



BIOEOS

Enjeux, objectifs, approche
et bilan de la campagne d'acquisition
in situ sur le site de La Réunion

Rapport de phase 1

Mars 2024



Contributions

| Coordination

Touria Bajjouk (IFREMER/DYNECO/LEBCO)



| Acquisitions des données

IFREMER/DYNECO : Touria BAJJOUK & Aurélien TANCRAJ

IFREMER/DOI : Magali DUVAL, Sylvain BONHOMMEAU, Mervyn RAVITCHANDIRANE, Victor ILLIEN & Arthur LAZENNEC

IRD : Pascal MOUQUET, Thomas GERMAIN & Moira CHATELLARD

UNIVERSITE DE TOULON : Audrey MINGHELLI

SORBONE UNIVERSITE : Malik CHAMI

ARBRE : Léo BROUDIC

| Partenaires Scientifiques



| Partenaires financiers



| Citation du document

Bajjouk T., Minghelli A., Mouquet P., Duval M., Chami M., Bonhommeau S., Tancray A., Ravitchandirane M., Illien V., Lazennec A., Broudic L., Germain T., 2024. Projet SCO-BioEOS : enjeux, objectifs, approche et bilan de la campagne d'acquisition in situ sur le site de La Réunion. Rapport de phase1 version 1.1. Conventions Ifremer-CNES (22/1002917) et Ifremer-Préfecture de La Réunion/SGAR (22/1002992), 39 p.

SOMMAIRE

1. INTRODUCTION	3
2. BIODIVERSITE COTIERE	5
2.1. ENJEUX ET LACUNES	5
2.1. DONNEES & METHODES MOBILISABLES POUR LES CONNAISSANCES SUR LA BIODIVERSITE COTIERE.....	6
2.1.1. Les données.....	6
2.1.2. Les métriques	7
2.1.3. Les algorithmes	7
2.2. BIOEOS, OBJECTIFS ET MISE EN ŒUVRE.....	9
3. CAMPAGNE D’ACQUISITION	12
3.1. ACQUISITIONS D’IMAGES SATELLITE	12
3.1.1. Pléiades	12
3.1.2. Pléiades NEO	13
3.1.3. Images Sentinel	14
3.1.4. Prisma.....	15
3.1.5. EnMap	16
3.2. ACQUISITIONS DES DONNEES IN SITU.....	16
3.2.1. Stratégie d’échantillonnage	17
3.2.2. Propriétés optiques de l’eau	19
3.2.2.1. CTD	20
3.2.2.2. Fluorimétrie.....	21
3.2.2.3. Mesures de l’éclairement par les sondes TRIOS.....	21
3.2.2.4. Prélèvements.....	25
3.2.3. Composition du fond marin	26
3.2.3.1. Collecte de signatures spectrales des habitats benthiques.....	26
3.2.3.2. Observations ponctuelles.....	29
3.2.3.3. Acquisitions par planche instrumentée	30
4. CONCLUSION	33
5. REFERENCES	34
6. ANNEXE	38

1. INTRODUCTION

Ayant un effet temporellement stabilisant sur les fonctions écosystémiques (Thibaut & Connolly, 2013 ; Cardinale et al., 2012 ; Loreau & de Mazancourt, 2013), **la biodiversité constitue un capital naturel délivrant d'importants services et bénéfiques pour l'humanité, des besoins alimentaires au patrimoine culturel.** Cependant, les espèces disparaissent actuellement à un taux de 100 à 1000 fois plus élevé que le taux naturel. En Europe, seulement 17% des habitats et des espèces et 11% des écosystèmes clés, protégés par une législation européenne, sont dans un état satisfaisant. **Les enjeux sont posés à différents niveaux : rétablissement ou maintien des fonctionnalités des écosystèmes, viabilité économique, gestion intégrée des usages et planification spatiale, prise en compte des altérations plus ou moins réversibles des écosystèmes** (ex. changement climatique) dans la gestion des ressources. Parmi les principaux besoins de connaissance identifiés (Mongruel et al., 2019), certains concernent les écosystèmes côtiers. Ces derniers recèlent une biodiversité exceptionnelle qui confère à la France une responsabilité particulière, y compris vis-à-vis de la communauté internationale. Ils sont cependant considérés parmi les plus vulnérables car les plus exposés aux pressions anthropiques, dont les impacts se cumulent. **Un réel besoin de connaissances spatio-temporelles sur la biodiversité est mis en exergue, notamment dans les territoires d'outre-mer.**

Ces éléments de contexte ont été à l'origine du projet **BioEOS (BIOdiversity Earth Observation and monitoring at régional Scale)**. Bénéficiant du label SCO (Space for Climate Observatory) avec le soutien du CNES, ce projet est le fruit d'une collaboration de onze partenaires universitaires et institutionnels, associant des compétences en traitement d'images et du signal, en écologie marine et en modélisation.

BioEOS propose ainsi d'utiliser des images de plusieurs satellites pour **extraire des métriques permettant de quantifier et suivre, via des proxys, la biodiversité côtière.** Il est prévu de développer une plateforme de chaîne de traitement opérationnelle, basée sur des outils en accès libre et intégrant des algorithmes déjà éprouvés par la communauté scientifique. **L'infrastructure Datarmor est envisagée pour héberger le démonstrateur de cette plateforme.**

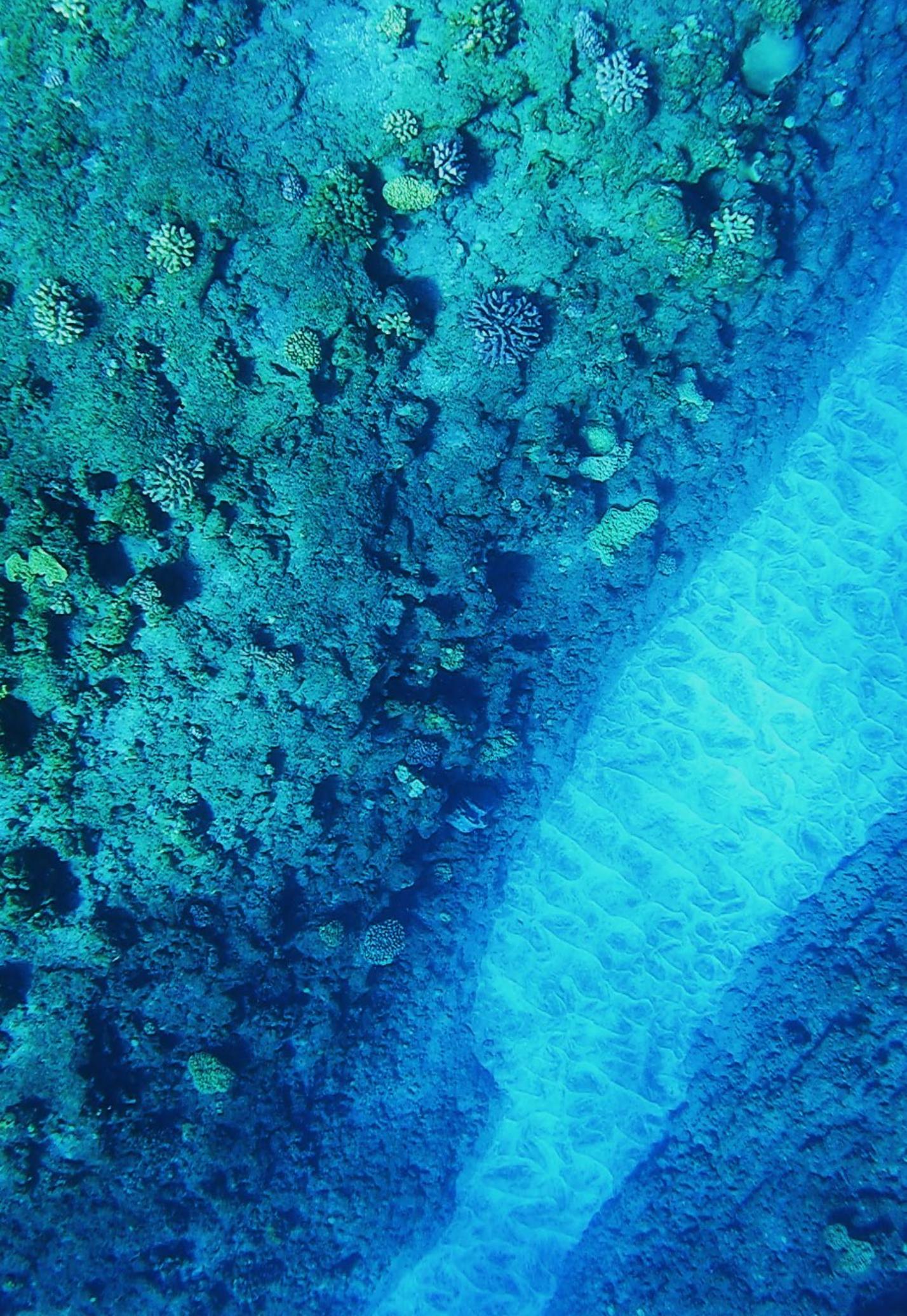
Bénéficiant d'un soutien financier du CNES et de la Préfecture de La Réunion en lien avec le SGAR et la DEAL, Le présent document constitue le premier rapport d'état d'avancement du projet. Il s'appuie sur les documents référencés dans le tableau ci-dessous :

Tableau 1. Documents de référence du projet SCO BioEOS

Document	Intitulé
Référence 1	L'Accord-Cadre CNES/IFREMER (réf. CNES n° 2021-0015355 & IFREMER n° 21/1002193)
Référence 2	La Convention CNES-Ifremer relative au projet BIOEOS (n° 22/1002917)
Référence 3	Convention d'attribution de subvention au titre du CCT 2019-2022 – Préfecture de La Réunion/SGAR (n° 22/1002992)



CONNAISSANCES EN BIODIVERSITE COTIERE Enjeux & objectifs pour BioEOS



2. Biodiversité côtière

2.1. Enjeux et lacunes

Depuis plusieurs années, la communauté scientifique est mobilisée pour améliorer notre connaissance de la biodiversité marine (Gray, 1997) et sa relation à l'environnement apporte en effet une base solide pour évaluer les conséquences d'un changement global (Académie des sciences, 1995). Les connaissances de sa dynamique spatiotemporelle restent cependant très disparates, notamment sur les territoires ultramarins qui représentent 80% de cette biodiversité marine, alors qu'ils abritent des écosystèmes emblématiques et vulnérables tels que les récifs coralliens ou les herbiers de phanérogames marines.

Menacés d'effondrement d'ici 2050, les récifs coralliens comptent en effet parmi les écosystèmes les plus productifs, mais également parmi les plus menacés. La dernière évaluation de la biodiversité mondiale réalisée en 2019 par l'IPBES (Plateforme intergouvernementale scientifique et politique sur la biodiversité et les services écosystémiques) indique que le couvert corallien vivant a diminué de près de 50 % depuis 1870. S'agissant de l'île de La Réunion, le rapport Ifreco (2021) sur l'état de santé des récifs coralliens, herbiers marins et mangroves des départements et territoires d'outre-mer français indique que la trajectoire de ses récifs suit, de manière générale, le sens d'une dégradation sur le long terme. Le bilan établi en 2020 fait état d'une augmentation du recouvrement en algues alors qu'une diminution moyenne du recouvrement corallien a été estimée à 17 % sur les platiers et 43 % sur les pentes externes, avec pour ces derniers une modification de la composition des communautés et une perte très rapide de la richesse spécifique.

Malgré leur importance en occupant une superficie de plus de 300 000 km² à travers le globe, les herbiers marins figurent encore parmi les écosystèmes côtiers les plus méconnus et les tendances évolutives de leur état de santé restent difficiles à établir en raison de données de surveillance très limitées. La majorité des territoires ultramarins abritent en effet des herbiers présentant des signes majeurs de dégradation. Sur le site de La Réunion, l'herbier à *Syringodium isoetifolium*, présent uniquement sur les plateformes récifales de l'Ouest, subit un important déclin depuis 2017. Ces tendances ont pour conséquence une détérioration des services écosystémiques, incluant la capacité d'accueil de la faune associée ou des impacts sur la dynamique morpho-sédimentaire. Elles traduisent également les fortes pressions naturelles et anthropiques qui s'exercent notamment sur les plateformes récifales.

Par ailleurs, des bilans régionaux recensant les enjeux, les besoins et les perspectives d'actions par territoire ont été établis. Ils font ressortir, notamment, l'importance d'avoir une cohérence entre les protocoles et le développement des indicateurs répondant aux enjeux de gestion locaux.

Concernant les récifs coralliens, l'une des principales recommandations d'Ifreco concerne la mise en place des réseaux de surveillance, essentiels pour suivre l'évolution des écosystèmes et pour adapter les politiques et la gestion en conséquence. Cependant, le réseau de suivi des récifs se limite souvent à quelques stations ponctuelles qui restent insuffisantes au regard de la surface qu'occupent les récifs et l'hétérogénéité spatiale que présentent les platiers. De même,

les moyens alloués sont par ailleurs souvent trop insuffisants pour assurer un réseau de suivi densifié régulier à haute fréquence.

S'agissant des herbiers, dont les étendues subissent de fortes variations dans le temps, on note une absence de suivis pérennes de cet écosystème à La Réunion, qui certes ne représente pas de vastes étendues, mais demeure d'intérêt patrimonial et écologique fort. Le bilan du séminaire « Science et Gestion IFRECOR et DCE » qui a eu lieu en 2017 à Schoelcher en Martinique met également en exergue la nécessité de mettre en place un suivi de la dynamique spatio-temporelle à long terme, notamment des paramètres de superficie et de fragmentation, comme l'une des priorités pour le suivi des herbiers.

S'agissant d'enjeux méthodologiques, de nombreuses évaluations de la biodiversité sont basées sur des inventaires d'espèces et les efforts peuvent être considérables pour identifier toutes les espèces présentes dans une région et encore plus s'il s'agit de décrire et de caractériser la distribution des espèces dans le monde (Wilson, 2000). De même, la plupart des études se basent sur des radiales unidimensionnelles orientées le long d'un gradient environnemental spécifique défini a priori. En ignorant la deuxième dimension spatiale et les changements associés dans la composition des espèces et les gradients environnementaux, cette approche peut fournir un aperçu limité du modèle complet de la diversité. Mettre en place des méthodes opérationnelles de suivi de la biodiversité nécessitent en effet de minimiser l'utilisation des données *in situ* et de garantir l'applicabilité à large échelle, y compris dans des endroits éloignés et sans accès.

Il y a donc un réel besoin d'indicateurs de suivi et d'évaluation de la biodiversité simples, intégrateurs, et opérables avec des capacités à distinguer les effets des pressions directes et indirectes. Les images que fournissent les systèmes satellites opérationnels permettent de répondre à ce besoin.

