



HAL
open science

Compte-rendu d'exécution final du projet FEDER “ RENOVRISK TRANSFERT ”

Pascale Cuet, Florian Jouvenot, Elsa Lagoutte, Pascal Mouquet, Gwenaëlle Pennober, Christophe Révillion, Marieke Schultz, J.-P. Cammas

► To cite this version:

Pascale Cuet, Florian Jouvenot, Elsa Lagoutte, Pascal Mouquet, Gwenaëlle Pennober, et al.. Compte-rendu d'exécution final du projet FEDER “ RENOVRISK TRANSFERT ”. Observatoire des sciences de l'univers de La Réunion (OSU-R). 2023. hal-04586178v1

HAL Id: hal-04586178

<https://hal.science/hal-04586178v1>

Submitted on 27 May 2024 (v1), last revised 28 May 2024 (v2)

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Distributed under a Creative Commons Attribution - NonCommercial - ShareAlike 4.0 International License



PO FEDER 2014-2020

Projet de Recherche : ReNovRisk-Transferts

Recherche intégrée et innovante sur les risques naturels

Aléas cycloniques sur la zone atelier « Massif du Maïdo – Littoral – Lagon »

Fiche Action 1.04 :

« Améliorer les compétences au service de l'économie de la connaissance »

N° Convention : GURDTI/20191772-001881

N° Synergie : RE0001881

ACTION 3 : Aléas littoraux



Projet RenovRisk - TRANSFERTS

Recherche intégrée et Innovante sur les risques naturels

Point de situation	Compte-rendu d'exécution final du projet FEDER « RENOVRISK TRANSFERT » Octobre 2023
Projet	<i>Programme opérationnel FEDER 2014-2020.</i> <u>Convention</u> N° : GURDTI/20191772-001881 <u>Opération</u> : RENOVRISK TRANSFERT N° Synergie : RE0001881
Fiche action	1.04 : « Améliorer les compétences au service de l'économie de la connaissance »
Porteur du Projet	CAMMAS Jean Pierre
Laboratoire	Observatoire des sciences de l'univers de la Réunion (OSU-R)
Liste des auteurs (par ordre alphabétique)	CUET Pascale , UMR Entropie / Université de La Réunion JOUVENOT Florian , UMR Espace-Dev / Université de La Réunion LAGOUTTE Elsa , UMR Entropie / Université de La Réunion MOUQUET Pascal , UMR Espace-Dev / IRD PENNOBER Gwenaëlle , UMR Espace-Dev / Université de La Réunion REVILLION Christophe , UMR Espace-Dev / Université de La Réunion SCHULTZ Marieke , UMR Espace-Dev / Université de La Réunion CAMMAS Jean-Pierre , Observatoire des sciences de l'univers de la Réunion (OSU-R)
Proposition de citation	Cuet, P., Jovenot, F., Lagoutte, E., Mouquet, P., Pennober, G., Revillion, C., Schultz, M., Cammas, J.P., 2023. Compte-rendu d'exécution final du projet FEDER « RENOVRISK TRANSFERT », ACTION 3 : Aléas littoraux. 77p.

L3.2.1-B : Cartographie des panaches de turbidité (turbidité de surface) à partir des données de SEAS-OI programmation d'images encadrant les cyclones (ESPACE-DEV)

ACTION 3 : Aléas Littoraux

O3.2 Les littoraux ouverts : étude des flux et mouvements sédimentaires de grande ampleur

O3.2.1 Apports solide événementiels et turbidité de surface

1. Contexte et objectifs

L'objectif de cette action est de qualifier et quantifier les apports solides événementiels dans le milieu marin au droit des estuaires. Ce travail permettra par ailleurs d'initier la calibration d'un indicateur de suivi des apports solides par approche satellite.

2. Matériel et méthode

L'étude qui a été réalisée : la caractérisation des panaches de turbidités associées à l'estuaire de la rivière des galets par imagerie optique haute résolution (Sentinel 2) et SPOT5 sur les données historiques. A l'aide d'un spectroradiomètre de terrain les données de réflectance seront calibrées. L'objectif est de finaliser la chaîne de traitement initiée dans le cadre du programme CHARC pour produire une information quantitative sur la turbidité de surface associée aux estuaires. Dans cette perspective en l'absence de ligne financière dédiée dans la dernière mouture du projet (i) du matériel de terrain a été construit à partir de matériaux de récupération (disque de secchi) (ii) Des données satellitaires Sentinel 2 gratuites ont été traitées à partir de chaînes de traitement développées dans RENOVRISK-Impact (volet IRD) (iii) Une campagne d'acquisition de données de calibration (échantillons d'eau, mesures radiométriques au spectromètre, disque de secchi) ont été acquises sur le terrain. Ces acquisitions se sont déroulées le 22 mars, à l'occasion d'une campagne d'acquisition de données Entropie pour le projet RENOVRISK-Transfert. Les analyses d'eau ont été réalisées par le GIE Marex gratuitement.

Le Tableau de synthèse ci-dessous regroupe les différentes mesures effectuées et leur contexte d'acquisition.

Tableau n°1 : indicateurs et mesures sur le terrain et contexte d'acquisition

WPT	003	004	005	006	007	008
Loc	ETSA (bouée)	ETSA (large)	ETSA (turb)	SALE (bouée)	GRRR	PAER
Heure	10h01	10h49	10h56	11h38	12h32	12h55
Spectro	1-10	11-25	26-42	43-60	61-71	72-88
Turbidité JB (NTU)	0,16	0,19	1,24	0,23	0,17	0,13
Prof (m)	9	40	6	9	100	37
Secchi (m)	-	-	-	-	37+	-

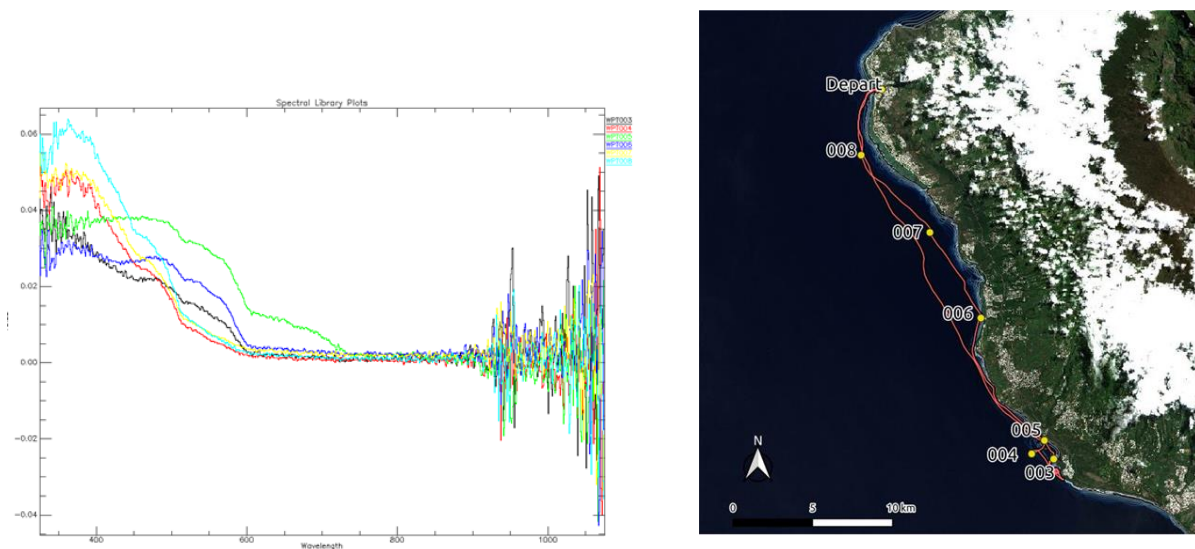


Figure 1 : Campagne d'échantillonnage Ouest (spectres et plan d'échantillonnage)

a. Spectres des points de vérité terrain : Après filtrage des mesures aberrantes (mauvaise visée, effets de surface, etc.), spectres de réflectance moyens des différents points sont compilés à des fins d'analyse. **b. Plan d'échantillonnage sortie de terrain du 22/03/2021 :** Le trajet en mer effectué le 22/03/21 entre 10h et 13h part du port de St-Gilles jusqu'au point de prélèvement de l'UMR Entropie à l'Etang Salé. Six points de mesures radiométriques ont été réalisés, répartis de l'Etang Salé à la Passe de l'Hermitage. Fond de carte : image S2 du même jour, acquise à 10h35min11s. Pas de nuages en mer, peu de houle / vent = conditions d'acquisition quasi-idéales.

Choix des Indices de turbidité : Dans la continuité des travaux entrepris dans le programme Charc ou un produit turbidité côtière qualitatif non calibré avait été produit nous avons repris

une revue bibliographique rapide pour l'estimation de la turbidité par le calcul d'indices sur les données radiométrie terrain et image montre que trois indices qui exploitent les bandes spectrales verte et rouge. En début de spectre, dans l'UV et le bleu, le signal étant peu absorbé, la contribution du fond sous-jacent est souvent sensible. En fin de spectre, dans l'IR, le signal est trop fortement absorbé et ne pénètre pas assez dans la masse d'eau pour fournir des informations sur la turbidité. Dans ce contexte 3 indices sont retenus :

- NDTI (Lacaux et al. 2007) :

$$NDTI = \frac{R - G}{R + G}$$

Propositions de pondérations, permettant un meilleur filtrage des effets de surface (d'après analyse des données images) :

- RWNDTI (Red Weighted NDTI, Mouquet 2021) :

$$RWNDTI = R(1 + NDTI)$$

- GWNDTI (Green Weighted NDTI, Mouquet 2021) :

$$GWNDTI = G(1 + NDTI)$$

3. Résultats

Les résultats sont de 2 ordres : (i) l'analyse de la corrélation entre les mesures de turbidité en laboratoire et les Spectres de terrain, et (ii) l'analyse de la corrélation entre spectres de terrain et indices moyennés sur les images.

Analyse de la corrélation entre les mesures de turbidité en laboratoire et les Spectres de terrain

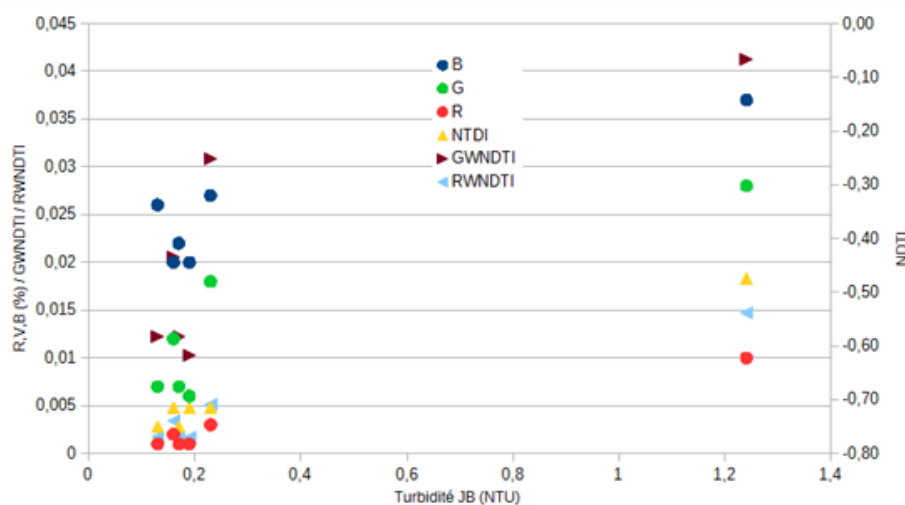


Figure n°2 : Corrélation entre les mesures de turbidité en laboratoire et les Spectres de terrain

Sur le graphique ci-dessus, lien entre turbidité mesurée sur le terrain et valeurs de réflectance brutes et des indices sur les mesures spectro : (i) Les valeurs de réflectance dans le B, V, R et des indices de turbidité sont plus faibles pour le groupe des points de faible turbidité que pour le point de forte turbidité terrain. (ii) Il manque beaucoup de valeurs de turbidité intermédiaires pour faire sortir une tendance nette. (iii) Pour le groupe des faibles turbidités près de l'origine, on voit que les valeurs des bandes bleue, verte et le GWNDTI sont les plus dispersées sur l'axe y, à mettre sans doute en lien avec le substrat sous-jacent qui perturbe le signal, bien sensible dans ces longueurs d'ondes pour les points de faible bathymétrie. (iv) La bande R et les indices NDTI et RWNDTI semblent plus intéressants, car les points avec une turbidité faible sont plus groupés : pas d'influence du fond même pour les points de faible bathymétrie.

Spectres de terrain / valeurs image (valeurs réflectance brutes) : Les courbes ci-dessous nous montrent une bonne corrélation entre valeurs de réflectance mesurées sur le terrain (avec le spectroradiomètre) et les mesures images (après corrections atmosphériques sous Sen2Cor (Renovrisk-Impact), et application d'un filtre médian 3x3 permettant de supprimer localement (à l'échelle du pixel) de forts artéfacts liés aux effets de surface), au niveau des 6 points de mesure.

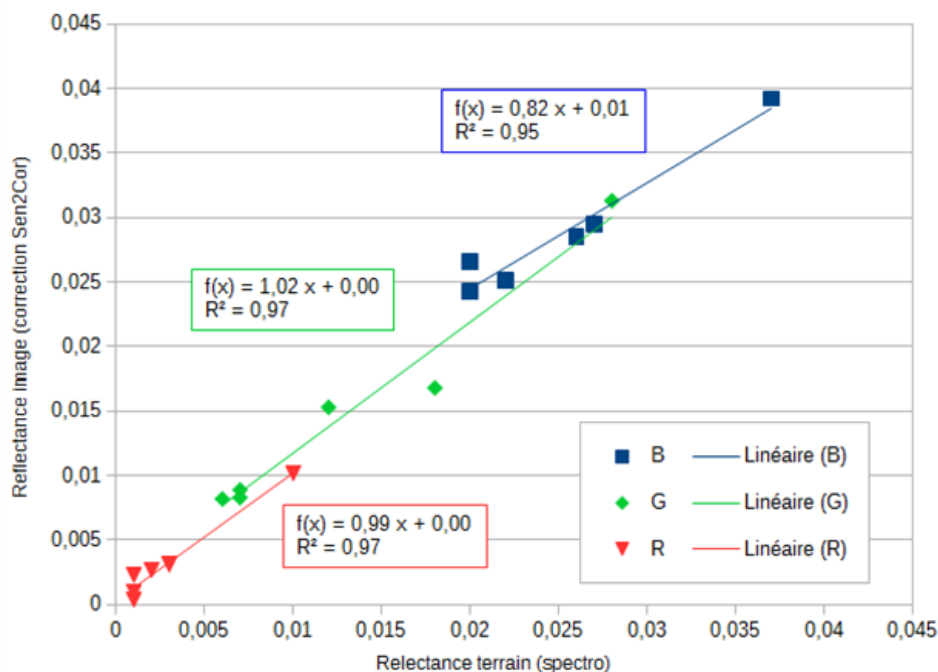


Figure 3 : corrélation entre réflectance de terrain et réflectance sur les images corrigées des effets atmosphériques (TOC : top of canope)

Spectre terrain / valeurs image (valeurs indices moyennées) : Même si on manque de données, comme pour les valeurs de réflectance brutes, les indices de turbidité montrent une bonne corrélation entre la radiométrie terrain et l'image. L'analyse des images nous montre que les effets de surface, non complètement corrigés sur les images perturbent encore le signal, et qu'une moyenne supplémentaire 9x9 (= sur une zone de 90m de côté) permet d'augmenter la corrélation.

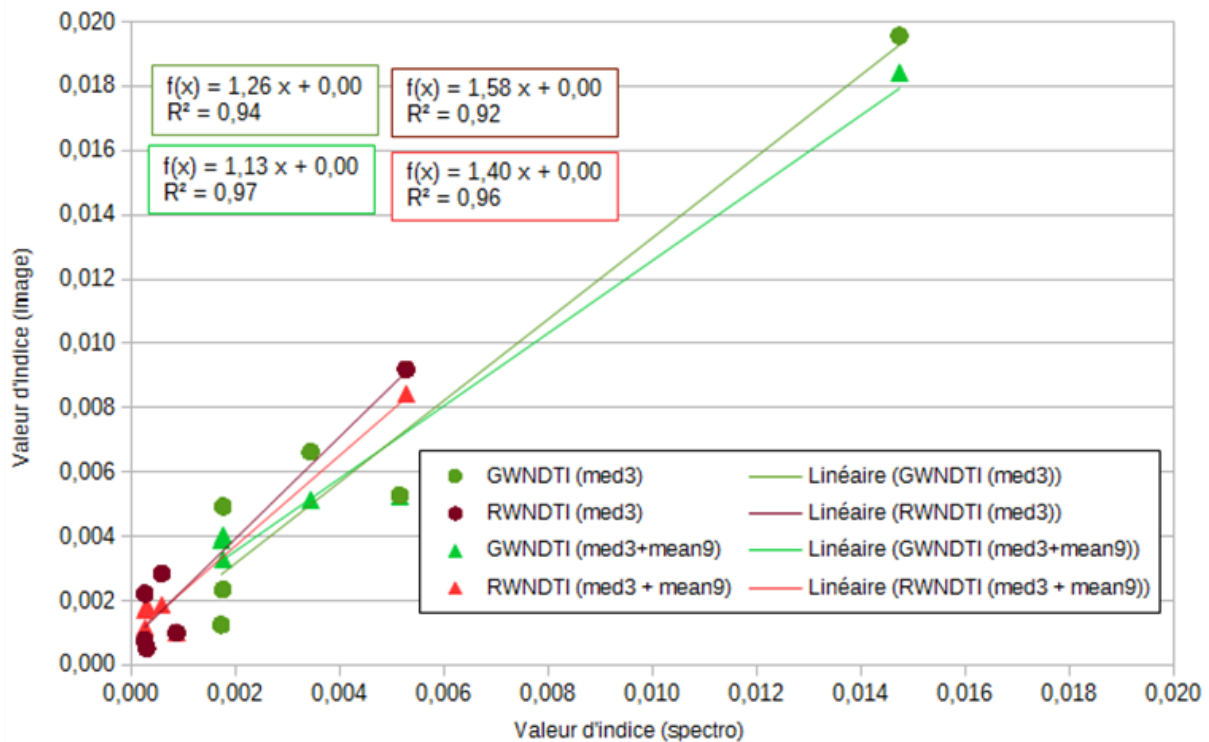


Figure n° 4 : Corrélation entre spectres de terrain et indices moyennés sur les images

2 Etudes de cas

Application à l'Etang-Salé : Représentation graphique des indices, calculés sur l'image S2 du 22/03/2021. La turbidité était très faible sur toute notre zone d'étude le jour d'acquisition. Difficile de mettre en évidence les variations spatiales, à part autour du point 005 de l'Etang-Salé. Les trois indices (NDTI, RWNDTI, et GWNDTI), calculés sur l'image med3, moyennés sur 90m med9, font bien ressortir la zone turbide autour du point 005.

- Le *NDTI* est celui qui est le plus bruité spatialement, avec des valeurs localement fortes dans des zones probablement peu turbides. En lien probablement avec des effets de surface.
- Le *RWNDTI* semble en partie corriger ces artéfacts.
- Le *GWNDTI* semble encore meilleur que le *RWNDTI* pour filtrer ce bruit. Attention cependant dans les petits fonds où le canal vert est encore perturbé par le signal du fond (visible à proximité du point 003).

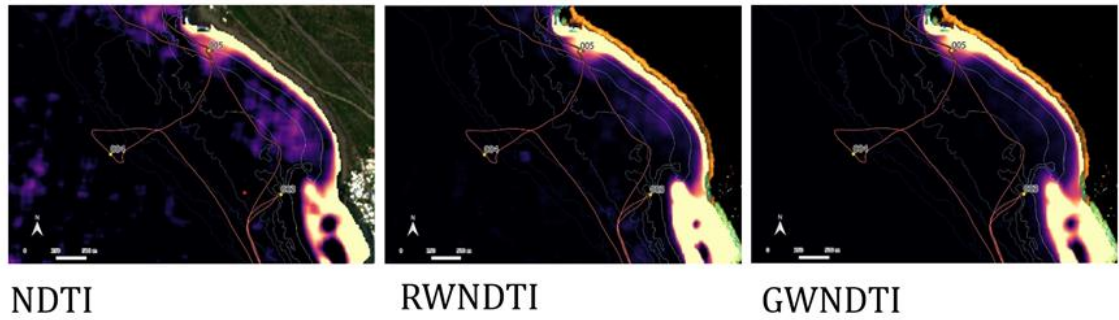


Figure 5 : indices de turbidités calculés sur l'Etang Salé

Application à l'Est de La Réunion

Dans l'Est de l'île, un panache de turbidité est nettement visible sur les images brutes (L2A) au niveau de l'embouchure de la rivière de l'Est. La zone turbide remonte vers le nord en longeant la côte, jusqu'au au-delà de Saint-André / Sainte-Suzanne à +30 km de distance, sur une bande s'étendant sur une largeur supérieure à 5 km vers le large. (Figure X).



Figure n°6 : Composition colorée de l'image Sentinel-2 du 22 mars 2021

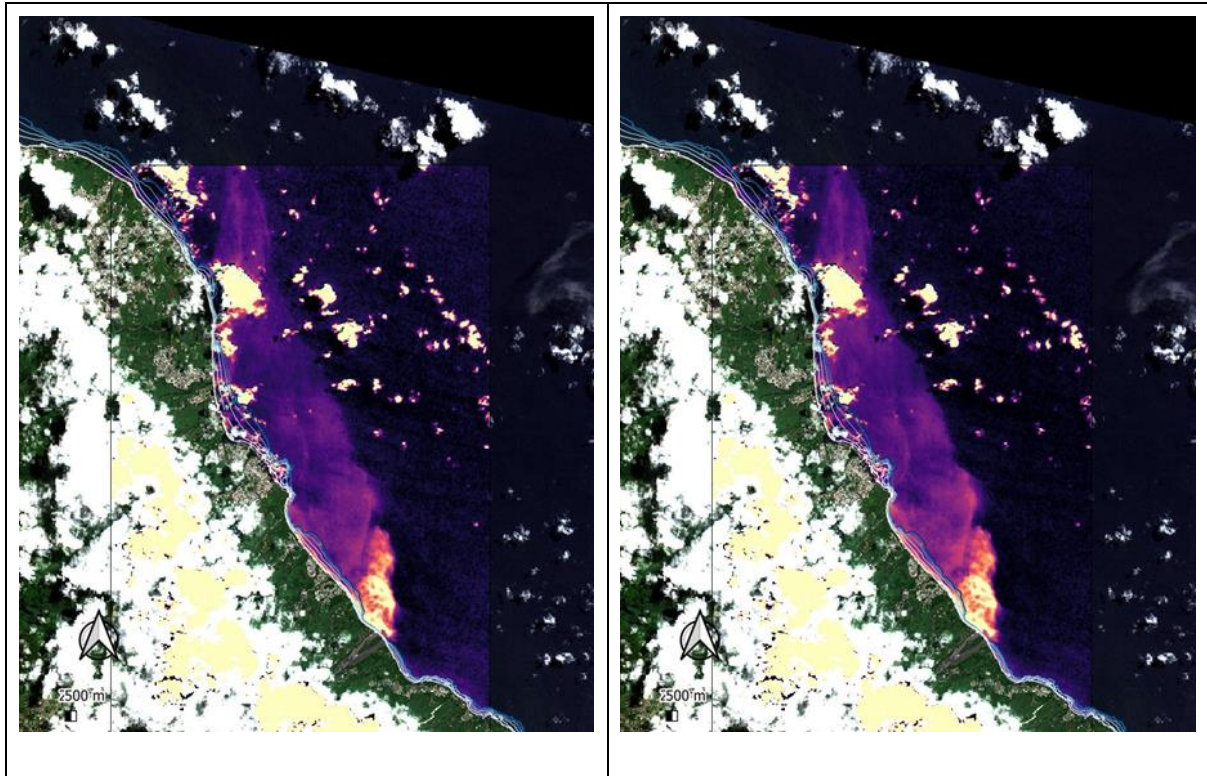


Figure 7 : calcul des indices de turbidité GWNDTI et RWNDTI

4. Conclusion

A ce stade des travaux, la quantification des matières en suspension par imagerie satellitaire montre de très belles perspectives mais ne sont pas encore stabilisées. Il faudrait multiplier les mesures de calibration sur le terrain. De nouvelles campagnes de terrain avec l'association ARBRE financées par Espace-Dev ont été réalisées en Février/mars 2022. La finalisation de l'outil demandera un financement dédié.

L3.3.1 : Cartographie des habitats par analyse hyperspectrale (dominance corallienne, dominance algale, sédiments). Différenciation des substrats sans signature spectrale spécifique (algues molles vs. calcaires) par analyse spatiale. (IUEM, Espace-Dev)

ACTION 3 : Aléas Littoraux

O3.3 Littoraux coralliens : bilan des carbonates et budgets sédimentaires

O3.3.1 Cartographie des habitats par analyse hyperspectrale

1. Contexte et objectifs

Les données de télédétection sont utilisées depuis de nombreuses années dans le monde pour cartographier les habitats marins littoraux. Sur l'île de La Réunion, des images aériennes hyperspectrales couplées à des données bathymétriques Lidar ont permis de développer des méthodes originales de cartographie des récifs coralliens. Les données historiques ont été acquises lors des deux campagnes Litto3D 2009-2010 (Shom / IGN) et Hyscores 2015 (Ifremer / UBO / Office de l'Eau Réunion). Plusieurs projets de recherche menés depuis près de 15 ans (Spectrhabet-OI¹ et Hyscores² notamment) ont permis de cartographier les différents constituants des plateformes récifales (sable, algues, coraux, herbiers)³ et d'estimer leur état de santé⁴, de produire une bathymétrie hyperspectrale dans les petites profondeurs⁵, et de générer des images des fonds marins⁶, images corrigées des effets de la colonne d'eau jusqu'à plus de 30m de profondeur. Ces méthodes et données ont pu être exploitées par les scientifiques et gestionnaires (DEAL, Office de l'Eau Réunion, etc.) pour répondre à des objectifs opérationnels et réglementaires (contribution à la mise en place de la Directive Cadre sur l'Eau à La Réunion notamment).

La finesse des analyses couplée à la très haute résolution de ces données (40cm) permet d'envisager de nombreuses applications et une exploitation plus large dépassant la simple cartographie récifale de fonds. Dans le cadre de ce projet RenovRisk-Transferts, il a été

¹ Fiche projet Spectrhabet-OI sur le site de l'Ifremer océan-Indien : <https://ocean-indien.ifremer.fr/Projets/Teledetection-Imagerie/Spectrhabet-2009-2011-Hyscores-2015-2016/SPECTRHABENT-OI-2009-2011>

² Fiche projet Hyscores sur le site de l'Ifremer océan-Indien : <https://ocean-indien.ifremer.fr/Projets/Teledetection-Imagerie/Spectrhabet-2009-2011-Hyscores-2015-2016/HYSCORES-2015-2016>

³ Nature des fonds : taux de couvertures en sable, algues, corail, herbier et composition colorée (Sable/Algues/Corail/Herbiers) des plateformes récifales réunionnaises en 2015. Ifremer - Délégation Océan Indien. <http://dx.doi.org/10.12770/a9bf52c4-1d31-4a67-944c-c4c6c9e4e0a5>

⁴ Indice surfacique de la Vitalité Corallienne Hyperspectrale (VCH) des zones récifales de la côte ouest de l'île de La Réunion (2015). Ifremer - Délégation Océan Indien. <http://dx.doi.org/10.12770/64687643-51f8-49e4-a75c-479fae0d1586>

⁵ Bathymétrie issue des images hyperspectrales - côte ouest de La Réunion. Ifremer - Délégation Océan Indien. <http://dx.doi.org/10.12770/0d177ff9-d802-4d10-8a00-3a46e0ef0735>

⁶ Images du fond marin corrigées des effets de la colonne d'eau - côte ouest de La Réunion. Ifremer - Délégation Océan Indien. <http://dx.doi.org/10.12770/a96ec3c8-74ff-404e-ae9d-33f2dd4dd1fd>

planifié d'utiliser les résultats du traitement des données hyperspectrales pour aider à l'évaluation d'un bilan des carbonates à l'échelle de la masse d'eau récifale de Saint-Gilles - l'Ermitage.

La plateforme récifale peut être compartimentée en deux classes géomorphologiques distinctes, ayant des rôles et contribuant différemment au bilan des carbonates :

- la **dépression d'arrière récif (DAR)** située le long du trait de côte au-delà de la plage, est la zone la plus profonde de la plateforme avec une bathymétrie comprise entre 50 cm et 2 m, elle est principalement composée de substrat meuble, formé par le sable et les débris coralliens colonisés par des algues gazannantes, et dans laquelle se trouvent des colonies coralliennes éparses,
- le **platier récifal**, qui s'étend au-delà de la DAR jusqu'au front récifal, est principalement composé de substrat dur formé de fragments coralliens morts compactés et de colonies vivantes.

Ces deux compartiments ont été traités de manière différente en fonction de leur composition et leurs rôles dans le bilan des carbonates : sur le platier récifal le principal contributeur est le corail vivant, bio constructeur ayant un rôle très positif dans le bilan, alors que dans la dépression d'arrière récif, ce sont les algues qui jouent un rôle prépondérant, avec une localisation hétérogène et subissant des variations temporelles régulières et rapides.

2. Matériel et méthode

2.1. Localisation de la zone d'étude

La zone d'étude est focalisée sur la plateforme récifale de l'Ermitage, s'étendant sur environ 7 km le long du littoral de la côte ouest de La Réunion, du port de Saint-Gilles au nord à la plage de Trou d'eau au sud. Le récif de type frangeant dans ce secteur est le plus développé des 4 récifs de l'Ouest de l'île, formant une plateforme récifale entre la plage de sable et le front récifal d'environ 400 m de large à son maximum.

2.2. Données utilisées

Acquisition des données in situ

Les données terrain ont été collectées au cours de 10 campagnes d'acquisition menées sur la plateforme récifale de d'Ermitage sur deux périodes climatiques différentes : l'hiver austral 2021 (août-septembre) et l'été austral 2022 (mars-mai). Ces campagnes ont permis d'acquérir 109 points de données en parcourant 26,4 km de transects à la nage par la méthode palmes-masque-tuba (PMT) ([tableau](#), [figure](#)).

