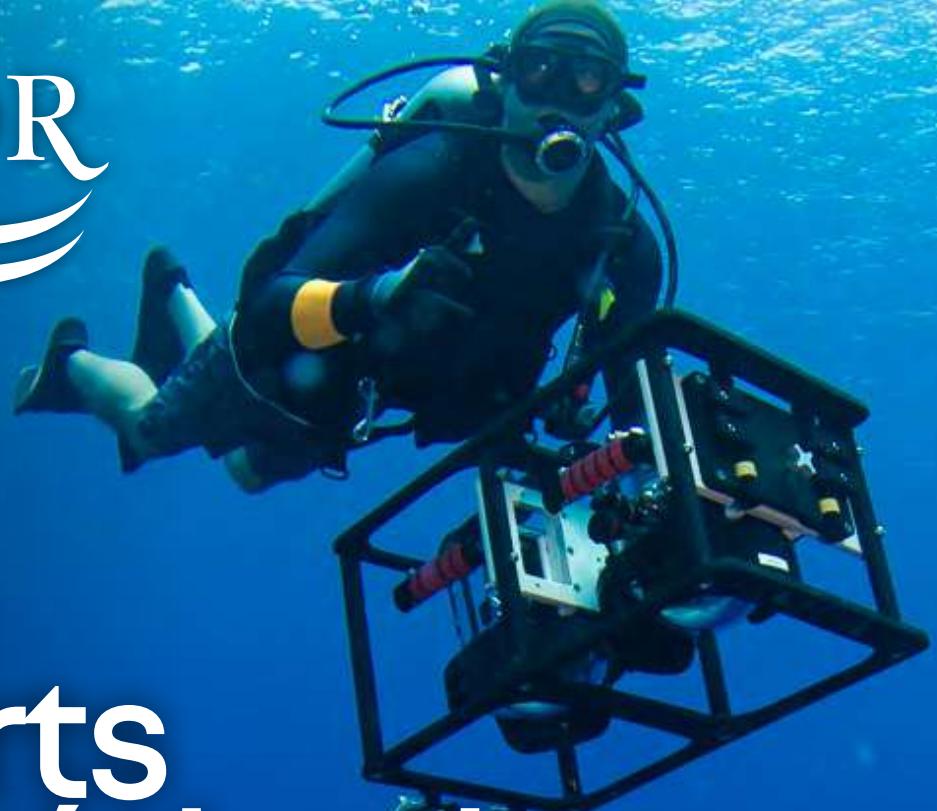




INITIATIVE FRANÇAISE
POUR LES RÉCIFS CORALLIENS



Apports des méthodes innovantes POUR L'ÉVALUATION DE L'ÉTAT DES RÉCIFS CORALLIENS