2.1. Données & méthodes mobilisables pour les connaissances sur la biodiversité côtière

2.1.1. Les données

La famille des satellites Sentinel 1 et 2 du programme européen Copernicus offrent désormais des images radar et multispectrales de la Terre à haute résolution spatiale. Ce système permet des acquisitions multispectrales avec une haute répétitivité temporelle avec une résolution spatiale de 10m et devraient fortement contribuer à l'amélioration du suivi régional au cours de la prochaine décennie (Bae et al., 2019 ; Ma et al., 2019). L'accès et l'intégration d'informations à échelle fine et spatialement exhaustives que propose les satellites Pléiades sont une étape cruciale vers une mise à l'échelle régionale et une surveillance mondiale (Schimel et al., 2013 ; Violle et al., 2014 ; Costion et al., 2015). Les nouvelles constellations satellites comme Pléiades Neo, avec une résolution spatiale accrue (30cm) et une bande spectrale supplémentaire dédiée au milieu marin (deep blue), ou CO3D, dédié à l'acquisition de modèles numériques de terrain, pourront aussi apporter des informations d'intérêt pour la cartographie. Les capteurs optiques passifs récents rendent possible l'accès à des données à grande échelle, et à haute revisite temporelle. En revanche, la résolution spatiale native de

certaines capteurs, notamment hyperspectraux tel que EnMAP (DLR, Allemagne) ou PRISMA (ASI, Italie) reste relativement faible pour cartographier précisément la zone côtière. C'est pourquoi de nombreuses approches de fusion de données multispectrales ou de fusion panchromatique/multispectral (pansharpening) ont été proposées et étudiées en détail afin d'obtenir un produit possédant toutes les caractéristiques requises : grande couverture, haute résolution spatiale et temporelle, et richesse spectrale grâce au différentes longueurs d'ondes du visible et infrarouge proche et moyen à disposition (Vivone 2014). L'analyse conjointe des données acquises par différents capteurs (Dalla Mura, 2015) permet en effet la mise en œuvre plus efficace de méthodes basées sur l'intelligence artificielle comme « l'apprentissage profond » (ou machine learning) dans le but d'obtenir des cartes précises de classification de l'occupation des sols, qu'elles soient obtenues de façon supervisée (Ghamsi, 2017) et que chaque pixel soit associé à la classe majoritaire, ou qu'elle soit démixée de façon non supervisée (Drumetz, 2016). La fusion entre capteurs multispectraux avec différentes caractéristiques en termes de résolution spatiale et spectrale, ainsi qu'entre des capteurs panchromatiques et hyperspectraux (satellites de nouvelle génération comme PRISMA et EnMap) sont aussi possibles (Loncan, 2015).

2.1.2. Les métriques

La mise en place des méthodes opérationnelles de suivi de la biodiversité nécessitent de minimiser et d'optimiser l'utilisation des données *in situ* et garantir l'applicabilité à large échelle y compris dans des sites éloignés et très difficiles d'accès. BioEOS propose d'utiliser des images de télédétection pour caractériser, via des proxys, la diversité, en deux dimensions et à large échelle sur l'ensemble d'un paysage ultra marin côtier de sa zone d'étude. Ce projet propose de s'appuyer sur le cadre et les produits standards développés par la communauté internationale de GEOBON en déployant le concept des EBVs (Essentiel Biodiversity Variables) sur sa zone d'étude (Peirera, 2013). Des modèles statistiques et proxys (e.g. Beta diversity) détectables par télédétection peuvent également être utilisés pour extrapoler à l'échelle régionale (Harbone et al., 2006 ; Ferrier, S., 2011) les observations *in situ* ponctuelles. A l'interface des aspects fonctionnels et spatiaux, l'approche basée sur l'écologie du paysage contribuerait de manière significative à la compréhension du fonctionnement des écosystèmes perturbés et/ou modifiés et des processus qui contrôlent leur état écologique grâce à (i) l'analyse du patron spatial par corrélations entre les métriques biologiques et paysagères tels que la connectivité et la fragmentation des habitats et (ii) au regard d'indices de biodiversité ou encore de traits biologiques et fonctionnels estimés à différentes échelles.

2.1.3. Les algorithmes

Plusieurs algorithmes développés par la communauté scientifique ont été identifiés pour étudier les fonds marins et caractériser la biodiversité qui leur est associée à partir de données multi-capteurs.

| L'inversion du modèle de transfert radiatif

Une des difficultés principales pour la caractérisation des eaux côtières réside dans l'ambiguïté de la mesure de la réflectance spectrale dont le comportement spectral résulte de la combinaison des effets liés à l'épaisseur de la colonne d'eau, au type de fond, à la diffusion et à l'absorption de la colonne d'eau (Defoin-Platel et Chami, 2007). L'inversion des modèles de transfert radiatif appliquée à des données spectrales permet en effet non seulement d'obtenir

la réflectance spécifique du fond et sa caractérisation (Mishra et al., 2007), mais également d'estimer les constituants de l'eau (Lorthiois et al., 2012) ainsi que la bathymétrie (Minghelli-Roman et al., 2009). Les travaux de ZhongPing Lee ont en effet ouvert la voie de l'estimation des paramètres du fond et de la colonne d'eau (Lee et al., 1998 et 1999). Plusieurs variantes apportées à cette inversion considèrent ou non des contraintes sur les types de fonds (Brando et al., 2009, Petit et al., 2017) ou prennent en compte la corrélation spatiale des pixels adjacents pour réduire les erreurs (Filipi et Kubota (2008)). Des méthodes statistiques comme le Maximum de Vraisemblance rendent les estimations plus robustes mais induisent une perte de résolution spatiale (Jay and Guillaume, 2011). L'originalité de l'approche est la possibilité de prise en compte de la variabilité intrinsèque des habitats benthiques. L'incertitude sur l'estimation des paramètres de la colonne d'eau et/ou du fond marin est à considérer également. Elle dépend principalement (i) de la qualité intrinsèque de la mesure de luminance spectrale par le capteur, (ii) de la complexité optique de l'environnement d'intérêt et (iii) des caractéristiques des traitements algorithmiques réalisés (IOCCG (2019)).

| Le démixage spectral

Pour les mélanges macroscopiques au niveau du pixel, le démixage spectral est une approche possible pour accéder à une information subpixellique (abondance) sur la présence de matériaux d'intérêt. Le spectre de radiance (et après correction radiométrique, de réflectance) peut être modélisé comme une combinaison de spectres de zones de taille sub-pixellique. Dans plusieurs travaux que l'on peut trouver en littérature (par exemple Bioucas-Dias et al., 2012), cette combinaison est considérée comme linéaire (modèle de mélange linéaire). Cependant, cette hypothèse n'est pas valable dans de milieux marins où la composante de lumière réfléchie par les objets d'intérêt dans cette étude est modifiée par interaction de la colonne d'eau (absorption, réflexions multiples etc.) si ces cibles sont submergées. Pour cette raison, l'analyse des hypothèses, la validation de modèles de mélange et le développement de solutions adaptées à ce contexte seront prise en compte dans ce projet.

| L'Intelligence Artificielle

Pour la mise en œuvre des nouvelles technologies liant des données volumineuses « big data », l'intelligence artificielle et sémantique est une approche d'intérêt pour extraire des informations pertinentes et des indicateurs. L'apprentissage profond « deep learning », faisant partie de la famille des méthodes apportant une grande capacité de classification et d'analyse automatique des différenciations, BioEOS propose d'exploiter l'Intelligence Artificielle pour produire les informations recherchées. Ces algorithmes fonctionnent avec plusieurs niveaux de détail ou de représentation des données (réseaux de neurones) qui les rendent particulièrement pertinents pour l'analyse d'images et par extension aux séries temporelles et aux données géoréférencées telles que prévues par BioEOS. Plus spécifiquement, les réseaux convolutifs (CNN) ou de type UNet ou d'autoencodeurs sont adaptés respectivement à la classification sémantique, la détection de changements ou le démixage (Zhu, 2017, Zhang 2016, Ozkan 2018). Cette flexibilité des réseaux de neurones permet donc d'utiliser les architectures d'état de l'art à la suite de la partie du réseau effectuant la fusion, et d'entraîner un modèle end-to-end réalisant toutes les tâches nécessaires simultanément. Les prédictions issues de ces approches offriront ainsi une mesure standardisée des patrons spatiaux et temporels des communautés sur lesquels évaluer les indicateurs d'état et de changements de biodiversité.

2.2. BioEOS, objectifs et mise en œuvre

BioEOS propose de répondre au défi de disposer d'outils d'observation pour acquérir des données fiables et pertinentes qui rendent compte de la variabilité spatio-temporelle de la biodiversité à large échelle en utilisant principalement des images de télédétection. Plus précisément, BioEOS se fixe les objectifs suivants :

(i) caractériser la distribution spatiotemporelle de la biodiversité par analyse des séries temporelles d'images satellite multicapteurs.

(ii) cartographier les changements et produire des indicateurs pour rendre compte de l'impact des changements globaux sur la dynamique spatio-temporelle de l'état de la biodiversité des écosystèmes côtiers.

Au-delà des besoins d'indicateurs d'état en lien avec des pressions anthropiques, la détection de changements brutaux (Dalla Mura 2008) intervenant à la suite d'événements ponctuels (cyclones, canicules, modification de la salinité de l'eau, changement de niveau de la mer, ...), est aussi un enjeu primordial pour les différents acteurs régionaux concernés par le suivi à grande échelle en zone côtière.

La **Figure 1** montre l'organisation proposée pour les développements envisagés dans le cadre du projet BioEOS. Il est prévu une implémentation du démonstrateur BioEOS sous DATARMOR, le cluster de calcul haute performance de l'Ifremer.

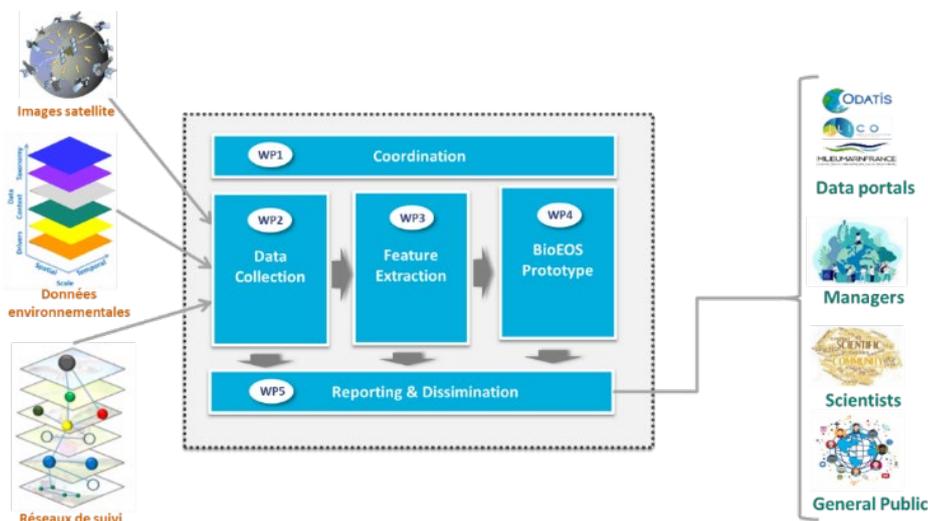


Figure 1 : Organisation proposée pour l'implémentation du démonstrateur BioEOS

Pour la preuve de concept, un ensemble de métriques de biodiversité seront extraites des données collectées sur les sites pilotes (**Tableau 2**). L'ambition de BioEOS est de fournir des informations génériques qui pourraient être utilisées pour différentes utilisations finales telles que : (i) l'état des récifs coralliens, un écosystème difficile avec de multiples transitions entre les régimes en fonction des facteurs de stress (Carpenter et al., 2008), (ii) la thématique du carbone bleu en prenant en compte les producteurs primaires. De même, la restauration et l'utilisation des habitats côtiers végétalisés sont une stratégie prometteuse d'atténuation et d'adaptation au changement climatique (Duarte et al, 2013b; Krause-Jensen et al., 2016), (iii)

la détection d'événements exceptionnels tels que la surveillance du phytoplancton (Gohin et al., 2021) ou (iv) la géomorphologie des fonds marins, une information importante pour déterminer les changements dans la présence ainsi que l'état écologique des habitats côtiers (Andersen et al., 2018, Bajjouk et al., 2020).

Tableau 2. Exemples de métriques envisagées par BioEOS pour le suivi de la biodiversité

Habitats	Métriques	Fréquence	Réunion	Mayotte	Glorieuses	Exemples d'applications
Récifs coralliens	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Extension, ▪ Fragmentation ▪ Cartes de diversité α- et β ▪ Cartes diachroniques 	Saisonnière + périodes cycloniques	X*		X	Suivi de l'état écologique des récifs coralliens
Herbiers	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Extension, ▪ Fragmentation ▪ Cartes diachroniques 	Saisonnière + périodes cycloniques	X*		X	Surveillance de la qualité de l'eau et bilan de carbone bleu
Topographie des fonds	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Cartes bathymétriques ▪ Cartes de rugosité/pente ▪ Cartes d'indices benthiques ▪ Cartes diachroniques 	Saisonnière + périodes cycloniques		X	X	Dynamique géomorphologique des fonds marins
Colonne d'eau	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Cartes mensuelles et saisonnières de Chlorophylle a, turbidity, SST et Kpar ▪ Points de ruptures 	Mensuelle Saisonnière		X**		Détection des ruptures et événements exceptionnels (climatologique, géologique, ...)

* Cofinancement de la DEAL Réunion

** Avec la contribution des données issues du projet OliTROP

Bénéficiaire d'un soutien financier complémentaire du contrat de convergence et de transformation de La Réunion (Préfecture de La Réunion en lien avec le SGAR et la DEAL), le choix s'est porté dans un premier temps sur le site de La Réunion pour initialiser la mise en place des chaînes de traitements. Une première campagne d'acquisition de données in situ a ainsi été organisée en novembre 2023 dans un objectif de calibration et de validation des algorithmes et modèles qui seront utilisés.

CAMPAGNE D'ACQUISITION

Site de l'île de La Réunion



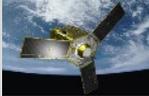
3. Campagne d'acquisition

Afin de mieux calibrer et valider les résultats des traitements des propriétés optiques qui seront effectués sur les images satellite des principaux capteurs considérés, il est essentiel de faire une acquisition de données *in-situ* simultanément au passage de capteurs satellitaires. Ainsi, une campagne d'acquisition des données terrains a été organisée dans le cadre du projet BioEOS sur le site de La Réunion, durant la période du 14 novembre au 1^{er} décembre 2023. Coordinée par Ifremer, cette campagne a impliqué quatre autres organismes partenaires : L'IRD, l'université de Toulon, la Sorbone Université et l'association ARBRE.

3.1. Acquisitions d'images satellites

Dans le cadre du développement du démonstrateur BioEOS, plusieurs systèmes satellites sont considérés pour évaluer leur potentiel de contribution à l'extraction, directe ou indirecte, d'informations pertinentes pour le suivi de la biodiversité côtière (**Tableau 3**).

Tableau 3. Capteurs satellites considérés par le projet BioEOS

Système satellite		Résolution spatiale	Nombre de bandes spectrales	Domaine spectral
Pléiades		2,4 m (MS) 70 cm PAN	4 + PAN	430-950 nm
Pleiades NEO		1,2 (MS) 30 cm (PAN)	6 + PAN	400 à 950 nm
Sentinel 2		10/20/60 m	13	440-2200 nm
ENMAP		30 m	262	420-2450 nm
PRISMA		30 m 5 m (PAN)	239+ PAN	400-2505 nm

3.1.1. Pléiades

Composée de deux satellites, appelés 1A et 1B, Pléiades est une constellation lancée par le CNES le 17 décembre 2011 (Pléiades 1A) et le 2 décembre 2012 (Pléiades 1B). La **Figure 2** montre un aperçu de la scène acquise, dans le cadre de DINAMIS, à la date la plus proche de la réalisation de la campagne BioEOS.