Date	Localisation	nb de points / distance (km)	Type données acquises
03/08/2021	Trou d'eau	9 / 3,0	Radiométrie sous-marine Levés MSA habitats (DAR)
10/08/2021	Planch'Alizé	10 / 2,6	Radiométrie sous-marine Levés MSA habitats (DAR)

24/08/2021	Mail de Rodrigues	8 / 2,1	Radiométrie sous-marine Levés MSA habitats (DAR)
16/09/2021	Le Récif	4 / 1,4	Radiométrie sous-marine Levés MSA habitats (DAR)
29/03/2022	Trou d'eau	13 / 4,0	Levés MSA habitats (DAR)
25/04/2022	Passe de l'Ermitage	17 / 4,1	Levés MSA habitats (DAR)
26/04/2022	Planch'Alizé	16 / 2,7	Levés MSA habitats (platier)
27/04/2022	Passe de l'Ermitage (Nord)	16 / 1,6	Levés MSA habitats (platier)
02/05/2022	Planch'Alizé	14 / 2,0	Levés MSA habitats (platier)
04/05/2022	Casino	18 / 2,9	Levés MSA habitats (platier)

Tableau n°1 : Synthèse des levés terrain réalisés entre août 2021 et mai 2022.

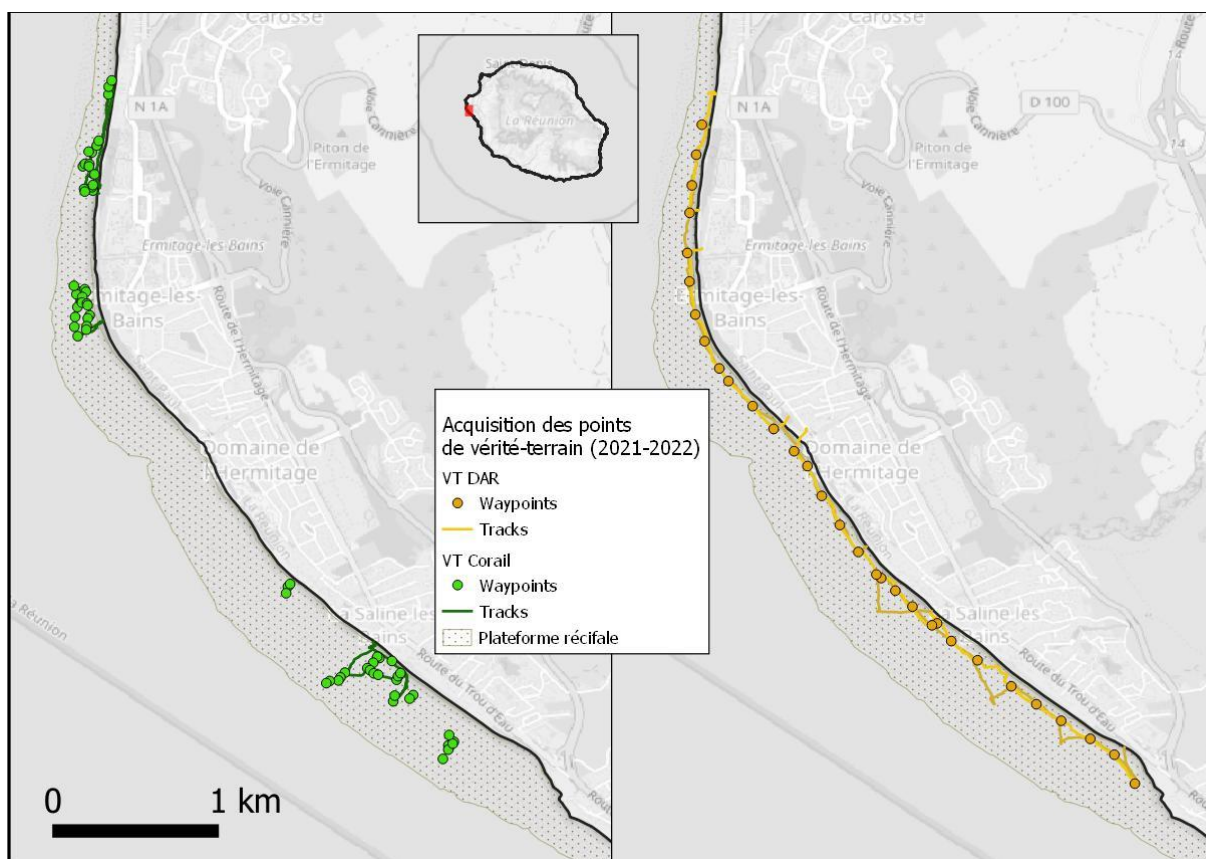


Figure 1 : Localisation des points de validation terrain acquis sur la plateforme récifale de l'Hermitage entre août 2021 et mai 2022

Données de télédétection

Plusieurs types de données de télédétection ont été mobilisées pour ce projet, elles sont synthétisées en détail dans le [tableau ci-dessous](#) :

- des données aériennes hyperspectrales et Lidar historiques, ainsi que les résultats de leur exploitation obtenus par le projet Hyscores (couvertures coralliennes, bathymétrie, découpage de la plateforme récifale en unités spatiales homogènes). Ces données ont été utilisées pour l'estimation des recouvrements coralliens sur les platiers, ainsi que pour les développements algaux dans la DAR (cf. [partie méthodologique ci-après](#)).
- des images satellites Pléiades, historiques (2016) et récentes (2021, 2022) spécialement programmées pour le projet et acquises grâce à la plateforme [Dinamis](#) de Data Terra. Ces données ont pu bénéficier des chaînes de traitement [Kalideos](#) du CNES pour les prétraitements et sont ainsi parfaitement inter-calibrées entre elles (corrections géométriques et radiométriques), permettant de meilleures analyses diachroniques.
- une image Pléiades Neo acquise le 1er juillet 2022 dans le cadre du [Pléiades Neo Challenge](#) organisé par la société Airbus.

Date	Type de donnée (vecteur)	Résolution spatiale (panchromatique)	Bandes spectrales (panchromatique)
Mai 2015	Hyperspectrale (aérien)	40 cm	160
24/06/2016	Pléiades (satellite)	2 m (50 cm)	4 (+1)
26/04/2022	Pléiades (satellite)	2 m (50 cm)	4 (+1)
01/07/2022	Pléiades Néo (satellite)	1,2 m (30 cm)	6 (+1)

Tableau n°2 Imagerie spatiale exploitée pour le projet RenovRisk-Transferts

2.3. Méthodologie

Cartographie des recouvrements coralliens sur les platiers récifaux

La méthode d'analyse a été mise en place dans le cadre d'un stage de Master 2 financé dans le cadre de ce projet RenovRisk-Transferts. Les paragraphes ci-dessous en reprennent les principaux développements, se reporter au mémoire complet pour de plus amples détails⁷.

Les récifs coralliens résultent de la bioconstruction de structures calcaires par calcification (production de carbonates de calcium à partir des ions de calcium Ca^{2+} et l'ion de carbonate CO_3^{2-}). Ces structures calcaires tridimensionnelles et complexes assurent l'équilibre de l'écosystème dont résultent les services de protection de littoral : elles servent de refuge pour

⁷ Marieke Schultz. Evaluation du potentiel de l'imagerie multispectrale satellitaire pour le suivi des récifs coralliens à La Réunion. Sciences de l'environnement. 2022. [\(hal-04158803\)](#)

les organismes pélagiques et benthiques, forment une barrière atténuant l'énergie des vagues entrantes et génèrent des sédiments soutenant les plages adjacentes. Ce sont majoritairement les coraux durs (Scléactiniaires) qui construisent le récif avec leur squelette calcaire.

Pour évaluer la capacité d'un récif à protéger le littoral, il est nécessaire d'en évaluer le maintien général et d'identifier de potentielles hétérogénéités spatiales en fonction des zones. Pour évaluer le maintien des récifs coralliens à La Réunion, la présente étude cherche donc à produire des estimations de bilan de carbonates continues et régulières spatialement afin de localiser finement les zones de production de carbonates et d'établir un bilan à l'échelle du récif entier.

Depuis 2009 à La Réunion, la cartographie de la couverture corallienne sur les plateformes récifales a historiquement été effectuée par imagerie hyperspectrale aéroportée (campagnes Litto3D / projets Spectrhabent-Oi et Hyscores). Cette donnée offre une grande résolution spectrale et spatiale qui permet de distinguer les différents substrats, même ceux dont la signature spectrale est très proche (coraux vs algues). Cependant, il s'agit d'une donnée très coûteuse et donc peu reproductible dans le temps. La présente étude cherche donc à développer une nouvelle méthodologie permettant d'établir une cartographie de la couverture corallienne vivante (CCV) à partir de la simple imagerie satellite multispectrale (MS) sur les récifs de La Réunion.

Pour extraire l'information des images MS permettant d'identifier les coraux vivants, nous nous basons sur les caractéristiques spectrales des substrats récifaux, telles que décrites dans la littérature, et notamment dans les bibliothèques spectrales in situ, pour proposer des indices qui puissent traduire le signal spectral en valeur de CCV. L'indice de brillance calculé sur les bandes spectrales bleue et verte (BIBG) de la donnée satellite est celui qui présente la meilleure corrélation avec les données de couvertures coralliennes estimées à partir des images hyperspectrales, et les données in-situ. Il a été utilisé pour produire à partir des images satellites récentes des cartographies des recouvrements coralliens sur l'ensemble de la plateforme récifale entre le port de Saint-Gilles au nord et site du Trou d'Eau au sud.

Cartographie des couvertures algales dans la dépression d'arrière récif (DAR)

Sur le même modèle que ce qui avait été développé dans le cadre du projet Hyscores à partir des données hyperspectrales pour le calcul de la vitalité corallienne hyperspectrale VCH (rapport entre la surface de "corail vivant" et la surface potentiellement colonisable totale représentée par le "corail vivant" + "algues"⁸), un nouvel indice permettant de rendre compte de la présence des algues au sein de la dépression d'arrière récif détritique a été développé. Cet indice algal (ASA) exploite la même source de données hyperspectrales⁹ et est calculé sur le substrat meuble de la dépression d'arrière récif, comme le rapport entre la surface en "algues" et la surface totale représentée par les "algues" + "sable".

⁸ Ropert Michel, Mouquet Pascal, Bajjouk Touria, Delacourt Christophe (2016). **HYScores : Cartographies hyperspectrales appliquées aux écosystèmes coralliens et à leur état de santé.** RST-DOI/ 2016-04. <https://doi.org/10.13155/46122>

⁹ Nature des fonds : taux de couvertures en sable, algues, corail, herbier et composition colorée (Sable/Algues/Corail/Herbiers) des plateformes récifales réunionnaises en 2015. Ifremer - Délégation Océan Indien. <http://dx.doi.org/10.12770/a9bf52c4-1d31-4a67-944c-c4c6c9e4e0a5>

$$IndiceAlgal(ASA) = \frac{Taux(Algues)}{Taux(Algues) + Taux(Sable)}$$

De la même manière que le calcul de la vitalité corallienne ne s'applique que sur la portion de la plateforme récifale potentiellement colonisable (= substrat dur), représentée principalement par le platier récifal, cet l'indice algal n'est calculé que sur le substrat meuble de la dépression d'arrière récif, constituée de sable et débris coralliens. Le même masque spatial que le VCH est donc utilisé inversé pour ne conserver que les zones d'intérêt de la DAR. Les plus grandes étendues de DAR se situent au sud de la Passe de l'Ermitage jusqu'à la plage de Trou d'Eau (Figure).

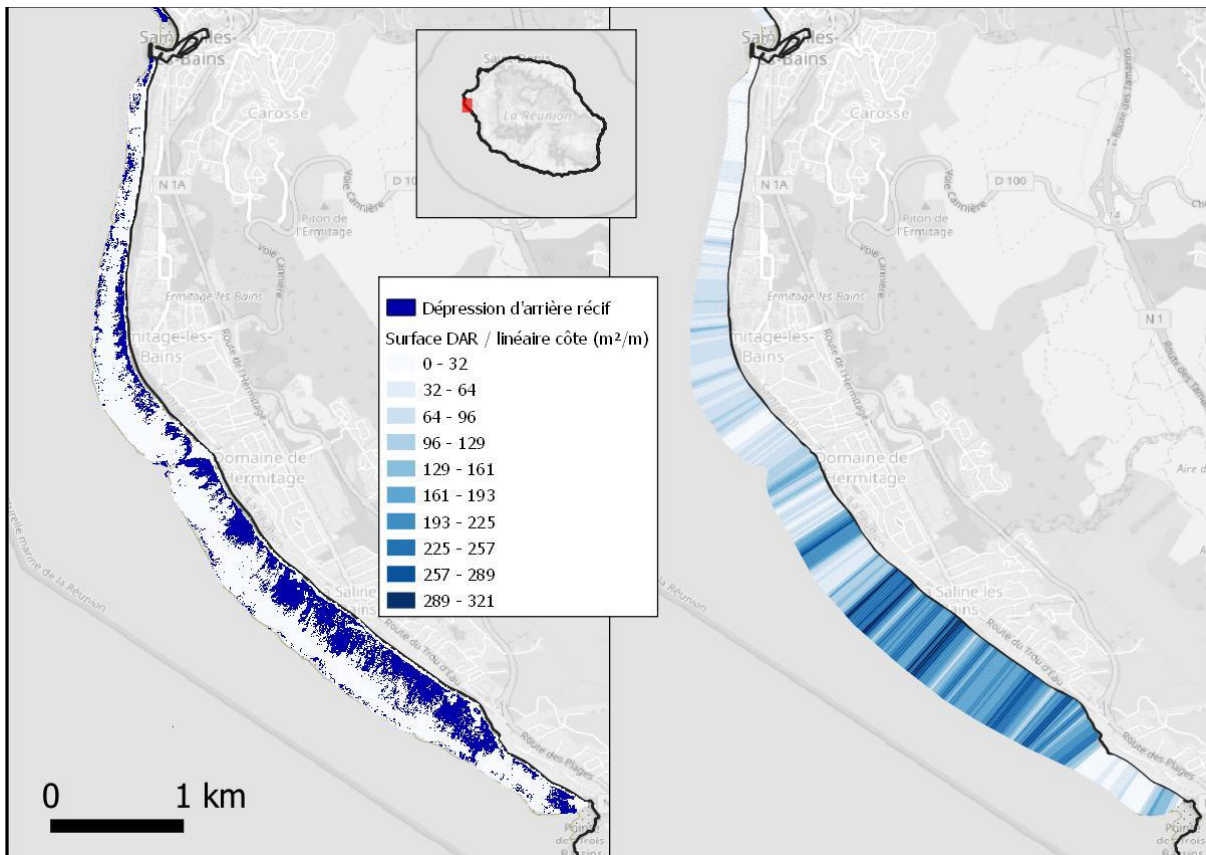


Figure 2 : Localisation de la dépression d'arrière récif (DAR) utilisée comme masque pour le calcul de l'indice algal, à gauche. Surface de DAR rapportée au linéaire côtier (= largeur de la DAR) à droite.

Une seconde estimation des recouvrements algaux dans la DAR a été réalisée à partir des 2 campagnes d'acquisition de données de terrain réalisées à la saison froide et la saison chaude. Elle permet de confirmer et actualiser les résultats obtenus par télédétection.

Cette estimation est réalisée à partir de l'analyse des proportions des différents types de fond sur les données terrain : la couverture algale considérée est constituée par les gazons algaux de type turf colonisant le substrat dur et les débris coralliens. Tout ce qui est micro-algues, voiles algales, microphytobenthos, etc. pouvant potentiellement coloniser le substrat meuble et avoir une activité photosynthétique / respiratoire n'est pas considéré ici, car il est impossible

à estimer sur le terrain (pouvant par exemple se manifester par une modification de la coloration du substrat sableux clair qui devient alors plus sombre).

La couverture algale est alors calculée par la formule suivante :

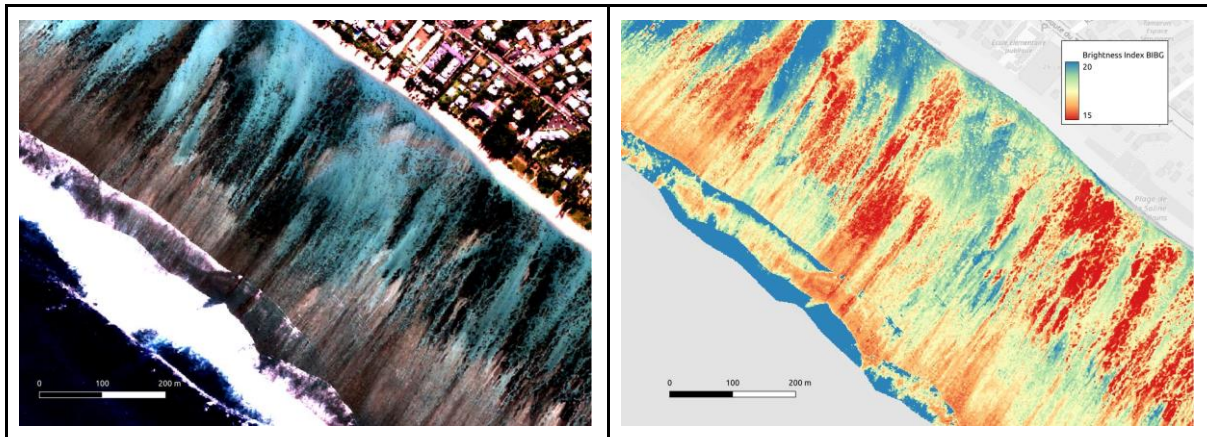
$$Surface_{Débris} + Surface_{Dur} - Recouvrement_{Corail} - Recouvrement_{Eponges}$$

Ces résultats in situ ont ensuite été comparés aux données issues de la télédétection.

2.4. Résultats

Cartographie des recouvrements coralliens sur les platiers récifaux

Les résultats des traitements cartographiques réalisés à partir des données satellites Pléiades sont présentés dans la [figure ci-dessous](#). Ils permettent de mettre en évidence l'hétérogénéité spatiale de la répartition des couvertures coralliennes vivantes de la plateforme récifale de l'Ermitage entre Saint-Gilles et Trou d'eau.



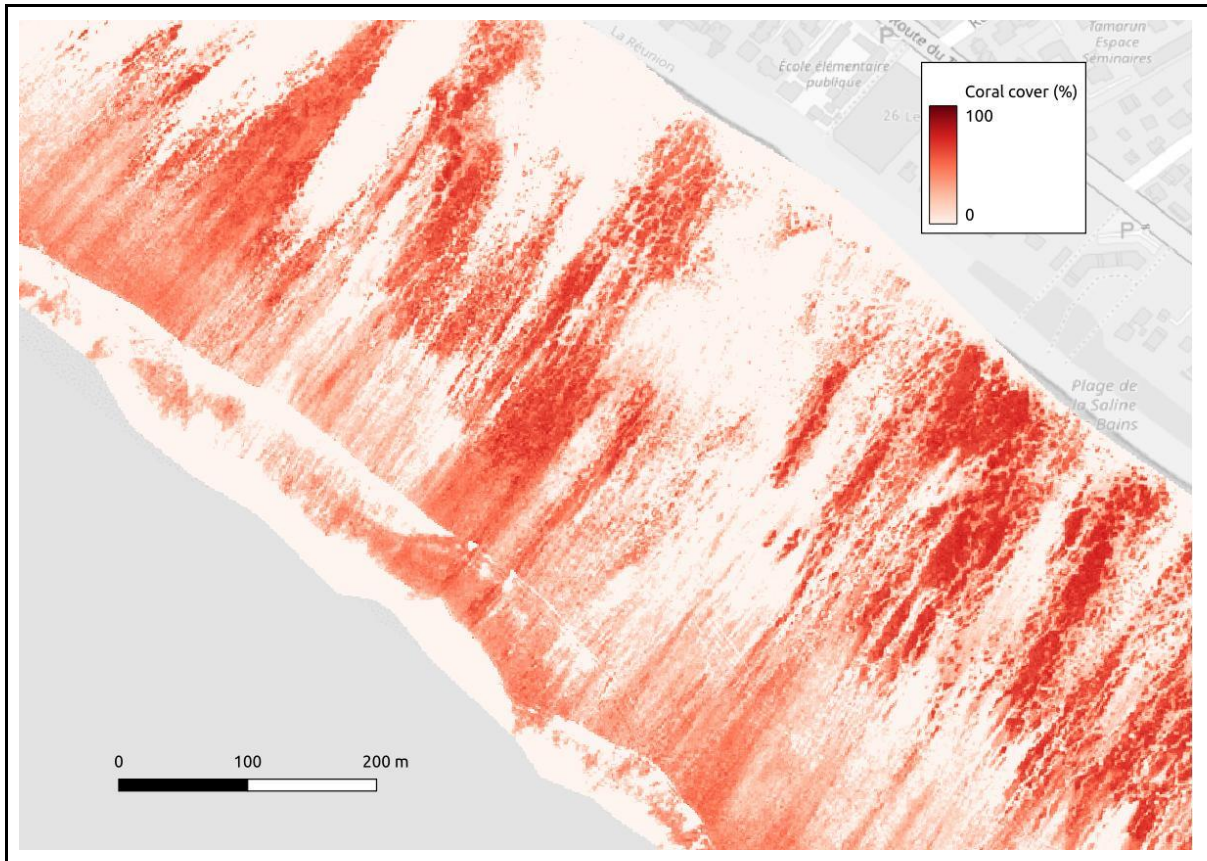


Figure 3. Résultats du traitement de l'image Pléiades Neo du 01/07/2022 sur la plateforme récifale de l'Ermitage. En haut à gauche composition colorée des canaux rouge, vert et bleu ; à droite calcul de l'indice de brillance bleu - vert ; en bas recouvrement corallien estimé sur la plateforme récifale.

Cartographie des couvertures algales dans la dépression d'arrière récif (DAR)

Les résultats du calcul de l'indice algal à partir des données hyperspectrales historiques dans la dépression d'arrière récif de la plateforme récifale de l'Ermitage sont présentés dans la [Figure](#) ci-dessous. Ils permettent localiser les algues dans les différents les secteurs :

- Le recouvrement algal dans la DAR n'est pas homogène le long du linéaire côtier entre la plage du Trou d'Eau au sud et les Brisants au nord. Plus forte aux deux extrémités nord et sud, la proportion d'algues est relativement plus faible au nord de la Passe de l'Ermitage au niveau du site de Toboggan, et au sud de la passe dans le secteur de Copacabana.
- En lien avec les variations de largeur de DAR du nord au sud, la quantité algale totale est beaucoup plus importante au sud de la Passe d'Ermitage, approximativement des sites au sud de Copacabana jusqu'à Trou d'eau.

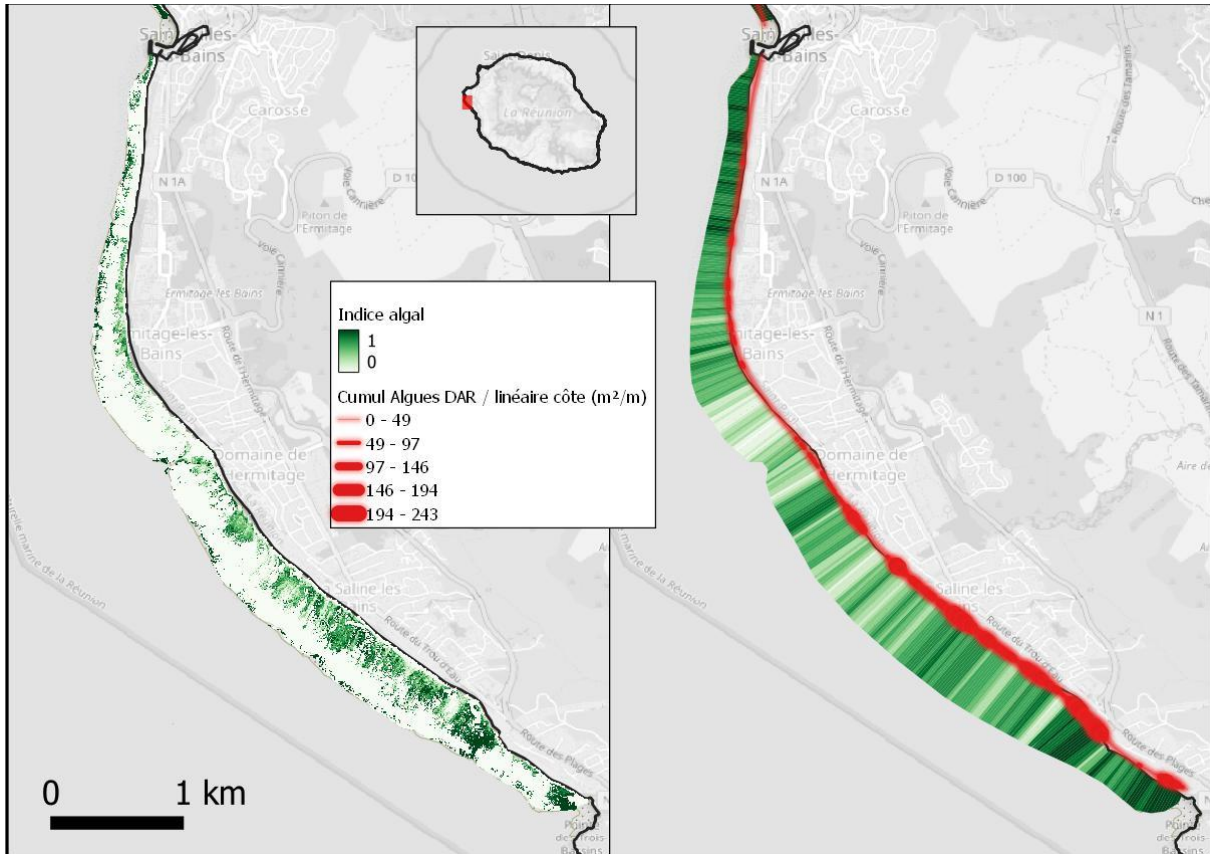


Figure 4. A gauche, résultat du calcul de l'indice algal dans la dépression d'arrière récif (DAR) à partir des données hyperspectrales, données pixellaires. A droite, la synthèse dans les polygones permet d'identifier les secteurs où le substrat sableux de la DAR est le plus enalgué (dégradé vert) et où la quantité d'algues totale est la plus importante (linéaire rouge de largeur proportionnelle).

Les résultats de l'estimation de la couverture algale à partir des données in-situ sont présentés sur la [Figure](#) ci-dessous en haut. Plusieurs analyses peuvent être faites à partir de ces données :

- la répartition de la couverture algale estimée sur le terrain suit le même schéma que ce qui a été obtenu à partir des données hyperspectrales 2015 (recouvrements plus forts aux extrémités, avec deux points bas vers les sites de Toboggan et Copacabana).
- ces données in-situ permettent aussi pour la première fois d'étudier la variation saisonnière des algues dans la dépression d'arrière récif. Il faut rappeler que ces résultats de recouvrement algaux sont obtenus à partir de la présence de débris et substrat dur uniquement : ils reflètent donc surtout les variations dans les proportions du sable, des débris et du substrat dur au sein de la DAR en fonction des saisons. On constate donc logiquement qu'ils sont assez stables entre l'été et l'hiver, aux incertitudes de positionnement et d'estimation in situ par les opérateurs près.

La comparaison de ces résultats in-situ avec l'indice algal hyperspectral ([Figure](#) ci-dessous en bas) nous montre que :



- la corrélation est meilleure en considérant la donnée pixellaire par rapport à la donnée intégrée dans les polygones de 20 m perpendiculaires au trait de côte. En plus de ne pas être homogène du nord au sud, la couverture algale dans la DAR ne l'est pas non plus du trait de côte vers front récifal. Il est donc important de localiser aussi avec précision les points de mesure in situ par rapport à leur distance à la plage.
- la bonne corrélation entre ces données, malgré une différence temporelle de 7 années entre les mesures, et une différence méthodologique (in situ vs télédétection), montre une relative stabilité de la couverture algale considérant uniquement la présence de débris coralliens et le substrat dur.
- la corrélation en hiver est plus forte que celle en été, en lien avec la période d'acquisition des données historiques hyperspectrales sur la période des mois de mai - juin 2015. Les développements algaux étaient probablement réduits et du même ordre de grandeur que les données hivernales in situ.

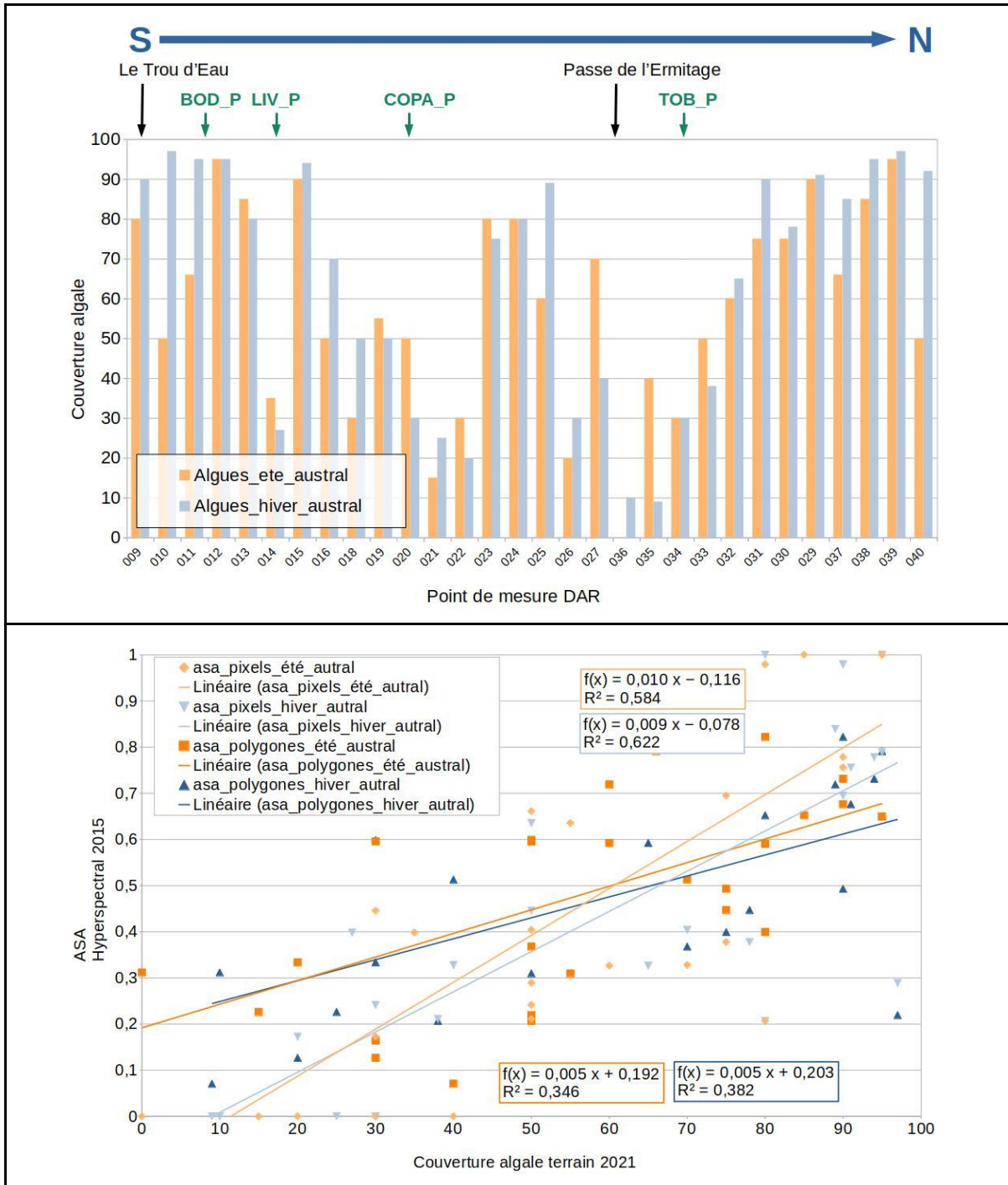


Figure 12. En haut, couverture algale sur le substrat dur et les débris de la dépression d'arrière récif d'après les mesures in-situ réalisées en hiver et été australs (août-septembre 2021 et avril-mai 2022 respectivement). En bas, estimation de la corrélation entre les mesures algales in-situ 2021-2022 et indice algal hyperspectral 2015.

