentation et de colonisation par les végétaux (plantes flottantes et végétation rivulaire) du fait du manque d'entretien est très préoccupant depuis plusieurs années (SAFER, 2016).

4.2.2. Poursuivre le suivi de la lagune

Vers une évaluation qualitative en continu

L'élaboration d'un carnet de bord des évolutions observées pourrait être planifié sur ce site. Ce type de suivi est facile à mettre en place, peu coûteux, et réalisable par les agents de terrain locaux. Ce suivi permettrait de disposer d'une solide base de données sur l'évolution de certains secteurs de l'étang (embouchure, canaux, épaisseur de vase en certains points, surfaces temporairement exondées).

Ces informations, qui sont faciles à renseigner en temps réel, sont généralement inexistantes et difficiles à récupérer à posteriori, mais sont primordiales pour une gestion adaptée. Ainsi, un carnet de bord des évolutions observées qui serait constitué de 'fiche type' à remplir par événement marquant pourrait être élaboré. Ces fiches devront renseigner le type d'évènement, la date, les conditions météo-marines observées, les remarques de l'observateur accompagnées des prises de vues photographiques pour illustrer le phénomène décrit.

Mesure de l'évolution des niveaux d'eau

L'étang des Salines est dynamique et il est essentiel de comprendre et de suivre son évolution au cours du temps. Aussi, le maintien du suivi hydrodynamique de l'étang des Salines devrait être réfléchi et comprendrait : 1) le maintien des deux stations actuelles, 2) l'installation d'un à deux sites complémentaires dans l'étang et 3) la mise en place d'un dispositif de suivi automatique de la courantologie. Ces mesures permettent d'obtenir les variations de hauteur d'eau, de température, du taux salinité dans l'étang et constituent un bon indicateur pour un suivi de l'évolution de la connectivité de la lagune avec la mer.

La mise en place d'un système d'alerte se basant sur une valeur seuil minimale de niveau d'eau pourrait permettre d'informer les autorités en charge de la gestion de l'étang.

Evolution morphologique

Les évolutions morphologiques d'une lagune font intervenir un grand nombre de processus physiques agissant sur le moyen et le long terme. Ainsi, la poursuite du suivi de l'évolution morphologique de l'étang à partir d'images satellites, de photos aériennes et d'orthophotographies devrait être envisagée en assurant la disponibilité à minima d'une image de bonne qualité (e.g. résolution horizontale inférieure à 3 m, couverture nuageuse faible) par an.

Afin de compléter les informations obtenues à partir des images aériennes, la poursuite de l'acquisition de données topo-bathymétriques et de l'épaisseur de vase reste essentielle afin de produire un plan réactualisé de l'étang et une meilleure évaluation de la dynamique sédimentaire associée. Ces données pourraient être réactualisées tous les trois à cinq ans selon les évolutions observées sur le terrain.

4.2.3. Modélisation des processus hydro-sédimentaires

Si les observations sont essentielles et restent un point clef à tout début d'investigation, l'amélioration de la compréhension des processus hydro-sédimentaires contrôlant l'évolution des systèmes lagunaires doit également associer la modélisation numérique, notamment afin de permettre l'identification des processus moteurs ou l'anticipation des mouvements sédimentaires. La compréhension et la modélisation de la dynamique de ces milieux représentent encore un véritable défi scientifique. Le diagnostic des processus résultant et le calcul de grandeurs caractéristiques telles que les flux résiduels, le prisme de marée, le temps de renouvellement ou l'âge des masses d'eau sont autant de variables caractéristiques essentielles à une meilleure compréhension de ces milieux.

Aussi, la mise en place d'un modèle hydrodynamique à surface libre, résolvant les équations classiques de la mécanique des fluides (Navier-Stokes) sous les hypothèses de Boussinesq et d'hydrostaticité pourrait permettre une meilleure caractérisation de l'hydrodynamique et une évaluation approfondie de la circulation au sein de la lagune, instantanées et résiduelles, les temps de renouvellement des masses d'eaux, l'influence des rivières.

5. Conclusion

Les observations et les analyses réalisées au cours de cette étude permettent d'améliorer la connaissance du fonctionnement hydro-sédimentaire de la lagune des Salines et de mieux comprendre son évolution historique au cours de ces dernières années.

Parmi les principaux résultats obtenus, il est apparu que la réduction de la surface en eau de la lagune ou « phénomène d'envasement » ne semble pas se poursuivre et serait relié à l'évolution de l'aménagement du bassin versant au cours de ces dernières décennies. Néanmoins, certaines portions de l'étang présentent de façon saisonnière (généralement entre décembre et juillet) un phénomène d'exondation en raison de leurs faibles profondeurs et des niveaux d'eau en mer relativement bas pendant cette période. Ainsi, il devient nécessaire de mieux évaluer les impacts écologiques et environnementaux des différents habitats qui leurs sont associées (e.g. mangrove sur la portion nord-ouest).

La communication entre la lagune et la mer fonctionne aujourd'hui avec un certain équilibre. Un réaménagement conséquent des canaux perturberait la propagation de l'onde marée et entrainerait une modification de son amplitude et des courants associés avec des effets sur la dynamique sédimentaire.

Les évolutions observées au cours de ces dernières décennies montrent que l'embouchure principale de la lagune est dynamique avec une forte tendance à l'ouverture, permettant naturellement l'expulsion de matière sédimentaire en dehors du système. Néanmoins, la situation géomorphologique actuelle de l'embouchure engendre des problèmes de franchissement et de sécurité pour les usagers. La relocalisation de la passerelle de l'Anse à Prunes doit alors être planifiée en évitant toute perturbation de la dynamique des écoulements dans le secteur de l'embouchure.