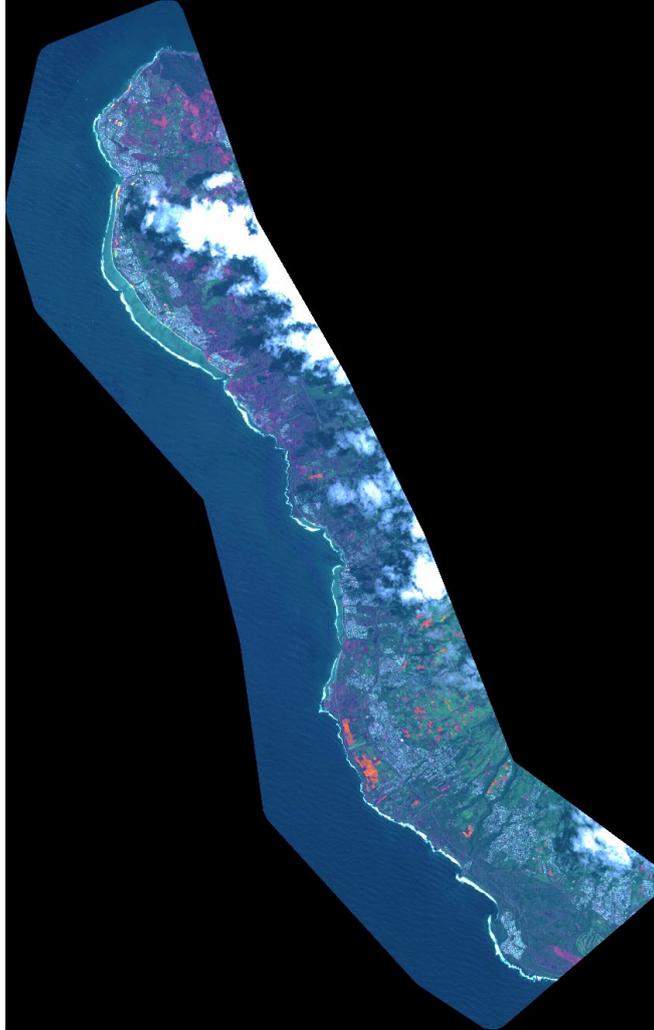


Figure 2 : Image de Pléiades du 05/10/2023

3.1.2. Pléiades NEO

Pléiades Neo est une constellation de satellites optiques à très haute résolution (VHR), lancés en 2021 et 2022. Deux satellites sont aujourd’hui en orbite. Ci-dessous les caractéristiques des deux scènes acquises le 20 et 28 novembre 2023 (Figure 3) avec le soutien du CNES, pour les besoins spécifiques du projet BioEOS :

Date	20/11/2023	28/11/2023
Resolution	30 cm	30 cm
Acquisition Time	06:32:48 UTC	06:36:44 UTC
Off-Nadir	12.5°	15.6°
Sun Azimuth	88.9°	93.3°
Azimuth Angle	179.95°	180.03°
Sun Elevation	68.4°	69.1°
Cloud Cover	2.0%	28.0%



Figure 3 : Aperçus des images de Pléiades NEO acquises le 20/11/2023 (à gauche) et 28/11/2023 (à droite)

3.1.3. Images Sentinel

Sentinel-2 est une mission d'observation de la Terre du programme Copernicus qui acquiert systématiquement des images optiques à haute résolution spatiale (10 m à 60 m) au-dessus des terres et des eaux côtières. La mission prend en charge une large gamme de services et d'applications tels que la gestion des urgences ou la qualité de l'eau. Sentinel-2 a été développé et est exploité par l'Agence spatiale européenne. La **Figure 4** illustre un aperçu de la scène acquise à la date la plus proche de la réalisation de la campagne BioEOS.

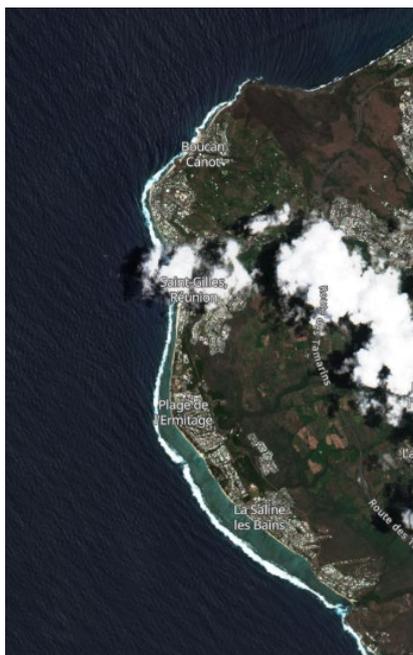


Figure 4 : Image Sentinel-2 acquise le 12/11/2023

3.1.4. Prisma

Lancé le 22 mars 2019, PRISMA est un satellite d'imagerie hyperspectrale à moyenne résolution (30 m), développé et exploité par l'ASI (Agenzia Spaziale Italiana). Il s'agit du successeur de la mission abandonnée HypSEO (Hyperspectral Satellite for Earth Observation) et sa durée de mission prévue est de 5 ans.

Une zone d'acquisition de 30x30 km a été programmée pour le satellite PRISMA selon l'estimation des opportunités d'acquisition suivantes (Figure 5) :

Start Time	Stop Time	Latitude (deg)	Longitude (deg)	Roll (deg)	SZA (deg)
2023-11-17 06:34:17	2023-11-17 06:34:21	-21.15536	55.27497	-5.3	21.1
2023-11-23 06:37:32	2023-11-23 06:37:36	-21.15536	55.27497	2.4	20.5
2023-11-29 06:40:50	2023-11-29 06:40:55	-21.15536	55.27497	10.1	20.1

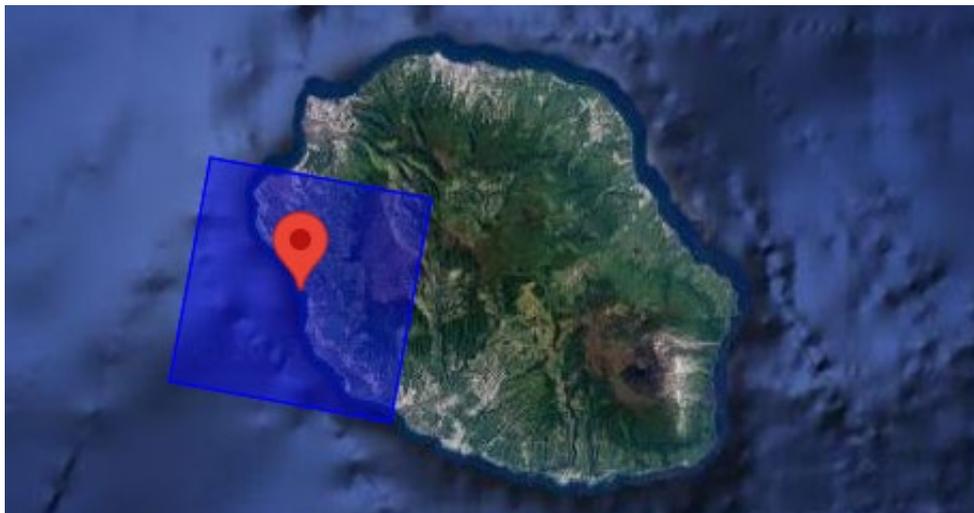


Figure 5. Programmation de la scène PRISMA par le CNES durant la campagne BioEOS

Malgré le passage en priorité haute de cette acquisition, elle n'a pas pu être réalisée dans de bonnes conditions en raison d'une couverture nuageuse trop importante (Figure 6).

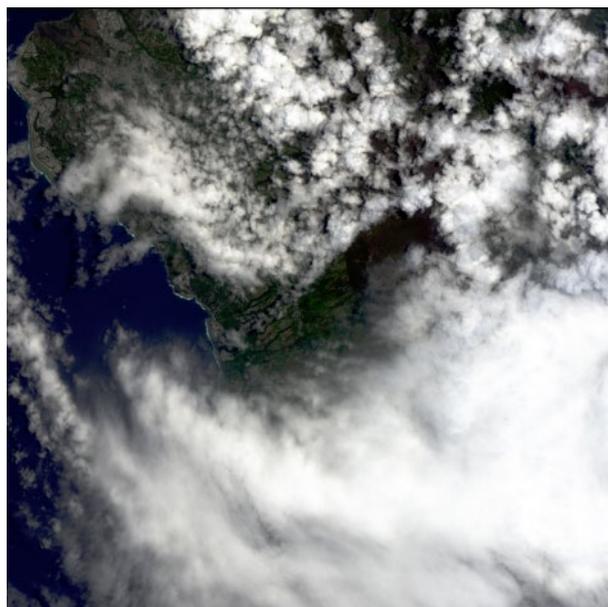


Figure 6 : Image PRISMA acquise le 17/11/2023

3.1.5. EnMap

Le programme EnMAP (Environmental Mapping and Analysis Program) est une mission satellitaire allemande visant à capturer des données d'images hyperspectrales de l'atmosphère et de la surface de la Terre. Lancée en avril 2022, la mission est gérée par le Centre aérospatial allemand (DLR), le Centre allemand de recherche en géosciences (GZF) dirigeant les recherches scientifiques associées.

Une scène a été programmée et acquise spécifiquement pour le projet BioEOS dans le cadre d'un appel à projet destinés aux utilisateurs potentiels de EnMap proposé par le DLR (Figure 7). Une image de très grande qualité a été acquise dans des conditions météorologiques très favorables le 20 novembre 2023 (ciel très dégagé sans cirrus apparent, mer calme, vitesse de vent quasi nulle, Figure 8).



Figure 7 : Aperçu de l'image ENMAP acquise le 20/11/2023

3.2. Acquisitions des données *in situ*

L'objectif principal est de cartographier les habitats benthiques du littoral à partir d'images satellites optiques dont le prétraitement nous fournit une réflectance au niveau de la surface de l'eau. La Figure 8 illustre les différentes interactions entre le rayonnement et les matières en suspension dans le système couplé atmosphère-océan entre la source (le soleil) et le capteur satellitaire.

Afin d'estimer la réflectance du fond qui est l'une des quantités radiométriques d'intérêt dans notre étude, il est nécessaire de savoir modéliser le rayonnement se propageant dans la colonne d'eau puis d'inverser la réflectance de surface pour déterminer les propriétés bio-optiques de la colonne d'eau (i.e., concentrations en matières en suspension et dissoutes). Il est indispensable d'effectuer des mesures *in situ* de ces propriétés bio-optiques et de la réflectance du fond pour documenter la zone d'étude mais également pour valider les

méthodes d'inversion de la réflectance de surface dérivée du capteur satellitaire. Les constituants marins ayant un impact sur les processus d'absorption et de diffusion du rayonnement dans la colonne d'eau, et donc sur la réflectance de surface sont les matières phytoplanctoniques (à travers la concentration en Chlorophylle *a*), les matières en suspension (y compris d'origine minérale) et les matières organiques dissoutes colorées (CDOM). Des mesures *in situ* ont été réalisées pour ces trois constituants.

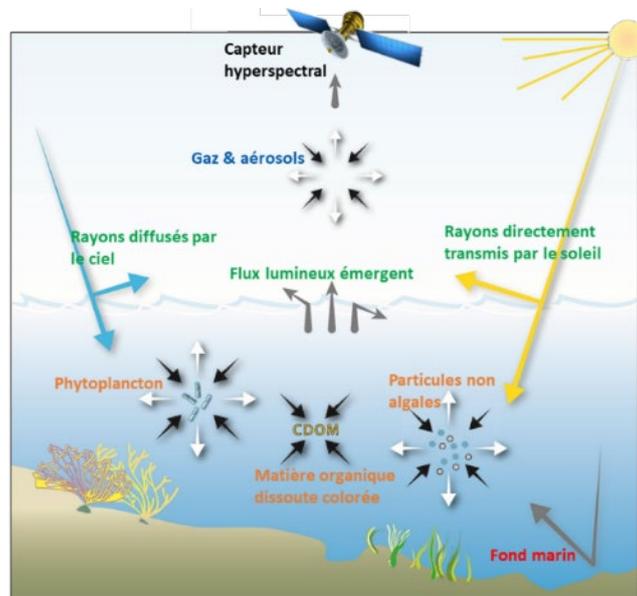


Figure 8 : Interactions du rayonnement se propageant dans le système couplé atmosphère-océan du soleil (source) vers un capteur satellitaire avec les matières en suspension présentes dans le milieu.

3.2.1. Stratégie d'échantillonnage

Nous avons sélectionné deux zones test sur lesquelles nous avons effectué les mesures. Deux principes ont orienté la détermination et la localisation des points de contrôle terrain, dans une perspective d'optimisation. S'appuyant à la fois sur les résultats de 2015 issus de Hyscores et sur la connaissance du terrain, chaque point a été positionné sur des zones d'intérêt. Il s'agit des zones situées autour de la passe de l'Ermitage et de Boucan Canot. Sur ces 2 sites, 5 stations ont été définies (Figure 9).

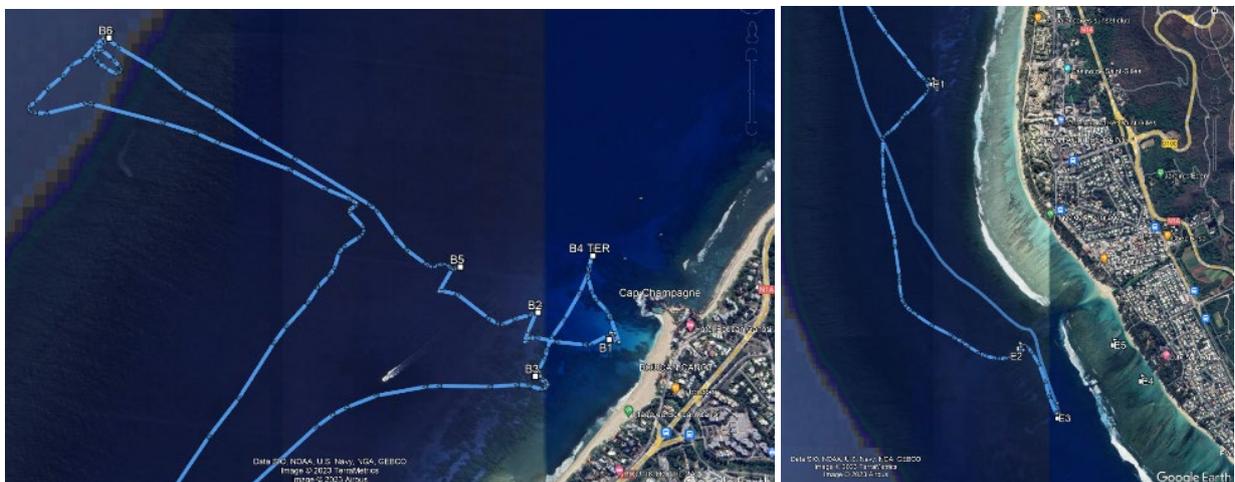


Figure 9 : Plan d'échantillonnage sur les sites de Boucan Canot (à gauche) et de l'Ermitage (à droite)

Boucan Canot : cette zone a moins d'intérêt sur le plan de la cartographie des habitats benthiques. Cependant, La configuration de ce site (ouvert sur l'océan, fonds sableux homogènes sur un gradient de bathymétrie continu) en fait un site idéal pour tester la robustesse des algorithmes pour des eaux plus profondes étant donné l'impact fort de la bathymétrie sur la réflectance en eaux lagunaires peu profondes. L'homogénéité de la composition du fond (sable clair) permet également une validation plus aisée des résultats.