L3.3.2-A : Données issues de l'acquisition (bilan des carbonates) : 1) bilan des carbonates sur le platier récifal : 1 bilan en saison chaude, 1 bilan en saison fraîche sur 2 radiales ; étude de faisabilité sur deux autres radiales en saison chaude. 2) bilan des carbonates pour le compartiment sédimentaire ou les substrats durs non coralliens : 1 bilan en saison chaude, 1 bilan en saison fraîche sur 2 sites plus ou moins anthropisés. (ENTROPIE)

ACTION 3 : Aléas Littoraux

O3.3 Littoraux coralliens : bilan des carbonates et budgets sédimentaires

O3.3.2 Bilan des carbonates

1. Contexte et objectifs

A La Réunion, les relevés topographiques permettant d'estimer les volumes de sable engraisés ou érodés sur la plage et la dune bordière montrent une tendance de certains secteurs à l'érosion (Mahabot, 2016). Parmi les facteurs potentiellement impliqués, figure la dégradation de l'écosystème du fait des perturbations anthropiques locales et du changement climatique, qui modifie les processus susceptibles d'alimenter les formations sédimentaires. En outre, la diminution de la quantité de CaCO_3 déposée par le récif conduit à une diminution de la croissance en hauteur de la barrière récifale, pouvant affecter sa fonction de dissipation de l'énergie des houles et entraîner des phénomènes d'érosion sur le cordon littoral, en particulier dans le contexte d'élévation du niveau des mers et de l'augmentation de l'intensité des cyclones.

Pour mieux appréhender le budget sédimentaire (engraissement des plages vs. pertes sédimentaires à l'échelle annuelle et/ou lors d'évènements extrêmes), il est en premier lieu nécessaire d'analyser le potentiel de production de carbonates par le système récifal, et en particulier d'améliorer notre connaissance de sa variabilité spatiale, fonction de la nature des principaux habitats (platier récifal, zone sédimentaire d'arrière récif) ainsi que de l'état de santé du milieu (dominance corallienne v s. dominance algale sur le platier par exemple).

Pour répondre à cette question, la première étape a été la mesure des quantités de CaCO_3 produites sur le platier récifal, ainsi que l'évaluation des pertes de carbonates par dissolution des sédiments dans la zone d'arrière-récif, dans différents secteurs du récif caractérisés par un recouvrement corallien contrasté et/ou une anthropisation plus ou moins importante.

2. Mesure du bilan des carbonates dans la zone d'arrière-récif

2.1. Méthodologie : sites d'étude et échantillonnage

Quatre sites d'étude (Tableau 1, Figure 1) ont été sélectionnés dans la dépression d'arrière-récif du récif de Saint-Gilles-La Saline : « Toboggan » au nord de la passe de l'Hermitage, « Copacabana », « Livingstone » et « Bodega » à La Saline. Ces quatre sites d'étude sont approximativement localisés au droit d'entrées d'eau océanique perpendiculaires à la côte (Figure 2, d'après Cordier, 2007). L'échantillonnage s'est déroulé sur les quatre sites d'étude au cours de la période estivale 2020 (de mi-janvier à mi-mars), puis sur les mêmes sites, à l'exception de Bodega, au cours de la période hivernale 2020 (en octobre).

Tableau 1. Coordonnées des stations étudiées dans la zone d'arrière-récif.

Site	ID site	Longitude (WGS 84)	Latitude (WGS 84)
Toboggan	TOB	55.22245	-21.08074
Copacabana	COPA	55.23334	-21.09368
Livingstone	LIV	55.23885	-21.09828
Bodega	BOD	55.24501	-21.10231



Figure 1. Localisation des stations étudiées dans la zone d'arrière-récif.

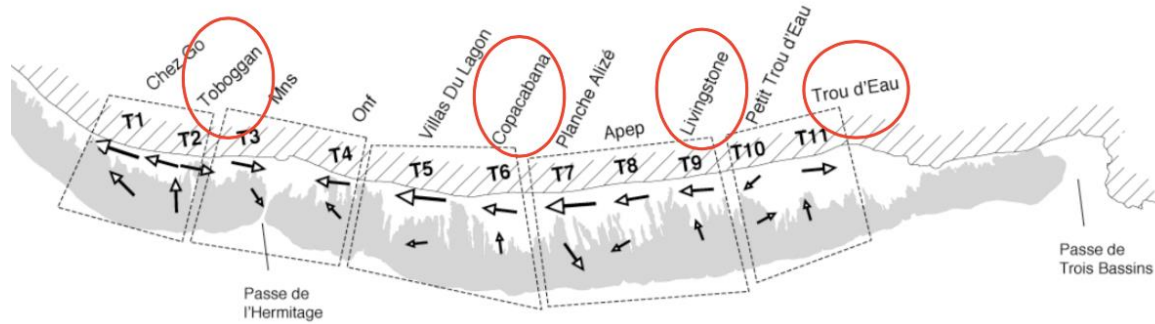


Figure 2. Emplacement des stations étudiées par rapport à la courantologie (d'après Cordier, 2007).

Sur chaque site d'étude, les mesures ont été réalisées à l'aide de trois enceintes benthiques placées en parallèle (Figure 3), avec sept incubations successives d'une durée moyenne de 1H30 réparties sur l'ensemble du cycle nyctéméral.

Les enceintes sont constituées d'une embase en PVC que l'on enfonce dans le sédiment et sur laquelle vient se fixer un dôme en plexiglass. Une pompe permet à l'eau contenue dans l'enceinte de circuler en circuit fermé. Une sonde multiparamétrique (YSI 6920) équipée d'un capteur optique à oxygène dissous (YSI 6150) est placée dans le circuit.

Les mesures d'oxygène permettent d'évaluer la productivité (activité photosynthétique), et l'activité respiratoire des communautés présentes dans le sédiment. Des prélèvements pour l'analyse de l'alcalinité totale sont effectués dans les enceintes au début et à la fin des incubations. Ce paramètre permet d'analyser les flux de carbonates (précipitation ou dissolution de CaCO_3).

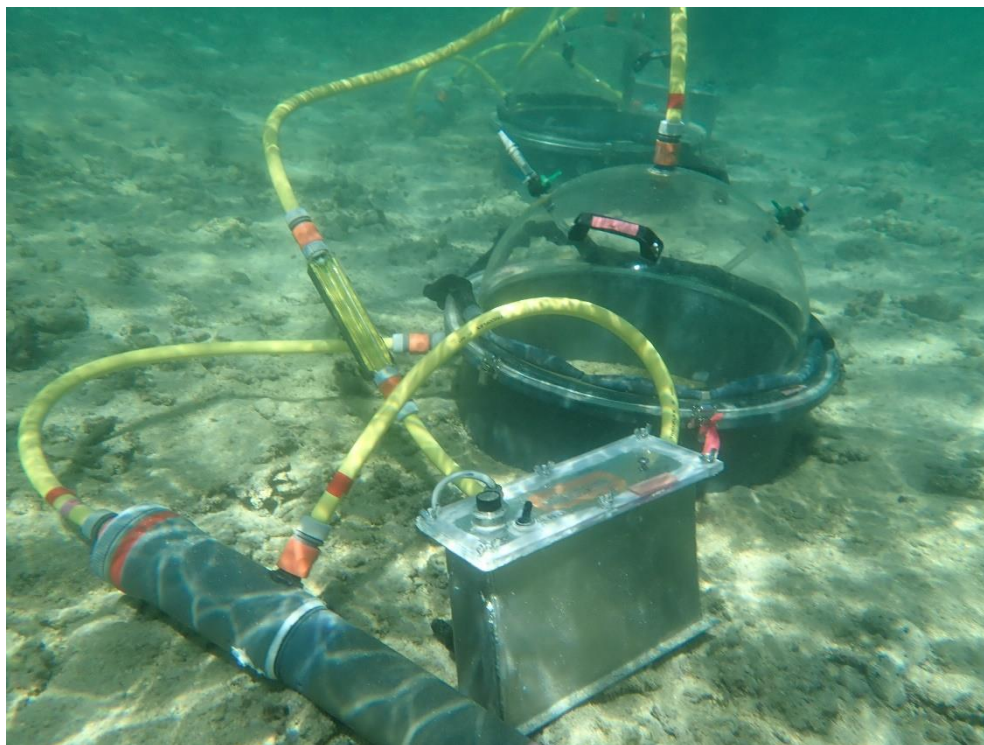


Figure 3. Dispositif expérimental permettant de mesurer les flux à l'interface eau-sédiment (Clavier et al., 2008).

Les flux d'oxygène à l'interface eau-sédiment au cours des incubations sont appelés « production nette » pn. Ils se calculent selon :

$$pn(\text{mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}) = \Delta O_2 \times \frac{V}{\Delta t \times S}$$

avec ΔO_2 la variation de la concentration en O_2 dissous (mmol L^{-1}) au cours de l'incubation, Δt la durée de l'incubation (h), V le volume d'eau dans le système (L) et S la surface de l'embase (m^2). Ils sont négatifs à l'obscurité (consommation d' O_2 dissous par la respiration), et positifs à la lumière au-delà d'une certaine intensité lumineuse (lorsque l'activité photosynthétique l'emporte sur la respiration).

Les flux d'alcalinité totale permettent de calculer la calcification nette gn selon :

$$gn(\text{mmolCaCO}_3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}) = \frac{-\Delta TA}{2} \times \frac{V}{\Delta t \times S}$$

avec ΔTA la variation de l'alcalinité totale (mmol L^{-1}) au cours de l'incubation. Une valeur positive dénote une précipitation nette de CaCO_3 , une valeur négative une dissolution nette.

Des mesures nécessaires à la caractérisation des stations, et donc à l'interprétation de la variabilité spatio-temporelle des bilans ont en outre été effectuées. Elles comportent :
 la mesure des teneurs en silicates dans l'eau, qui témoigne de l'influence de la nappe phréatique, et donc du degré d'influence terrestre et anthropique sur les stations,
 la mesure de la teneur en chlorophylle a dans les sédiments, pour comprendre la variabilité des mesures de productivité,
 la mesure des taux de saturation en aragonite, un paramètre notamment fonction du pH du milieu, considéré dans la littérature comme un facteur de contrôle essentiel du bilan des carbonates.

2.2. Résultats

- **Caractérisation des stations**

On trouve des concentrations en silicates particulièrement élevées sur la station Copacabana, ce qui témoigne d'un apport d'eaux douces souterraines notable dans ce secteur, comparativement aux deux stations Toboggan et Livingstone (**Figure 4**). Bodega apparaît intermédiaire.

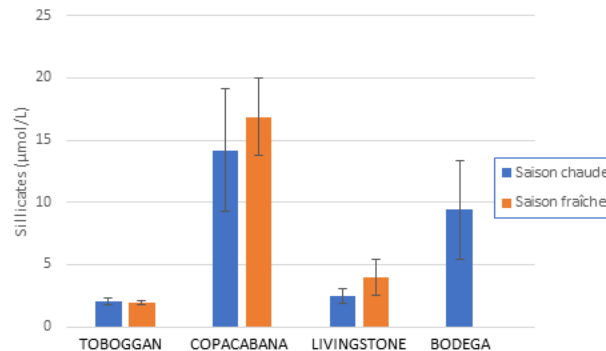


Figure 4. Teneurs en silicates (\pm écart-type) mesurées au cours des incubations dans la dépression d'arrière-récif en 2020.

Salinité
Arrière-récif du site « Copacabana »
13 -14 / 02 / 2020

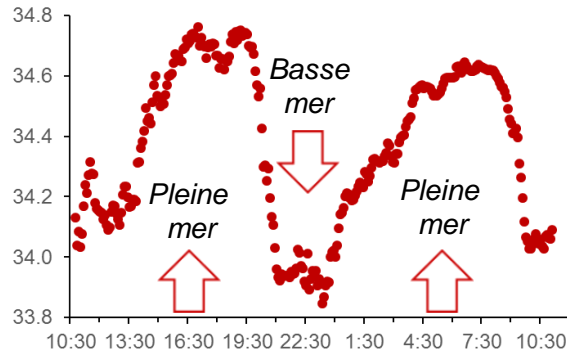


Figure 5. Variations de la salinité au cours des mesures effectuées sur la station Copacabana en février 2020.

A Copacabana, la salinité diminue très nettement à marée basse par rapport à la marée haute, confirmant l'hypothèse d'un apport d'eaux douces souterraines (**Figure 5**). Cependant, les teneurs en chlorophylle a sont sensiblement les mêmes sur l'ensemble du récif de La Saline avec des valeurs moins élevées à Toboggan, qui se démarque bien des 3 autres stations (**Figure 6**). La station de Toboggan apparaît la plus épargnée par l'influence terrestre, et s'oppose en ce sens plus particulièrement à Copacabana.

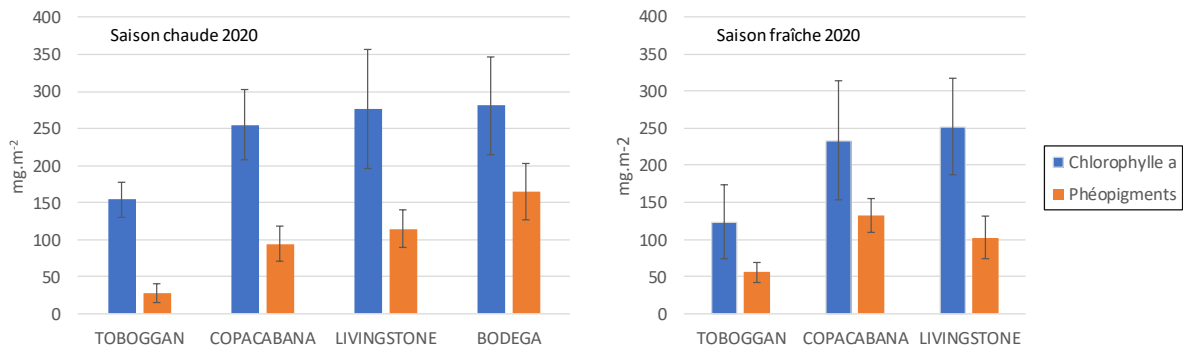


Figure 6. Concentrations moyennes (\pm écart-type) en chlorophylle a et phéopigments (produits de dégradation de la chlorophylle) dans les sédiments des stations étudiées en saison chaude (à gauche) et en saison fraîche (à droite).

- **Bilans métaboliques journaliers**

Les résultats se présentent sous forme de relations entre la lumière et les flux d'oxygène ou de carbonates à l'interface eau-sédiment (**Figures 7 et 8**). Ces relations sont modélisées à l'aide de l'équation :

$$pn = p_{max} \cdot [1 - e^{(-I/I_k)}] + r$$

où p_n (respectivement g_n) est la production nette (respectivement la calcification nette) en mmol O_2 ou de $\text{CaCO}_3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$, p_{max} (respectivement g_{max}) est la valeur de l'asymptote horizontale de la courbe, I est la lumière (plus exactement le « PAR », soit la quantité de lumière utilisable pour la photosynthèse en $\mu\text{mol de photons} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$), I_k est la valeur de la lumière correspondant à l'atteinte de l'asymptote horizontale et r (respectivement g_{nit}) est le flux d'oxygène (respectivement de carbonates) à l'obscurité.

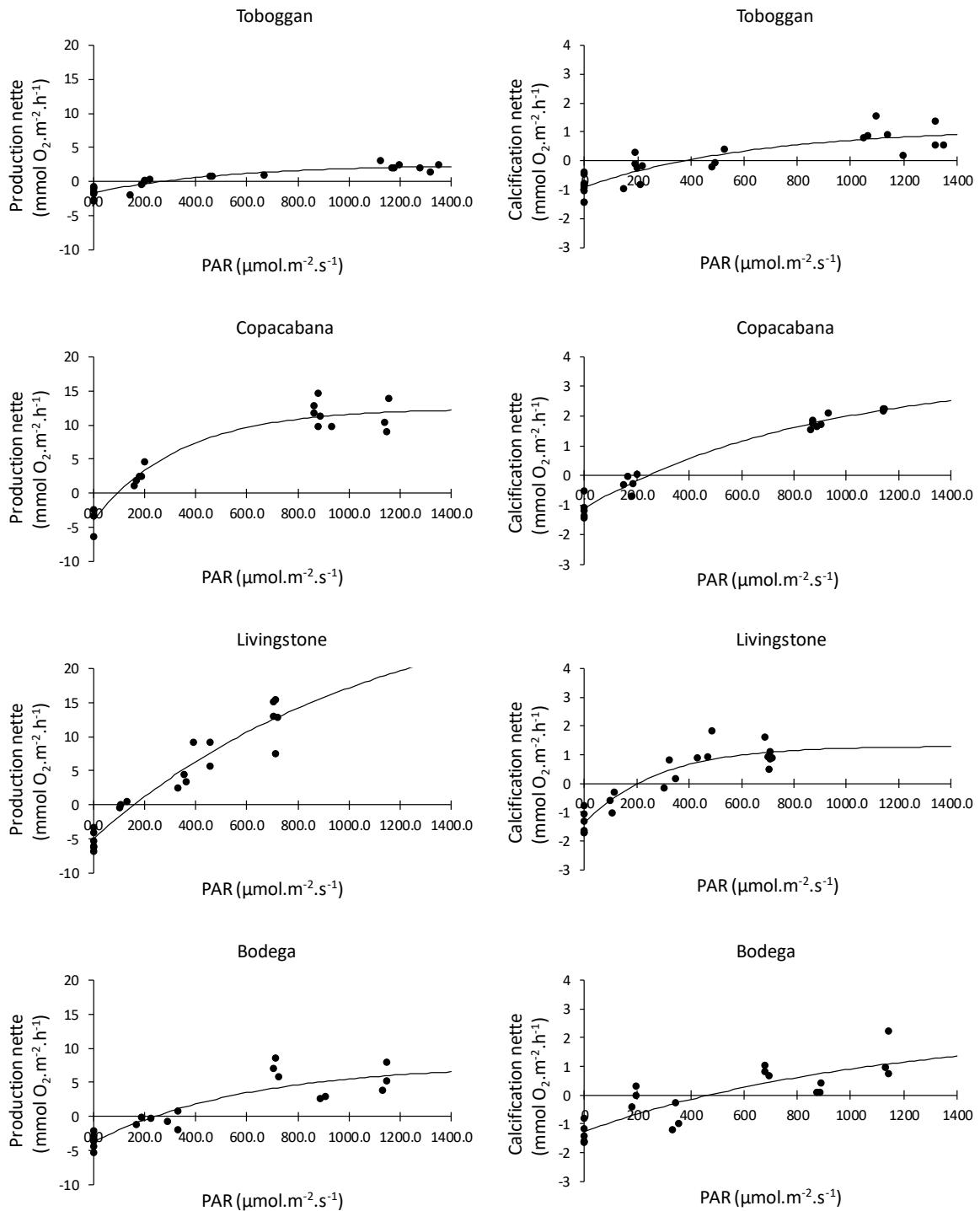


Figure 7. Relations entre la lumière (PAR) et les flux d'oxygène (à gauche) ou de carbonates (à droite) à l'interface eau-sédiment en saison chaude.

L'analyse statistique permet de déterminer les trois paramètres caractérisant ces courbes, p_{max} , I_k et r (respectivement g_{max} , I_k et g_{nuit}), et d'évaluer la pertinence des modèles (cf. à titre d'exemple le **tableau 2** correspondant aux valeurs déterminées en saison fraîche sur Livingstone dans le cas de la production nette). Celle-ci est de manière générale excellente, sauf pour le p_{max} à Livingstone et le g_{max} à Bodega en saison chaude. On note en effet que les courbes représentant la production nette ou la calcification nette en fonction de la lumière n'atteignent pas l'asymptote dans ces deux cas (**Figure 7**). Les valeurs de I_k sont également mal déterminées en plusieurs occasions.

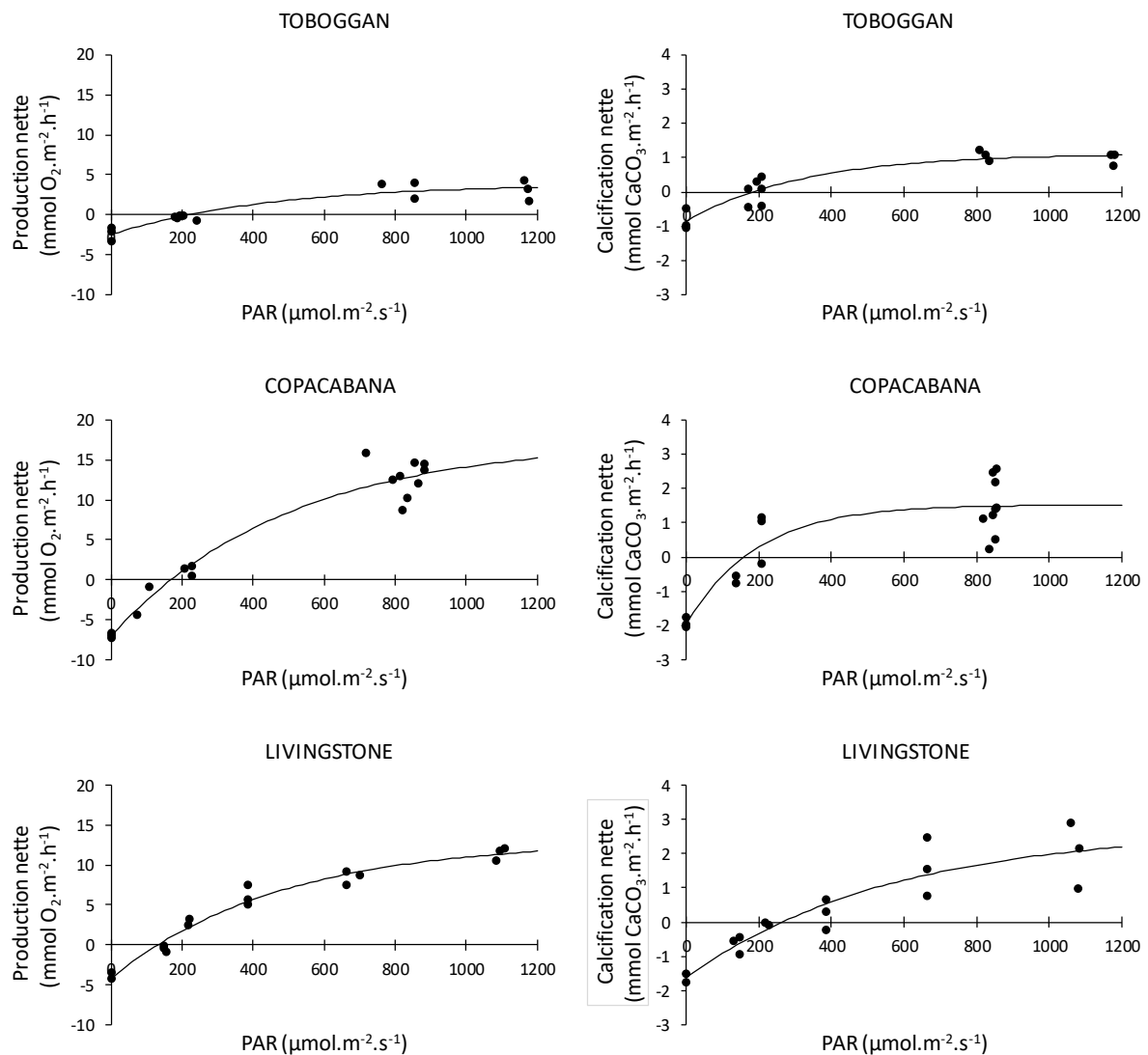


Figure 8. Relations entre la lumière (PAR) et les flux d'oxygène (à gauche) ou de carbonates (à droite) à l'interface eau-sédiment en saison fraîche.

Tableau 2. Modélisation des flux d'oxygène en saison fraîche sur Livingstone. Valeur des paramètres p_{max} ($\text{mmol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$), I_k ($\mu\text{mol de photons}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$) et r ($\text{mmol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$), proportion de variance expliquée et coefficient de corrélation entre le PAR et la production nette.

LIVINGSTONE

	Estimation	Erreur-type	Valeur de t dl = 13	niveau p	Conf inf limite	Conf sup limite
P_{max}	17.2556	1.03993	16.59306	0.000000	15.0090	19.5022
I_k	469.9729	75.89101	6.19273	0.000033	306.0203	633.9254
r	-4.2157	0.62285	-6.76850	0.000013	-5.5613	-2.8702

Proportion de la variance expliquée : .97100853 R =.98539765

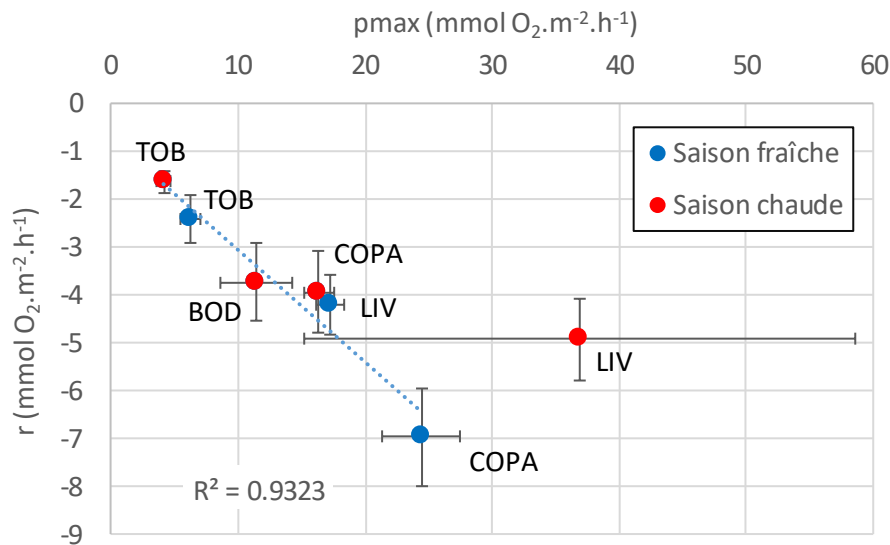


Figure 9. Relation entre le p_{max} et la respiration r (\pm erreur-type) dans les sédiments d'arrière-récif. Les données obtenues sur Livingstone en saison chaude ne sont pas incluses dans le calcul de la corrélation.

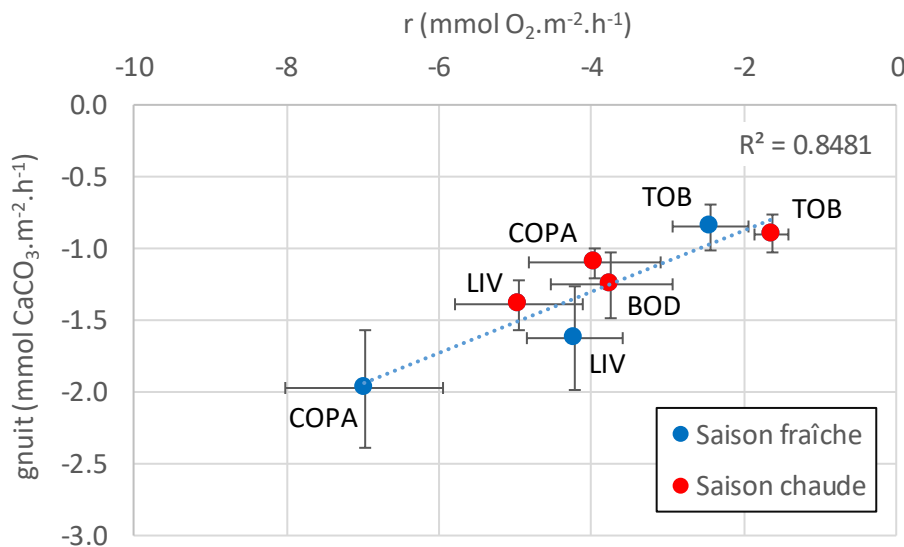


Figure 10. Relation entre la respiration r et la dissolution de CaCO_3 observée pendant la nuit (\pm erreur-type) dans les sédiments d'arrière-récif.

De manière générale, on observe que la respiration r est d'autant plus élevée que l'activité photosynthétique (p_{max}) est plus importante (**Figure 9**), impliquant que la matière organique produite par le système est en majorité consommée sur place. Livingstone en saison chaude semble se démarquer, peut-être en raison d'une augmentation brutale de la productivité, sans que la biomasse des organismes consommateurs de la matière organique (bactéries, microfaune, ...) ne montre encore de réponse à cette augmentation. Cependant, comme précisé ci-dessus, la valeur de la p_{max} à Livingstone en saison chaude est sujette à caution.

On observe également que la dissolution de $CaCO_3$ observée pendant la nuit est d'autant plus importante que la respiration est plus élevée (**Figure 10**), montrant l'impact de l'acidification du milieu associée à la production de CO_2 (consommation de matière organique).

Finalement, les équations utilisant les paramètres p_{max} , I_k et r (respectivement g_{max} , I_k et g_{nuit}) calculés pour chacune des stations sont utilisées pour calculer les bilans journaliers, compte-tenu de la quantité moyenne de lumière utilisable pour la photosynthèse au cours des 24H du cycle nyctéméral (**Figure 11**).