ÉTAT DES LIEUX 2025

© Yen Yi Lee

www.ifrecor.fr



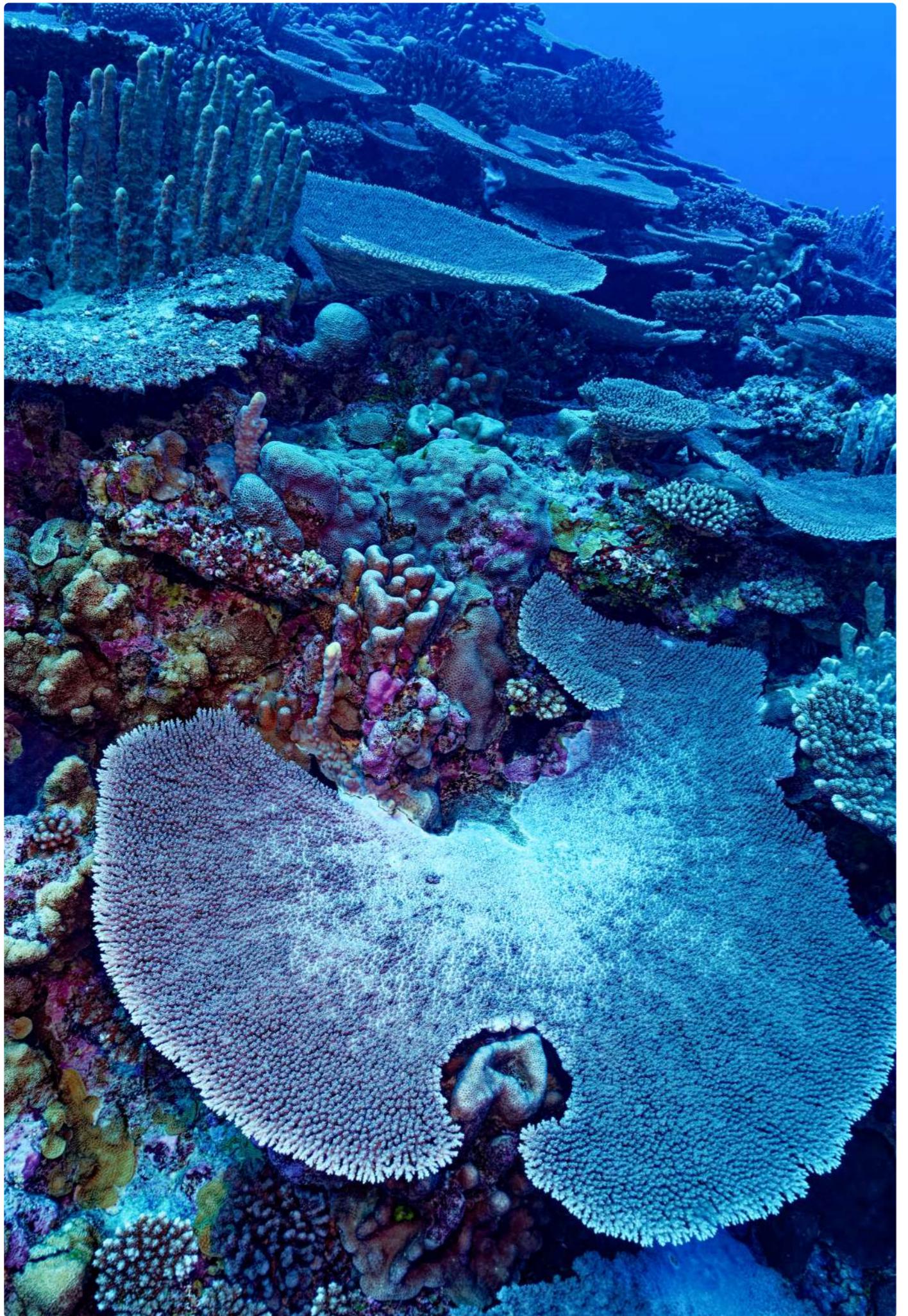


Photo : © Ifrecor

IFRECOR, 2025.