Zone de l'Ermitage : ce lieu d'étude a été retenu comme site pilote pour les développements méthodologiques car il présente à la fois une très grande diversité d'habitats benthiques et un gradient bathymétrique important. Cette richesse permet d'appréhender, dans une zone spatialement restreinte, la plupart des situations présentes sur le littoral réunionnais (pente externe, platier et dépression d'arrière récif).

Afin d'apprécier la variabilité spatiale et temporelle, des prélèvements à plusieurs stations et à deux dates ont été réalisés aussi bien sur la zone du platier et dépression d'arrière récif (DAR) qu'en pente externe. L'échantillonnage sur cette dernière a été réalisé à l'aide d'embarcations semi-rigides (**Figure 10**). Le **Tableau 4** montre la localisation des stations échantillonnées ainsi que la profondeur maximale ou des mesures ont été effectuées.

Station	Latitude	Longitude	Profondeur maximale échantillonnée
B1	-21.027559	55.224408	8m
B2	-21.026831	55.222346	20 m
B3	-21.028564	55.222264	8 m
B4	-21.025849	55.224845	15m
B5	-21.025589	55.220097	15m
B6	-21,019359	55.209920	Subsurface en zone profonde sans signal retour du fond
E1	-21.071307	55.214931	20m
E2	-21.08756	55.220502	20m
E3	-21.091725	55.223103	10m
E4	-21.08945	55.228509	1.5 m (Lagon)
E5	-21.087252	55.226701	1.5 m (Lagon)

Excepté pour la station B6 qui a été visité une seule fois, Les 10 autres stations ont été mesurées 3 fois : le 20/11, le 23/11 et le 28/11/2023. Quand la profondeur le permettait (>10m), nous avons réalisé **6 paliers de mesures à 10 m, 5 m, 2 m, 1 m, 0.5 m et 0-** (juste sous la surface de l'eau). Toutes les métadonnées associées à chaque mesure (date, heure, site, profondeur, conditions météo, ...) sont notées pour les opérateurs.



Figure 10 : Embarcation semi-rigide utilisée durant la campagne BioEOS pour acquérir des données *in situ* sur la pente externe

3.2.2. Propriétés optiques de l'eau

La grappe optique utilisée pour les mesures des propriétés optiques de l'eau et des variables environnementales est constituée d'un châssis en inox sur lesquels ont été placés 4 instruments (Figure 11) :

- La sonde CTD (Sea-Bird HydroCAT) qui mesure la température, la salinité, l'oxygène dissous et la profondeur.
- La sonde FLNTU qui mesure la fluorescence et la turbidité.
- Le radiomètre TRIOS ACC (RAMSES G2-ACC-VIS-Ti-300m) dirigée vers le haut qui mesure l'éclairement descendant,
- Le radiomètre TRIOS ARC (RAMSES G2-ARC-VIS-Ti-300m) dirigée vers le bas qui mesure la luminance montante,

Les mesures radiométriques ARC et ACC étaient commandées par un système d'acquisition fourni par la société Trios (Tribox).

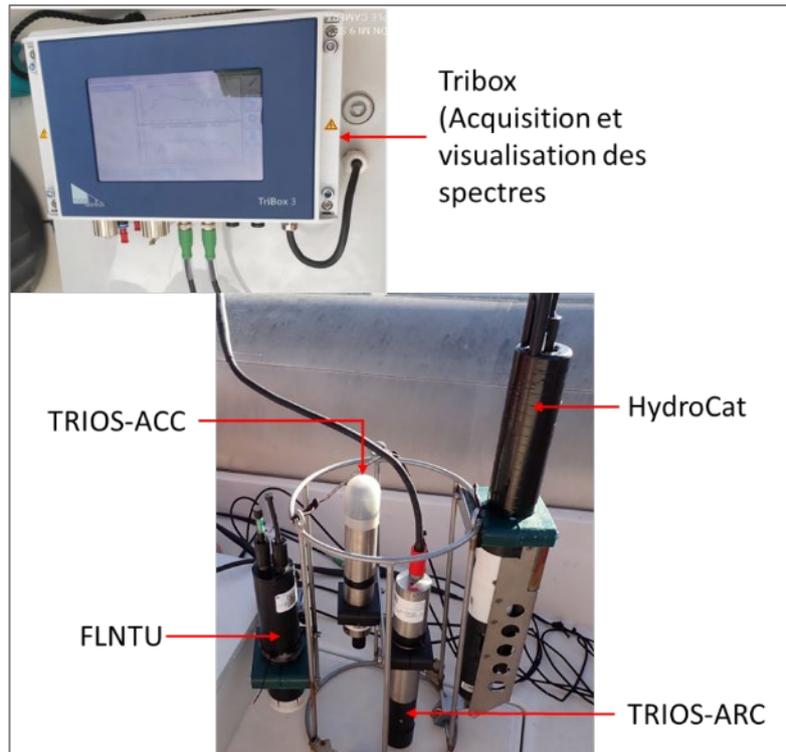


Figure 11 : Cage optique avec les sondes TRIOS, CTD et FLNTU

3.2.2.1. CTD

La sonde CTD utilisée est la sonde HydroCAT de la société Seabird (<https://www.seabird.com/hydrocat-ctd-and-optional-optical-dissolved-oxygen/product-accessories?id=60761421600>). Cette sonde intègre de multiples capteurs sur le même châssis et une pompe qui aspire l'eau pour l'analyse de plusieurs paramètres. Les **Figure 12** (températures) et **Figure 13** (salinité) montrent des exemples de profils obtenus par la CTD.

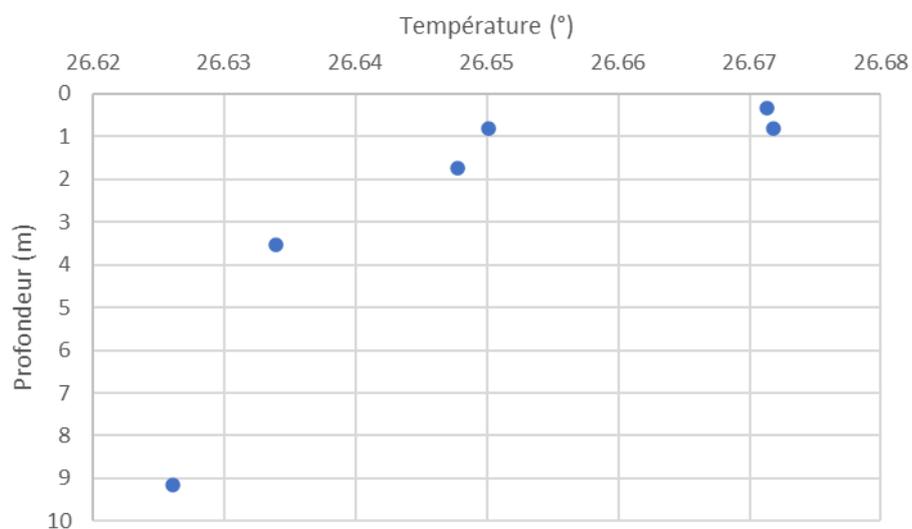


Figure 12 : Température en fonction de la profondeur mesurée à la station

Le profil de température montre que la température diminue avec la profondeur.

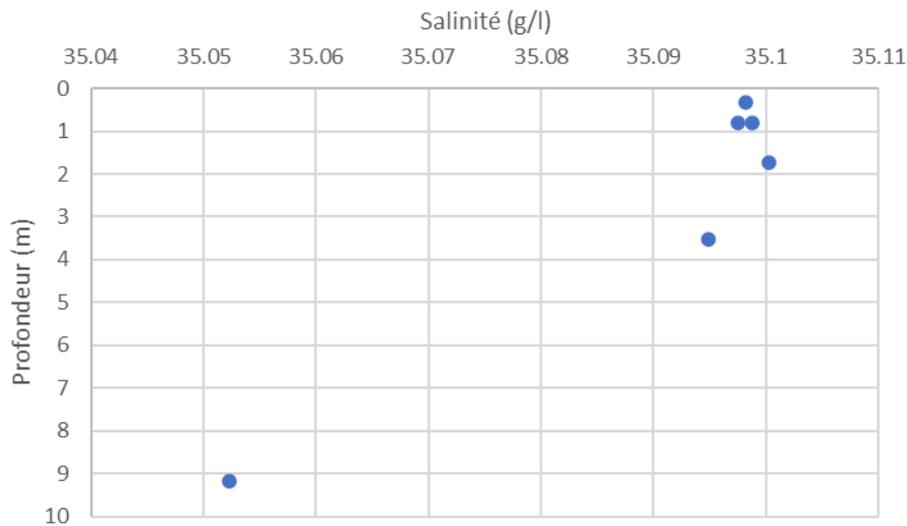


Figure 13 : Salinité en fonction de la profondeur

Le profil de salinité montre que la salinité de l'eau diminue légèrement avec la profondeur ; une salinité plus élevée en surface est attendue en raison de l'évaporation.

3.2.2.2. Fluorimétrie

Le capteur utilisé est la sonde ECO FLNTU de la société Seabird (<https://www.seabird.com/eco-flntu/product?id=60762467722>). La mesure de fluorescence peut être directement reliée à la concentration en Chl a et donc à la biomasse phytoplanctonique.

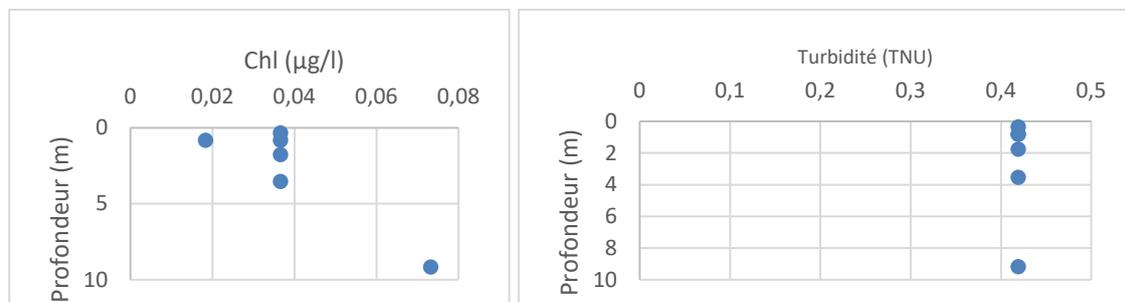


Figure 14 : Exemple de profils Fluorométrie/Turbidité

De très faibles concentration de chlorophylle (<0,08 µg/l) ont été mesurées à toutes les profondeurs. La valeur de turbidité est constante dans la colonne d'eau. Elle est égale à 0,42 NTU (Figure 14).

3.2.2.3. Mesures de l'éclairement par les sondes TRIOS

Les mesures de l'éclairement (irradiance en anglais mesurée en $W/m^2/nm$) et de luminance (radiance en anglais mesurée en $W/m^2/nm/sr$) ont été réalisées grâce à l'appareil Ramsès de la société TRIOS (<https://www.trios.de/en/ramses.html>) dans les gammes spectrales de 320 à 950 nm. Ces capteurs permettent de mesurer la luminance et l'éclairement dans les gammes

spectrales de 320 à 950 nm. Ils sont particulièrement adaptés pour être autonomes sur le terrain grâce à leur taille et leur poids réduits ainsi qu'à leur très faible consommation d'énergie. Les mesures avec les radiomètres Trios sont facilitées car elles s'opèrent à partir de la surface. Les radiomètres sont fixés sur un châssis et reliés à un câble transmettant les données jusqu'au système d'acquisition Tribos à partir duquel l'utilisateur démarre l'acquisition suivant l'immersion désirée. La profondeur est estimée grossièrement lors du déploiement grâce à une corde graduée et la profondeur exacte est déterminée en post-traitement à l'aide du capteur de pression inclus dans les radiomètres Trios.

Les mesures d'éclairement descendant le long de la colonne d'eau permettent de déterminer le coefficient d'atténuation diffuse (K_d) de l'eau, qui est relié au coefficient d'atténuation (absorption + diffusion). Le radiomètre TRIOS ACC est orienté vers le ciel pour mesurer l'éclairement descendant (en $W/m^2/nm$) et le radiomètre TRIOS ARC, orienté vers le bas, mesure la luminance montante en $W/m^2/sr/nm$ (Figure 15)

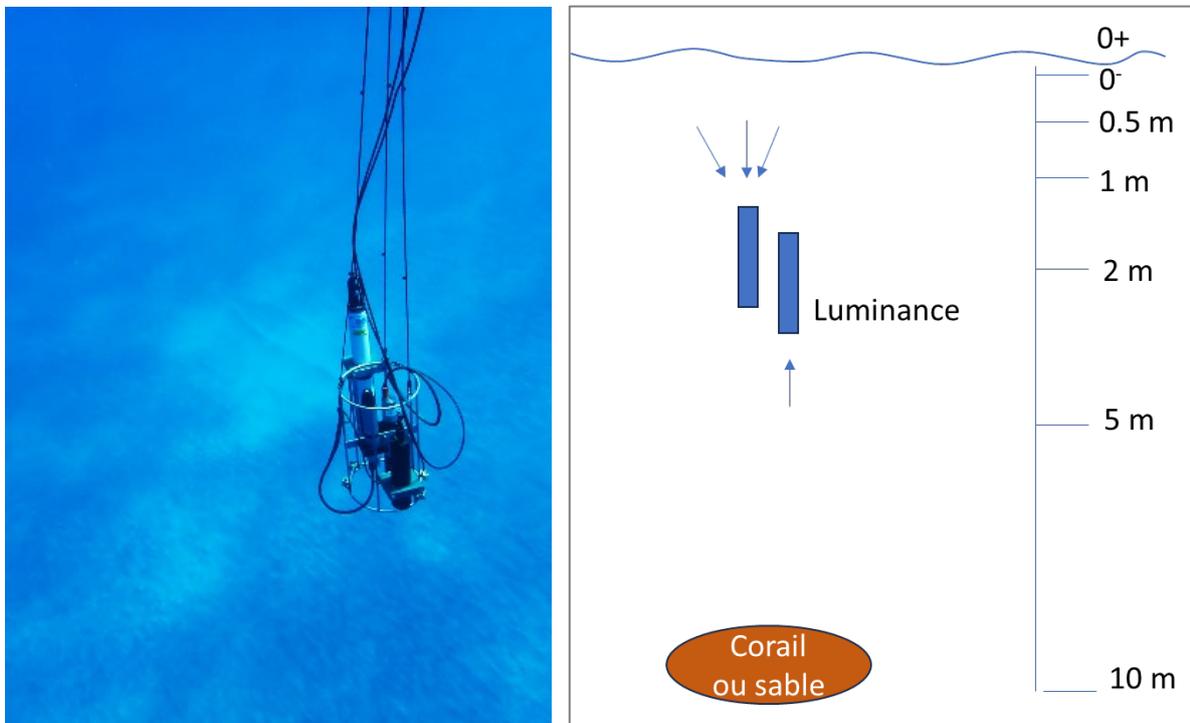


Figure 15 : Protocole de mesure de l'éclairement descendant et de la luminance montante par les radiomètres Ramses Trios dans la colonne d'eau (pente externe du site d'étude).