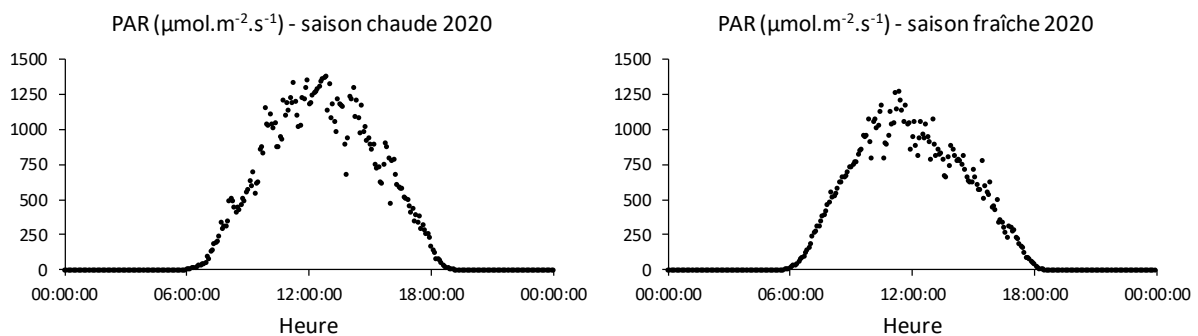


Figure 11. Lumière moyenne observée au cours des 24H du cycle nyctéméral en saison chaude (à gauche) et en saison fraîche (à droite).

A partir des flux d'oxygène, on évalue (1) l'activité photosynthétique ou production brute P_g , qui correspond à la quantité de matière organique synthétisée par les producteurs primaires (microphytobenthos présent dans les sédiments, algues calcaires encroûtantes présentes sur les débris, ...); (2) la respiration R , supposée constante au cours des 24H du cycle nyctéméral; et enfin (3) la production en excès P_n , qui est la différence entre la quantité de matière synthétisée par la photosynthèse et la quantité de matière utilisée pour la respiration. Une valeur de P_n positive montre que le système synthétise plus de matière qu'il n'en consomme, et qu'il peut donc soit accumuler de la matière soit en exporter. Une valeur de P_n négative montre que le système consomme plus de matière qu'il n'en synthétise, et qu'il a donc besoin de sources extérieures de matière organique pour subvenir à ses besoins métaboliques. On calcule aussi le rapport P_g / R , qui donne des informations similaires. A partir des flux de carbonates, on calcule la quantité de carbonate de calcium précipitée ou dissoute, à la lumière, à l'obscurité, et à l'échelle du cycle nyctéméral (**Tableau 3**).

Tableau 3. Bilans métaboliques journaliers en saison chaude et en saison fraîche. Pn production en excès, R respiration journalière, Pg production brute ($\text{mmol.m}^{-2}.\text{j}^{-1}$). Gn calcification nette journalière ($\text{mmol.m}^{-2}.\text{j}^{-1}$), G nuit taux de dissolution nette observé à l'obscurité (mmol.m^{-2} au cours d'une nuit de 12H), G jour taux de précipitation nette du carbonate de calcium à la lumière (mmol.m^{-2} au cours d'une journée de 12H).

	Saison chaude				Saison fraîche		
	Toboggan	Copacabana	Livingstone	Bodega	Toboggan	Copacabana	Livingstone
Pn	-5	60	84	-2	-7	22	36
R	-39	-95	-119	-90	-58	-167	-101
Pg	34	155	202	87	51	189	138
Pg/R	0.87	1.63	1.71	0.97	0.88	1.13	1.36
Gn	-6	2	-7	-10	-2	-11	-7
G nuit	-11	-13	-17	-15	-10	-24	-20
G jour	4	15	10	5	8	12	12

On voit que, quelle que soit la saison, la production brute (activité photosynthétique) est beaucoup plus faible à Toboggan qu'à Copacabana et Livingstone. Ces deux stations présentent une production en excès positive, tandis que Toboggan apparaît légèrement déficitaire.

A la lumière, on observe sur toutes les stations une précipitation de CaCO_3 , tandis que du CaCO_3 est dissout pendant la nuit. Le bilan journalier est négatif (dissolution nette de CaCO_3) sauf à Copacabana en saison chaude. A l'échelle de l'année, le taux de dissolution à Toboggan est de $-162 \text{ g.m}^{-2}.\text{an}^{-1}$. Il est similaire à Copacabana ($-169 \text{ g.m}^{-2}.\text{an}^{-1}$), avec toutefois une forte variabilité saisonnière. Il est un peu plus élevé à Livingstone ($-252 \text{ g.m}^{-2}.\text{an}^{-1}$).

2.3. Conclusion

Les sédiments d'arrière-récif de Saint-Gilles/La Saline présentent à l'échelle annuelle une dissolution nette de carbonate de calcium comprise entre 0.16 et $0.25 \text{ kg.m}^{-2}.\text{an}^{-1}$, des valeurs assez similaires à celles que l'on trouve dans la littérature (de l'ordre de 0.09 à $0.35 \text{ kg.m}^{-2}.\text{an}^{-1}$; Andersson & Gledhill 2013). Le taux de dissolution peut cependant être ponctuellement plus important. En l'absence de variations saisonnières, la valeur relevée en saison fraîche à Copacabana correspondrait ainsi à une dissolution nette annuelle de $0.41 \text{ kg.m}^{-2}.\text{an}^{-1}$.

Un facteur favorisant la dissolution semble être le CO_2 émis lors de la consommation de matière organique (respiration) dans les sédiments. La respiration est plus élevée sur les stations les plus productives, Copacabana et Livingstone, que sur Toboggan, ce qui pourrait relier l'intensité de la dissolution à l'abondance des producteurs primaires, et donc, vraisemblablement, au niveau d'eutrophisation du milieu. En saison fraîche, les données sont cohérentes avec cette hypothèse. Le gradient observé en ce qui concerne la production brute (Toboggan < Livingstone < Copacabana) se retrouve en ce qui concerne la respiration et le taux de dissolution journalier du CaCO_3 . En saison chaude cependant, la précipitation nette de CaCO_3 observée durant la journée est également la plus importante sur les stations les plus productives, venant contrebalancer la dissolution nocturne. Dans ces conditions, il est

beaucoup plus difficile de relier l'abondance des producteurs primaires, et donc l'état d'eutrophisation du milieu, à une dissolution nette de CaCO_3 .

2.4. Production scientifique

Les données acquises en saison chaude ont fait l'objet d'un mémoire de Master 2 : Parvedy F. (2020) Quels sont les facteurs qui influencent le bilan des carbonates dans le compartiment sédimentaire du récif de St-Gilles/La Saline ? Mémoire de Master 2 Biodiversité et EcoSystèmes Tropicaux Aquatiques, Littoraux et Insulaires, Université de La Réunion.

3. Mesure du bilan des carbonates sur le platier récifal

3.1. Etude de faisabilité : analyse des conditions hydrodynamiques

- **Méthodologie**

La première étape du travail a consisté en l'analyse d'un ensemble de mesures de courant d'une durée de 24 à 72 heures (*a minima* un cycle de marée complet), réalisées sur 7 stations du platier récifal (MNS, Toboggan, Copacabana, Planch'Alizés, Livingstone, Trou d'eau et Bodega) (**Figure 12**). Les mesures ont été effectuées durant les premiers trimestres de 2019 ou 2020, et avaient pour objectif d'analyser la faisabilité du protocole envisagé pour les mesures de métabolisme.

Les enregistrements hydrodynamiques ont été effectués avec un courantomètre à effet doppler Aquadopp Profiler à fréquence acoustique de 2 MHz (Nortek). Les courants ont été mesurés en continu pendant 2 minutes toutes les 5 minutes, puis moyennés sur ces 2 minutes, sur un profil vertical avec des cellules de 10 cm.

Des filières de traitement de données ont été développées sous Matlab en les rendant semi-automatiques.

- **Résultats**

Plusieurs cellules de circulation peuvent être distinguées sur la **figure 12** : une circulation principalement influencée par la houle au niveau des stations Toboggan, Livingstone, Trou d'Eau et Bodega avec des courants dirigés *onshore* à travers le platier récifal, et une circulation principalement conditionnée par la géomorphologie du récif. On observe ainsi (1) au niveau de la station MNS, un transport vers le nord par une dérive littorale *along-shore* en direction du port de Saint-Gilles, suivi d'un retour vers le milieu océanique ; (2) au niveau de la station Copacabana, une circulation influencée par la passe de l'Hermitage avec un flux très variable orienté Nord-Nord-ouest ; (3) au niveau de la station Planch'Alizés, un courant *offshore* représentant un courant de sortie par une fausse-passe.

- **Choix des sites d'étude**

Compte-tenu du protocole utilisé pour les mesures de métabolisme, le courant sur les radiales d'étude doit être (1) orienté *onshore*, (2) plus ou moins perpendiculaire à la plage avec une direction de l'axe majeur de l'ellipse ne s'écartant pas trop de l'axe *cross-shore* ($\Delta\theta < 20^\circ$) et

(3) relativement unidirectionnel avec un écart-type autour de la moyenne de la direction du courant moyen faible. Les deux premiers critères permettent de s'assurer que le flux d'eau traverse la communauté récifale située entre le milieu océanique et la station du platier récifal où se trouvent positionnés les instruments de mesure. Les stations MNS, Copacabana et Planch'Alizés ne conviennent pas en raison de l'orientation du courant *along-shore* ou *offshore*.

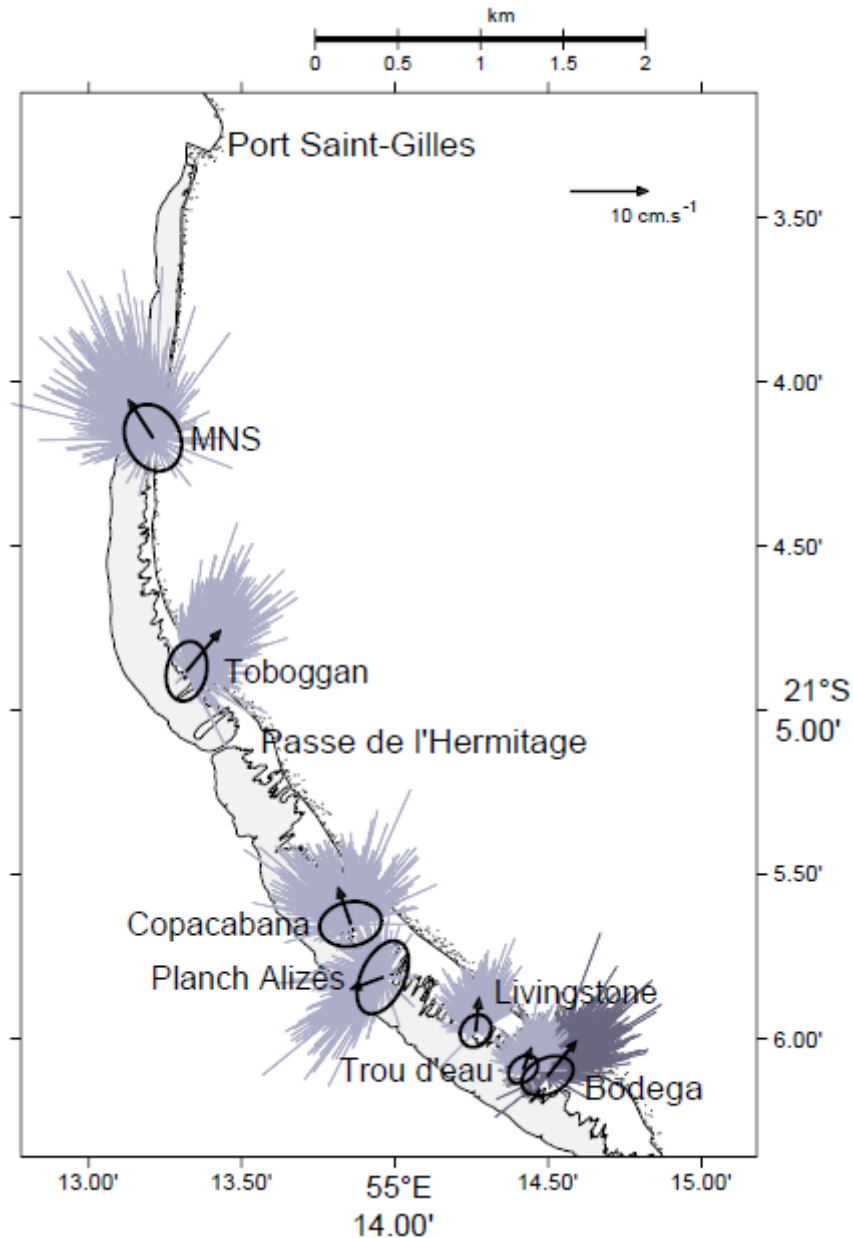


Figure 12. Enregistrements hydrodynamiques sur le récif de La Saline. Les ellipses indiquent la direction des axes majeur et mineur associés à la majeure partie de la variance et à la variance restante respectivement, la flèche indique le vecteur courant moyen et les traits gris représentent l'ensemble complet des données traitées.

3.2. Bilans métaboliques

- **Méthodologie**

Une méthode Eulérienne de mesure de l'activité métabolique des communautés récifales a été utilisée sur le platier récifal. La méthode (voir par exemple Gruber et al. 2017) est basée sur l'utilisation d'instruments de mesure autonomes implantés sur deux stations positionnées en amont (dans le milieu océanique) et en aval (à la limite de la zone d'arrière-récif) du courant dominant. L'acquisition des données (pH, oxygène dissous, vitesse et direction des courants, ...) est réalisée à haute fréquence sur le cycle nyctéméral (au minimum toutes les 15 minutes) pour permettre une description de la variabilité journalière. Elle est complétée par le prélèvement d'échantillons discrets pour l'alcalinité totale, car il n'existe actuellement pas d'instrument permettant la mesure de ce paramètre *in situ*.

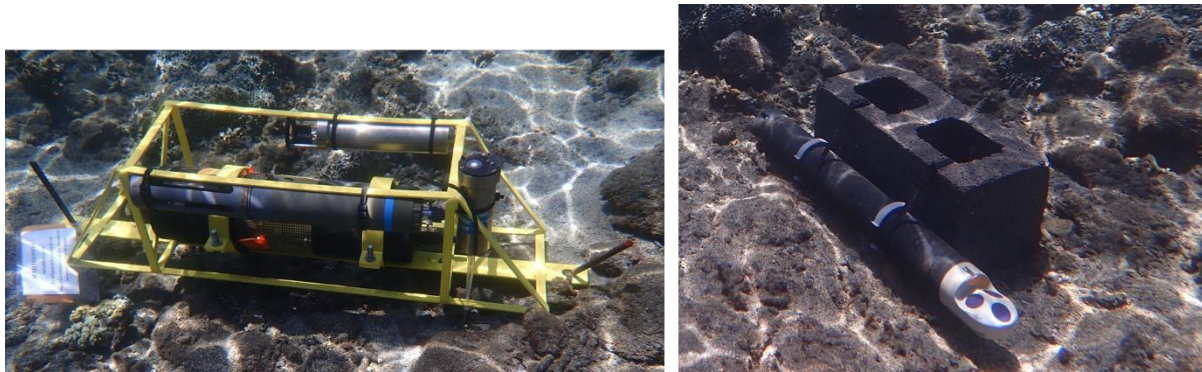


Figure 13. Les instruments placés sur le platier récifal. A gauche : sondes pour la mesure du pH_T (SAMI² pH, Sunburst Sensors), de l'oxygène dissous (YSI 6920), de la température et de la salinité (ACTW, Alec Electronics), et de la lumière (PAR « *Photosynthetic Active Radiation* », Compact LW, Alec Electronics). A droite, courantomètre (Aquadopp Profiler, Nortek).

L'oxygène dissous a été mesuré toutes les 15 minutes dans le milieu océanique et sur le platier récifal à l'aide de sondes YSI 6920 V2-2 équipées de capteurs optiques, avec une précision de $\pm 0,1$ mg.L⁻¹. Le pH_T (échelle de pH spécifique à l'eau de mer dite « total scale ») a été mesuré toutes les 15 minutes à l'aide d'une sonde SAMI²-pH (Sunburst Sensors) sur le platier récifal, avec une précision de $\pm 0,003$ unités pH, et à l'aide d'une sonde SeaFET™ V2 (Sea-bird Scientific) dans le milieu océanique, avec une précision de $\pm 0,02$ unités pH (**Figures 13 et 14**).

Un courantomètre ADCP (Aquadopp Profiler, Nortek) a été déployé sur le platier récifal et programmé pour enregistrer, pendant 2 minutes toutes les 5 minutes, la vitesse et la direction moyennes du courant sur un profil vertical, avec des cellules de 10 cm. L'ADCP était associé à un capteur de pression pour enregistrer la profondeur instantanée toutes les 5 minutes (**Figure 13**).

Sur chaque site étudié et pendant chaque période d'échantillonnage, des échantillons d'eau ont été prélevés pour l'analyse au laboratoire de l'oxygène dissous, du pH_T et de l'alcalinité totale (TA). À deux reprises, un échantillonneur autonome programmable (AquaMonitor, GreenEyes) a été utilisé pour collecter les échantillons de TA, sur le platier de Trou d'Eau en avril 2021 et sur le platier de Toboggan en juin 2022 (**Figure 14**). Les échantillons collectés pour l'analyse de l'oxygène dissous et du pH_T ont été utilisés pour vérifier l'étalonnage des sondes. Au total, 31 échantillons ont été collectés dans le milieu océanique, 15 en saison chaude et 16 en saison fraîche. Sur le platier récifal, plus de 10 échantillons pour l'oxygène dissous et 15 pour le pH_T ont été collectés au cours de chacune des périodes d'échantillonnage.

La salinité et la température ont été mesurées lors de l'échantillonnage dans le milieu océanique à l'aide d'une miniCTD (Valeport), et toutes les 15 minutes sur le platier récifal à l'aide d'une sonde JFE Advantech ACTW-USB, avec des précisions de $\pm 0,01$ et $\pm 0,1^\circ\text{C}$, respectivement.

Le rayonnement photosynthétiquement actif (PAR) a été mesuré sur le platier récifal à l'aide d'une sonde Compact LW (Alec-Electronics) enregistrant une fois par seconde pendant 10 secondes toutes les 15 minutes.

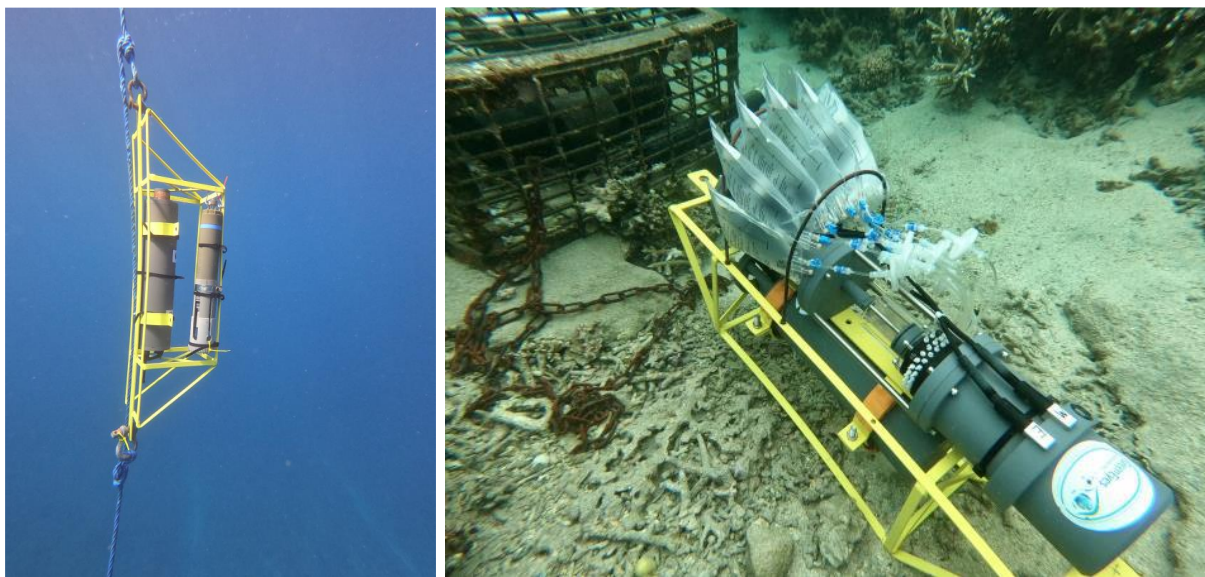


Figure 14. A gauche, les instruments placés dans le milieu océanique : sondes pour la mesure du pH_T (SeaFET™ V2, Sea-bird Scientific) et de l'oxygène dissous (YSI 6920). A droite, l'échantillonneur (AquaMonitor, GreenEyes) utilisé pour collecter les échantillons d'alcalinité totale sur le platier de Trou d'Eau en avril 2021 et sur le platier de Toboggan en juin 2022.

- **Données issues de l'instrumentation**

Le **tableau 4** récapitule les différentes séries de données acquises à la limite entre le platier récifal et la zone d'arrière-récif sur les trois sites retenus (Toboggan, Livingstone, Trou d'Eau / Bodega), ainsi que des informations sur la direction moyenne du courant permettant la comparaison avec les critères définis (paragraphe 3.1, choix des sites d'étude) quant à la faisabilité de la méthode. A priori, les observations effectuées à Toboggan (sauf en juin 2022)

et dans le secteur de Trou d'Eau / Bodega conviennent. Les données acquises à Livingstone ne permettront vraisemblablement pas d'obtenir des résultats de qualité suffisante.

Tableau 4. Liste des données issues de l'instrumentation sur les trois sites de platier retenus (Toboggan, Livingstone, Trou d'Eau / Bodega), et informations sur la direction moyenne du courant au cours des enregistrements.

Site	Date	Direction moyenne du courant (°)	Ecart-Type à la moyenne (°)	Déviations par rapport à l'axe cross-shore (°)
Toboggan	31 Jan.- 03 Fév. 2020	40	42	7
	11 Oct.- 14 Oct. 2021	43	40	10
	14 Juin - 16 Juin 2022	9	55	44
Livingstone	19 Fév.- 21 Fév. 2020	6	51	34
	01 Oct.- 05 Oct. 2020	355	48	45
	06 Oct.- 11 Oct. 2021	343	43	57
Bodega / Trou d'Eau	13 Mars - 16 Mars 2020	40	50	5
	27 Avr.- 13 Mai 2021	34	48	0
	19 Oct.- 21 Oct. 2021	36	46	2

A titre d'illustration, les données acquises sur le platier du Trou d'Eau à La Saline en avril / mai 2021 sont présentées sur la **figure 14**. Les variations journalières de la concentration en oxygène dissous et du pH_T sont conformes à la théorie, avec une augmentation pendant la journée (activité photosynthétique des producteurs primaires) et une diminution pendant la nuit (respiration des communautés benthiques). A compter du 4 mai, l'intensification de la houle se traduit par une augmentation de la hauteur d'eau et de la vitesse des courants. On observe en parallèle une diminution de l'amplitude des variations journalières de la concentration en oxygène dissous et du pH_T. Le signal lié à l'activité métabolique des communautés benthiques est en effet dilué quand la hauteur de la colonne d'eau est plus importante, et quand le temps de résidence des eaux sur le platier est plus court du fait d'un courant plus fort.

Les données concernant le milieu océanique ont été acquises au niveau de la bouée BS4 de la RNMR, face à la station Trou d'Eau, entre le 22 avril et le 5 mai 2021 (saison chaude), et entre le 1^{er} et le 22 octobre 2021 (saison fraîche). L'amplitude des variations journalières est très faible, comparativement aux observations réalisées sur les platiers récifaux (**Tableau 5**). D'un point de vue statistique, les paramètres diffèrent d'une saison à l'autre, à l'exception de la salinité. Les concentrations en oxygène dissous sont proches des valeurs de saturation estimées à partir de la température *in situ* et de la salinité, soit 203 ± 1 mmol.m⁻³ en saison chaude et 214 ± 2 mmol.m⁻³ en saison fraîche.

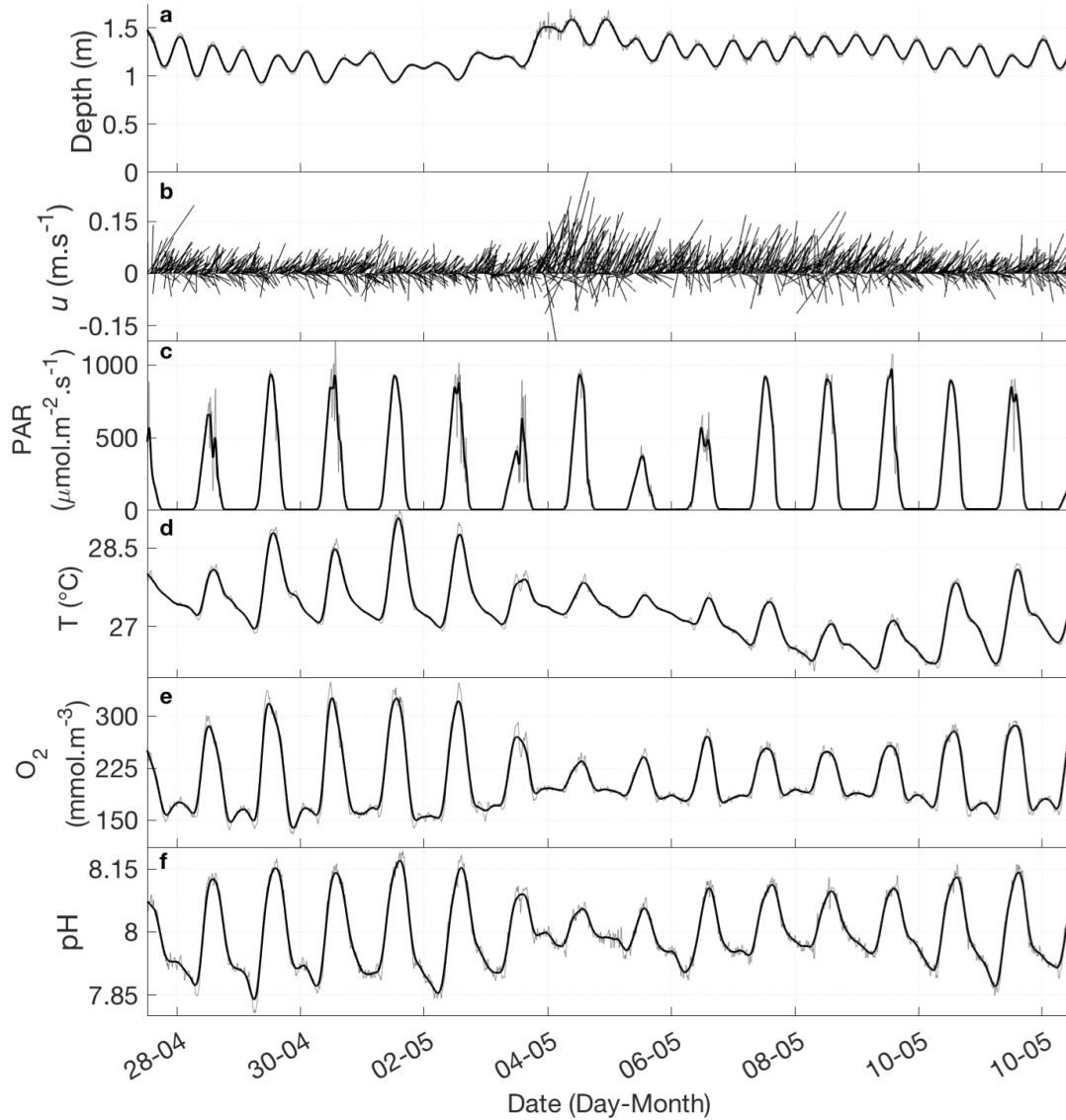


Figure 14. **a.** profondeur (m), **b.** direction et vitesse du courant (u , $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$), **c.** quantité de lumière disponible pour la photosynthèse (PAR, $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$), **d.** température (T , $^{\circ}\text{C}$), **e.** concentration en oxygène dissous (O_2 , $\text{mmol}\cdot\text{m}^{-3}$) et **f.** pH_T sur le platier du Trou d'Eau en avril / mai 2021. Sur la figure **b**, la longueur des traits est proportionnelle à la vitesse du courant et leur direction indique la direction du courant. Sur les autres figures, les tracés en gris correspondent aux données brutes et les tracés en noir à des données lissées sur 6 heures (méthode LOWESS).

Tableau 5. Valeur moyenne (\pm écart-type) des données acquises dans le milieu océanique entre le 22 avril et le 5 mai 2021 (saison chaude), et entre le 1^{er} et le 22 octobre 2021 (saison fraîche).

	Saison chaude	Saison fraîche
T (°C)	27.6 (\pm 0.2)	24.3 (\pm 0.4)
Salinité	34.99 (\pm 0.10)	35.00 (\pm 0.01)
O ₂ dissous (mmol.m ⁻³)	202 (\pm 5)	219 (\pm 4)
pH _T	8.02 (\pm 0.01)	8.05 (\pm 0.01)
TA (μmol.kg ⁻¹)	2289 (\pm 4)	2297 (\pm 4)

- **Bilans de productivité**

L'approche unidimensionnelle de Gruber et al. (2017), adaptée de l'approche du « Volume Contrôlé » de Falter et al. (2008), a été utilisée pour calculer les flux d'oxygène liés à l'activité métabolique (J_{O_2} en mmol O₂. m⁻². h⁻¹) :

$$J_{O_2} = \underline{h} \cdot \frac{dC}{dt} + q \cdot \frac{dC}{dx} - J_{Gaz}$$

A droite de l'équation, le premier terme correspond au terme local, soit l'accumulation ou la perte d'O₂ sur le transect par unité de temps dt , avec \underline{h} (m) la profondeur moyenne le long du transect et \underline{C} la concentration moyenne en O₂ le long du transect (mmol O₂.m⁻³). Le deuxième terme est le flux d'oxygène dû à l'advection, soit le renouvellement des eaux lié à l'hydrodynamisme sur le transect, avec q le volume d'eau transporté dans la direction du courant moyen (m³.h⁻¹.m⁻¹), évalué à partir de la profondeur et de la vitesse du courant, dC le changement de concentration en O₂ le long du transect (mmol O₂.m⁻³) et dx (m) la longueur du transect. Enfin, le troisième terme correspond au flux de gaz entre l'océan et l'atmosphère. Ce flux est généralement paramétré à l'aide de l'équation suivante (Wanninkhof et al. 2009) :

$$J_{Gaz} = k \cdot (C_{sat} - C)$$

où k est la vitesse de transfert du gaz (m. h⁻¹), C_{sat} est la concentration du gaz dissous à la surface de l'eau (mmol O₂. m⁻³) lorsqu'il y a équilibre avec l'atmosphère à une température et une salinité données et C est la concentration réelle de gaz dissous dans l'eau (mmol O₂. m⁻³).

La mise au point des calculs a porté sur le choix du vecteur courant à utiliser (axe majeur de l'ellipse ou vecteur courant moyen), la méthode de lissage des données et la recherche de la meilleure paramétrisation pour le flux de gaz entre l'océan et l'atmosphère (Lagoutte et al., en préparation). La concentration en oxygène dissous dans le milieu océanique a été prise égale à la valeur correspondant à la saturation (cf. paragraphe précédent, données issues de l'instrumentation) lorsque des données n'étaient pas disponibles.