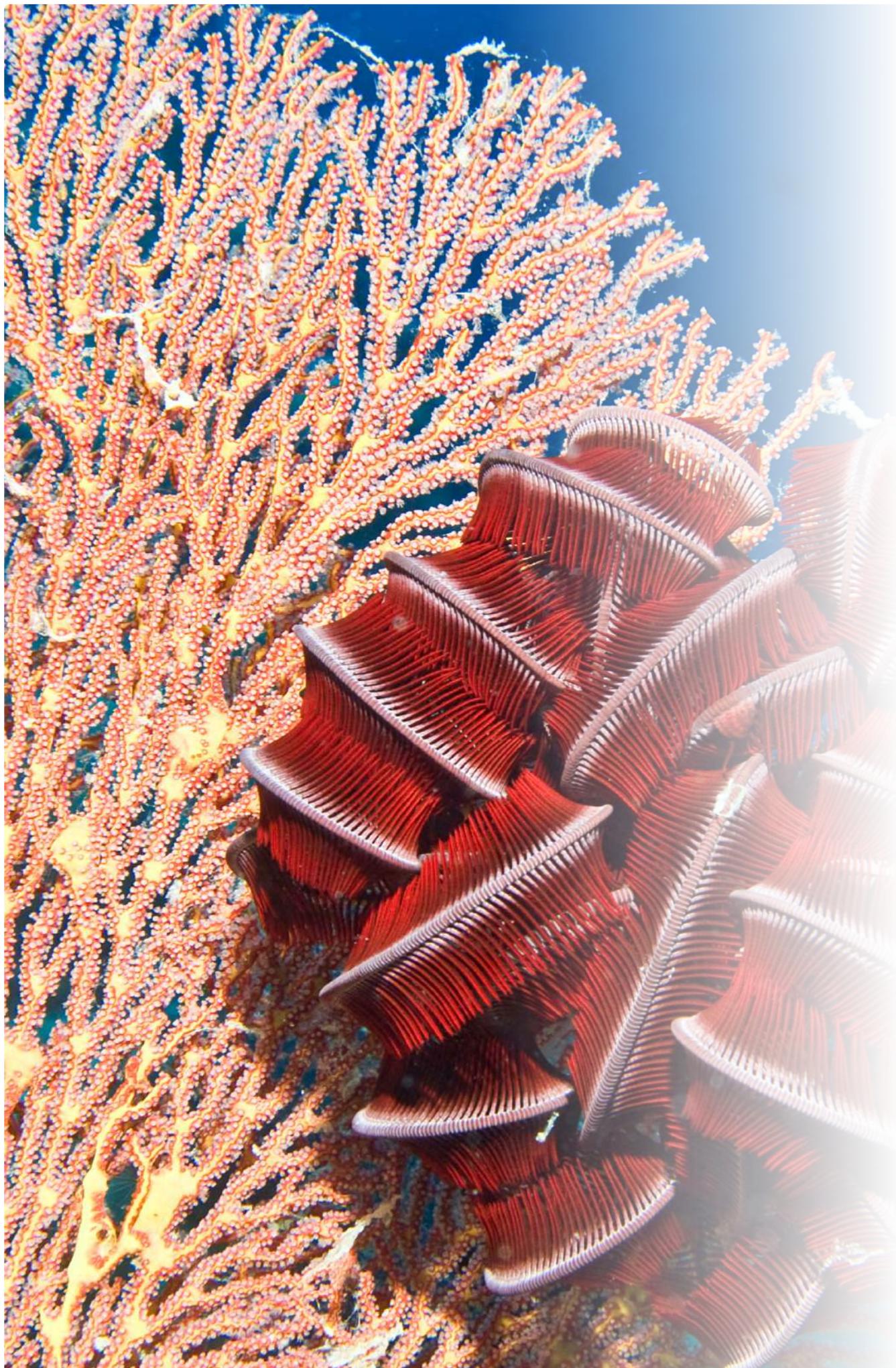
Apports des méthodes innovantes POUR L'ÉVALUATION DE L'ÉTAT DES RÉCIFS CORALLIENS

ÉTAT DES LIEUX 2025, 144 P.