Des notes ont été prises à chaque acquisition de mesures pour une station donnée dans le but de préciser notamment les conditions atmosphériques, de l'état de mer et du déploiement de la cage optique (Figure 16).



Figure 16 : Note d'informations associées aux mesure d'éclairement dans chaque station et prises de photos sur l'état de la surface de la mer et du ciel au moment de la réalisation de la mesure.

Au sein de la plateforme récifale, le dispositif d'acquisition des mesures radiométriques a été adapté en fixant des pieds rotatifs en bas de la cage permettant ainsi de s'adapter à des mesures sur des fonds coralliens non plats et en faible profondeur (**Figure 17**). La cage optique a été installée par un plongeur.

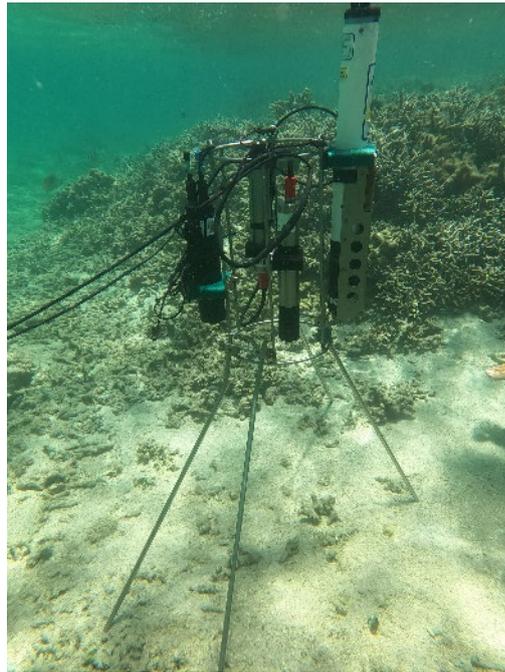


Figure 17 : Mesure de l'éclairement descendant et de la luminance montante par les sondes RAMSES dans la plateforme récifale

Le rapport entre la luminance montante et l'éclairement descendant fournit la réflectance dite « de télédétection » (notée R_{rs}) (**Figure 18**).

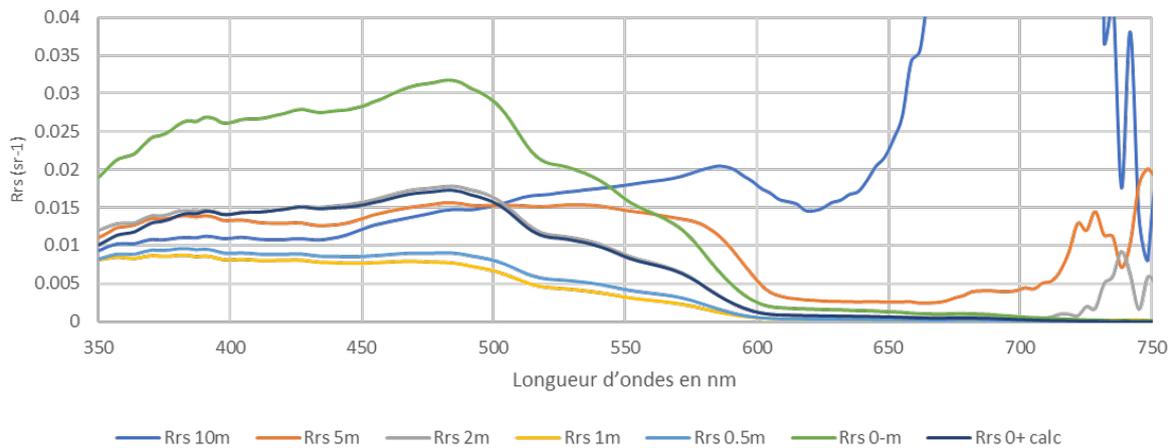


Figure 18 : Réflectance de la colonne d'eau à différentes profondeurs

La mesure de l'éclairement descendant à différentes profondeurs permet également de mesurer l'atténuation diffuse de l'eau K_d (Figure 19).

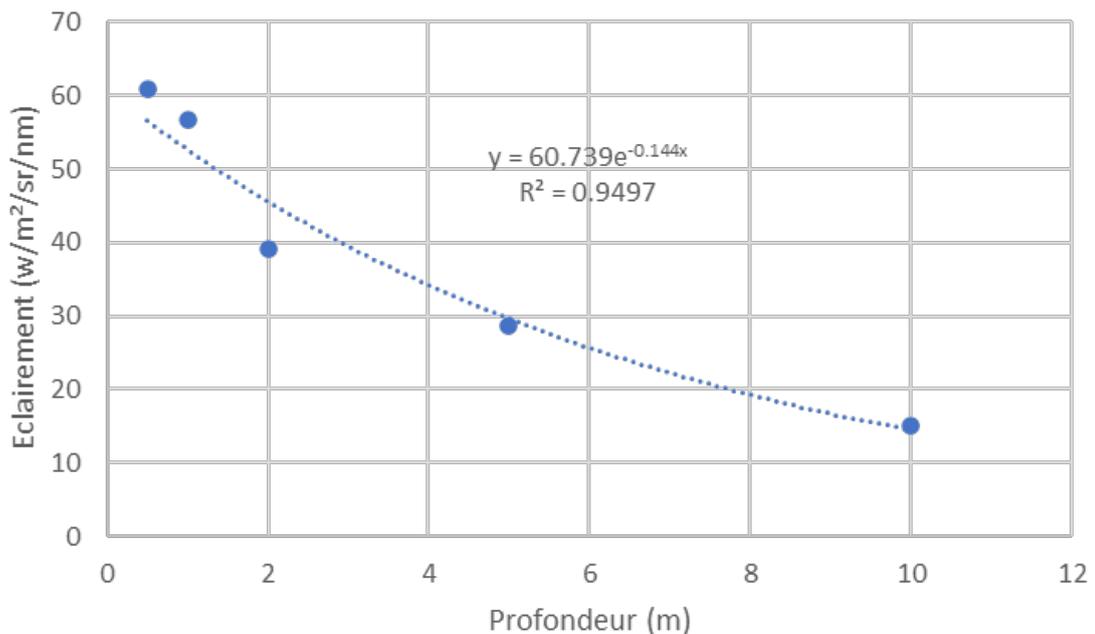


Figure 19 : Variation de l'éclairement descendant en fonction de la profondeur à la longueur d'onde 350 nm. Le coefficient de régression dans la fonction exponentielle fournit la valeur du coefficient d'atténuation diffuse K_d (en m^{-1}) ($K_d=0.144 m^{-1}$ dans cet exemple).

Les valeurs de K_d peuvent être estimées pour toutes les longueurs d'onde. Les valeurs de K_d mesurées pour notre site d'étude sont caractéristiques des eaux claires de l'océan ouvert (eaux de type «Cas 1» oligotrophes) comme le montre la Figure 20.

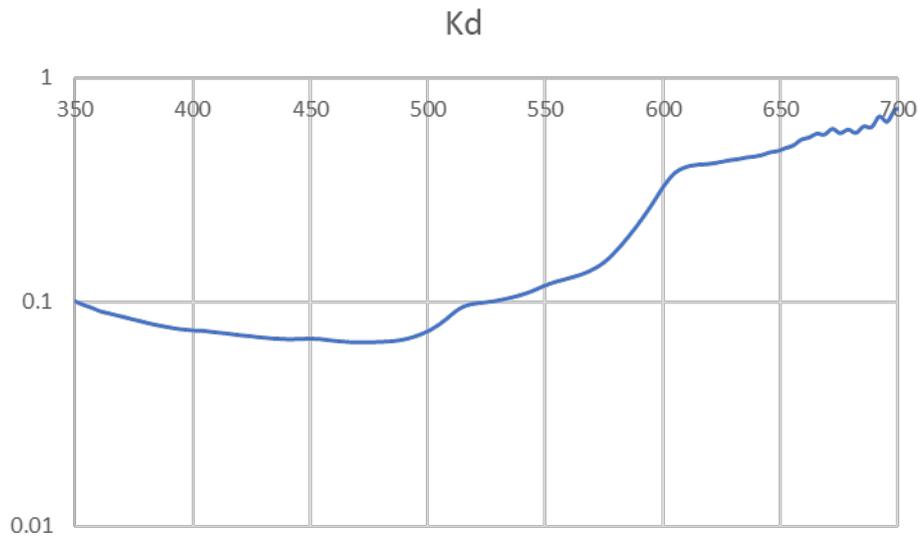


Figure 20 : Variation spectrale du coefficient d'atténuation diffuse K_d (en m^{-1}) caractéristiques des eaux oligotrophiques (Jerlov, 1968)

La mesure de la réflectance juste sous la surface de la mer (notée profondeur 0-) nous permet de déduire la réflectance de l'eau au-dessus de la surface (notée 0+) qui sera utilisée pour vérifier la robustesse des corrections atmosphériques appliquées aux images satellite par l'équation (1).

$$\rho_w^{0+}(\lambda) = \frac{0.52 \rho_w^{0-}(\lambda)}{1 - 1.56 \rho_w^{0-}(\lambda)} \quad (1)$$

3.2.2.4. Prélèvements

Le but des prélèvements est d'acquérir une connaissance des propriétés bio-optiques de la colonne d'eau en analysant :

- la concentration en matières en suspension (MES) ainsi que mesure de la proportion minérale (MI) et organique de ces matières (MO).
- la concentration en chlorophylle a (CHLORO A).
- la fraction colorée des composés organiques dissous dans l'eau de mer, ou CDOM (Colored Dissolved Organic Matter) encore appelée « substances jaunes ».

Sur la plateforme récifale, les prélèvements ont été réalisés au moyen de flacons tenus à la main par un opérateur à la nage. Les flacons ont été immergés fermés afin d'être remplis aux endroits/profondeurs désirées. En pente externe, les points d'échantillonnage ont été approchés en bateau semi-rigide et les prélèvements faits grâce à des bouteilles Niskin immergées à la profondeur désirée. L'eau de mer prélevée a ensuite été filtrée pour effectuer en laboratoire les mesures de concentrations en matières en suspension et en CDOM (**Figure 21**).

Ces prélèvements ont été réalisés aux 10 stations, le 20/11/2023 et le 28/11/2023. Ils sont pour le moment en cours d'analyse en se basant sur les protocoles d'Aminot et Kérouel (2004) pour la chlorophylle a et les MES et de Babin et al. (2003) et Loos et Costa (2010) pour les CDOM.



Figure 21 : Préparation pour la réalisation des prélèvements et dispositif de filtration pour l'analyse de la chlorophylle, de la matière en suspension et du CDOM

Les analyses des échantillons prélevés seront réalisées pour partie par le CITEB (CHLORO A et MES) et pour partie par le MIO (CDOM).

3.2.3. Composition du fond marin

3.2.3.1. Collecte de signatures spectrales des habitats benthiques

Les mesures de réflectance ont été réalisées à l'aide d'un spectroradiomètre GER1500 de marque SVC (Spectral Vista Corporation) placé dans un caisson étanche et permettant une manipulation autonome (sans lien avec un PC en surface) par un opérateur depuis un bateau et en plongée dans la zone de dépression d'arrière-récif (**Figure 22**).

	Gamme spectrale :	350 – 1050 nm
	Résolution spectrale :	1,5 nm entre 300 – 1100 nm
	Ouverture (FOV) :	4° émergé / 3° immergé
	Dimensions :	37cm x 40cm x 22cm
	Poids :	10,8 kg
	Prof. Maximale :	30 m
	Flottabilité :	Positive – négative avec 2 kg de lest
	Autonomie :	Emergée (spectro seul) : 4 h x 2 batteries Immergée (dans le caisson) : 8 h x 2 batteries
Spectralon :	Surface lambertienne renvoyant 99% du signal lumineux incident sur toute la gamme spectrale	

Figure 22 : Matériel utilisé pour la mesure de la réflectance du fond marin. Le caisson étanche (en haut) dans lequel est placé le spectroradiomètre (au milieu). En bas, la surface blanche de référence (Spectralon) est utilisée pour calibrer les données en fonction de la luminosité ambiante.

Les mesures sont réalisées, appareil immergé, directement au-dessus de l'objet à analyser. Une première série de mesures sur le Spectralon placé à proximité de la cible (même profondeur) permet de calibrer l'appareil en fonction de la luminosité ambiante. La seconde série de mesures est réalisée sur la cible d'intérêt (Figure 23)

Le temps d'intégration (durée durant laquelle le capteur du spectroradiomètre est exposé à l'énergie lumineuse renvoyée par la cible) a été ajusté automatiquement par l'appareil en fonction de l'éclairage ambiant. Le nombre de mesures moyennées par enregistrement est de 16. Ces deux paramètres ont été réglés directement sur le spectroradiomètre en début de mission.



Figure 23 : Acquisition de la réflectance du fond marin pour collecter les signatures spectrales des habitats benthiques par le spectromètre GER-1500

Ces mesures, réalisées sur une seule ou différentes parties de la cible permettent de prendre en compte l'hétérogénéité spatiale (différences de structure, texture, coloration) et ses impacts potentiels sur la réflectance. Le nombre d'enregistrements du blanc est porté à 10 lorsque des variations rapides de la luminosité sont observées afin d'éviter la collecte de spectres saturés. La multiplication de spectres permet en effet une vérification a posteriori des données et l'élimination des spectres aberrants lors des post-traitements. La distance à la cible (40 cm environ) et l'orientation du plongeur (appareil à bout de bras face au soleil) tiennent compte des préconisations en fonction des cibles et de l'environnement. Le diamètre de la surface couverte au sol pour un angle d'ouverture de 3° et configuration immergé est d'environ 2,1 cm, compatible avec la prise de mesures sur des cibles pures et de petite taille.