A titre d'exemple, les résultats obtenus dans le secteur de Trou d'Eau / Bodega en avril 2021 sont présentés sur la **figure 15**.

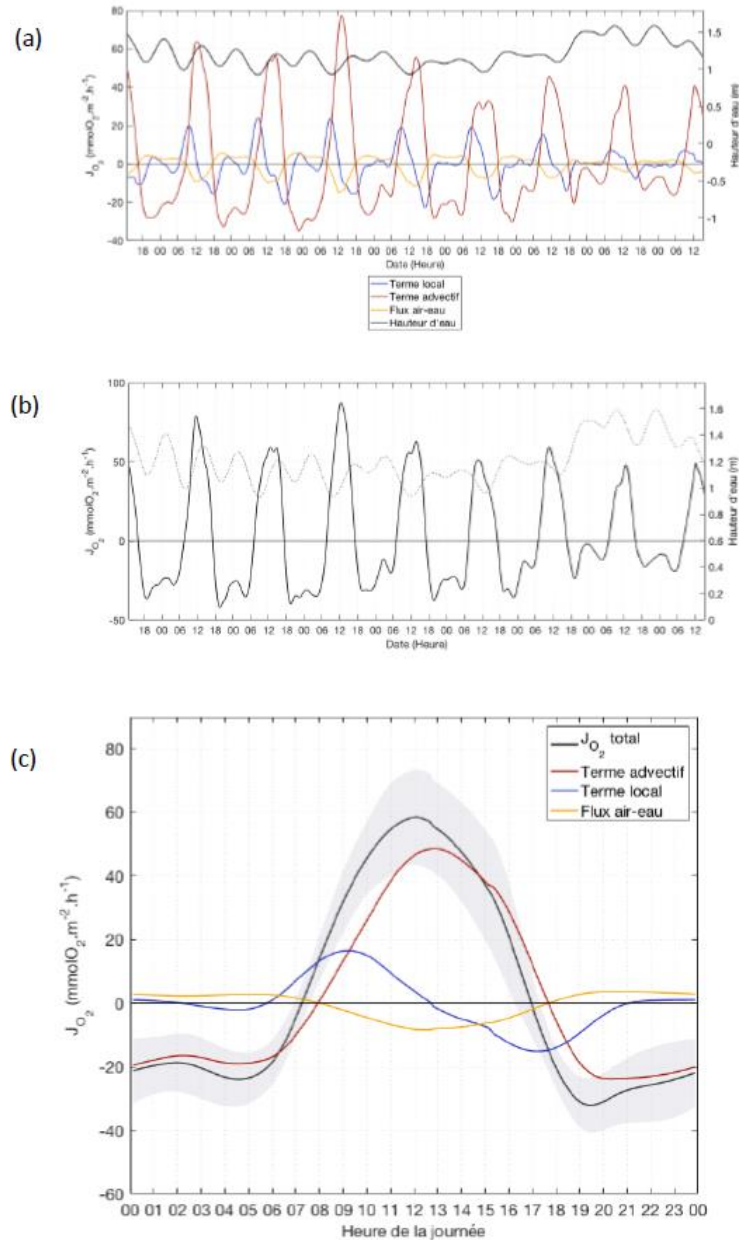


Figure 15. (a) Termes local et advectif, flux de gaz océan-atmosphère (mmol O₂.m⁻².h⁻¹) et hauteur d'eau (m), (b) Flux d'oxygène J_{O_2} (ligne continue, mmol O₂.m⁻².h⁻¹) et hauteur d'eau (pointillés, m) et (c) Moyenne en fonction de l'heure de la journée du flux d'oxygène (J_{O_2}), des termes advectif et local et du flux océan-atmosphère (mmolO₂.m⁻².h⁻¹) sur le platier de Trou d'Eau en avril / mai 2021. L'écart-type autour de la moyenne de J_{O_2} est représenté en grisé.

Comme dans le cas de l'utilisation des enceintes benthiques (cf. paragraphe 2.2), les flux d'oxygène à l'interface entre l'eau et le compartiment benthique sont reportés sur des graphiques en fonction de l'intensité lumineuse.

En saison chaude (**Figure 16**), les trois courbes obtenues présentent des paramètres p_{max} , I_k et r significativement différents d'un point de vue statistique (**Tableau 6**). Les valeurs de p_{max} et de r les plus élevées sont observées à Livingstone, suivi de Trou d'Eau / Bodega et enfin de Toboggan. En inter-saison (**Figure 17**), les trois paramètres diffèrent entre Trou d'Eau / Bodega et Toboggan. Comme en saison chaude, les valeurs de p_{max} et de r sont plus

importantes à Trou d'Eau / Bodega qu'à Toboggan. Enfin, en saison fraîche (**Figure 18**), on observe à Livingstone des valeurs de p_{max} et r extrêmement différentes en fonction de l'année d'échantillonnage, avec des valeurs beaucoup plus fortes en 2020 qu'en 2021. En 2021, les valeurs de p_{max} et r sont similaires à Toboggan et Livingstone, et plus élevées à Trou d'Eau / Bodega.

De manière générale, Toboggan s'oppose donc à Trou d'Eau / Bodega, avec des valeurs de p_{max} et r plus faibles. Les données sont beaucoup plus variables à Livingstone, avec, selon les périodes d'échantillonnage, des valeurs qui sont similaires à celles de Toboggan ou peuvent être supérieures à celles de Trou d'Eau / Bodega.

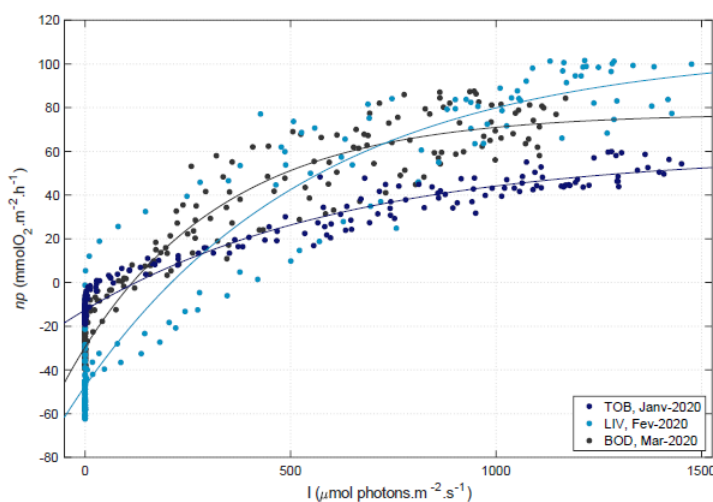


Figure 16. Courbes np – intensité lumineuse construites à partir des flux d'oxygène J_{O_2} pour les séries de données acquises en saison chaude. TOB, Toboggan ; LIV, Livingstone ; BOD, Bodega.

Tableau 6. Valeur (\pm erreur standard) des paramètres p_{max} ($mmol O_2.m^{-2}.h^{-1}$), I_k ($\mu mol photons.m^{-2}.s^{-1}$) et r ($mmol O_2.m^{-2}.h^{-1}$) dans les différents secteurs d'étude en fonction de la période d'échantillonnage. Les lettres en gras entre parenthèses représentent les résultats des tests de comparaison par paires. Les sites d'étude ne partageant pas la même lettre présentent des valeurs significativement différentes.

Saison	Site	Date	p_{max}	I_k	r
Saison chaude	Toboggan	31 Jan.- 03 Fév. 2020	72 ± 2 (a)	646 ± 45 (a)	-12.6 ± 0.4 (a)
	Livingstone	19 Fév.- 21 Fév. 2020	174 ± 8 (b)	605 ± 70 (a)	-51 ± 1.8 (b)
	Trou d'Eau / Bodega	13 Mars - 16 Mars 2020	107 ± 2 (c)	355 ± 23 (b)	-30 ± 0.8 (c)
Inter-saison	Toboggan	14 Juin - 16 Juin 2022	61 ± 2 (a)	118 ± 10 (a)	-20 ± 1 (a)
	Trou d'Eau / Bodega	27 Avr.- 13 Mai 2021	81 ± 1 (b)	258 ± 13 (b)	-22.9 ± 0.5 (b)
Saison fraîche	Toboggan	11 Oct.- 14 Oct. 2021	39 ± 1 (a)	351 ± 29 (a)	-13.5 ± 0.4 (a)
	Livingstone	01 Oct.- 05 Oct. 2020	109 ± 3 (b)	422 ± 33 (a)	-29 ± 1 (b)
	Livingstone	06 Oct.- 11 Oct. 2021	35 ± 1 (a)	297 ± 23 (a)	-14 ± 0.4 (a)
	Trou d'Eau / Bodega	19 Oct.- 21 Oct. 2021	67 ± 2 (c)	390 ± 37 (a)	-24 ± 1 (b)

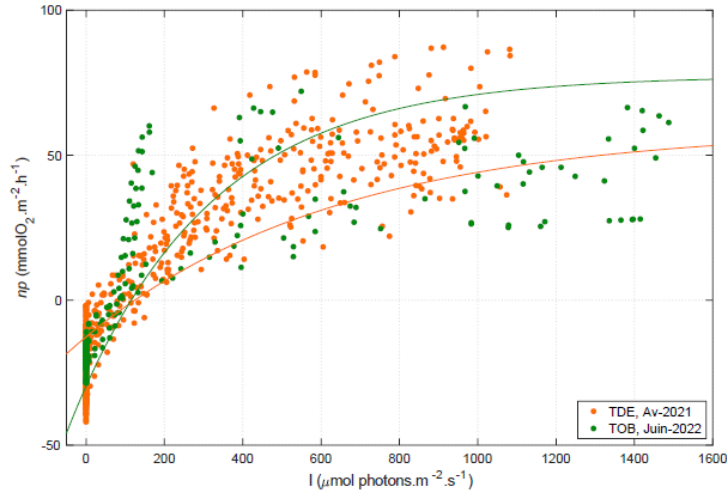


Figure 17. Courbes np – intensité lumineuse construites à partir des flux d’oxygène J_{O_2} pour les séries de données acquises en intersaison. TOB, Toboggan ; TDE, Trou d’Eau.

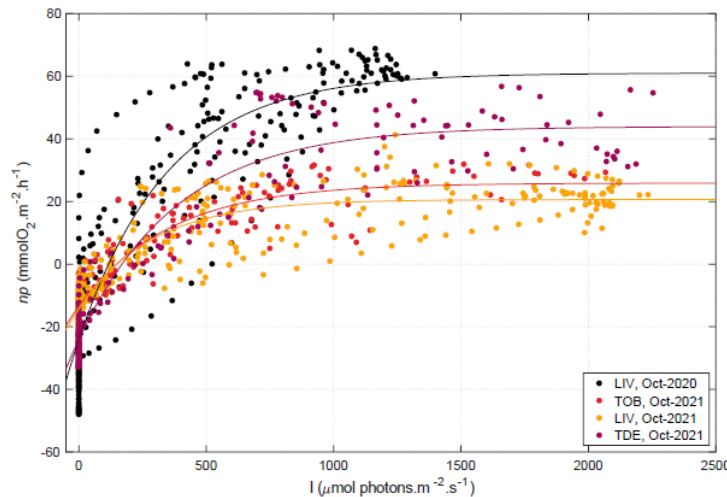


Figure 18. Courbes np – intensité lumineuse construites à partir des flux d’oxygène J_{O_2} pour les séries de données acquises en saison fraîche. TOB, Toboggan ; LIV, Livingstone ; TDE, Trou d’Eau.

Les valeurs de p_{max} obtenues dans le secteur de Trou d’Eau / Bodega diminuent régulièrement de la saison chaude à la saison fraîche. Les données acquises dans ce secteur semblent donc cohérentes. En effet, ces variations saisonnières sont en accord avec les modifications de la structure des communautés benthiques auxquelles on peut s’attendre au cours de l’année, la température, la luminosité et les apports terrestres liés à la pluviométrie favorisant en saison chaude le développement algal, et donc la production primaire.

Dans le secteur du Toboggan, les données acquises en saison chaude et en saison fraîche sont également cohérentes, avec des valeurs de p_{max} plus élevées en saison chaude qu’en saison fraîche. La valeur de p_{max} observée en inter-saison, similaire à la valeur observée en saison chaude, semble cependant anormalement élevée. En outre, on note à cette période une dispersion des données autour du modèle, peut-être liée à la déviation importante du

courant moyen par rapport à l'axe cross-shore (**Tableau 4**). Cette série de données semble donc sujette à caution.

Une forte dispersion des données autour du modèle est également observée à Livingstone quelle que soit la période d'échantillonnage, toujours en liaison avec une déviation importante du courant moyen par rapport à l'axe cross-shore (**Tableau 4**). L'absence de cohérence entre les données acquises en saisons fraîches 2020 et 2021 fait également douter de la faisabilité de la méthode dans ce secteur.

- **Bilans de calcification**

Différentes approches ont été testées, notamment une méthode proposée par Barnes (1983) et couplant les mesures d'oxygène dissous et de pH_T pour calculer des données d'alcalinité totale. L'objectif était d'obtenir des données de TA à haute fréquence sur le platier récifal (toutes les 15 minutes comme pour l'oxygène dissous et le pH_T), afin d'en déduire des valeurs de calcification nette avec une méthode similaire à la méthode utilisée pour les calculs de productivité (approche unidimensionnelle de Gruber et al. 2017).

Selon Barnes (1983), la calcification récifale peut être estimée à partir des changements de concentration en oxygène dissous et du pH_T de l'eau de mer s'écoulant à travers le récif si l'alcalinité totale initiale TA' et le quotient métabolique Q sont connus. La variation d'alcalinité totale ΔTA est alors estimée par :

$$-\Delta TA = \frac{\Delta O_2 \cdot Q + (K - K')TA' - K(A_B - A_H) + K'(A'_B - A'_H)}{\left(K - \frac{1}{2}\right)}$$
$$K = 10^{-\text{pH}} \cdot k_1 + k_1 \cdot k_2 + \frac{(10|-\text{pH})^2}{10^{-\text{pH}} \cdot k_1 + 2k_1 \cdot k_2}$$

avec ΔO_2 ($\text{mmol} \cdot \text{m}^{-3}$) le changement de concentration en oxygène dissous le long du transect, Q le quotient métabolique, TA l'alcalinité totale, A_B l'alcalinité des borates, A_H l'alcalinité des ions hydroxydes et k_1 , k_2 les constantes de dissociation de l'acide carbonique. Initialement, la méthode a été mise en œuvre en suivant la masse d'eau à l'aide d'un flotteur (méthode Lagrangienne), avec des prélèvements en amont (paramètres ci-dessus en prime) et en aval du transect parcouru par le flotteur (paramètres ci-dessus sans prime). Elle donne des résultats robustes (Barnes, 1983) et a été utilisée en milieu fermé, avec des chambres d'incubation benthiques (Schneider et al. 2009), et en milieu ouvert, pour le calcul de bilans de calcification *in situ* (Takeshita et al. 2016 ; Platz et al. 2020).

Dans le calcul proposé par Barnes (1983), l'expression $\Delta O_2 \cdot Q$ correspond à $-\Delta \text{CO}_2$, la quantité de carbone fixée durant la photosynthèse (ou produite par la respiration). Le quotient métabolique Q est donc défini comme le nombre de moles de CO_2 fixées durant la photosynthèse par mole d'oxygène dissous O_2 produite ou inversement par la respiration. Dans la littérature, ce quotient est habituellement pris égal à 1 (Takeshita et al. 2016), mais la méthode est très sensible à sa valeur (Bolden et al. 2019), et la première étape des calculs a donc été de le déterminer.

Pour cela, les données de TA disponibles (échantillons discrets) ont été couplées aux valeurs de pH_T mesurées au moment du prélèvement pour calculer la concentration totale en carbone inorganique dissous des échantillons (DIC, somme du CO_2 dissous et des deux espèces qui

en dérivent, les ions HCO_3^- et CO_3^{2-}). La calcification nette (égale à la moitié du flux d'alcalinité) et le flux de DIC ont été calculés selon l'approche unidimensionnelle de Gruber et al. (2017). Enfin, le flux de carbone lié à l'activité photosynthétique ou respiratoire J_{Corg} a été calculé comme la différence entre le flux de DIC et la calcification.

Le quotient métabolique Q a été calculé en reportant les valeurs de J_{Corg} en fonction du flux d'oxygène J_{O_2} (**Figure 19**). Il n'a pas été observé de différence significative entre les trois jeux de données pour lesquels on disposait d'un nombre d'échantillons suffisant pour calculer la pente de la droite de régression (Trou d'Eau en avril / mai et octobre 2021, et Toboggan en juin 2022). Le quotient métabolique obtenu à partir de l'ensemble des données est de 1.15 avec un intervalle de confiance à 95% de [1.00 ; 1.31], une valeur sans doute un peu élevée. Bien que des valeurs comprises entre 0.8 et 1.15 aient été rapportées dans la littérature (Kinsey 1985), le quotient métabolique n'est en effet pas significativement différent de l'unité dans les écosystèmes récifaux (Falter et al. 2012).

Différentes valeurs de Q comprises entre 1 et 1.3 ont donc été testées, mais aucune n'a permis d'obtenir des valeurs de TA cohérentes avec les valeurs mesurées (échantillons discrets), vraisemblablement en raison de variations journalières, ou fonction des conditions environnementales, du quotient métabolique (Bolden et al. 2019 ; Trentman et al. 2023).

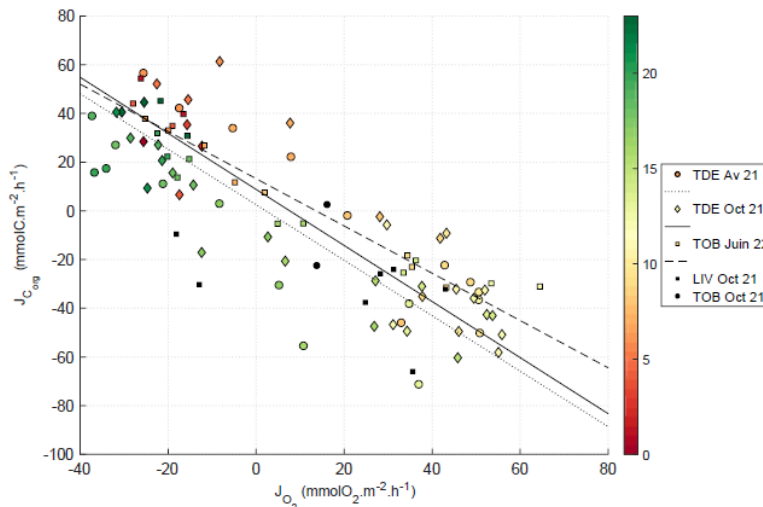


Figure 19. Régressions linéaires entre le flux d'oxygène dissous (J_{O_2}) et le flux de carbone lié à l'activité photosynthétique et à la respiration (J_{Corg}). TDE, Trou d'Eau ; TOB, Toboggan ; LIV, Livingstone. Le code couleur (à droite) représente l'heure de la journée.

Un autre mode de calcul basé sur les seules mesures de pH_T a été testé, en remplaçant, toujours dans la formule de Barnes (1983), $\Delta\text{O}_2 \cdot Q$ par une expression de $-\Delta\text{CO}_2$ en fonction de $-\Delta\text{TA}$. Le report de l'alcalinité totale en fonction de la concentration en carbone inorganique dissous (**Figure 20**) permet en effet d'évaluer le rapport entre la production nette (NCP) et la calcification nette (NCC) des communautés récifales (Suzuki et Kawahata 2003). Ce rapport est calculé à partir de la pente de la droite obtenue (m) selon :

$$\frac{NCC}{NCP} = \frac{m}{2 - m}$$

Il est sensiblement le même sur Toboggan en juin 2022, et Trou d'Eau en avril / mai et octobre 2021, et s'établit en moyenne à 0.24 ± 0.02 , une valeur relativement faible indiquant une dominance de l'activité photosynthétique (Muehlllehner et al. 2016).

Les résultats obtenus n'ont ici encore pas été très satisfaisants, des différences notables apparaissant entre les valeurs de TA calculées et mesurées.

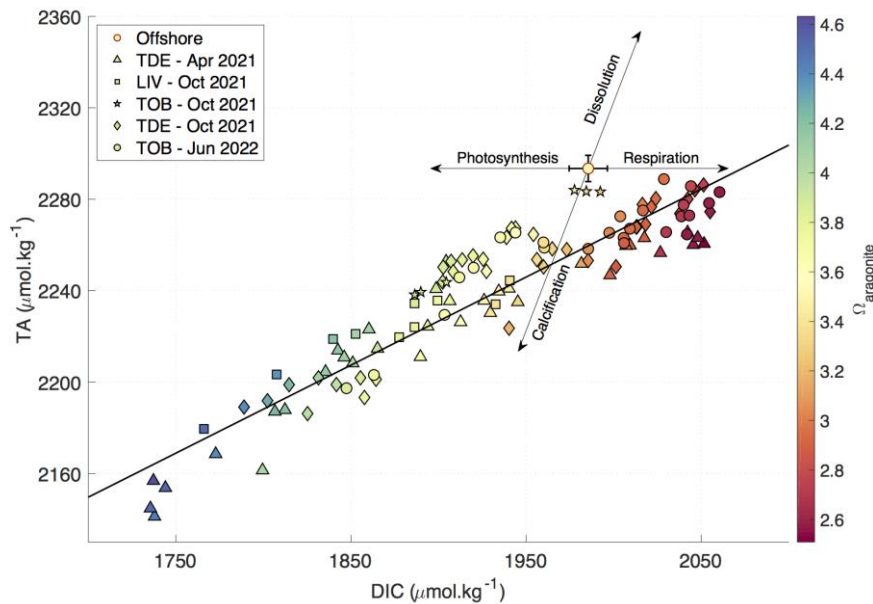


Figure 20. Alcalinité totale (TA) en fonction de la concentration en carbone inorganique dissous (DIC) pour les échantillons prélevés sur les platiers récifaux (TDE, Trou d'Eau ; LIV, Livingstone ; TOB, Toboggan) et dans le milieu océanique (moyenne \pm écart-type). Le code couleur (à droite) représente le taux de saturation en aragonite ($\Omega_{\text{aragonite}}$). Ce paramètre, calculé à partir du pH_T et de l'alcalinité totale, est un indicateur des conditions environnementales (d'autant plus défavorables à la calcification que $\Omega_{\text{aragonite}}$ est plus faible).

Finalement, la méthode la plus robuste pour estimer le bilan de calcification est sans doute d'utiliser la relation entre le TA et le DIC (**Figure 20**) selon la méthode de Suzuki et Kawahata (2003). Les bilans journaliers de productivité ont été établis en utilisant les paramètres des courbes np – intensité lumineuse construites à partir des flux d'oxygène J_{O_2} (**Tableau 6**), selon la méthodologie exposée au paragraphe 2.2 (bilans métaboliques journaliers). Seules cinq séries de données ont été utilisées, en excluant les quatre séries de données peu satisfaisantes pour lesquelles une déviation importante du courant moyen par rapport à l'axe cross-shore a été observée. Le quotient métabolique permettant de calculer les flux de carbone organique J_{Corg} à partir des flux d'oxygène J_{O_2} a été considéré égal à l'unité.

Dans le secteur de Trou d'Eau / Bodega, le bilan des carbonates à l'échelle journalière a été calculé pour la saison intermédiaire et la saison fraîche comme 24% de la production brute (**Tableau 7**). Cette valeur est très proche de la valeur précédemment établie en saison fraîche

pour le même secteur ($22 \pm 4\%$; Chauvin 2013). La même valeur a été utilisée pour le secteur de Toboggan en saison fraîche. En effet, même si la série de données acquise sur ce site en juin 2022 ne s'est pas révélée utilisable, la forte valeur de production brute calculée à cette période reflète plus vraisemblablement une mauvaise estimation du temps de résidence des eaux sur le platier récifal qu'une forte contribution algale, peu probable à cette époque de l'année. Les résultats obtenus dans le secteur de Trou d'Eau / Bodega suggèrent par ailleurs qu'il est possible d'extrapoler la valeur obtenue en saison intermédiaire à la saison fraîche.

Tableau 7. Bilans métaboliques journaliers dans les secteurs de Toboggan et Trou d'Eau / Bodega. Pg production brute, R respiration journalière, Pn production en excès, G calcification nette journalière.

Site	Date	Pg mmol O ₂ .m ⁻² .j ⁻¹	R mmol O ₂ .m ⁻² .j ⁻¹	Pn mmol O ₂ .m ⁻² .j ⁻¹	G mmol CaCO ₃ .m ⁻² .j ⁻¹
Toboggan	31 Jan.- 03 Fév. 2020	569 ± 7	-302 ± 9	267 ± 7	104*
	11 Oct.- 14 Oct. 2021	334 ± 8	-324 ± 10	9 ± 8	80
Trou d'Eau / Bodega	13 Mars - 16 Mars 2020	885 ± 13	-656 ± 19	230 ± 14	202*
	27 Avr.- 13 Mai 2021	634 ± 9	-551 ± 12	83 ± 9	152
	19 Oct.- 21 Oct. 2021	658 ± 15	-566 ± 22	91 ± 15	158

* estimé sur la base d'un rapport entre la saison chaude et la saison fraîche égal à 1.3

En revanche, en l'absence de données exhaustives de TA et de DIC en saison chaude, on ne peut estimer le bilan des carbonates qu'à partir des données extraites de la littérature quant aux variations saisonnières des bilans métaboliques journaliers. Celles-ci montrent que le rapport entre les valeurs établies pour la saison chaude et la saison fraîche s'établit en moyenne à 1.6 pour la production brute et 1.3 pour la calcification (Chauvin 2013).

Dans le secteur de Trou d'Eau / Bodega, une calcification nette de 210 mmol CaCO₃.m⁻².j⁻¹ pour une production brute de l'ordre de 1000 mmol O₂.m⁻².j⁻¹ en saison chaude a précédemment été rapportée (Cuet et al. 2011), en accord avec les données présentées dans le **tableau 7** pour mars 2020.

3.3. Conclusion

Seuls deux secteurs du platier récifal de Saint-Gilles La Saline se prêtent à la mesure des bilans métaboliques à l'aide de la méthode Eulérienne, le secteur de Toboggan, au nord de la passe de l'Ermitage et le secteur de Trou d'Eau / Bodega, dans la partie sud du récif de La Saline. La direction du courant détermine la qualité de la donnée, une déviation trop importante du courant moyen par rapport à l'axe cross-shore se traduisant par des bilans métaboliques incohérents.

Des bilans de productivité ont pu être établis sur les deux secteurs, en saison chaude et en saison fraîche. A l'échelle annuelle (moyenne des valeurs acquises en saison chaude et en saison fraîche), l'activité photosynthétique (production brute) représente environ 450 mmol.m⁻².j⁻¹, soit 2 kg.m⁻².an⁻¹, de carbone fixé sous forme de matière organique par la production primaire à Toboggan. L'activité photosynthétique est plus importante dans le secteur de Trou d'Eau / Bodega, avec une valeur moyenne de 766 mmol.m⁻².j⁻¹, soit 3.4 kg.m⁻².an⁻¹ de carbone

fixé. Ces valeurs sont comprises dans la gamme de valeurs rapportée pour les platiers récifaux (de 150 à 1580 $\text{mmol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{j}^{-1}$; Falter et al. 2013), avec une valeur un peu inférieure à la médiane (640 $\text{mmol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{j}^{-1}$; Falter et al. 2013) à Toboggan, et un peu supérieure à la médiane dans le secteur de Trou d'Eau / Bodega. Les variations saisonnières sont marquées, avec une activité photosynthétique plus importante en saison chaude qu'en saison fraîche, qui se traduit par une accumulation de matière organique (forte production en excès) vraisemblablement liée au développement algal à cette période de l'année.

Une méthode de calcul de l'alcalinité totale (paramètre permettant d'établir le bilan des carbonates) basée sur l'utilisation conjointe des mesures de pH_T et de concentrations en oxygène dissous effectuées à haute fréquence sur le platier récifal a été testée. Elle n'a pas été probante, et les mesures effectuées en début de projet, notamment au cours de la saison chaude, n'ont pu être exploitées. L'acquisition d'un échantillonneur autonome programmable en cours de projet a par la suite permis de collecter un grand nombre d'échantillons pour la mesure de l'alcalinité totale au laboratoire. Une relation entre l'activité photosynthétique et le bilan des carbonates a ainsi pu être déterminée pour la saison fraîche. Le bilan des carbonates en saison chaude a été calculé sur la base des variations saisonnières rapportées dans la littérature. Il est cohérent avec une estimation antérieure dans le secteur de Trou d'Eau / Bodega, mais demande évidemment à être confirmé.

En l'état des données, la précipitation de carbonate de calcium représente 92 $\text{mmol CaCO}_3\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{j}^{-1}$, soit 3.4 $\text{kg CaCO}_3\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{an}^{-1}$ à Toboggan à l'échelle annuelle (moyenne de la saison chaude et de la saison fraîche). La précipitation de CaCO_3 est plus importante dans le secteur de Trou d'Eau / Bodega, avec une valeur moyenne de 179 $\text{mmol CaCO}_3\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{j}^{-1}$, soit environ 6.5 $\text{kg CaCO}_3\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{an}^{-1}$. Ces valeurs sont comprises dans la gamme de valeurs rapportée pour les platiers récifaux (de 20 à 250 $\text{mmol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{j}^{-1}$; Falter et al. 2013), avec une valeur inférieure à la médiane (130 $\text{mmol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{j}^{-1}$; Falter et al. 2013) à Toboggan, et supérieure à la médiane dans le secteur de Trou d'Eau / Bodega.

3.4. Production scientifique

L'analyse des conditions hydrodynamiques a fait l'objet d'un mémoire de Master 2 :
Lagoutte E. (2021) Faisabilité d'une nouvelle approche méthodologique pour l'étude du bilan des carbonates en milieu récifal. Mémoire de Master 2 Sciences de la Mer, Université Sorbonne Université.

Une publication est en phase de finalisation, et sera soumise prochainement :
Elsa Lagoutte, Aline Tribollet, Sophie Bureau, Emmanuel Cordier, Perrine Mangion, Anne Chauvin, Pascal Mouquet, Lionel Bigot, Patrick Frouin, Pascale Cuet. Biogeochemical evidence of flow re-entrainment on the main fringing reef of La Reunion Island. *Marine Chemistry*.

Une deuxième publication est en cours d'écriture :
Elsa Lagoutte, Aline Tribollet, Pascale Cuet. Impact of gas exchange parametrization on daily metabolic budgets of a shallow coral reef. *Coral Reefs*.