Sommaire

APPORTS DES MÉTHODES INNOVANTES POUR L'ÉVALUATION DE L'ÉTAT DES RÉCIFS CORALLIENS

Sommaire étude de cas	7	3.3 Synthèse des avantages-inconvénients de l'ADNe	78
Liste des contributeurs	8	3.4 Eléments complémentaires	79
Coordination	8	3.5 En savoir plus sur les marqueurs	79
Entretiens	8	3.6 En savoir plus sur les bases de séquence de références	80
Échanges par mail	9	3.7 Étude de cas	81
Relecteurs de chapitres	9	3.8 Références	82
INTRODUCTION GÉNÉRALE	10	CHAPITRE 4 L'ACOUSTIQUE PASSIVE	84
Méthode de travail pour la réalisation de ce guide	12	4.1 Introduction	85
SYNTHÈSE	13	4.2 Description détaillée	87
Tableau de synthèse des méthodes innovantes	17	A) Installation du système d'enregistrement acoustique	87
Fiches de synthèse	23	B) Traitement des données	89
CHAPITRE 1 LA PHOTOGRAMMÉTRIE SOUS MARINE	30	4.3 Synthèse des avantages-inconvénients de l'acoustique passive	92
1.1 Introduction	31	4.4 En savoir plus	93
1.2 Description détaillée	34	4.5 Étude de cas	94
A) En amont du terrain	34	4.6 Références	96
B) Lors de l'acquisition sur le terrain	35	CHAPITRE 5 LA TÉLÉDÉTECTION	98
C) Traitement des données	36	5.1 Introduction	99
D) Extraction de métriques	37	5.2 Description détaillée	102
E) Encart sur DeepReefMap	40	A) L'acquisition d'images	102
1.3 Synthèse des avantages-inconvénients de la photogrammétrie	41	B) Exploitation de données cartographiques et vérité terrain	108
1.4 Etudes de cas et exemples d'applications	42	5.3 Synthèse des avantages-inconvénients de la télédétection	112
1.5 En savoir plus - autres systèmes d'acquisition pour la photogrammétrie	44	Encart sur le contrôle de l'ancrage	113
1.6 Références	45	5.4 En savoir plus	114
CHAPITRE 2 : SYSTÈMES D'ACQUISITION D'IMAGES ET DE VIDÉOS SOUS-MARINES	46	5.5 Références	118
2.1 Introduction	47	CHAPITRE 6 L'INTELLIGENCE ARTIFICIELLE	120
2.2 Description détaillée des systèmes fixes	50	6.1 Introduction	121
A) Station vidéo rotative	50	6.2 L'IA et le traitement de données pour les récifs coralliens	122
B) Caméra appâtée ou BRUV (Baited-Remote Underwater Video)	54	6.3 Synthèse des avantages-inconvénients de ces outils	125
Caractéristiques communes aux systèmes fixes	56	d'annotation de photoquadrats utilisant l'IA	
2.3 Description détaillée des systèmes mobiles	57	6.4 Principes de l'Intelligence Artificielle	126
A) Robot sous-marin de type ROV (Remote Operated Vehicle)	59	6.5 Références	129
B) Robot sous-marin de type AUV (Autonomous Underwater Vehicle)	61	CHAPITRE 7 COMPLÉMENTS SUR D'AUTRES MÉTHODES	130
C) Robot de surface de type ASV (Autonomous Surface Vessel)	64	7.1 Introduction	131
Caractéristiques communes des systèmes mobiles	59	7.2 Télédétection acoustique	131
2.4 Caméra en stéréo	65	A) Sondeur monofaisceau	132
2.5 Références	68	B) Sondeur multifaisceaux	132
CHAPITRE 3 L'ADN ENVIRONNEMENTAL	70	C) Sonar à balayage latéral	133
3.1 Introduction	71	7.3 Télédétection optique active	134
3.2 Description détaillée	74	LIDAR	134
A) En amont du terrain	74	7.4 Références	135
B) Sur le terrain	75	7.5 Méthodes d'échantillonnage de faune	136
C) Extraction, amplification et séquençage	76	A) ARMS (Autonomous Reef Monitoring Structures)	136
D) Analyses bioinformatiques & résultats	77	B) SMURF : Standard Monitoring Units of Recruitments of Fish	137
E) Métriques & rendus	77	C) FARMS : Fish-Specific Autonomous Reef Monitoring Structures	137
Encart Sciences participatives	77	D) Biohut®	138
		E) PCC : Post-larvae Capture and Culture	138
		7.6 Références	139
ANNEXES	140	ANNEXES	140
Glossaire	141	Glossaire	141
Acronymes	144	Acronymes	144



SOMMAIRE

Etudes de cas

CHAPITRE 1 | LA PHOTOGRAMMÉTRIE SOUS MARINE

Polynésie française : suivi de l'évolution temporelle de la géométrie des fonds marins par photogrammétrie (2019-2025)	42
Saint-Barthélemy : modélisation d'un récif corallien à <i>Acropora palmata</i> par photogrammétrie (2023)	43
Mayotte : cartographie fine de deux récifs coralliens par photogrammétrie sous-marine après le blanchissement de 2024 (2024)	43

CHAPITRE 2 | SYSTÈMES D'ACQUISITION D'IMAGES ET VIDÉOS SOUS-MARINES

Nouvelle-Calédonie : caractérisation des peuplements de poissons, de leurs habitats et évaluation de l'état à l'aide de STAVIRO (2014)	52
Saint-Martin : amélioration des connaissances sur les regroupements de requins nourrices (<i>Ginglymostoma cirratum</i>) à l'aide de la caméra appâtée (2016)	55
Tromelin (îles Éparses) : améliorer les connaissances sur les récifs coralliens de la zone mésophotique avec un ROV (2025)	58
Martinique : réalisation de transect vidéo en stéréo opéré par un plongeur (2024)	67