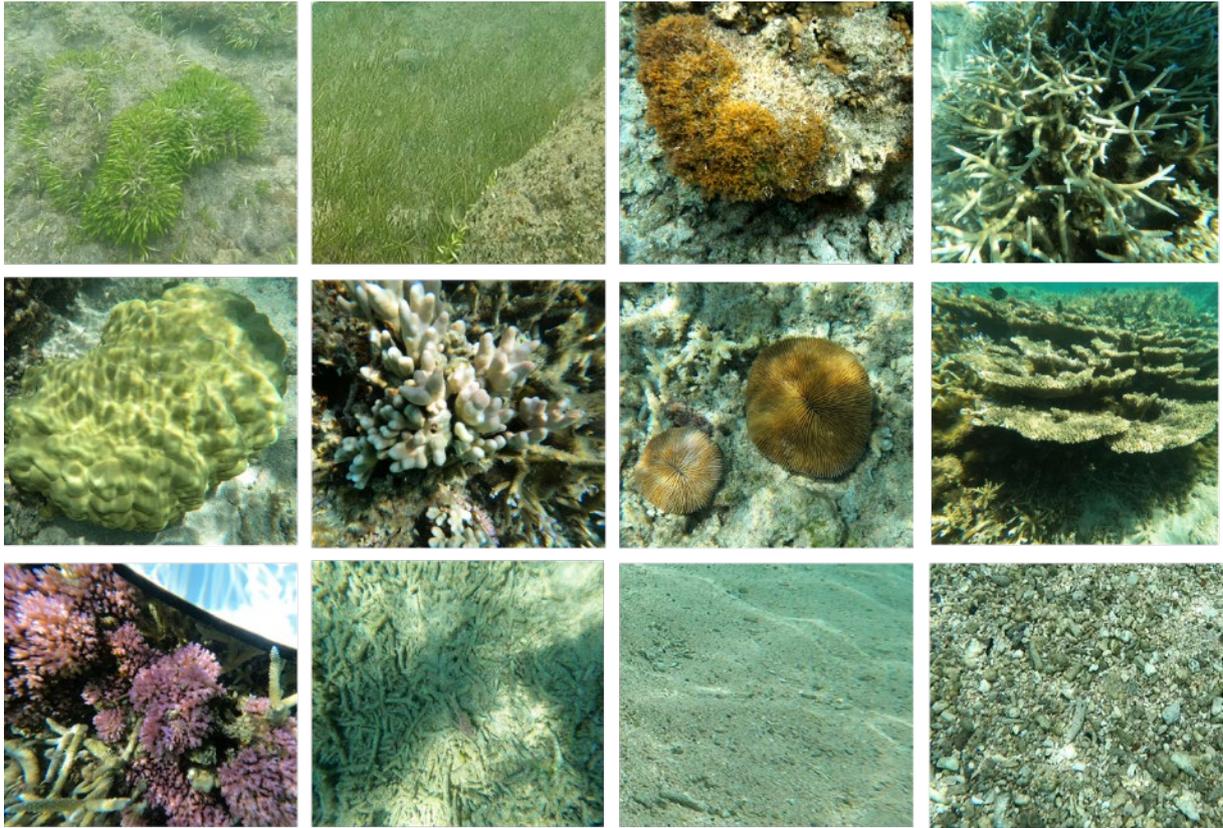


Figure 24 : Exemple de types de fond (coraux, herbier et substrats) pour lesquels des signatures spectrales ont été acquises.

Au total, 787 spectres ont été acquis pour caractériser les signatures spectrales des principaux habitats benthiques et d'espèces présents sur le site de La Réunion (Figure 24). La Figure 25 illustre quelques exemples de signature spectrales acquises pour certaines formes de coraux : libre, massifs ou encroûtants.

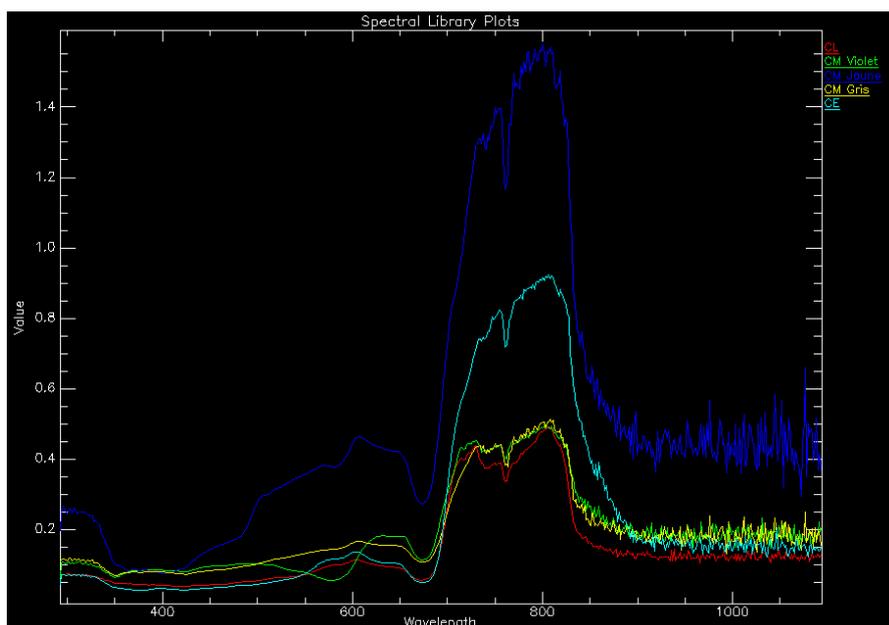


Figure 25 : Exemples de signatures spectrales acquises pour des coraux libres (CL), des coraux massifs (CM) et des coraux encroûtants (CE)

3.2.3.2. Observations ponctuelles

Les observations ponctuelles envisagées par BioEOS s'appuient sur les préconisations du guide méthodologique de l'IFRECOR (Nicet et al., 2015). Elles consistent en une évaluation visuelle de différents paramètres biologiques et environnementaux nécessaires à la caractérisation d'une typologie des habitats. Pour les besoins du projet, les paramètres les plus importants relèvent du peuplement caractéristique de l'habitat visité et plus particulièrement les taux de recouvrement (pourcentage) des composantes principales de ces peuplements (algues, coraux, substrat, herbiers). Ces acquisitions peuvent être réalisées selon deux protocoles :

(i) Le premier est celui du projet UTOPIAN :

Ce protocole, mis en œuvre durant la campagne, est basé sur la méthode CORRAM (Pinault et al., in prep). Il s'agit d'une méthode d'évaluation rapide mise en œuvre sur des stations réparties de manière aléatoire stratifiée (plusieurs stations aléatoirement réparties au sein de mailles carrées juxtaposées) avec une station tous les 50 mètres pour le platier et 75 mètres pour la pente externe. Sur chaque station, représentant un cercle de 100m², un point GPS est pris. Ce protocole a été déployé sur le site de l'Ermitage.

Au total, 88 points d'échantillonnage ont été réalisés le 24/11/2023, dont 26 en pente externe et 62 sur le platier. L'ensemble des métriques du protocole de terrain CORAM (COral Reef Rapid Assessment Method) sont évaluées visuellement (**Figure 26**) :

Variables quantitatives

- Recouvrement corallien (variable quantitative) ;
- Pourcentage du genre *Acropora* au sein de la communauté corallienne ;
- Recouvrement par la faune sessile benthique non corallienne ;
- Recouvrement par les algues dressées > 2cm ;
- Densité d'oursin herbivore ;
- Densité de coraux juvéniles

Variables qualitatives évaluées avec un score allant de 0 à 3

- Etat de santé des colonies coralliennes vivantes ;
- Complexité structurelle des colonies coralliennes vivantes ;
- Diamètres des colonies coralliennes vivantes.

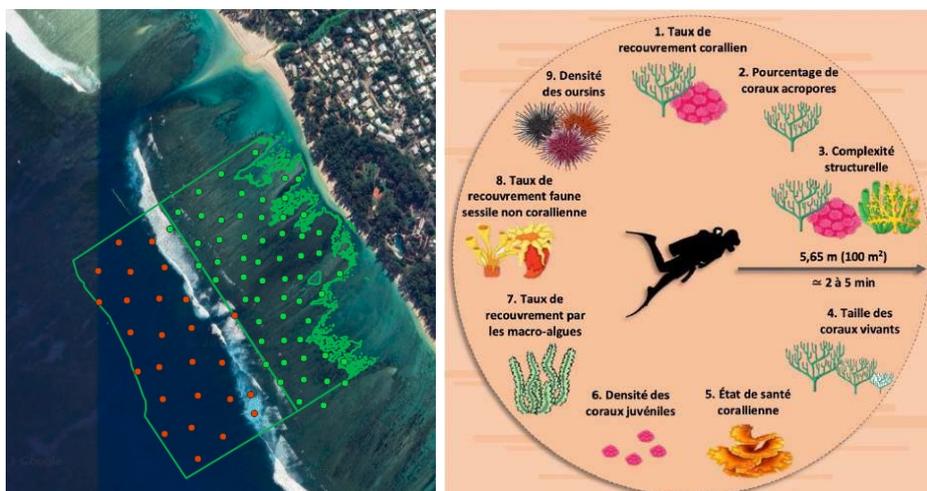


Figure 26 : Plan d'échantillonnage pour l'acquisition des données sur les types de fonds réalisé selon le protocole CORAM (d'après Pinault et Broudic, 2023)

(ii) Le second protocole est celui développé par le projet Hyscores:

Pour faciliter l'acquisition de photos dans le cadre des opérations de "vérité terrain", les prises de vues sont réalisées au moyen de caméras (GoPro) immergées par les opérateurs terrain. Synchronisées au départ du trajet avec l'heure GPS, chaque image pouvait donc ainsi, à postériori, être repositionnée sur le trajet parcouru (Figure 27).

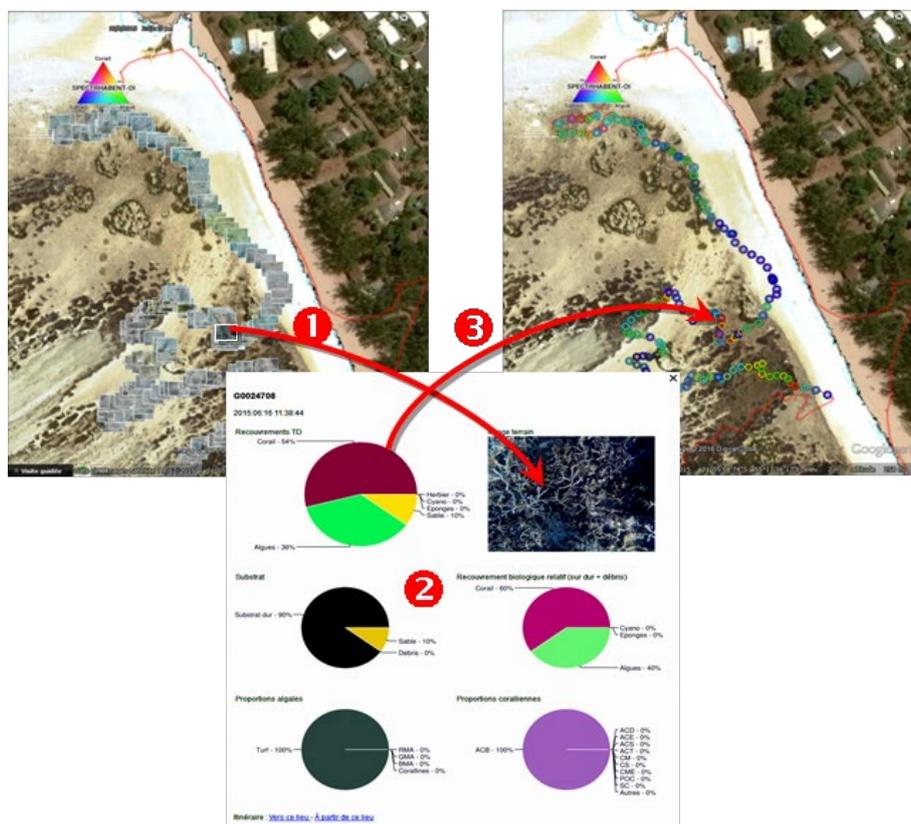


Figure 27 : Exemple de résultats des analyses de photos GoPro acquises dans le cadre des vérités terrain du projet Hyscores. 1. Géoréférencement, 2. Photo-interprétation et synthèses graphiques, 3. Représentation cartographique des résultats (Ropert et al., 2016).

La très bonne qualité des images permet d'envisager une photo-interprétation visant à évaluer les proportions respectives des 4 composantes principales (algue, corail, sable, herbier). En outre, l'analyse permet également d'affiner les informations relatives aux proportions et à la nature du substrat (dur, débris, sable), aux groupes algaux et types coralliens ainsi que les recouvrements biologiques relatifs (hors substrat sableux).

Pour ce protocole, il est prévu de poursuivre les acquisitions au-delà de la période de la campagne BioEOS afin de disposer de données *in situ* sur les types de fonds pour les futures acquisitions d'image satellite.

3.2.3.3. Acquisitions par planche instrumentée

Le projet BioEOS s'appuie sur les données issues de nombreux projets terminés ou en cours. Sur la même période que la campagne BioEOS se déroulaient les acquisitions du projet PLANCHA également soutenu par le CCT La Réunion. Le projet PLANCHA a bénéficié des moyens à la mer du projet BioEOS pour réaliser certaines acquisitions en pente externe.

Des acquisitions ont été réalisées par la planche instrumentée, développée par l’Ifremer et le CNRS/LIRMM dans le cadre des projets IOT¹ et PLANCHA². Il s’agit d’un véhicule de surface autonome simple et peu coûteux permettant la collecte de données environnementales, comme la bathymétrie et des informations sur les types de fonds par photogrammétrie (Gogendeau, 2022).

La **Figure 28** montre le dispositif et des exemples d’acquisitions réalisées lors de la campagne BioEOS. Les données acquises seront traitées dans le cadre du projet PLANCHA et seront utilisables comme vérité terrain par le projet BioEOS sans attendre la fin du moratoire mais sous réserve de non diffusion avant publication par le projet PLANCHA.

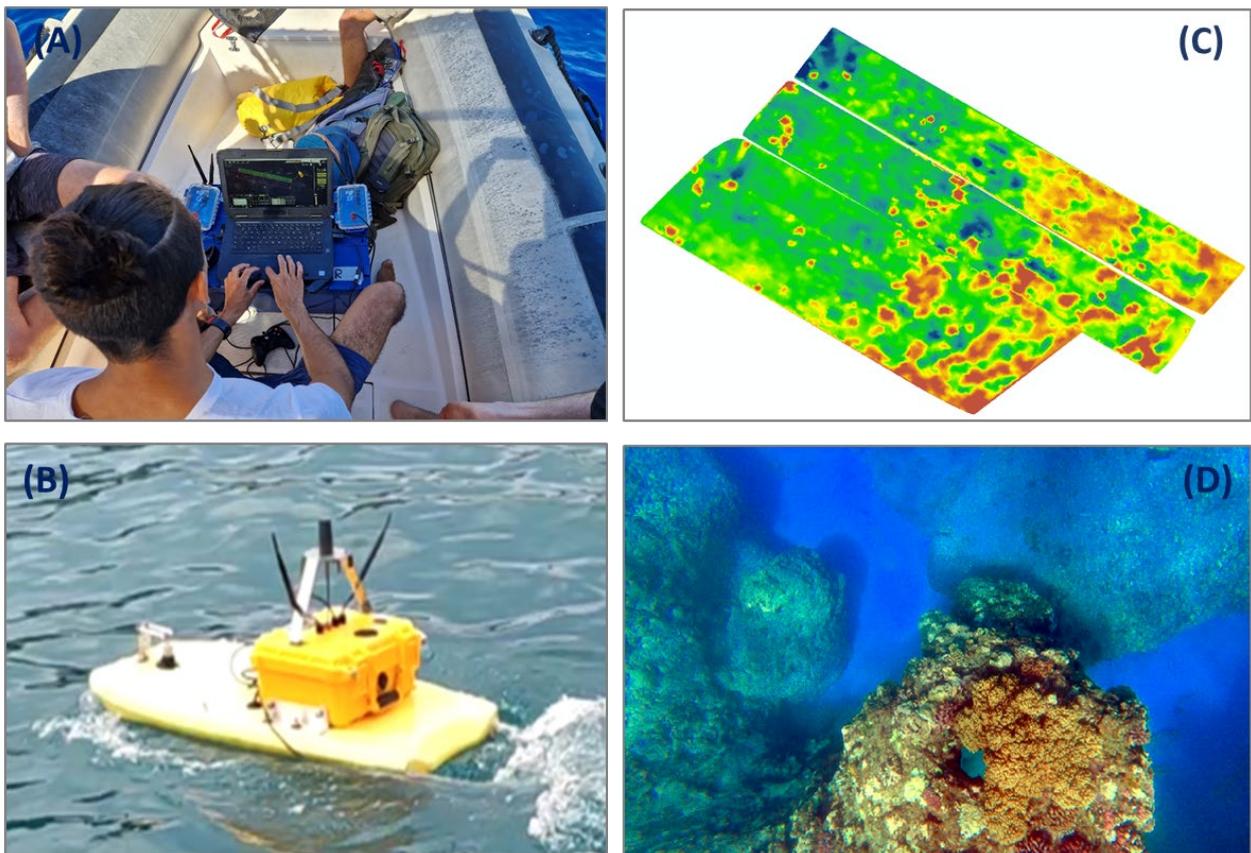


Figure 28 : Acquisitions par le dispositif Plancha (A) depuis un poste de contrôle à bord (B) des informations spatialisées sur la bathymétrie (C) et l’imagerie des fonds (D).