Références bibliographiques

- Andersson, A. J., & Gledhill, D. (2013). Ocean acidification and coral reefs: effects on breakdown, dissolution, and net ecosystem calcification. *Annual review of marine science*, 5, 321-348.
- Barnes, D. J. (1983). Profiling coral reef productivity and calcification using pH and oxygen electrodes. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 66(2), 149-161.
- Bolden, I. W., Sachs, J. P., & Gagnon, A. C. (2019). Temporally-variable productivity quotients on a coral atoll: implications for estimates of reef metabolism. *Marine Chemistry*, 217, 103707.
- Chauvin, A. (2013). Photosynthèse et calcification sur les récifs coralliens face au changement global et aux impacts anthropiques : du corail hermatypique *Acropora muricata* à l'écosystème. Thèse Université de La Réunion.
- Cuet, P., Atkinson, M. J., Blanchot, J., Casareto, B. E., Cordier, E., Falter, J., ... & Tourrand, C. (2011). CNP budgets of a coral-dominated fringing reef at La Réunion, France: coupling of oceanic phosphate and groundwater nitrate. *Coral Reefs*, 30, 45-55.
- Clavier, J., Chauvaud, L., Cuet, P., Esbelin, C., Frouin, P., Taddei, D., & Thouzeau, G. (2008). Diel variation of benthic respiration in a coral reef sediment (Reunion Island, Indian Ocean). *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 76(2), 369-377.
- Cordier, E. (2007). Dynamique hydrosédimentaire du récif frangeant de l'Hermitage/La Saline (La Réunion): processus physiques et flux sédimentaires. Thèse Université de La Réunion.
- Falter, J.L., Lowe, R.J., Atkinson, M.J., Monismith, S.G., Schar, D.W. (2008). Continuous measurements of net production over a shallow reef community using a modified Eulerian approach. *J. Geophys. Res.* 113, C07035.
- Falter, J. L., R. J. Lowe, M. J. Atkinson, Cuet, P. (2012). Seasonal coupling and de-coupling of net calcification rates from coral reef metabolism and carbonate chemistry at Ningaloo Reef, Western Australia, *J. Geophys. Res.*, 117, C05003.
- Falter, J. L., Lowe, R. J., Zhang, Z., & McCulloch, M. (2013). Physical and biological controls on the carbonate chemistry of coral reef waters: effects of metabolism, wave forcing, sea level, and geomorphology. *PloS one*, 8(1), e53303.
- Gruber, R. K., Lowe, R. J., & Falter, J. L. (2017). Metabolism of a tide-dominated reef platform subject to extreme diel temperature and oxygen variations. *Limnology and Oceanography*, 62(4), 1701-1717.
- Kinsey, D. W. (1985). Metabolism, calcification and carbon production: 1 systems level studies, in *Proceedings of the Fifth International Coral Reef Congress*, vol. 4, pp. 505–526, Int. Assoc. of Biol. Oceanogr., Tahiti, French Polynesia.
- Mahabot, M. M. (2016). Suivi morphodynamique des plages récifales de La Réunion en contexte d'observatoire. Thèse Université de La Réunion.
- Muehlehner, N., Langdon, C., Venti, A., & Kadko, D. (2016). Dynamics of carbonate chemistry, production, and calcification of the Florida Reef Tract (2009–2010): Evidence for seasonal dissolution. *Global Biogeochemical Cycles*, 30(5), 661-688.
- Platz, M. C., Takeshita, Y., Bartels, E., & Arias, M. E. (2020). Evaluating the potential for autonomous measurements of net community production and calcification as a tool for monitoring coral restoration. *Ecological Engineering*, 158, 106042.
- Schneider, K., Levy, O., Dubinsky, Z., & Erez, J. (2009). In situ diel cycles of photosynthesis and calcification in hermatypic corals. *Limnology and Oceanography*, 54(6), 1995-2002.



- Suzuki, A., & Kawahata, H. (2003). Carbon budget of coral reef systems: an overview of observations in fringing reefs, barrier reefs and atolls in the Indo-Pacific regions. *Tellus B: Chemical and Physical Meteorology*, 55(2), 428-444.
- Takeshita, Y., McGillis, W., Briggs, E. M., Carter, A. L., Donham, E. M., Martz, T. R., ... & Smith, J. E. (2016). Assessment of net community production and calcification of a coral reef using a boundary layer approach. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 121(8), 5655-5671.
- Trentman, M. T., Hall Jr, R. O., & Valett, H. M. (2023). Exploring the mismatch between the theory and application of photosynthetic quotients in aquatic ecosystems. *Limnology and Oceanography Letters*.
- Wanninkhof, R., Asher, W. E., Ho, D. T., Sweeney, C., & McGillis, W. R. (2009). Advances in quantifying air-sea gas exchange and environmental forcing. *Annual review of marine science*, 1, 213-244.

L3.3.2-B : Variabilité spatiale et temporelle du bilan des carbonates à l'échelle du site pilote de l'Hermitage/La Saline. (IUEM, Espace-Dev, ENTROPIE)

ACTION 3: Aléas Littoraux

O3.3 Littoraux coralliens : bilan des carbonates et budgets sédimentaires

O3.3.2 Bilan des carbonates

1. Contexte et objectifs

Au niveau de la plateforme récifale, le bilan des carbonates est fortement influencé par la présence et l'activité des communautés biologiques benthiques se développant sur le substrat. La meilleure connaissance de leur répartition spatiale et dynamique temporelle permet d'aider à l'établissement de ce bilan en identifiant les potentielles zones de production ou de dissolution.

Plusieurs analyses ont été réalisées en fonction de la localisation (platier ou dépression d'arrière récif), et en fonction des types biologiques principaux (corallien ou algal).

2. Suivi de la couverture corallienne entre 2015 et 2022, contribution positive au bilan des carbonates

2.1. Matériel et méthode

Les données utilisées sont les cartographies des recouvrements coralliens estimés à partir des images hyperspectrales 2015 (projet Hyscores)¹⁰, et des données satellites acquises en 2022 (cf. livrable [L3.3.1](#) pour les dates et caractéristiques).

Pour une meilleure comparaison entre les dates, le taux de corail issu de la donnée hyperspectrale, initialement à la résolution spatiale de 40 cm, a été rééchantillonné à 1,2 m la résolution de la donnée satellite Pléiades Neo. Les valeurs des pixels ont ensuite été moyennées sur une surface de 2500 m² (filtre de convolution dans une matrice de 41 x 41 pixels - 50 x 50 m), permettant un lissage des données pour une meilleure représentation de la donnée à l'échelle de la masse d'eau récifale complète, et l'atténuation des incertitudes de localisation entre les deux jeux de données dus à l'acquisition / orthorectification des images.

Deux seuils ont ensuite été appliqués sur les taux de corail pour estimer leur contribution positive faible ou forte au bilan des carbonates :

¹⁰ Nature des fonds : taux de couvertures en sable, algues, corail, herbier et composition colorée (Sable/Algues/Corail/Herbiers) des plateformes récifales réunionnaises en 2015. Ifremer - Délégation Océan Indien. <http://dx.doi.org/10.12770/a9bf52c4-1d31-4a67-944c-c4c6c9e4e0a5>

- au-dessus de 5% de corail pour la faible contribution. En dessous de ce seuil, les valeurs de recouvrement corallien estimées par télédétection sont assez peu fiables et doivent être considérées avec précaution, elles ne sont donc pas retenues pour les analyses.
- le seuil de 30% pour la forte contribution. Cette valeur correspond à celle qui avait été retenue dans le projet Hyscores pour définir les *entités coralliennes*, objets surfaciques qui pouvaient être considérés comme des coraux purs et utilisés pour la détection de changement lors des analyses diachroniques. Sur cette classe, la contribution corallienne peut être considérée comme maximale. Pour indication, d'après la littérature, Andréfouët et Payri (2000)¹¹ estiment que le substrat corallien (recouvrement 100%) produit 17,1 kg de CaCO₃ par m² et par an.

2.2. Résultats

Les données hyperspectrales historiques 2015 et les images satellites Pléiades Neo 2022 ont permis d'établir une carte de la contribution corallienne positive au bilan des carbonates ([Figure](#)).

Ces deux cartes montrent des résultats proches en 2015 et 2022, avec une contribution relativement hétérogène du nord au sud, et de la plage vers le front récifal. Les contributions les plus importantes se situent dans les secteurs de plus fortes couvertures coralliennes du platier récifal interne et au niveau des colonies coralliennes isolées dans la DAR (notamment dans le secteur sud au niveau du Trou d'eau). La contribution est globalement assez faible au nord de la Passe, plus importante au sud, en accord avec les valeurs de bilan des carbonates mesurées in-situ (3,4 kg CaCO₃ / m² / an pour le site de Toboggan avec une couverture corallienne moyenne de 15% et 6,5 kg CaCO₃ / m² / an pour le site de Bodega / Trou d'Eau avec une couverture corallienne moyenne de 34 %).

L'analyse diachronique montre que la contribution est globalement assez stable dans le temps (entre 2015 et 2022), avec localement des zones qui subissent des changements plus importants :

- au nord et à proximité immédiate au sud de la Passe, la quasi-totalité des secteurs qui étaient fortement contributeurs sont reclassés en faible contribution, en lien avec une baisse de la couverture corallienne moyenne. Dans toute la zone bordant la Passe, les contributions se réduisent pratiquement à zéro avec la disparition en 2022 de nombreuses zones initialement classées en faible contribution en 2015.
- vers le sud dans le secteur de La Saline, à partir des points Copacabana jusqu'aux points Bodega à Trou d'eau, la tendance de la contribution corallienne est inversée (stable ou en augmentation), en lien avec le développement récent de colonies coralliennes dans la dépression d'arrière récif.

¹¹ Andréfouët, S., & Payri, C. (2000). **Scaling-up carbon and carbonate metabolism of coral reefs using in-situ data and remote sensing.** *Coral Reefs*, 19(3), 259–269. <https://doi.org/10.1007/s003380000117>



Ces résultats sur l'évolution temporelle, même si ils montrent des résultats intéressants sur les grandes tendances, sont à considérer avec précaution en raison de méthodologies différentes employées pour déterminer les couvertures coralliennes en 2015 et 2022. Notamment, sur les résultats produits à partir de l'image PNEO, la classe de faible contribution positive des coraux au bilan des carbonates est probablement légèrement surévaluée par rapport à la donnée hyperspectrale. En effet, en raison d'une méthodologie différente (estimation des recouvrements coralliens uniquement à partir d'un indice de brillance, par opposition à la méthode exploitant la donnée hyperspectrale de démelangeage spectral plus complexe), les algues, ayant aussi une activité photosynthétique, abaissent l'intensité du signal lumineux réfléchi par le substrat, et contribuent ainsi à une surélévation des taux de corail détectés dans les faibles taux de recouvrements (indice de brillance faible et proche). Pour réduire cet effet, l'image satellite utilisée a été choisie en période hivernale (début juillet) lorsque la couverture algale est au minimum, limitant ainsi leur contribution à l'indice. Dans les zones de forte abondance d'algues de type corallinacées (algue calcaire rouge encroûtante), qui sont moins sujettes à des cycles de développement saisonniers, les couvertures du substrat sont beaucoup plus stables, et cet effet cyclique sur le signal de télédétection est beaucoup moins sensible. Leur contribution, même faible, est constante quelque soit la date des images. C'est notamment le cas au nord de la passe de l'Ermitage, où les algues corallinacées du genre *Mesophyllum* forment des massifs compacts occupant des surfaces importantes sur les platiers.

L'impact négatif sur la qualité des résultats par la surreprésentation des algues de type corallinacées avec la méthode satellite, est à nuancer car on sait que ces algues calcaires contribuent aussi positivement au bilan des carbonates, même si elle est moindre que les coraux. Leur prise en compte dans ce calcul semble donc logique ici pour établir de manière exhaustive le bilan des carbonates sur les platiers.

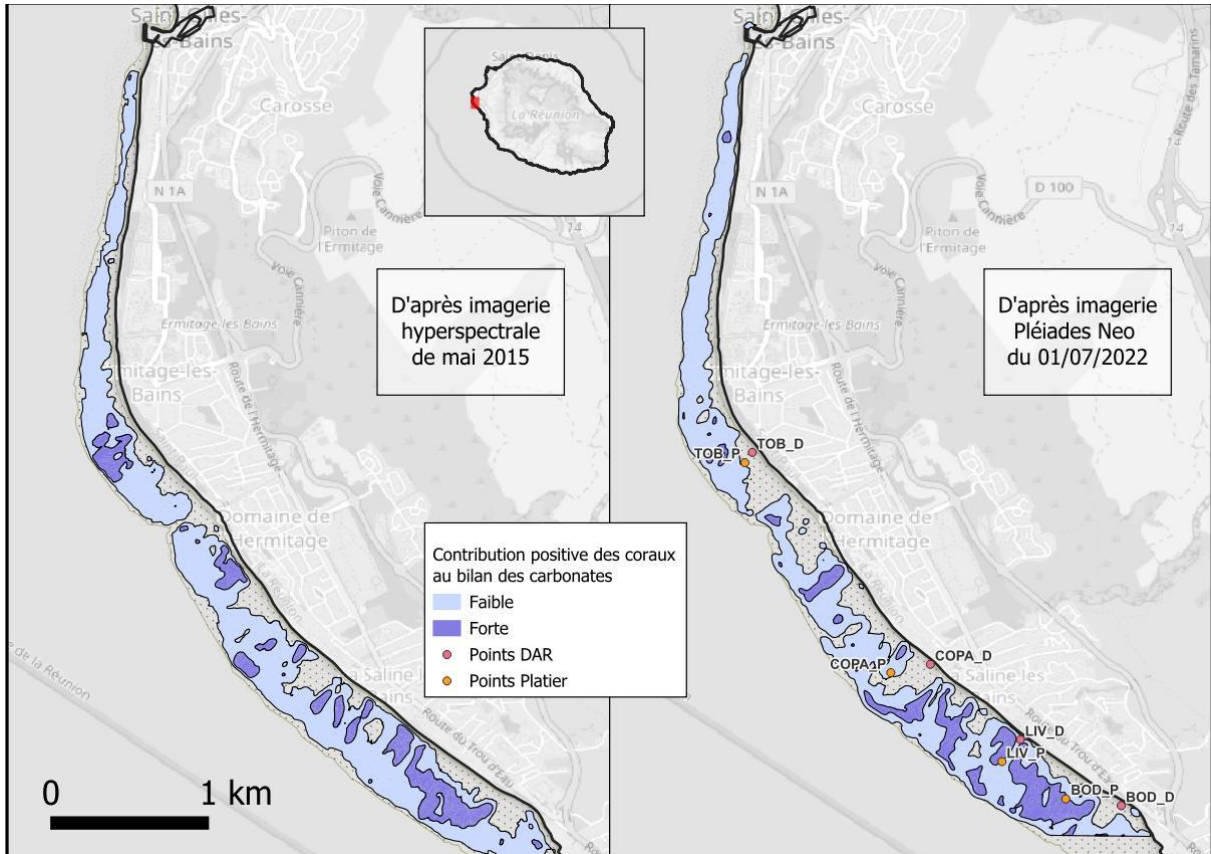


Figure. Contribution positive des coraux au bilan des carbonates sur la plateforme récifale de l'Ermitage. À gauche à partir des données hyperspectrales de 2015, à droite à partir des données satellites Pléiades Néo 2022.

3. Cartographie des algues en 2022, contribution potentielle à la dissolution des sédiments

Un facteur favorisant la dissolution des sédiments semble être le CO₂ émis lors de la consommation de matière organique (respiration). Or, en saison fraîche, la respiration et la dissolution du CaCO₃ sont d'autant plus élevées que l'activité photosynthétique est plus importante. A cette saison, l'intensité de la dissolution pourrait donc être reliée à l'abondance des producteurs primaires, et donc, vraisemblablement, au niveau d'eutrophisation du milieu.

3.1. Matériel et méthode

Pour évaluer la quantité d'algues présentes au niveau du substrat meuble de la dépression d'arrière récif, l'image Pléiades Neo du 1er juillet 2022 a été utilisée. Cette image est la plus récente, et possède une résolution spatiale plus fine que les images Pléiades (1,2 m vs 2 m). Cette différence de résolution permet une meilleure discrimination / exclusion lors du traitement des colonies coralliennes pouvant influencer les analyses, notamment dans la dépression d'arrière récif où elles sont isolées et facilement prises en compte.

L'indice de brillance bleu-vert (BIBG) a été calculé sur tous les pixels de l'image satellite, et considéré comme proxy des peuplements biologiques recouvrant le benthos (coraux / algues). Le substrat calcaire sous-jacent étant très clair (sable et débris coralliens), plus cet indice de brillance est faible, plus la couverture biologique est importante (cf. partie [méthodologique](#) du livrable L3.3.1).

Pour restreindre l'analyse à aux algues de la DAR, deux masques sont été appliqués aux données :

- les coraux ont été exclus, masqués en appliquant un seuillage sur l'indice de brillance, ceux-ci étant beaucoup plus sombres que les algues de la DAR (turf sur débris, microphytobenthos)
- la DAR a été masquée avec le masque platier - DAR bathymétrique du projet Hyscores, en ne considérant que les points les plus profonds de la plateforme récifale.

Il en résulte que les pixels non masqués dont la brillance est la plus faible sont alors considérés comme étant fortement couverts par les algues, et les pixels les plus brillants sont considérés comme étant du sable pur dépourvu d'algues. Pour une meilleure analyse, ces résultats sont synthétisés le long du linéaire côtier tous les 20m dans les polygones transversaux (présence algale moyenne) et les polygones (quantité algale totale).

3.2. Résultats

La carte de répartition des algues dans le substrat meuble de la dépression d'arrière récif est présentée dans la [Figure](#) ci-dessous. Cette carte de 2022 montre des résultats assez similaires à ceux obtenus à partir des données hyperspectrales 2015 : plus d'algues aux deux extrémités nord et sud, la proportion d'algues est relativement plus faible juste au nord de la Passe de l'Ermitage au niveau du site de Toboggan, et au sud de la passe dans le secteur de Copacabana. La quantité algale totale est plus importante dans le secteur de Trou d'eau (Copacabana - Livingstone), du fait de couvertures et d'une surface de DAR plus importantes.

C'est dans ce secteur que l'accumulation de matière organique issue de la production primaire dans les sédiments pourrait favoriser leur dissolution, plus particulièrement en saison fraîche.

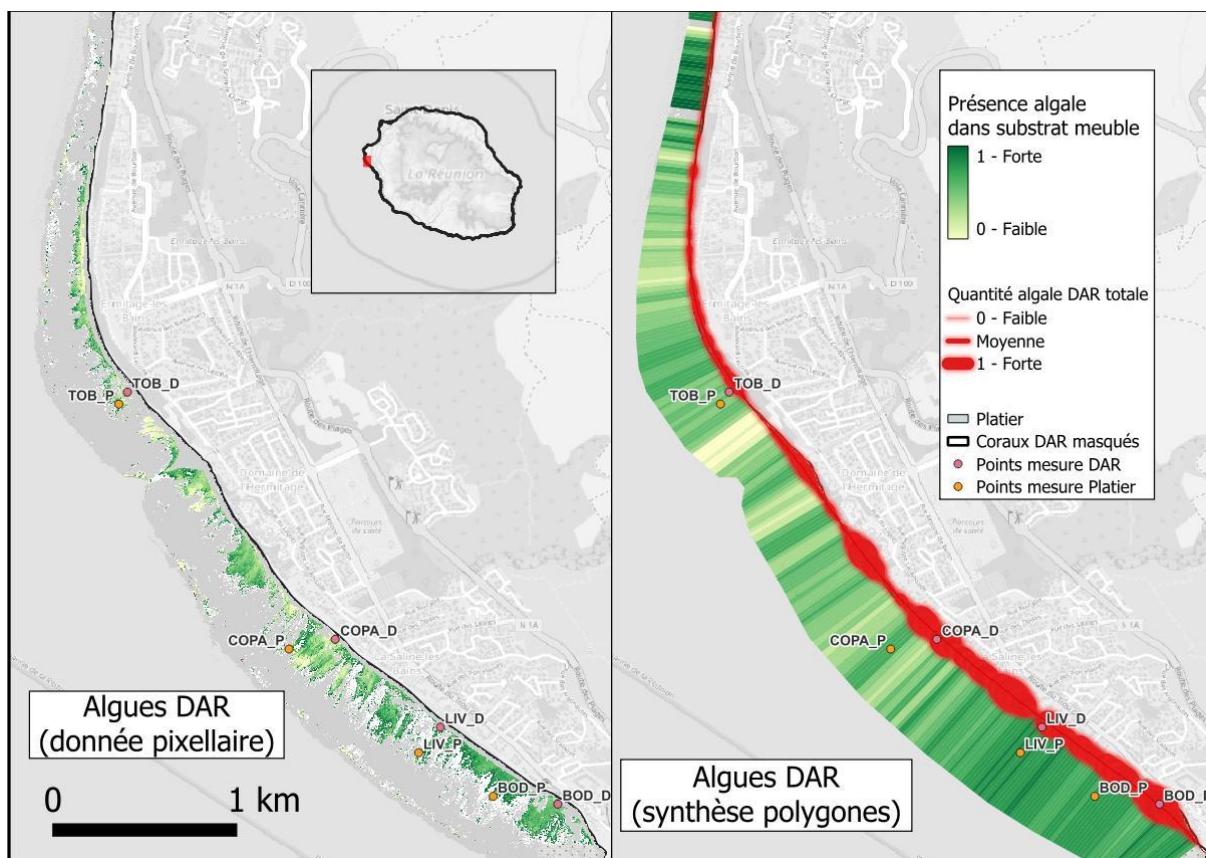


Figure. Présence algale dans la dépression d'arrière récif. A gauche, résultat pixellaire du traitement d'image Pléiades Neo. A droite, la synthèse dans les polygones permet d'identifier les secteurs où le substrat sableux de la DAR est le plus enalgué (dégradé vert) et où la quantité d'algues totale est la plus importante (linéaire rouge de largeur proportionnelle).

4. Variation saisonnière de la couverture algale (2022)

Le but de cette partie est d'améliorer les connaissances sur la répartition des algues sur la plateforme récifale, en identifiant les zones subissant au cours de l'année des variations temporelles saisonnières de recouvrement.

Sur les plateformes récifales, les algues au sens large considérées dans cette partie (macroalgues, microalgues de type turf, composant du microphytobenthos avec les cyanobactéries et autres microorganismes), sont des organismes photosynthétiques à développement rapide, qui peuvent proliférer en quelques semaines lorsque les conditions météorologiques sont favorables, recouvrant alors rapidement le substrat sous-jacent et pouvant occuper des surfaces importantes. A l'inverse, ces algues molles dont la structure est fragile, sont faiblement fixées au substrat, sont donc rapidement décrochées, emportées et

dégradées lorsque les conditions sont défavorables, pouvant alors libérer d'importantes surfaces de substrat.

A La Réunion, l'alternance entre la saison estivale, favorable à leur développement, et la saison hivernale qui leur est défavorable, conduit à de fortes et rapides variations dans les recouvrements algaux du benthos de la plateforme récifale, sur des surfaces et proportions qui peuvent être localement importantes.

Les données de télédétection permettent de réaliser des inventaires rapides et exhaustifs à des périodes de développement clefs (hiver / été australs). Des analyses diachroniques régulières de ces données permettent de mettre en évidence et de suivre les évolutions dans le temps, y compris à la haute fréquence temporelle des cycles saisonniers.

4.1. Matériel et méthode

Deux images satellites ont été acquises en 2022 sur un intervalle de temps court (2 mois), à la transition entre les périodes estivale (décembre - mars) chaude et humide, favorable aux développements algaux, et hivernale (juillet - septembre) plus froide et sèche soumise aux houles australes favorisant le renouvellement des masses d'eau récifales et le nettoyage des fonds. Ce court laps de temps entre les images a permis de cibler principalement les changements de recouvrement rapides liés aux développements algaux de la plateforme récifale, les recouvrements coralliens variant eux peu et plus lentement (en l'absence d'événement exceptionnel de type blanchissement ou décote marine).

- L'image Pléiades (PL) du 26/04/2022, acquise en fin de période estivale. Sur cette image, les algues de la plateforme sont à leur maximum de développement et les recouvrements sont importants. Cette image a été acquise par l'intermédiaire de la plateforme [Dinamis](#), et a bénéficié des traitements [Kalidéos](#) (traitements géométriques et radiométriques). Hauteur d'eau lors de l'acquisition : 0,8 m (données [Shom](#)).
- L'image Pléiades Neo (PNEO) du 01/07/2022, acquise quelques jours après le passage du premier front froid de la saison hivernale sur La Réunion, associé à une forte houle australe de sud-ouest (hauteur significative supérieure à 5,5 m), et ayant nettoyé le substrat de la plateforme récifale de tous les développements algaux estivaux. Cette image a été acquise dans le cadre du [Pléiades Neo Challenge](#). Hauteur d'eau lors de l'acquisition : 0,3 m (données [Shom](#)).

Les indices de brillance bleu-vert (BIBG) ont été calculés pour tous les pixels des 2 images satellites, et considérés comme proxy des peuplements biologiques recouvrant le benthos (coraux / algues). Le substrat calcaire sous-jacent étant très clair (sable et débris coralliens), plus cet indice de brillance est faible, plus la couverture biologique est importante (cf. partie [méthodologique](#) du livrable L3.3.1). Le différentiel entre deux dates permet ainsi de mettre en évidence les variations saisonnières temporelles.

Avant de réaliser le différentiel entre les deux dates et pour avoir des résultats cohérents, il est nécessaire de réaliser plusieurs opérations d'homogénéisation sur les données :

- le sous échantillonnage de l'image PNEO (1,2 m) à la résolution de la donnée PL (2 m). Il permet de pouvoir réaliser l'opération de différence pixel à pixel entre les deux jeux de données.
- le masquage des pixels hors de la zone d'étude (limites de la plateforme récifale), et des zones de déferlement (altération du signal de télédétection par la présence de bulles d'air en surface et dans la colonne d'eau), pour éviter que l'opération de différence ne fasse apparaître des artéfacts dans ces zones. L'opération de détournement des masques est réalisée manuellement par un opérateur expérimenté pour un gain de temps et une meilleure interprétation (limites de zones de déferlement souvent diffuses).
- Le lissage spatial des indices de brillance, par l'utilisation d'un filtre de convolution permettant de calculer la valeur médiane dans une zone de 2500 m² (25 x 25 pixels - 50 x 50 m) autour de chaque pixel, permet d'atténuer les erreurs de localisation entre les deux images et les différences de valeurs qui pourraient en résulter. Pour rappel les deux images n'ont pas été orthorectifiées avec la même chaîne de traitement (Kalideos / CNES pour l'image PL et Airbus pour l'image PNEO), pouvant conduire à des décalages spatiaux de quelques pixels.

Les images sont ensuite différenciées entre les deux dates, mettant en évidence pour chaque pixel un accroissement (baisse de l'indice de brillance) ou une baisse (augmentation de la brillance) de la couverture algale. Pour l'interprétation des résultats, les données sur la plateforme récifale sont ensuite masquées sur le platier ou dans la dépression d'arrière récif avec le masque issu de la donnée hyperspectrale.

4.2. Résultats

La différence entre les indices de brillance bleu-vert calculés sur les images satellites Pléiades et Pléiades Neo permet de localiser les zones où les variations de recouvrement algal sont les plus importantes entre les périodes estivale et hivernale de cette année 2022 ([Figure ci-dessous](#)).

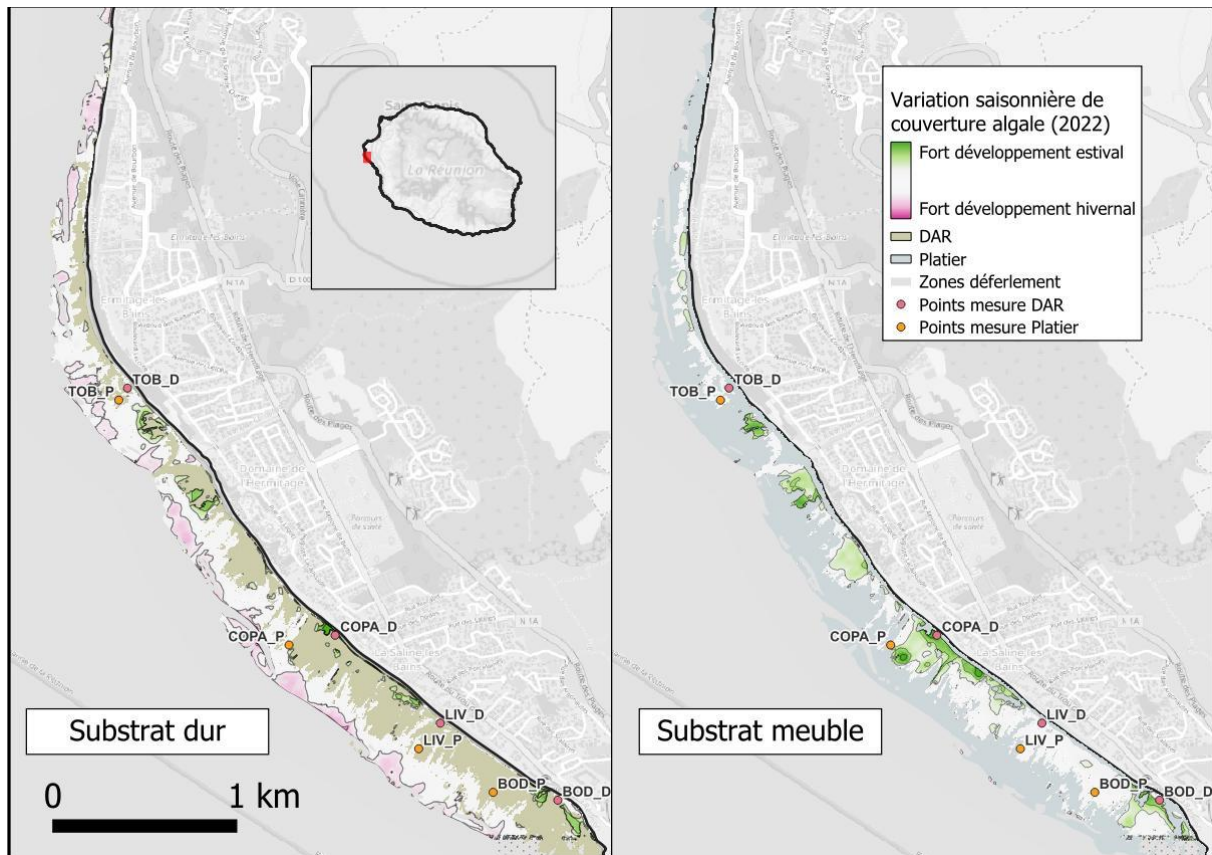


Figure. Variations saisonnières de la couverture algale au sein de la plateforme récifale de l'Ermitage, en fonction du type de substrat, dur sur le platier récifal à gauche et meuble dans la dépression d'arrière récif à droite. Données estimées par imagerie satellite Pléiades et Pléiades Néo pour l'année 2022.