CHAPITRE 3 | ADN ENVIRONNEMENTAL

Martinique : analyse de la biodiversité de la macrofaune marine (mammifères, poissons osseux, élastomorphes) par metabarcoding (ADNé) contenue dans l'eau de mer de surface (2019-2020)	81
Polynésie française : l'ADN environnemental comme outil de surveillance des espèces invasives introduites par les navires et l'activité portuaire (2024)	81

CHAPITRE 4 | L'ACOUSTIQUE PASSIVE

Mayotte : évaluer l'état des récifs coralliens par l'acoustique passive (2022-2024)	94
---	----

CHAPITRE 5 | LA TÉLÉDÉTECTION, QUELQUES EXEMPLES D'UTILISATION DU DRONE EN POLYNÉSIE FRANÇAISE

Bassas da India (îles Éparses) : la cartographie sans vérité terrain : carte de la géomorphologie marine de Bassas da India (0-30 m) (2024)	108
Martinique : cartographie des habitats marins côtiers (0-40 m) de la Martinique via des méthodes de télé-détection (2024)	110
Polynésie française : quelques exemples d'utilisation du drone (2023)	111
Mayotte : cartographie des habitats marins de Mayotte (projet de recherche CARMUHAM en cours)	114
La Réunion : suivi des variables essentielles de la biodiversité côtière (projet de recherche BioEOS en cours)	116

Liste des contributeurs

Coordination

RÉALISATION DES ENTRETIENS, DE LA BIBLIOGRAPHIE ET DE LA RÉDACTION : Clarisse Thellier (TAAF/Ifrecor)

ENCADREMENT : Claire Bissery (Ifrecor), Clément Lelabousse (TAAF)

Entretiens

GESTIONNAIRES

ANTILLES

Réserve naturelle de Saint-Martin : Julien Chalifour
Agence Territoriale de l'Environnement :
Sébastien Gréaux
Parc naturel marin de Martinique :
Paul Giannasi et Jessica Crillon

OCÉAN INDIEN

Terres Australes et Antarctiques Françaises :
Clément Lelabousse et Grégoire Moutardier
Parc marin de Mayotte : Oriane Lepeigneul
Réserve marine de La Réunion : Tévamie Rungassamy

OCÉAN PACIFIQUE

Nouvelle Calédonie (Province Sud) : Emmanuel Coutures
Nouvelle-Calédonie (Province Nord) : Sophie Katrawi
Josina Tiavouane
Polynésie française : Yannick Chancerelle (CRIODE)

CHERCHEURS ET ACTEURS PRIVÉS

PHOTOGRAMMÉTRIE SOUS-MARINE : Guilhem Banc-Prandi (EPFL), Adrien Cheminée (Septentrion Environnement), Mathilde Facon (Créocéan), Renata Ferrari (AIMS), Romain Pinel (Geolab), Jonathan Sauder (EPFL), Devis Tuia (EPFL), Isabel Urbina-Barreto (IRD), Orlane Velin (Créocéan)

SYSTÈMES ACQUISITION D'IMAGES ET VIDÉOS SOUS-MARINES : Océane Beaufort (Kap naturel), Sylvain Bonhommeau (Ifremer), Matteo Contini (Ifremer),

COMITÉ DE PILOTAGE : Fabrice Auscher (OFB), Claire Bissery (Ifrecor), Théophile Collet (MOM), Catherine Gabré (cellule d'appui Ifrecor), Sandrine Job (CORTEX), Clément Lelabousse (TAAF), Marianna Monneau (MOM), Antoine Pebayle (MTEFBMP), Gaëlle Simian PatriNat (OFB/MNHN/CNRS/IRD), Grégoire Moutardier (TAAF), Francis Staub (cellule d'appui Ifrecor), Amandine Vaslet (Stegastes consulting), Morgane Vivant (ANCB), Julien Wickel (GIE Marex)