La **Figure 29** synthétise l’ensemble des acquisitions réalisées spécifiquement par le projet Plancha et celles acquises conjointement avec le projet BioEOS (Cf. Annexe).

¹ <https://ocean-indien.ifremer.fr/Projets/Innovations-technologiques/piOT-2018-2020-IOT-2018-2021/IOT-2018-2021>

² <https://ocean-indien.ifremer.fr/Projets/Innovations-technologiques/PLANCHA-2021-2023>

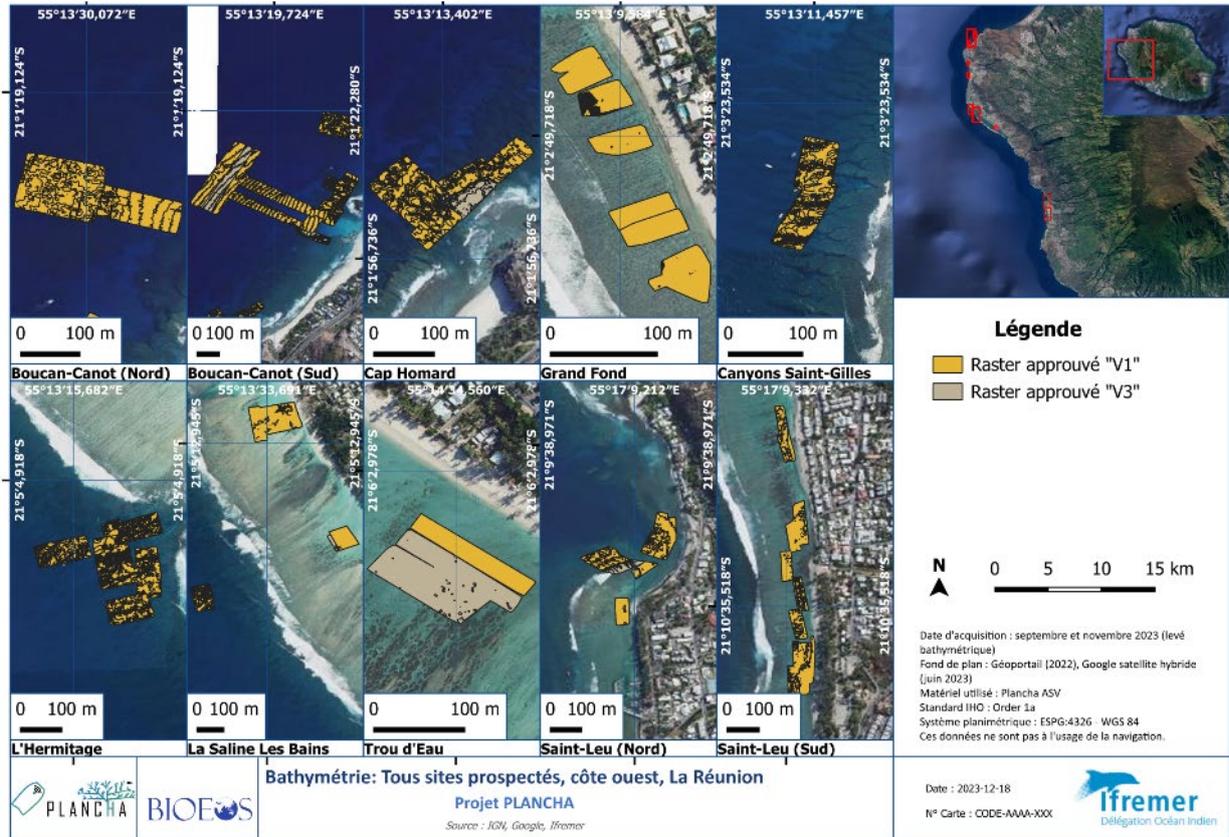


Figure 29 : Synthèse des acquisitions réalisées spécifiquement par le projet Plancha et celles acquises conjointement avec le projet BioEOS. V1 indique que le contrôle qualité est achevé, et V3 que les positions GPS centimétriques nécessitent d'être vérifiées pour les données acquises.

4. Conclusion

Labelisé par le SCO (Space for Climate Observatory), le projet BioEOS (BIOdiversity Earth Observation and monitoring at régional Scale) propose d'utiliser l'imagerie satellite pour extraire des métriques permettant de quantifier et suivre, via des proxys, la biodiversité côtière. L'objectif principal est de répondre à un réel besoin de connaissances spatio-temporelles sur la biodiversité est mis en exergue, notamment dans les territoires d'outre-mer :

(i) en caractérisant la distribution spatiotemporelle de la biodiversité par analyse des séries temporelles d'images satellite multi-capteurs (Pléiades, Pléiades Neo, Sentinel-2, Prisma et EnMap).

(ii) en cartographiant les changements et produisant des indicateurs pour rendre compte de l'impact des changements globaux sur la dynamique spatio-temporelle de l'état de la biodiversité des écosystèmes côtiers.

Il est ainsi prévu de développer une plateforme de chaîne de traitement opérationnelle basée sur des outils en accès libre et intégrant des algorithmes déjà éprouvés par la communauté scientifique : l'inversion du modèle de transfert radiatif, le démélange spectral et l'Intelligence Artificielle.

Bénéficiant d'un soutien financier complémentaire du contrat de convergence et de transformation de La Réunion (Préfecture de La Réunion en lien avec le SGAR et la DEAL), le choix s'est porté dans un premier temps sur le site de La Réunion pour la mise en place des chaînes de traitements, avant de les appliquer sur les autres sites d'étude du projet.

Afin de mieux calibrer et valider les résultats des traitements des propriétés optiques qui seront effectués sur les images satellite des principaux capteurs considérés, il est essentiel de faire une acquisition de données *in-situ* simultanément au passage de capteurs satellitaires. Ainsi, une campagne d'acquisition des données terrains a été organisée dans le cadre du projet BioEOS sur le site de La Réunion, durant la période du 14 novembre au 1er décembre 2023. Les constituants marins ayant un impact sur les processus d'absorption et de diffusion du rayonnement dans la colonne d'eau, et donc sur la réflectance de surface, sont les matières phytoplanctoniques (à travers la concentration en Chlorophylle *a*), les matières en suspension et les matières organiques dissoutes colorées (CDOM). Des mesures *in situ* ont été réalisées pour ces trois constituants, complétées par des acquisitions de signatures spectrales des principaux types de fond. Des acquisitions de scènes ont également été programmées spécifiquement durant cette période pour les satellites Pléiades et Pléiades NEO, Prisma et EnMap. Elles sont complétées par des acquisitions systématiques des satellites Sentinel-2 aux dates les plus proches.

A noter qu'un séminaire sur l'imagerie et le suivi de la biodiversité a été organisé du 23 au 25 janvier 2024 dans le cadre de BioEOS. Il a rassemblé les compétences de différentes équipes multidisciplinaires qui combinent télédétection, intelligence artificielle, hydrographie, écologie et modélisation ainsi que des acteurs de la gestion et de la conservation de la biodiversité marine. L'objectif est de s'assurer que les produits biogéophysiques qui vont être élaborés dans le cadre de BioEOS répondront aux attentes de la communauté scientifique, mais également pour la prise de décision par les gestionnaires des espaces protégés (Stratégies marines et directives européennes, Objectifs de développement durable, etc.).

5. Références

Académie des sciences, 1995. Biodiversité et environnement. Rapport N° 33Ed. Technique & documentation – Lavoisier. 88 p.

Aminot A. et Kérouel R., 2004. Hydrologie des écosystèmes marins. Paramètres et analyses. 336p.

Andersen, J. H., Manca, E., Agnesi, S., Al-Hamdani, Z., Lillis, H., Mo, G., ... & Vasquez, M. (2018). European broad-scale seabed habitat maps support implementation of ecosystem-based management. *Open Journal of Ecology*, 8(02), 86-103.

Bae S. et al., 2019. Radar vision in the mapping of forest biodiversity from space, *Nature Communications*, 10:4757. 10.1038/s41467-019-12737-x

Bajjouk, T., Jauzein, C., Drumetz, L., Dalla Mura, M., Duval, A., & Dubois, S. F. (2020). Hyperspectral and lidar: complementary tools to identify benthic features and assess the ecological status of Sabellaria alveolata reefs. *Frontiers in Marine Science*, 7, 804.

Bajjouk, T., Mouquet, P., Ropert, M., Quod, J. P., Hoarau, L., Bigot, L., & Populus, J. (2019). Detection of changes in shallow coral reefs status: Towards a spatial approach using hyperspectral and multispectral data. *Ecological Indicators*, 96, 174-191.

Bioucas-Dias J. M., A. Plaza, N. Dobigeon, M. Parente, Q. Du, P. Gader, and J. Chanussot (2012), "Hyperspectral unmixing overview: geometrical, statistical, and sparse regression-based approaches", *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, vol. 5, no. 2, pp. 354-379.

Brando, V.E., Anstee, J.M., Wettle, M., Dekker, A.G., Phinn, S.R., Roelfsema, C., 2009. A physics based retrieval and quality assessment of bathymetry from suboptimal hyperspectral data. *Remote Sens. Environ.* 113, 755–770.

Cardinale, B.J., Duffy, J.E., Gonzalez, A., Hooper, D.U., Perrings, C., Venail, P., Narwani, A., Mace, G.M., Tilman, D., Wardle, D.A., Kinzig, A.P., Daily, G.C., Loreau, M., Grace, J.B., Larigauderie, A., Srivastava, D.S., Naeem, S., 2012. Biodiversity loss and its impact on humanity. *Nature* 486, 59–67. <https://doi.org/10.1038/nature11148>

Carpenter, K.E., Abrar, M., Aeby, G., Aronson, R.B., Banks, S., Bruckner, A., Chiriboga, A., Cortés, J., Delbeek, J.C., DeVantier, L. and Edgar, G.J., 2008. One-third of reef-building corals face elevated extinction risk from climate change and local impacts. *Science*, 321(5888), pp.560-563.

Costion C.M., Simpson L., Pert P.L., Carlsen M.M., John Kress W., Crayn D., 2015. Will tropical mountaintop plant species survive climate change? Identifying key knowledge gaps using species distribution modelling in Australia. *Biological Conservation*, 191:322-330. 10.1016/j.biocon.2015.07.022

Loreau, M., S. Naeem, P. Inchausti, J. Bengtsson, JP Grime, A Hector, DU Hooper, MA Huston, D. Raffaelli, B Schmid, D Tilman and DA Wardle. 2001. Biodiversity and ecosystem functioning: current knowledge and future challenges. *Science* 294: 804-808. *Ecology Letters*, 16(2), 140-150. COMMISSION EUROPÉENNE, 2011. COMMUNICATION DE LA COMMISSION AU

PARLEMENT EUROPÉEN, AU CONSEIL, AU COMITÉ ÉCONOMIQUE ET SOCIAL EUROPÉEN ET AU COMITÉ DES RÉGIONS . La biodiversité, notre assurance-vie et notre capital naturel - stratégie de l'UE à l'horizon 2020. 17p.

Dalla Mura, M., Benediktsson, J. A., Bovolo, F., & Bruzzone, L. (2008). An unsupervised technique based on morphological filters for change detection in very high resolution images. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 5(3), 433-437.

Dalla Mura, M., Prasad, S., Pacifici, F., Gamba, P., Chanussot, J., & Benediktsson, J. A. (2015). Challenges and opportunities of multimodality and data fusion in remote sensing. *Proceedings of the IEEE*, 103(9), 1585-1601.

Defoin-Platel, M., Chami, M., 2007. How ambiguous is the inverse problem of ocean color in coastal waters? *Journal of Geophysical Research* 112, C03004.

Drumetz, L., Veganzones, M. A., Henrot, S., Phlypo, R., Chanussot, J., & Jutten, C. (2016). Blind hyperspectral unmixing using an extended linear mixing model to address spectral variability. *IEEE Transactions on Image Processing*, 25(8), 3890-3905.

Duarte, C. M., Losada, I. J., Hendriks, I. E., Mazarrasa, I., & Marbà, N. (2013b). The role of coastal plant communities for climate change mitigation and adaptation. *Nature Climate Change*, 3(11), 961-968.

Ferrier, S., 2011. Extracting more value from biodiversity change observations through integrated modeling. *Bioscience*, 61(2), pp.96-97.

Filippi, A. M., & Kubota, T. (2008). Introduction of spatial smoothness constraints via linear diffusion for optimization-based hyperspectral coastal ocean remote-sensing inversion. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 113

Ghamisi, P., Plaza, J., Chen, Y., Li, J., & Plaza, A. J. (2017). Advanced spectral classifiers for hyperspectral images: A review. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine*, 5(1), 8-32.

Gogendeau P., 2022. A Smart multi-sensor system for marine animals with embedded geolocation. *Embedded Systems*. PhD Doctoral Thesis, Université de Montpellier. English. NNT : 2022UMONS058, 174 p.

Harborne, A. R., P. J. Mumby, F. Micheli, C. T. Perry, C. P. Dahlgren, K. E. Holmes, and D. R. Brumbaugh. 2006 a. The functional value of Caribbean coral reef, seagrass and mangroves habitats to ecosystem processes. *Advances in Marine Biology* 50:57–190.

Ifrecor (2021). Etat de santé des récifs coralliens, herbiers marins et mangroves des outre-mer français. Bilan 2020, 337 pp.