Le premier constat est qu'il n'y a pas de variation sensible de brillance dans les zones où les recouvrements coralliens sont importants (cf. comparaison avec les figures des [couvertures coralliennes](#), ou leur [contribution positive au bilan des carbonates](#)), validant l'hypothèse initiale de stabilité temporelle saisonnière des couvertures coralliennes (en l'absence d'événement majeur impactant), et que cette méthode est adaptée au suivi à haute fréquence des couvertures algales, plus volatiles au cours de l'année.

L'analyse de ces résultats montre des comportements différents en fonction des types de fond et des compartiments géomorphologiques. Ces compartiments ont été déterminés à l'aide du masque Platier / DAR du projet Hyscores, qui se base sur un critère bathymétrique, et supposant que sur la plateforme récifale les substrats durs (constitués par le platier, les massifs coralliens et le beach rock de haut de plage), se situent à des niveaux bathymétriques supérieurs à ceux de la zone de dépression d'arrière récif meuble composée principalement de sable et débris coralliens.

Sur le substrat dur

On peut noter plusieurs comportements différents en fonction de la localisation sur la plateforme :

- au niveau du platier corallien externe (à proximité de la zone de déferlement et du front récifal), on note un léger abaissement de l'indice de brillance en hiver par rapport à l'été (coloration rosée sur la [figure](#) à droite). La couverture algale est donc plus dense et visible sur les images. Plusieurs hypothèses peuvent expliquer ce résultat, par exemple le nettoyage du platier des débris coralliens et autres sédiments fins qui auraient pu sédimenter et se déposer durant la saison chaude, en l'absence de houle et courants significatifs. La saison hivernale froide n'étant pas favorable au développement des algues, il semble peu probable qu'un développement algal important soit intervenu au cours de la période d'étude relativement courte de deux mois entre les images, et juste après un épisode de forte houle australe.
- au niveau du platier corallien interne (contigu à la DAR), on note deux zones de part de d'autre de la Passe de l'Ermitage où la couverture algale a fortement baissé en hiver.
 - Au nord de la Passe, dans une petite zone hétérogène de colonies coralliennes isolées dans la DAR et dans un secteur ayant fortement changé depuis l'élaboration du masque Hyscores. Cette baisse de l'activité algale observée serait un artéfact et principalement due aux changements intervenus non pas sur le substrat dur, mais plutôt dans le substrat meuble de la DAR environnante et majoritaire. Se reporter au paragraphe correspondant ci-après.
 - Au sud de la Passe, la baisse de l'activité algale observée en hiver se situe au niveau de langues de débris coralliens, mises en évidence dans la littérature scientifique par Bajjouk et al. (2015)¹². Dans ces zones, principalement composées de fragments coralliens mobiles, on peut supposer que les houles hivernales contribuent à remobiliser les débris non encore consolidés, avec pour effet d'abraser et nettoyer le substrat de sa couverture algale (turfs, corallinacées), les rendant ainsi visiblement plus clairs sur les images. Ce résultat montre aussi que ces langues de débris sont dynamiques et encore fortement mobiles.
- au niveau des zones de substrat dur dans la DAR, ce sont principalement des dalles de grès de plage (*beach-rock*), localisées à proximité de la plage (points COPA_D, LIV_D et BOD_D par exemple). Ces zones sont rapidement colonisées par les algues à la saison chaude, et nettoyées lors des houles hivernales sous l'action du déferlement des vagues et de l'action abrasive du sable.

¹² T. Bajjouk, P. Mouquet, M. Ropert, J.P. Quod, L. Hoarau, L. Bigot, N. Le Dantec, C. Delacourt, J. Populus. **Detection of changes in shallow coral reefs status: Towards a spatial approach using hyperspectral and multispectral data.** Ecol. Ind., 96 (2019), pp. 174-191. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2018.08.052>

Sur le substrat meuble

Pour le substrat meuble de la dépression d'arrière récif, un seul comportement est observé du nord au sud de la plateforme : une baisse générale de la couverture / contribution algale hivernale dans le signal observé par télédétection. L'action mécanique de la houle et des courants associés, couplée à une période de développement moins favorable (baisse de la température de l'eau, de l'ensoleillement et des apports nutritifs dans les eaux de ruissellement), a pour effet de nettoyer le substrat meuble des développements algaux, cyanobactéries et films microphytobenthos qui s'étaient développés durant la saison estivale plus favorable. Le substrat sableux est globalement plus clair. Si ce phénomène est observé sur toute la plateforme récifale, il semble plus important au sud de la Passe de l'Ermitage, où les développements algaux dans la DAR sont les plus importants.

Ce qui est montré ici pour la transition saisonnière été-hiver australs 2022, serait à confirmer sur une série temporelle plus longue, pour valider que ces variations dans les couvertures algales sont bien cycliques (périodes, localisation, intensité), et pour mettre en évidence d'éventuelles tendances sur le plus long terme.

Les secteurs de la plateforme récifale mis en évidence ici, au niveau des platiers durs comme de la dépression d'arrière récif meuble, subissent d'importantes variations saisonnières de recouvrement algaux.

Ce travail de cartographie à partir de données de télédétection et mesures in-situ a permis d'améliorer les connaissances et de localiser avec plus de précision les secteurs de la plateforme récifale où les activités des différents composants biologiques sont les plus importantes et susceptibles de varier au cours de l'année.

En outre, la comparaison des images Pléiades (PL) du 26/04/2022 et Pléiades Neo (PNEO) du 01/07/2022 a permis de lever toute ambiguïté sur la pertinence d'éliminer du jeu de données les mesures effectuées en juin 2022 à Toboggan pour le calcul des bilans métaboliques. Compte-tenu de l'orientation du courant, on voit en effet que la forte productivité observée à cette période provient d'une contribution majeure des algues présentes sur le substrat dur ou dans la zone d'arrière-récif au sud de Toboggan, et ne représente donc pas l'activité métabolique du secteur d'intérêt.

L3.3.3-A Protocole d'acquisition de données sédimentologiques par traitement d'image. (Espace-Dev)

ACTION 3: Aléas Littoraux

O3.3 Littoraux coralliens : bilan des carbonates et budgets sédimentaires

O3.3.3 Budgets sédimentaires

1. Contexte et objectifs

La proposition de réfléchir à un protocole d'acquisition de données adaptée aux spécificités des sédiments récifaux par de deux constats connus de la littérature :

- Grande hétérogénéité granulométrique : de plusieurs dizaines de centimètres (blocs) en passant par les graviers, les sables jusqu'aux poudres calcaires.



Figure 1. Hétérogénéité granulométrique sur la plage de l'Hermitage (source M. Ahmed, 2023)

- La morphologie hétérogène des blocs de corail jusqu'aux sables se traduit lors de l'utilisation de colonnes de tamis par une surestimation de la taille des grains et des particules enchevêtrées dans les mailles altérant la mesure et imposant de longues sessions de nettoyage (se référer aux travaux de L. Berthois et A. Cailleux entre les années 1940 à 1980) ne permettant pas une représentativité spatiale et pas toujours une cohérence spatiale de l'échantillonnage.

- Il n'existe aucune méthode pour aborder de manière continue (même protocole, même indicateurs) ce type de sédimentation. Les colonnes à sédimentations sont surtout efficaces dans des environnements sédimentaires homogènes (Pennober, 1999) (granulométrique et nature de grain) pour éviter des effets connus sous le nom d'effet d'ascenseur.

La réflexion méthodologique proposée sur ce projet vise à une meilleure intégration des échelles (tailles des grains) prise en compte de la morphologie des grains avec une ambition de représentativité spatiale de l'échantillonnage. Pour ce faire différentes expérimentations ont été mis en oeuvre protocoles qui ont mobilisé sur la dotation du projet ½ temps de CDD Ingénieur et un stage de master.

2. Matériel et méthode

2.1. Analyse granulométrique de la strate des sables en laboratoire.

Ce protocole a fait l'objet d'un stage de Master en 2021 (Razakarivony Andriamiharirinina Njaka Herizo, Master M2 RNET). L'acquisition d'images à partir d'une **loupe binoculaire** équipée d'une caméra au laboratoire Entropie pour l'acquisition d'images des échantillons préparés en laboratoire (entre 100 et 200 objets par image). Traitement des images par un logiciel de traitement d'image mobilisation du logiciel de traitement d'image Ecognition et export des propriétés des objets segmentés.

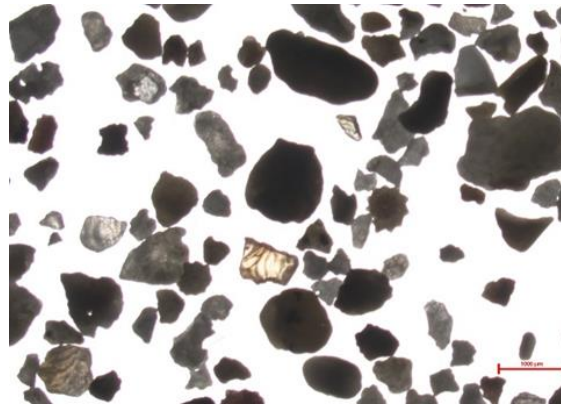


Figure 2. Image acquise à la loupe binoculaire (Razakarivony Andriamiharirinina Njaka Herizo, 2021)

Le tableau ci-dessous regroupe les paramètres calculés pour chaque grain détecté dans l'image.

Tableau 1. Paramètres élémentaires calculés pour chaque grain de sable détecté

	Clas	Color	Area (Px)	Length (Px)	Width (Px)	Length/width	Compactness	Border length (Px)	Density	roughness (Px)	Area (micron ²)	Length (micron)	Width (micron)	Border Length (micron)
7	corail	128,00	157,70	50,1518	43,42	1,15	1,38	190,00	2,32	0,71	33180,98	230,0464	199,19	871,53
8	corail	128,00	129,50	45,0000	39,00	1,15	1,36	168,00	2,24	0,72	27247,54	206,4150	178,89	770,62
10	corail	128,00	144,00	16,0000	13,00	1,23	1,44	58,00	1,94	0,82	3029,84	73,3920	59,63	266,05
14	corail	128,00	169,00	17,0000	12,00	1,42	1,21	58,00	2,01	0,79	3555,86	77,9790	55,04	266,05

Ces paramètres permettent ensuite de calculer tous les indicateurs de morphologie et de taille de la littérature (MZ, sorting, Centile Phi)

Les développements proposés à cette étape sont identiques à ceux proposés par des chaînes de traitement existant dans le commerce et ne concernent que la strate sable.

2.2. Alternative par acquisitions d'images sur le terrain

Ce protocole mobilise des acquisitions directes d'images d'échantillons sur une planchette ou sans séparation des particules de sable en laboratoire pour gagner du temps. Le traitement des images a pu être programmé sous l'environnement Matlab (the Mathworks). Les développements réalisés permettent de déterminer les classifications classiques en sédimentologie, et de fournir d'autres paramètres avancés. Le parti pris d'une méthode la moins contraignante possible pour l'opérateur, a conduit à résoudre un certain nombre de problèmes tels que la correction géométrique automatisée de l'image ou la minimisation de l'influence des ombres, la méthode devant est la moins dépendante possible des conditions naturelles d'éclairément. Le set d'images prises sont analysées par lot et les résultats de ces analyses sont sauvegardées dans les différents onglets correspondant aux sites d'étude du suivi, dans un format compatible avec Excel (Microsoft) sans que l'opérateur n'ait à intervenir au cours du processus d'analyse (traitement non-supervisé).

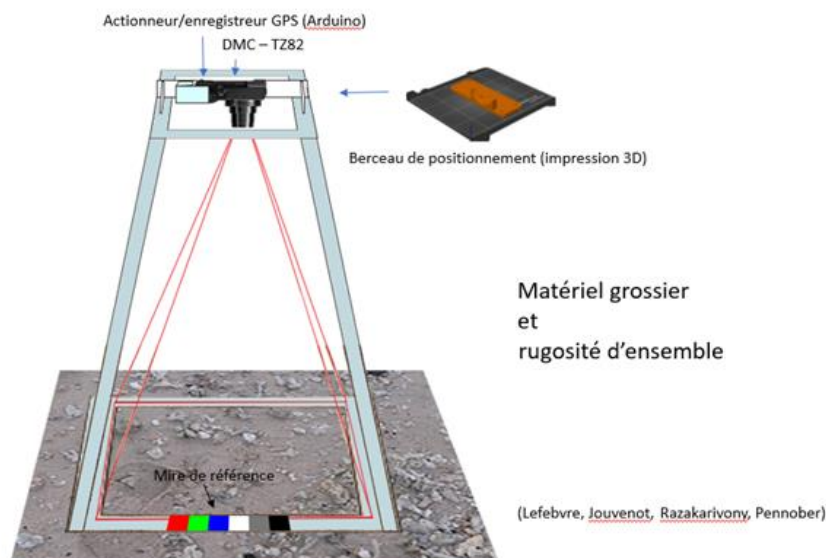


Figure 3 : dispositif portable d'acquisition d'information sur le substrat à l'échelle d'un quadrat géolocalisé

A cette étape le principal résultat est la détermination de l'indicateur pertinent pour appréhender de manière globale la sédimentation des estrans : la rugosité différenciée des estrans. Elle ne peut être appréhendée sur des images acquises au nadir.

• *Calcul de rugosité à partir des images drone et photogrammétrie*

Les méthodes qui consistent à calculer la rugosité à partir des outils géospatiaux sont en plein développement. Ces approches sont liées au développement de la photogrammétrie très haute résolution Modèles (Casella et al., 2022)¹³ et à l'exploitation des MNT et MNE produits

¹³ Casella, E., Lewin, P., Ghilardi, M., Rovere, A., & Bejarano, S. (2022). Assessing the relative accuracy of coral heights reconstructed from drones and structure from motion photogrammetry on coral reefs. *Coral Reefs*, 41(4), 869-875. <https://doi.org/10.1007/s00338-022-02244-9>

à travers différents indicateurs (Burns et al., 2015)¹⁴. L'indice de rugosité fournit une indication de la texture, de la rugosité ou de l'irrégularité d'une surface en se basant sur des mesures spécifiques, telles que les pentes locales, les variations d'altitude, les déviations entre points ou d'autres paramètres liés à la topographie mais aussi les pentes locales, qui offrent une bonne description de la structure spatiale (Labarre, 2017)¹⁵. Ainsi, l'indice de rugosité topographique (TRI) publié par Riley et al. en 1999¹⁶ fournit des informations sur la variabilité spatiale de la surface locale, il peut être interprété comme un indice de variabilité spatiale omnidirectionnelle à courte portée, calculé selon une perspective centrée sur le pixel. La simplicité et l'interprétabilité de l'indice, qui ne dépend pas des choix de l'utilisateur, ont favorisé sa mise en œuvre dans plusieurs environnements logiciels tels que QGIS et son application à un large éventail d'études de cas en raison de sa simplicité de mise en œuvre et son implantation dans différents logiciels tel que QGIS. Son calcul :

$$TRI = Y \left[\sum (x_{ij} - x_{00})^2 \right]^{1/2}$$

ou x_{ij} = à l'élévation de chaque cellule voisine de la cellule (x0,0)

Le protocole de traitement des données géospatiales est résumé dans la figure ci-dessous.

¹⁴ Burns, J., Delparte, D., Gates, R., & Takabayashi, M. (2015). Integrating structure-from-motion photogrammetry with geospatial software as a novel technique for quantifying 3D ecological characteristics of coral reefs. *PeerJ*, 3, e1077. <https://doi.org/10.7717/peerj.1077>

¹⁵ Labarre, S. (2017). Caractérisation et modélisation de la rugosité multi-échelle des surfaces naturelles par télédétection dans le domaine solaire. thèse de doctorat Université Paris Diderot. 238p. https://www.ipgp.fr/~jacquemoud/publications/these_Labarre_2017.pdf

¹⁶Riley, S.J., De Gloria, S.D., Elliot, R. (1999): A Terrain Ruggedness that Quantifies Topographic Heterogeneity. *Intermountain Journal of Science*, Vol.5, No.1-4, pp.23-27. https://download.osgeo.org/qgis/doc/reference-docs/Terrain_Ruggedness_Index.pdf

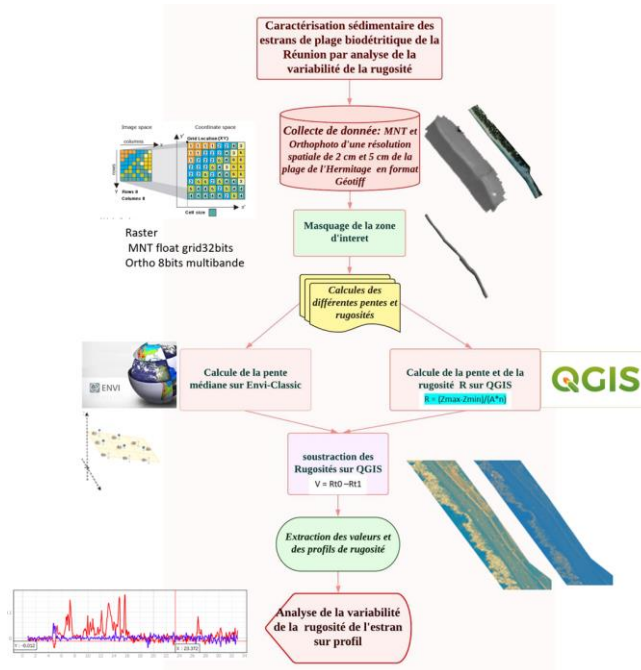


Figure 4. protocole d'extraction de profils de rugosités sur l'estran mobilisant les logiciels ENVI et QGIS

Les campagnes d'acquisition d'images optiques drones ont été réalisées par l'OSU-Réunion sur la période 2019 à 2023 dans le cadre du SNO DYNALIT (Service National d'Observation des Dynamiques Littorales). Les données sont actuellement mobilisées pour produire des informations topographiques sur une section de l'Hermitage 2 fois par an et sont disponibles sur le site Geosur. Le tableau ci- dessous présente les caractéristiques des données de l'Hermitage.

Tableau 2. Campagnes drones mobilisées pour étudier la variabilité de la rugosité de l'estran

Années	Dates	Résolution MNT	Résolution image
2019	Avril	MNT / 5 cm	Ortho/ 2 cm
	Novembre	MNT / 5 cm	Ortho/ 2 cm
2020	Octobre	MNT / 5 cm	Ortho/2 cm
2021	30 avril	MNT / 2cm	Ortho/ 2 cm
	30 avril	MNT / 5 cm	Ortho/2 cm

		28 octobre	MNT / 5 cm	Ortho / 2cm
2022		28 avril	MNT / 5 cm	Ortho/ 2 cm
		25 octobre	MNT/ 5 cm	Ortho/ 2 cm
2023		28 avril	MNT/ 5 cm	Ortho / 2 cm

3. Résultats

Les variations de rugosité mesurées ici soulignent à cette étape de la réflexion des variations sédimentaires de l'estran. En l'absence de cyclone sur la période, les fortes variations de rugosité se situent en bas d'estran. Elles peuvent du point de vue sédimentologique montrer un processus d'affouillement du soubassement corallien ou montrer l'apport de débris coralliens. Ces observations méritent d'être contextualisées des profils topographiques pour interpréter le sens de l'augmentation de la rugosité.

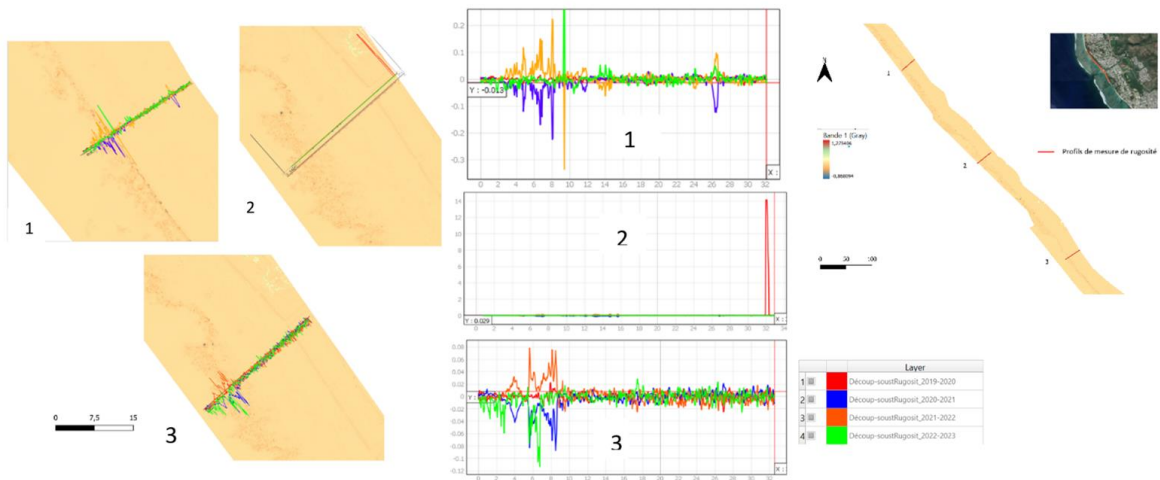


Figure 5. variation de la rugosité à l'échelle du profil qui atteste de modifications sédimentologiques

L3.3.3-B : Données issues de l'acquisition (budget sédimentaire) : 1) sédimentologie sur radiales de références 1 fois par an. 2) topographie (mesure des volumes) 2 fois par an et après cyclone. (Espace-Dev)

ACTION 3: Aléas Littoraux

O3.3 Littoraux coralliens : bilan des carbonates et budgets sédimentaires

O3.3.3 Budgets sédimentaires

Note : En l'absence de cyclone morphogénique sur la période, les suivis sur le site de référence sont réalisés sur des radiales de référence à partir des données drones acquis par MNT 2 fois par an.

1. Contexte et objectifs

Les suivis topographiques se caractérisent par des suivis bi-annuels de profils de plage par DGPS (Topcon) et par des MNT issus de la photogrammétrie par drone (Phantom 4). Jusqu'en 2020 les suivis étaient autonomes avec une station de référence propre positionnée sur site à chaque campagne. Depuis 2020, suite à une panne insoluble de la station de référence de l'OSU-Réunion ils mobilisent le réseau GNSS (Géolocalisation et Navigation par un Système de Satellite) Lél@¹⁷ Ce qui se traduit par une sensible modification des conditions d'acquisition de la donnée en raison de la distance des bornes de référence positionnées à Saint Leu et Saint Paul. Cette modification est encore à évaluer sur le long terme. Mais la répétabilité de la mesure évaluée sur les campagnes 2020-2021 semble améliorée. La précision de la mesure recherchée est de l'ordre de 10 cm.

Dans l'objectif de quantifier les processus morphosédimentaires des plages d'arrière récif à moyen terme, l'analyse de données topographiques de profils de plage acquises sous forme de profil ou de transect de plage par DGPS permettent à la fois d'étudier la morphologie des plages mais également de quantifier des volumes de sédiments mobilisés à différents échelle spatiale et temporelle. Les données sont bancarisées sur l'infrastructure de données Géosur.

2. Matériel et méthode

Les acquisitions débutent à la tête de profil matérialisé par une borne pour une grande partie d'entre elles. Lors de la pose de la borne en 2012-2013, une demande d'Autorisation d'Occupation Temporaires (AOT) sur le Domaine Maritime Public (DPM) a été réalisée. Les levés topographiques se font point par point le long de la radiale aidé du carnet de terrain grâce à l'affichage en fond d'écran de couches d'information géographique (Bd ortho IGN).

¹⁷ <http://www.reseau-lela.com/>

Pour réaliser une mesure, il suffit de se positionner sur le point à mesurer pendant quelques secondes et de “buller” correctement la canne télescopique. La mesure finale d’un point correspond à la moyenne des mesures réalisées en fonction de la durée prédéfinie. Selon la morphologie de la plage le nombre de points levés varie : une plage avec un pendage régulier aura des points plus espacés, au contraire en présence de rupture de pente sur une plage les points seront plus resserrés.

Le post-traitement, réalisé à partir du logiciel Topcon Tools V8, consiste à corriger les données brutes de la base du DGPS, ces données correspondent aux signaux des satellites captés en temps réel enregistrés directement sur la mémoire de l’appareil. Les données des bases sont corrigées par rapport aux données de la station RGP (réseau GNSS permanent) la plus proche (Station de Saint-Leu). Ces données sont téléchargeables depuis le site de l’IGN. A la fin du post-traitement sur Topcon Tools, les coordonnées réelles des bases sont récupérées afin de calculer les offsets en x, y et z par rapport aux coordonnées non corrigées. Les offsets sont ensuite appliqués aux points mobiles pour chaque profil. La dernière étape consiste à transformer les hauteurs ellipsoïdales z en altitude dans le système altimétrique local IGN89 à partir du logiciel Circe5 Réunion¹⁸ développé par l’IGN. Les fichiers de sortie finaux sont sauvegardés au format .csv.

A partir des coordonnées post-traités x, y et z, les courbes des profils de plages peuvent être générées comme sur l’exemple de la figure suivante.

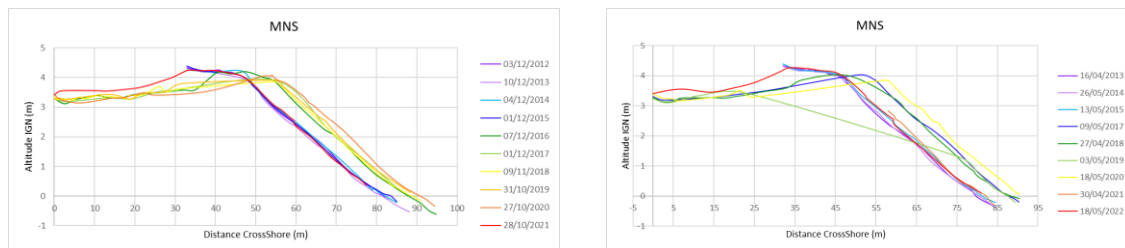


Figure 1 : Exemple de profils de plages générés sur le site MNS

Pour cela, la distance séparant la tête de profil par rapport aux points de levés est calculée grâce à la relation trigonométrique de Pythagore.

$$Distance = \sqrt{(X_i - X_0)^2 + (Y_i - Y_0)^2}$$

avec X_0 et Y_0 coordonnées du PR; X_i et Y_i coordonnées d'un point

Les altitudes z sont ensuite reportées en fonction des distances obtenues. Le volume de sédiment du profil de plage est calculé en considérant la morphologie de la surface du profil décrit comme constante sur un linéaire de 1 m de part et d'autre de celui-ci. Le principe du calcul consiste à intégrer la surface de la courbe au-dessus de l'altitude Z=0 du système altimétrique local IGN 89. Cependant, en l'absence de fonction mathématique propre au profil de plage, il est malheureusement impossible de réaliser cette intégration. Pour y remédier, on

¹⁸ Réseau GNSS sur l'île de La Réunion Réseau Lél@ <https://w3.leica-geosystems.com>

considère que la surface occupée par la courbe correspond à la somme des aires des trapèzes comprises entre deux points mesurés successivement.

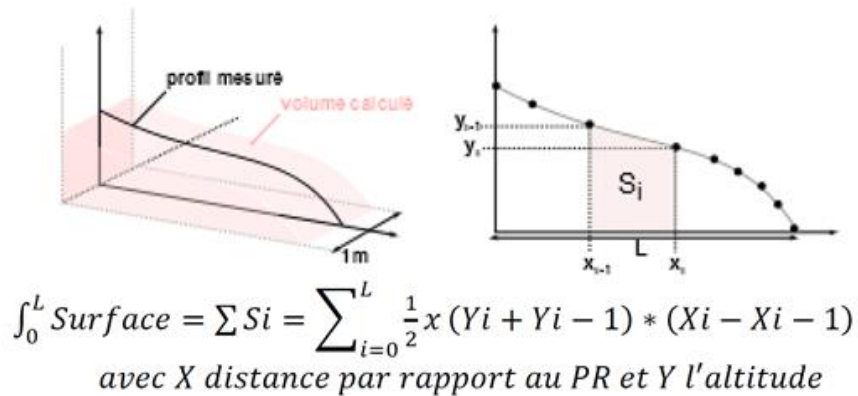


Figure 2. Méthode de calcul du bilan volumique par décomposition surfacique (Mahabot, 2016)

Les volumes différentiels ou bilans volumiques entre levés de dates différentes sont obtenus par soustraction des volumes en mètre cube. Si le gain est négatif, la plage en question est en érosion, en revanche un gain positif signifie un engraissement de la plage. Un volume cumulé correspond à la somme des bilans volumiques date à date. Concernant l'incertitude sur le volume de sédiment, celui-ci est calculé en considérant une erreur verticale de 0.02 m (en lien avec la précision du DGPS observée) pour chaque point du profil c'est-à-dire qu'elle est proportionnelle à la longueur du profil.

$$\Delta V = 0,02 * L \text{ avec } L \text{ longueur du profil de plage}$$

Les volumes calculés comme dans le Tableau ci-dessous, à l'échelle du profil permettent, par le calcul de simples différences, une mesure des dynamiques topographiques saisonnières.

Tableau 1. Exemple de tableau de synthèse des volumes pour le profil Copacabana (COP) produit par la routine de traitement

Date	Volume_COP_m3	Incertitude_COP_m3	Longueur_calcul_COP
20171201	55.5487706369278	0.568098406434368	28.4049203217184
20180427	54.4931236648251	0.60130566700955	30.0652833504775
20181109	55.9587600146585	0.600192107924671	30.0096053962335
20190503	54.7089929328166	0.57553867689411	28.7769338447055
20191031	55.5051675137712	0.587365102031527	29.3682551015764

20200518	55.0859518756621	0.562884874432913	28.1442437216457
20201027	53.6662207734949	0.552185997886377	27.6092998943188
20210422	54.2231709287859	0.55900573593078	27.950286796539

3. Résultats

Tendances par profil

L'analyse des variations volumiques 2012 et 2021 ou 2017 et 2021 montre une tendance globalement à l'érosion¹⁹ mais il faut contextualiser ces résultats. Les amplitudes de variation que l'on peut lire sur les graphiques ci-dessous dans le secteur de la Saline sont plus faibles que dans le secteur de l'Hermitage montrant une situation globalement plus protégée. En outre, les tendances d'évolution volumique calculées peuvent être classées en 3 types de comportement selon la précision de la régression linéaire à travers la valeur du coefficient R².

Un premier groupe de profils avec un R² > -0,70 est considéré comme étant dans une situation d'érosion pérenne. Le profil concerné à l'Hermitage est le profil SGVC durant les 2 saisons, SCVV et COP durant la période australe. Un second groupe affichant cette fois-ci des valeurs de R² entre -0,40 et -0,70, est dans une situation d'érosion plus contrastée en raison de la superposition de régime de gain et de perte de sédiments. Les profils concernés sont ONF les deux saisons, SGVV et TDO en période cyclonique. Seul un profil de l'Hermitage est dans cette situation (SGVV), les 2 autres sont tous localisés dans le compartiment de la Saline (ONF et TDO).