Afin de favoriser un transport sédimentaire en dehors de la lagune, des actions de gestion peuvent être mises en place avec notamment un réaménagement des différentes retenues d'eau en amont du bassin versant. Il faut néanmoins agir avec discernement pour que ces travaux ne favorisent pas l'intrusion de matières sédimentaires et une sédimentation verticale accrue au sein de la lagune.

Enfin, l'étang des Salines est dynamique et il est essentiel de comprendre et de suivre son évolution au cours du temps. Aussi, la poursuite du suivi hydrodynamique et morphologique de la lagune doit être envisagée. Si les observations sont essentielles et restent un point clef à tout début d'investigation, l'amélioration de la compréhension des processus hydro-sédimentaires contrôlant l'évolution des systèmes lagunaires doit également associer la modélisation numérique, notamment afin de permettre l'identification des processus moteurs et l'anticipation des mouvements sédimentaires.

Références

- Aubrey, D. G., & Speer, P. E. (1985). A study of non-linear tidal propagation in shallow inlet/estuarine systems Part I. *Observations. Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 21(2), 185-205. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0272771485900964>
- Battistini, R., & Hirschberger, F. (1989). *Le Pléistocène moyen marin et dunaire de la péninsule de Sainte-Anne (Sud de la Martinique) : sa signification volcano-isostasique*, *Bulletin du centre de géomorphologie de Caen*, n°36, p. 259-262.
- Bonnissent, D. (2011). Sainte-Anne – Grande Anse des Salines. Opération préventive de diagnostic. *ADLFI. Archéologie de La France - Informations Une Revue Gallia, Espace Car.*
- Deneufbourg, G. (1970). *Etude géologique du site de la Marina des Salines à Sainte Anne – rapport BRGM n°70 ANT. 27.*
- Duncombe. (2008). *Fiche descriptive sur les zones humides Ramsar (FDR) – version 2006-2008 - Catégories approuvées dans la Recommandation 4.7(1990) modifiée par la Résolution VIII.13 de la 8e Session de la Conférence des Parties contractantes (2002) et par les Résolutions .*
- EGIS. (2017). *Diagnostics et plans de gestion simples de zone humides du Conservatoire du littoral en Outre-Mer Lot 2 / Martinique « Étang des Salines » Rapport APD.*
- Fry, V., Estuarine, D. A.-, Science, C. and S., & 1990, undefined. (1981). Tidal velocity asymmetries and bedload transport in shallow embayments. *Elsevier*. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0272771490900672>
- Grinsted, A. (2020). *Tidal fitting toolbox (https://www.mathworks.com), MATLAB Central File Exchange. Retrieved August 10, 2020.*
- Jewell, S. A., Walker, D. J., & Fortunato, A. B. (2012). Tidal asymmetry in a coastal lagoon subject to a mixed tidal regime. *Geomorphology*, 138(1), 171–180. <https://doi.org/10.1016/J.GEOMORPH.2011.08.032>
- Kjerfve, B. (1986). COMPARATIVE OCEANOGRAPHY OF COASTAL LAGOONS. *Estuarine Variability*, 63–81. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-761890-6.50009-5>
- Lankford, R. R. (1976). *Man's use of coastal lagoon resources. Joint Oceanographic Assembly; Edinburgh,(UK). Book of Abstracts of papers presented at Joint Oceanographic Assembly, Edinburgh.*
- MILLET, B. (1986). *Hydrologie et hydrochimie d'un milieu lagunaire tropical: le lac Togo. , Paris : ORSTOM.*
- Paris, R., Sabatier, P., Biguenet, M., Bougouin, A., André, G., & Roger, J. (2021). A tsunami deposit at Anse Meunier, Martinique Island: Evidence of the 1755 CE Lisbon tsunami and implication for hazard assessment. *Marine Geology*. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.margeo.2021.106561>
- Phleger. (1969). *Some general features of coastal lagoons. A Ayala-Castaneres (Ed.), Lagunas*

Costeras, Univ. Nac. Autonomus de México. 5–26.

PRNM. (1976). *Julius C., Pons J.C., La Savane des pétrifications de la Martinique.*

REGUIEG. (1986). *L'évapotranspiration et bilan hydrique en Martinique. Document Météo-France.*

SAFER. (2016). *Etude Agricole Salines Dillon.*

Speer, P. E., & Aubrey, D. G. (1985). A study of non-linear tidal propagation in shallow inlet/estuarine systems Part II: Theory. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, *21*(2), 207-224. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0272771485900976>

SUB-C MARINE. (2022). *Etang des Salines - Levé topographique et bathymétrique.*

Torres, R., Research, M. T.-J. of G., & 2012, undefined. (2012). Seasonal sea level cycle in the Caribbean Sea. *Wiley Online Library*, *117*(7), 7011. <https://doi.org/10.1029/2012JC008159>

Westercamp, D., Andreieff, P., Bouysse, P., Cottez, S., & Battistini, R. (1989). *Notice Explicative de la Carte Géologique à 1: 50 000ème de la Martinique. BRGM: Orleans, France.*



Direction régionale Martinique
Villa Bel Azur,
4 Lotissement Miramar
Route Pointe des Nègres
97200 Fort-de-France
Martinique
Tél. : 05 96 71 17 70
www.brgm.fr