IPBES (2019): Summary for policymakers of the global assessment report on biodiversity and ecosystem services of the Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services. S. Díaz, J. Settele, E. S. Brondízio, H. T. Ngo, M. Guèze, J. Agard, A. Arneth, P. Balvanera, K. A. Brauman, S. H. M. Butchart, K. M. A. Chan, L. A. Garibaldi, K. Ichii, J. Liu, S. M. Subramanian, G. F. Midgley, P. Miloslavich, Z. Molnár, D. Obura, A. Pfaff, S. Polasky, A. Purvis, J. Razzaque, B. Reyers, R. Roy Chowdhury, Y. J. Shin, I. J. Visseren-Hamakers, K. J. Willis, and C. N. Zayas (eds.). IPBES secretariat, Bonn, Germany. 56 pages. <https://doi.org/10.5281/zenodo.3553579>

- Jay, S., & Guillaume, M. (2011, June). Estimation of water column parameters with a maximum likelihood approach. In *2011 3rd Workshop on Hyperspectral Image and Signal Processing: Evolution in Remote Sensing (WHISPERS)* (pp. 1-4). IEEE.
- Krause-Jensen, D., & Duarte, C. M. (2016). Substantial role of macroalgae in marine carbon sequestration. *Nature Geoscience*, 9(10), 737-742.
- Gohin Francis, Bryère Philippe, Lefebvre Alain, Sauriau Pierre-Guy, Savoye Nicolas, Vantrepotte Vincent, Bozec Yann, Cariou Thierry, Conan Pascal, Coudray Sylvain, Courtay Gaelle, Françoise Sylvaine, Goffart Anne, Hernández Fariñas Tania, Lemoine Maud, Piraud Aude, Raimbault Patrick, Rétho Michael (2020). Satellite and In Situ Monitoring of Chl-a, Turbidity, and Total Suspended Matter in Coastal Waters: Experience of the Year 2017 along the French Coasts. *Journal Of Marine Science And Engineering*, 8(9), 665 (25p.). Publisher's official version: <https://doi.org/10.3390/jmse8090665>, Open Access version : <https://archimer.ifremer.fr/doc/00645/75669>
- Jerlov N. G., 1968. *Optical oceanography*. Elsevier, 194 pp.
- Lee, Z., Carder, K. L., Mobley, C. D., Steward, R. G., & Patch, J. S. (1998). Hyperspectral remote sensing for shallow waters. I. A semianalytical model. *Applied optics*, 37(27), 6329-6338.
- Loncan, L., De Almeida, L. B., Bioucas-Dias, J. M., Briottet, X., Chanussot, J., Dobigeon, N., ... & Tournier, J. Y. (2015). Hyperspectral pansharpening: A review. *IEEE Geoscience and remote sensing magazine*, 3(3), 27-46.
- Lorthiois, T., Doxaran, D., and Chami, M., 2012. Daily and seasonal dynamics of suspended particles in the Rhône River plume based on remote sensing and field optical measurements. *Geo-Marine Letters*, 32(2), 89-101.
- Maes, J., Teller, A., Erhard, M., Lique, C., Braat, L., Berry, P., & Paracchini, M. L. (2013). Mapping and Assessment of Ecosystems and their Services. An analytical framework for ecosystem assessments under action, 5, 1-58.
- Minghelli, A., Vadakke-Chanat, S., Chami, M., Guillaume, M., Migne, E., Grillas, P., & Boutron, O. (2021). Estimation of Bathymetry and Benthic Habitat Composition from Hyperspectral Remote Sensing Data (BIODIVERSITY) Using a Semi-Analytical Approach. *Remote Sensing*, 13(10), 1999.
- Minghelli-Roman, A., Goreac, A., Mathieu, S., Spigai, M., Gouton, P., 2009. Comparison of bathymetric estimation using different satellite images in coastal sea waters. *Int. J. Remote Sens.* 30, 5737–5750.
- Nicot J.B., Porcher M., Pennober G., Mouquet P., Alloncle N., Denis Y., Gabrié C., Dirberg G., Malfait G., Nicolas A., Pribat B., Ringelstein J., Tollis S., Quod J., Andréfouët S. (2015). Aide pour la réalisation et la commande de cartes d'habitats normalisées par télédétection en milieu récifal sur les territoires français. Guide de mise en œuvre à l'attention des gestionnaires. Document de synthèse. IFRECOR, 25pages, août 2015, <http://www.ifrecor-doc.fr/items/show/1649>
- PINAULT, M., BROUDIC, L. (2023). UTOPIAN 2022-2023 – Identification des zones d'enjeu de conservation des récifs de la Réunion. 17 p + annexes.

Petit, T., Bajjouk, T., Mouquet, P., Rochette, S., Vozel, B., & Delacourt, C. (2017). Hyperspectral remote sensing of coral reefs by semi-analytical model inversion—Comparison of different inversion setups. *Remote sensing of environment*, 190, 348-365.

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>

Schimel D.S., Asner G.P., Moorcroft P., 2013. Observing changing ecological diversity in the Anthropocene. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 11(3):129-137. 10.1890/120111

Thibaut, L. M., & Connolly, S. R. (2013). Understanding diversity–stability relationships: towards a unified model of portfolio effects. *Ecology Letters*, 16(2), 140-150.

Vivone, G., Alparone, L., Chanussot, J., Dalla Mura, M., Garzelli, A., Licciardi, G. A., ... & Wald, L. (2014). A critical comparison among pansharpening algorithms. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 53(5), 2565-2586.

Wilson, E.O., 2000. A global biodiversity map. *Science*, 289(5488), pp.2279-2279. Wilson, E.O., 2000. A global biodiversity map. *Science*, 289(5488), pp.2279-2279.

6. Annexe

Identifiants des acquisitions par la planche instrumentée	Date	Localisation	Projet impliqué
20230118_REU-GRANDFOND_ASV-1_00	18/1/23	Grandfond	Plancha
20230118_REU-GRANDFOND_ASV-1_01	18/1/23	Grandfond	Plancha
20230131_REU-GRANDFOND_ASV-1_00	31/1/23	Grandfond	Plancha
20230131_REU-GRANDFOND_ASV-1_01	31/1/23	Grandfond	Plancha
20230203_REU-GRANDFOND_ASV-1_02	3/2/23	Grandfond	Plancha
20230206_REU-GRANDFOND_ASV-1_00	6/2/23	Grandfond	Plancha
20230206_REU-GRANDFOND_ASV-1_01	6/2/23	Grandfond	Plancha
20230206_REU-GRANDFOND_ASV-2_01	6/2/23	Grandfond	Plancha
20230906_REU-BOUCAN_ASV-1_02	6/9/23	Boucan canot	Plancha
20230907_REU-BOUCAN_ASV-1_01	7/9/23	Boucan canot	Plancha
20230907_REU-BOUCAN_ASV-1_02	7/9/23	Boucan canot	Plancha
20230908_REU-BOUCAN_ASV-1_01	8/9/23	Boucan canot	Plancha
20230908_REU-BOUCAN_ASV-1_02	8/9/23	Boucan canot	Plancha
20230913_REU-BOUCAN_ASV-1_01	13/9/23	Boucan canot	Plancha
20230913_REU-BOUCAN_ASV-1_02	13/9/23	Boucan canot	Plancha
20230913_REU-BOUCAN_ASV-2_01	13/9/23	Boucan canot	Plancha
20230922_REU-HERMITAGE_ASV-1_01	22/9/23	Hermitage	Plancha
20230922_REU-HERMITAGE_ASV-1_02	22/9/23	Hermitage	Plancha
20230925_REU-HERMITAGE_ASV-1_01	25/9/23	Hermitage	Plancha
20230925_REU-HERMITAGE_ASV-1_02	25/9/23	Hermitage	Plancha
20230926_REU-HERMITAGE_ASV-1_01	26/9/23	Hermitage	Plancha
20230926_REU-HERMITAGE_ASV-2_01	26/9/23	Hermitage	Plancha
20230927_REU-HERMITAGE_ASV-1_01	27/9/23	Hermitage	Plancha
20230927_REU-HERMITAGE_ASV-2_01	27/9/23	Hermitage	Plancha
20231018_REU_SAINTELEU_ASV-2_01	18/10/23	Saint Leu	Plancha
20231019_REU_SAINTELEU_ASV-2_01	19/10/23	Saint Leu	Plancha
20231019_REU_SAINTELEU_ASV-2_02	19/10/23	Saint Leu	Plancha
20231021_REU_SAINTELEU_ASV-2_01	21/10/23	Saint Leu	Plancha
20231021_REU_SAINTELEU_ASV-2_02	21/10/23	Saint Leu	Plancha
20231024_REU_SAINTELEU_ASV-2_01	24/10/23	Saint Leu	Plancha
20231024_REU_SAINTELEU_ASV-2_03	24/10/23	Saint Leu	Plancha
20231027_REU_SAINTELEU_ASV-1_01	27/10/23	Saint Leu	Plancha
20231027_REU_SAINTELEU_ASV-1_02	27/10/23	Saint Leu	Plancha
20231027_REU_SAINTELEU_ASV-1_03	27/10/23	Saint Leu	Plancha
20231027_REU_SAINTELEU_ASV-2_01	27/10/23	Saint Leu	Plancha
20231027_REU_SAINTELEU_ASV-2_02	27/10/23	Saint Leu	Plancha
20231027_REU_SAINTELEU_ASV-2_03	27/10/23	Saint Leu	Plancha
20231108_REU-SAINTELEUPORT_ASV-2_02	8/11/23	Saint Leu	Plancha
20231109_REU-PEBOUCAN_ASV-1_01	9/11/23	Pente externe Boucan	Plancha
20231109_REU-PEBOUCAN_ASV-2_01	9/11/23	Pente externe Boucan	Plancha
20231109_REU-PEBOUCAN_ASV-2_02	9/11/23	Pente externe Boucan	Plancha
20231110_REU-SAINTELEU_ASV-1_01	10/11/23	Saint Leu	Plancha
20231110_REU-SAINTELEU_ASV-1_02	10/11/23	Saint Leu	Plancha

Identifiants des acquisitions par la planche instrumentée	Date	Localisation	Projet impliqué *
20231110_REU-SAINTLEU_ASV-1_03	10/11/23	Saint Leu	Plancha
20231110_REU-SAINTLEU_ASV-1_04	10/11/23	Saint Leu	Plancha
20231110_REU-SAINTLEU_ASV-2_01	10/11/23	Saint Leu	Plancha
20231110_REU-SAINTLEU_ASV-2_02	10/11/23	Saint Leu	Plancha
20231110_REU-SAINTLEU_ASV-2_03	10/11/23	Saint Leu	Plancha
20231110_REU-SAINTLEU_ASV-2_04	10/11/23	Saint Leu	Plancha
20231114_REU-SAINTLEU_ASV-1_01	14/11/23	Saint Leu	Plancha
20231114_REU-SAINTLEU_ASV-1_02	14/11/23	Saint Leu	Plancha
20231115_REU-BIOEOS-BOUCAN_ASV-1_01	15/11/23	Boucan	BioEOS/Plancha
20231115_REU-BIOEOS-BOUCAN_ASV-1_02	15/11/23	Boucan	BioEOS/Plancha
20231115_REU-BIOEOS-BOUCAN_ASV-2_01	15/11/23	Boucan	BioEOS/Plancha
20231117_REU-BIOEOS-BOUCAN_ASV-1_01	17/11/23	Boucan	BioEOS/Plancha
20231117_REU-BIOEOS-BOUCAN_ASV-1_02	17/11/23	Boucan	BioEOS/Plancha
20231120_REU-BIOEOS-BOUCAN_ASV-1_03	20/11/23	Boucan	BioEOS/Plancha
20231121_REU-BIOEOS-BOUCAN_ASV-1_01	21/11/23	Boucan	BioEOS/Plancha
20231121_REU-BIOEOS-BOUCAN_ASV-1_03	21/11/23	Boucan	BioEOS/Plancha
20231122_REU-BIOEOS-BOUCAN_ASV-1_01	22/11/23	Boucan	BioEOS/Plancha
20231122_REU-BIOEOS-BOUCAN_ASV-1_03	22/11/23	Boucan	BioEOS/Plancha
20231122_REU-BIOEOS-BOUCAN_ASV-2_01	22/11/23	Boucan	BioEOS/Plancha
20231122_REU-BIOEOS-BOUCAN_ASV-2_03	22/11/23	Boucan	BioEOS/Plancha
20231123_REU-BIOEOS-TROUDEAU_ASV-1_02	23/11/23	Trou d'eau	BioEOS/Plancha
20231123_REU-BIOEOS-TROUDEAU_ASV-1_03	23/11/23	Trou d'eau	BioEOS/Plancha
20231123_REU-BIOEOS-TROUDEAU_ASV-1_04	23/11/23	Trou d'eau	BioEOS/Plancha
20231124_REU-BIOEOS-PEHERMITAGE_ASV-1_01	24/11/23	Pente externe Hermitage	BioEOS/Plancha
20231124_REU-BIOEOS-PEHERMITAGE_ASV-1_02	24/11/23	Pente externe Hermitage	BioEOS/Plancha
20231124_REU-BIOEOS-PEHERMITAGE_ASV-2_01	24/11/23	Pente externe Hermitage	BioEOS/Plancha
20231124_REU-BIOEOS-PEHERMITAGE_ASV-2_02	24/11/23	Pente externe Hermitage	BioEOS/Plancha
20231127_REU-BIOEOS-PEHERMITAGE_ASV-1_01	27/11/23	Pente externe Hermitage	BioEOS/Plancha
20231127_REU-BIOEOS-PEHERMITAGE_ASV-1_02	27/11/23	Pente externe Hermitage	BioEOS/Plancha
20231127_REU-BIOEOS-PEHERMITAGE_ASV-1_03	27/11/23	Pente externe Hermitage	BioEOS/Plancha
20231127_REU-BIOEOS-PEHERMITAGE_ASV-2_01	27/11/23	Pente externe Hermitage	BioEOS/Plancha
20231127_REU-BIOEOS-PEHERMITAGE_ASV-2_02	27/11/23	Pente externe Hermitage	BioEOS/Plancha
20231127_REU-BIOEOS-PEHERMITAGE_ASV-2_03	27/11/23	Pente externe Hermitage	BioEOS/Plancha
20231128_REU-BIOEOS-PEHERMITAGE_ASV-1_01	28/11/23	Pente externe Hermitage	BioEOS/Plancha
20231128_REU-BIOEOS-CAPHOMARD_ASV-1_01	28/11/23	Cap Homard	BioEOS/Plancha
20231128_REU-BIOEOS-CAPHOMARD_ASV-2_01	28/11/23	Cap Homard	BioEOS/Plancha
20231128_REU-BIOEOS-CAPHOMARD_ASV-2_02	28/11/23	Cap Homard	BioEOS/Plancha
20231129_REU-BIOEOS-PEHERMITAGE_ASV-1_01	29/11/23	Pente externe Hermitage	BioEOS/Plancha
20231129_REU-BIOEOS-STGILLES-CANYON_ASV-1_01	29/11/23	Saint gilles Canyon	BioEOS/Plancha
20231129_REU-BIOEOS-PEHERMITAGE_ASV-2_01	29/11/23	Pente externe Hermitage	BioEOS/Plancha
20231129_REU-BIOEOS-STGILLES-CANYON_ASV-2_01	29/11/23	Saint gilles Canyon	BioEOS/Plancha

* les acquisitions indiquées BioEOS/Plancha ont été réalisées sur des embarquements lors de la campagne BIOEOS