Enfin, un dernier groupe avec un R² < 0,40 ne présente aucune tendance significative. Dans profils peuvent afficher une tendance non significative à l'accrétion : BRI sur les deux saisons, COP en contexte cyclonique. Les figures ci-dessous illustrent parfaitement le propos explicité ci-dessus, le profil des Brisants situé en position d'aval transit qui avait la particularité de tendre vers l'accrétion jusqu'en 2016 (Pennober et Mahabot, 2017²⁰), suit une nouvelle tendance non significative en raison d'une perte importante en sédiment (-26,1 m³) en 2018,

¹⁹ Tulet P., Aunay B., Barruol G., Barthe C., Belon R., Bielli S., Bonnardot F., Bousquet O., Cammas J. P., Cattiaux J., Chauvin F., Fontaine I., Fontaine F. R., Gabarrot F., Garabedian S., Gonzalez A., Join J. L., Jouvenot F., Nortes-Martinez D., Mekies D., Mouquet P., Payen G., Pennober G., Pianezze J., Rault C., Revillion C., Rindraharisaona E. J., Samyn K., Thompson C., Veremes H. (2021). ReNovRisk : a multidisciplinary programme to study the cyclonic risks in the South-West Indian Ocean. *Natural Hazards*, 107 (2), 1191-1223. ISSN 0921-030X.

²⁰ PENNOBER G., MAHABOT M.-M., 2017, SOERE « Trait de côte, aménagements littoraux »-Bilan scientifiques de la seconde phase de mise en œuvre d'un système d'observation du littoral ouest de La Réunion. Rapport Final. ESPACE-DEV/OSU-Réunion, 23 p.

après le passage de la tempête tropicale Fakir. Cette perte est actuellement en cours de compensation avec des bilans volumiques positifs depuis 2020.

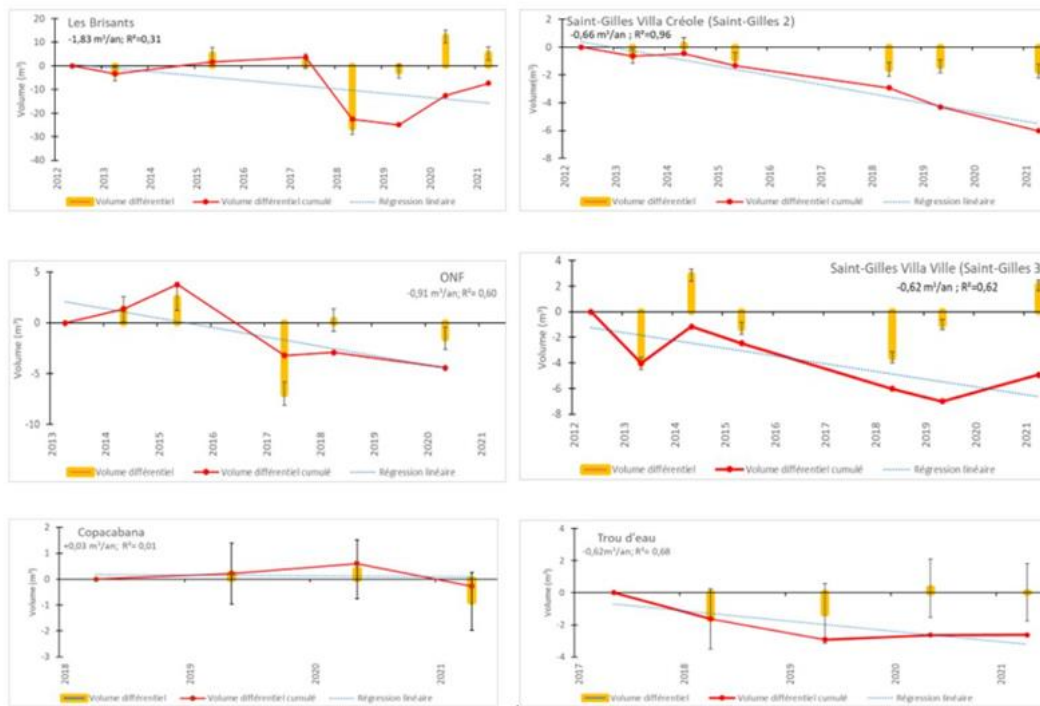


Figure 3 : Bilans volumiques et tendance en fin de saison cyclonique sur le secteur L'Hermitage la Saline entre 2012 à 2021 ou 2017-2021

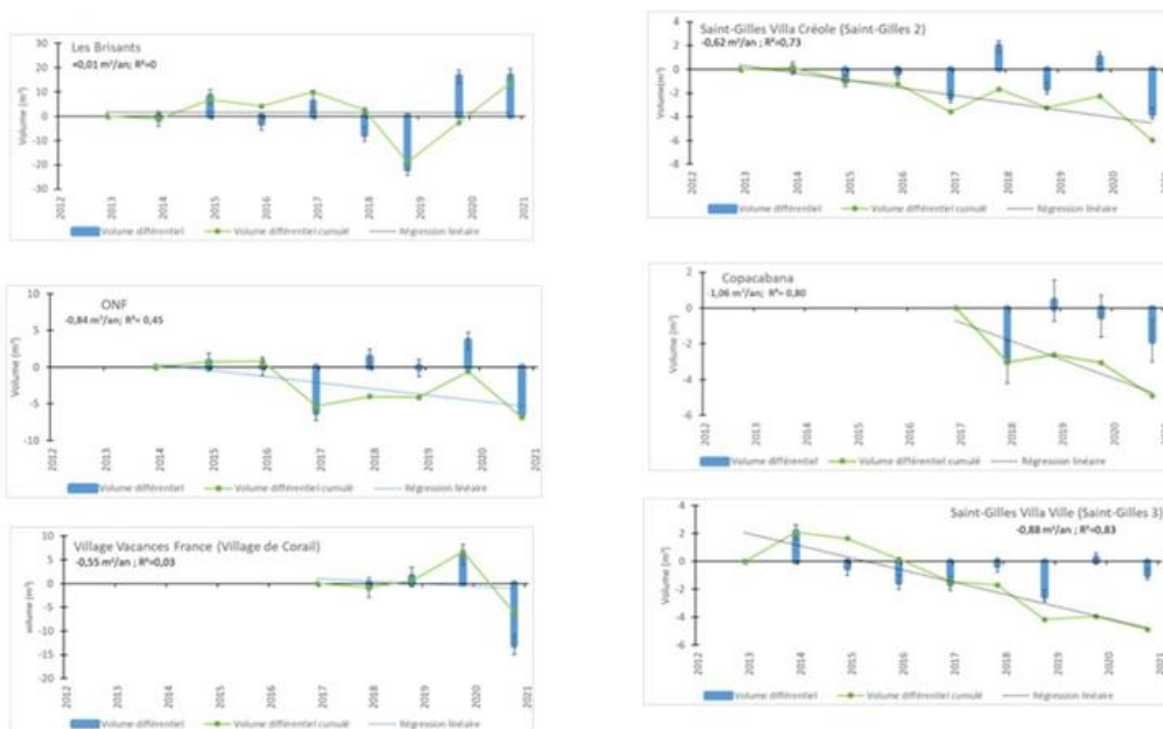


Figure 4. Bilans volumiques et tendance en fin de saison australe entre 2012 à 2021 sur le secteur l'Hermitage La Saline

Synthèse à l'échelle des compartiments

Dans l'objectif de quantifier les processus morphosédimentaires des plages d'arrière récif à moyen terme, l'analyse de données topographiques de profils de plage acquis par DGPS permettent à la fois d'étudier la morphologie des plages mais également de quantifier des volumes de sédiments mobilisés à différents échelle spatiale et temporelle. Ainsi, à partir d'une série de données topographiques relevée au DGPS depuis 2017, l'étude a permis de montrer les dynamiques à l'échelle pluriannuelle en intégrant les deux saisons de houle. 8 profils permettent d'étudier ces tendances sur les compartiments Hermitage et La Saline.

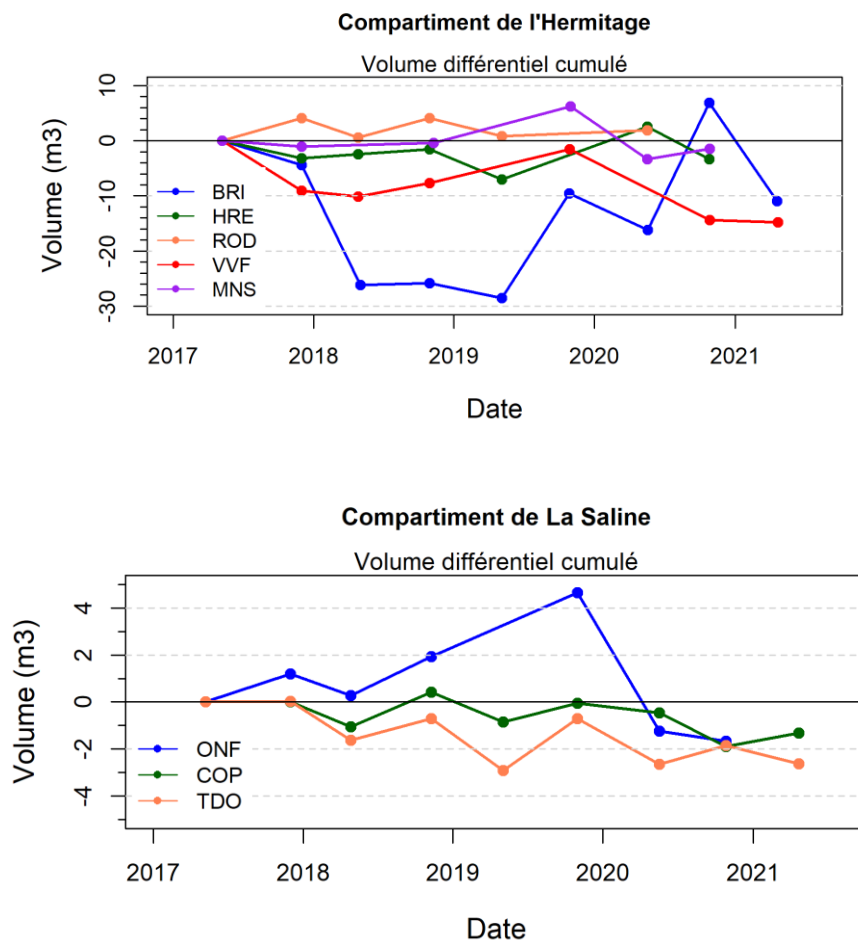


Figure 5. Synthèses des volumes différentiels cumulés à l'échelle des profils par compartiment (Hermitage/La Saline)

Le compartiment de l'Hermitage présente des situations très contrastées. Avec un profil ROD (Rondavele) relativement stable en volume et un profil des Brisants (BRI) qui présente une forte variabilité. Avec une perte de volume de l'ordre de 30m³ qui perdure entre mi-2018 à mi-2020. En Novembre 2020 il présente un engraissement remarquable de 25 m³. Mais après la saison cyclonique 2021 le bilan par rapport à la même période en 2017 est négatif avec une



perte de près de 11m³. Sur le site de l'Hermitage le profil du VVF est celui qui présente la plus forte perte sédimentaire en 2021 avec une perte de l'ordre de 15m³. Ce profil n'a montré qu'une seule période de reconstruction depuis 2017, la saison australe 2020.

Au sud de la passe de l'Hermitage le compartiment de la Saline est suivi par 3 profils qui présentent tous en 2021 une situation déficitaire par rapport à 2017 avec des pertes inférieures à 4m³. Entre avril 2017 et avril 2020 le profil ONF a présenté un fort engraissement jusqu'à plus de près de 5 m³.

Si en 2021, aucun profil ne présente un engraissement significatif par rapport à 2017, l'analyse des bilans volumique doit être réalisée au regard des interventions sur le littoral. Des recharges ont lieu sur le littoral sur plusieurs sites dont nous ne connaissons ni les dates de réalisation, ni la fréquence. La re-végétalisation des arrières plages sur plusieurs sites s'est accompagnée de reprofilage de haut de plage.

L3.3.3-C Mise en relation des paramètres : bilan des carbonates, forçages météo-marins et budget sédimentaire. (IUEM, Espace-Dev, ENTROPIE)

ACTION 3: Aléas Littoraux

O3.3 Littoraux coralliens : bilan des carbonates et budgets sédimentaires

O3.3.3 Budgets sédimentaires

La mise en relation des paramètres est réalisée ici sous forme d'une cartographie de synthèse (figure ci-dessous). Elle montre la situation relativement plus favorable du compartiment de la Saline par rapport à celui de l'Hermitage sur les différents indicateurs comme le recouvrement corallien, le bilan des carbonates et le suivi des profils de plage. Cependant, l'ensemble des profils de plage montre un déficit de sable sur la période 2017-2021.

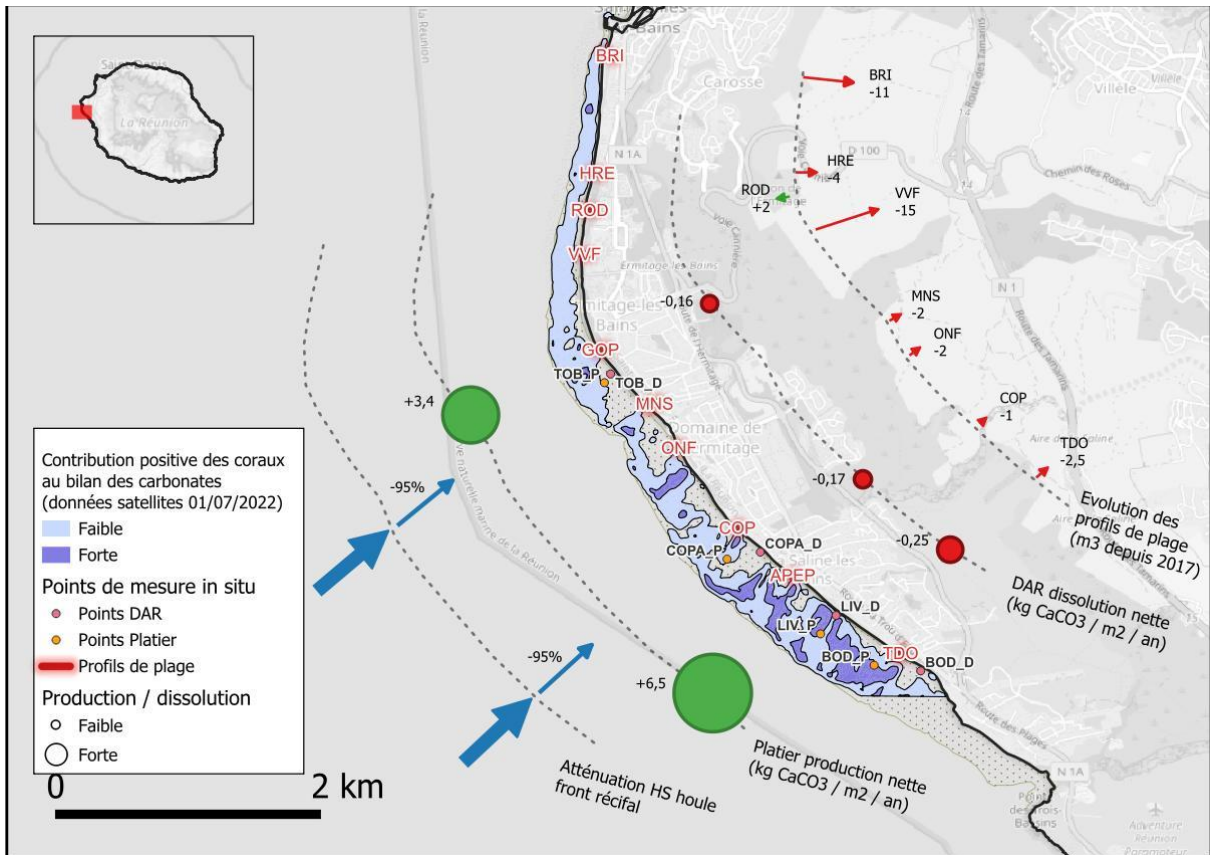


Figure 1 : synthèse des indicateurs étudiés sur les compartiments de l'Hermitage et de la Saline

La cartographie du corail vivant réalisée à partir des données hyperspectrales historiques et des images satellites récentes, montre que les plus forts recouvrements sont au sud de la Passe de l'Hermitage, au niveau du platier récifal interne et des colonies coralliennes isolées dans la DAR (notamment dans le secteur du Trou d'Eau). L'analyse diachronique entre 2015

et 2022, met en évidence des évolutions opposées entre deux secteurs : une tendance à la régression des couvertures coralliennes autour et au nord de la Passe, et au contraire une augmentation des recouvrements dans le secteur sud du Trou d'eau. A partir de ces données de télédétection, l'estimation de la contribution positive du platier récifal au bilan des carbonates est globalement plus faible au nord de la Passe, et plus importante au sud, en accord avec les valeurs de bilan des carbonates mesurées in-situ.

Dans la zone d'arrière-récif, le bilan annuel est négatif (dissolution nette de CaCO_3), avec un taux de dissolution un peu plus important au sud du récif de la Saline ($-0.25 \text{ kg CaCO}_3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{an}^{-1}$) que de part et d'autre de la passe de l'Hermitage (de -0.16 à $-0.17 \text{ kg CaCO}_3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{an}^{-1}$). Cependant, même au sud du récif, la dissolution demeure faible et ne contribue vraisemblablement pas de manière significative à limiter l'alimentation en sable de la plage.

En revanche, sur le platier récifal, en saison fraîche, la précipitation de carbonate de calcium est deux fois moins élevée au nord de la passe de l'Hermitage que dans la partie sud du récif ($80 \text{ mmol CaCO}_3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{j}^{-1}$ à Toboggan vs. $155 \text{ mmol CaCO}_3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{j}^{-1}$ dans le secteur de Trou d'Eau / Bodega). Le bilan annuel pourrait représenter $+3.4 \text{ kg CaCO}_3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{an}^{-1}$ à Toboggan et $+6.5 \text{ kg CaCO}_3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{an}^{-1}$ dans le secteur de Trou d'Eau / Bodega, sous réserve de la confirmation des hypothèses effectuées quant aux variations saisonnières. Ces valeurs sont du même ordre de grandeur que les valeurs rapportées dans la littérature pour les platiers récifaux (de $+0.7$ à $+9.1 \text{ kg CaCO}_3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{an}^{-1}$), mais inférieure à la médiane ($+4.7 \text{ kg CaCO}_3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{an}^{-1}$) à Toboggan, et supérieure à la médiane dans le secteur de Trou d'Eau / Bodega. La capacité du platier récifal à alimenter la plage en sable dépend de nombreux autres facteurs, comme l'abondance des bioérodeurs, ou la contribution des algues calcaires (dont le CaCO_3 se dissout plus facilement que celui des coraux) pour ne parler que des facteurs biologiques. Les différences observées dans le bilan des carbonates entre la partie nord du récif et sa partie sud y contribuent toutefois certainement.

Les données des capteurs de pression in-situ et les résultats de modélisation de houle montrent une réduction supérieure à 94% de la hauteur significative des vagues au niveau du front récifal quel que soit le compartiment (La Saline ou l'Hermitage) considéré²¹. L'énergie résiduelle des vagues se dissipe ensuite progressivement par frottement sur le fond jusqu'à la plage. La présence de colonies coralliennes vivantes sur la plateforme récifale modifie la structure tridimensionnelle du fond, augmentant sa rugosité, et donc sa capacité potentielle d'atténuation de vagues. L'acquisition de données complémentaires devrait permettre de préciser ces liens entre la présence et la nature d'une couverture corallienne vivante sur la plateforme récifale et l'atténuation de la houle.

Au niveau de la plage, les mesures sur les 8 profils topographiques de référence sur les compartiments La Saline et de l'Hermitage affichent une situation érosive contrastée avec de faibles volumes érodés à la Saline (-3 m^3 par rapport à la topographie de l'estran en 2017) et une tendance régressive plus marquée au nord de la passe de l'Hermitage (jusqu'à -15 m^3 par rapport à 2017). Notons que le nord de la passe fait actuellement l'objet d'une

²¹ (i) Rapport de stage M2 de Samuel OSINA à partir des données Renovrisk. Transformation des vagues dans un récif frangeant, 2022. GEO-Ocean UMR 6538 / OSU Réunion.

(ii) Livrable 3.4.1 Renovrisk-Transfert



restauration écologique donc les impacts pourront être évalués par un suivi dans le temps. Les évolutions sédimentaires mesurées par l'indicateur rugosité fine de l'estran (TRI) montrent des dynamiques qu'il faudra contextualiser sur les profils à l'avenir. Les données drones uniquement acquises à ce jour sur la section Passe de l'Hermitage/Toboggan mériteraient d'intégrer un site de la Saline au vu des différentiels constatés.

En résumé, sur les indicateurs bilan des carbonates, recouvrements coralliens, et dynamique topographique des profils de plage, le compartiment la Saline au sud montre une situation moins dégradée que le site de l'Hermitage au nord de la Passe de l'Hermitage. Les atténuations de houles par le front récifal, qui sont mesurées du même ordre sur les deux sites instrumentés, ne semblent pas être un facteur explicatif de ce différentiel. La transformation de l'énergie de ces houles et leur atténuation au niveau de la plateforme récifale (configuration bathymétrique, rugosité induite par les couvertures coralliennes, etc.) pourrait toutefois produire des différences locales de courantologie (cellules de circulation latérales, accélération dans les chenaux ou runup sur l'estran, etc.), favorisant ou réduisant localement les capacités de transport/arrachement ou de sédimentation. De ce point de vue, le secteur de la Passe et au nord semble plus exposé que le secteur Sud, dont la configuration et la plus forte couverture corallienne se traduit par un bilan sédimentaire plus favorable même si légèrement déficitaire sur la période étudiée (2017-2021).

L3.4.1 Mesure des états de mer par suivi vidéo dans le lagon (ESPACE-DEV- IUEM/LDO)

ACTION 3: Aléas Littoraux

O3.3 Littoraux coralliens : bilan des carbonates et budgets sédimentaires

O3.3.3 Budgets sédimentaires

1. Contexte et objectif

Ce livrable, non financé dans le cadre du projet suite aux derniers ajustements budgétaires, fait l'objet d'une thèse financée par une bourse Ministère de l'enseignement supérieur. Il vise à développer des indicateurs dérivés du niveau d'eau mesuré par caméra vidéo. Ces indicateurs découlent essentiellement du run up sur l'estran. Cette approche vise à compenser la difficulté d'instrumentation du platier récifal de la Réunion en raison de la faible profondeur et de la forte fréquentation anthropique.

2. Matériel et méthode

Dans cette perspective, un système vidéo optique à faible coût a été installé sur le poste MNS de la passe de l'Hermitage. Haut de 8 m, il est situé à environ 30 m du pied de plage en décembre 2019. Une convention OSU-Réunion/ Région Réunion/Mairie de Saint Paul a permis 1 année l'exploitation de cette caméra à distance. Cependant, des arrêts d'enregistrement liés aux interventions sur les réseaux par l'Université et la Région (réseau Wirun) qui interrompent la création des séries temporelles sans avertissement de l'OSU. La caméra TRENDNET TV-IP319PI (3840*2160 pixels, 4K) peut collecter en continu des images à une fréquence d'images de 2 Hz entre 6h00 et 19h00. Les données collectées sont stockées sur un disque qui était accessible à distance par Internet via WIRUN qui lui aussi a été abandonné sur le site de l'Hermitage par la Région Réunion.

En février 2020, une sonde de pression (Wave gauge OSSI) autonome a été installée dans l'arrière récif, à une centaine de mètres de la caméra afin d'obtenir les niveaux d'eau. La sonde a été programmée pour prendre des mesures à une fréquence de 10 Hz. Dans un premier temps, la sonde a été utilisée pour évaluer l'efficacité de la caméra à produire des indicateurs. Après évaluation, il a été décidé que la sonde serait complémentaire à la caméra. Cependant, en l'absence de solution en termes de wifi elle se substitue à la caméra. Les mesures de la sonde nourrissent aujourd'hui les SNO REEFtemps et SNO Dynalit de l'OSU.

Les images brutes ont été traitées et trois types d'images ont été obtenues : des images de longue exposition - moyennées sur 10 minutes (Timex), des images instantanées et des timestacks. Le Timestack est obtenu en empilant des profils cross-shore pris sur chaque image d'une région d'intérêt pour obtenir une image. Les timestack sont principalement utilisés pour estimer les paramètres de jet de rive.

Dans cette phase d'expérimentation, le jeu de données exploité couvre une période de 198 jours entre mars 2020 et septembre 2020 ce qui représente 2376 heures d'enregistrement et donc 46% du temps écoulés sur la période en question, avec en moyenne 12 heures d'enregistrement par

jour (les images sont sélectionnées pour couvrir le créneau de 6h00 à 18h00). Les données manquantes sont dues à des dysfonctionnements temporaires de la caméra ou à une mauvaise qualité des images collectées. De plus comme précisé précédemment, le système vidéo optique n'acquiert aucune information pendant la nuit.

3. Résultats

Avec la caméra, aujourd'hui il est possible d'avoir la hauteur d'eau dans l'arrière récif à un temps donné, et ce en presque temps-réel (il faut en contexte opérationnel en moyenne 10 minutes pour que l'image arrive sur le serveur). En effet, les travaux en cours montrent que le coefficient de corrélation entre les hauteurs d'eau issus de la sonde de pression et ceux extraites des images caméra est de 0.74 pour 3600 points mesurés. L'instrumentation caméra/sonde, comme on peut le voir sur les figures ci-dessous, montre qu'au niveau de Toboggan, l'amortissement de la houle atteint près de 99% à marée basse et 94% à marée haute d'après les données sondes. Les hauteurs significatives ne dépassent pas 0,5 m et sont généralement en dessous de 0,2 m.

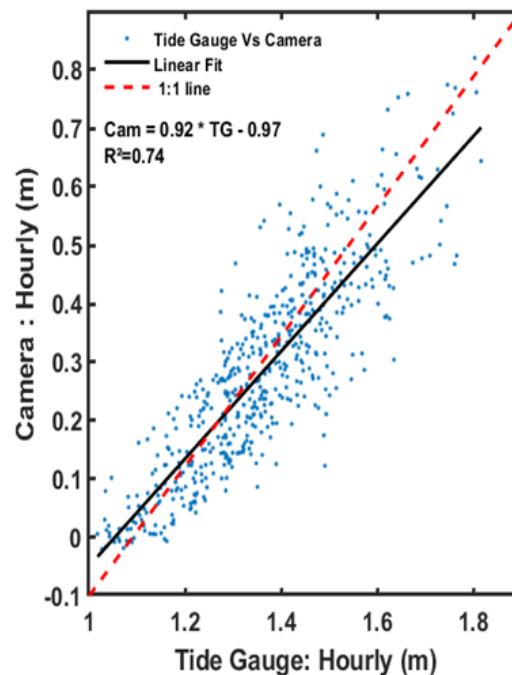


Figure 1. Hauteurs d'eau extraites de la caméra versus hauteurs d'eau mesurées par la sonde. Ici les données sont moyennées sur 1 heure (réalisation : Machabee, 2021).

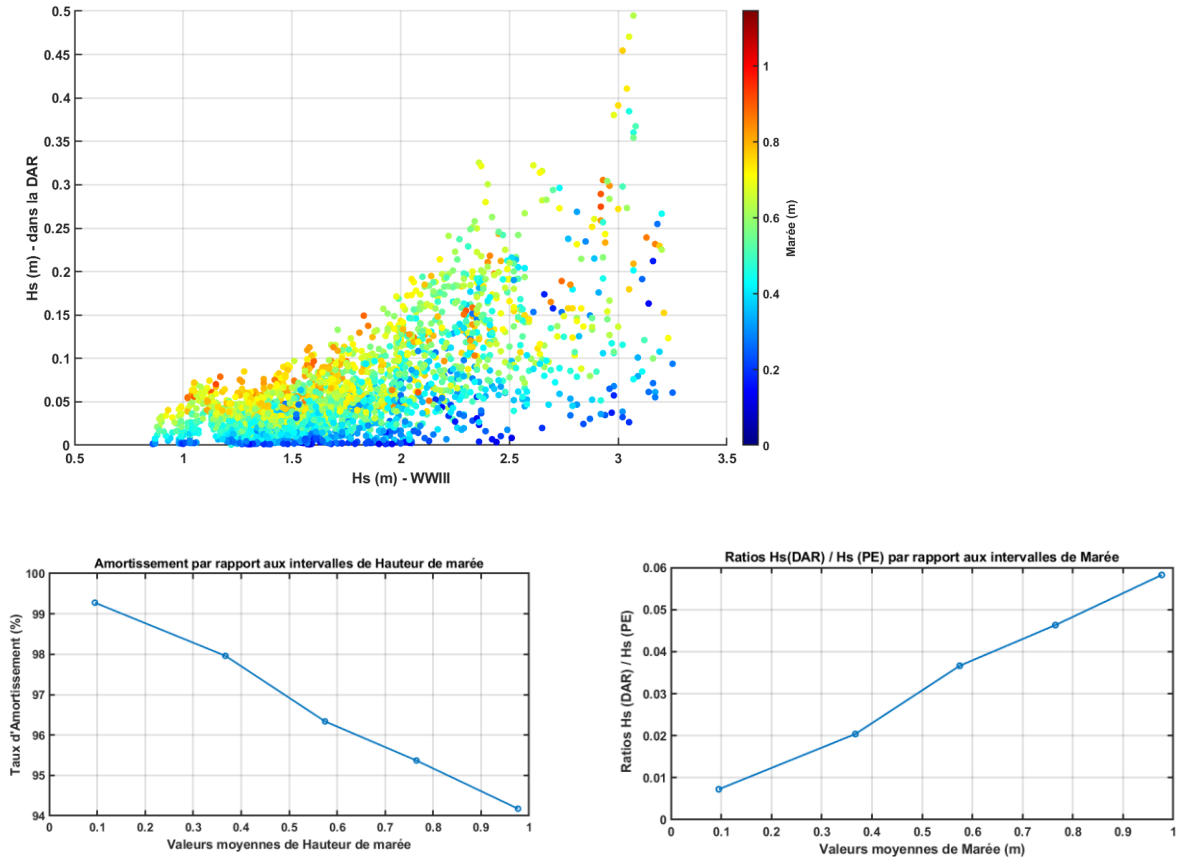


Figure 2. Hauteurs significatives de houles et amortissement de la houle sur le site de Toboggan (Hermitage) (Machabee, 2023)