Thomas Claverie (IRD), Alexis Cuvillier (Créocéan), Magali Duval (Ifremer), Michael Field (Island Robotics), Victor Illien (Ifremer), Jérôme Mathey (DroneGo), Dominique Pelletier (Ifremer)

ADNe : Adrien Cheminée (Septentrion Environnement), Julien Claes (SPYGEN), Marion Couëdel (IRD), Aurélie Lacoeuilhe (Patrinat (OFB/MNHN/CNRS/IRD)), Xavier Pochon (Cawthon Institute), Rémy Poncet (Patrinat (OFB/MNHN/CNRS/IRD)), Gaëlle Simian (Patrinat (OFB/MNHN/CNRS/IRD))

ACOUSTIQUE PASSIVE : Frédéric Bertucci (IRD), Simon Elise (ReefPulse), Cédric Gervaise (Chorus), Miles Parsons (AIMS), Thibaud Rossard (consultant)

MÉTHODES DE TÉLÉDÉTECTION : Serge Andréfouët (IRD), Touria Bajjouk (Ifremer), Priscilla Dupont (IRD), Pascal Mouquet (IRD), Jean-Benoît Nicet (GIE Marex), Leonardo Tamborrino (Plan Blue), Elisabeth Riera (MNHN)

INTELLIGENCE ARTIFICIELLE : Priscilla Dupont (IRD), Claudia Restrepo-Ortiz (IRD), Orlane Velin (Créocéan)

COMPLÉMENTS SUR D'AUTRES MÉTHODES : Marion Couëdel (IRD), Vincent Macaigne (ID Océan)

AIDE GÉNÉRALE SUR TOUTES LES MÉTHODES : Lionel Bigot (Université de la Réunion), Thomas Dallison (ICRI), Mohsen Kayal (IRD), Jean-Philippe Maréchal (Nova Blue Environment), Serge Planes (CRIODE), Raphaël Ritson-Williams (UCLA)



Photo : © Gregory Piper

Échanges par mail

PHOTOGRAMMÉTRIE SOUS-MARINE : Liz Goergen (King Abdullah University of Science and Technology)

ADNe : Charlotte Dromard (Université des Antilles), Hélène Magalon (Université de La Réunion)

TÉLÉDÉTECTION : Greg Asner (ASU Center for Global Discovery and Conservation Science), Hannah Brocke (Plan Blue), Loïc Giraud (TAAF)

IA : Alexandra Kler Lago (Mermaid), Erik Meesters (University of Wageningen)

AUTRES INFORMATIONS : Amanda Brigdale (AIMS), Dimitri Deheyn (UCLA), Joanna Kolasinski (Université de La Réunion), Melissa Roth (UCLA), David Suggett (KAUST Coral Restoration Initiative)

COMPLÉMENTS SUR D'AUTRES MÉTHODES : Steven Lebars (ID Océan)

AIDE GÉNÉRALE SUR TOUTES LES MÉTHODES : Florian Holon (Andromède océanologie), David Lennon (AIMS)

Relecteurs de chapitres

PHOTOGRAMMÉTRIE : Mathilde Facon (Créocéan), Romain Pinel (Geolab), Isabel Urbina-Barreto (IRD)

ADNe : Julien Claes (SPYGEN), Aurélie Lacoeuilhe PatriNat (OFB/MNHN/CNRS/IRD), Serge Planes (CRIODE), Alice Valentini (SPYGEN)

IMAGERIE 2D : Océane Beaufort (Kap naturel), Sylvain Bonhommeau (Ifremer), Magali Duval (Ifremer), Mathilde Facon (Créocéan), Dominique Pelletier (Ifremer),

ACOUSTIQUE PASSIVE : Frédéric Bertucci (IRD), Simon Elise (ReefPulse)

TÉLÉDÉTECTION : Touria Bajjouk (Ifremer), Jean-Benoît Nicet (GIE Marex)

RELECTURE GÉNÉRALE DE TOUT LE DOCUMENT : Fabrice Auscher (OFB), Claire Bissery (IFRECOR), Catherine Gabré (cellule d'appui Ifrecor), Clément Lelabousse (TAAF), Marianna Monneau (MOM), Grégoire Moutardier (TAAF), Aurélien Schmitt (Station biologique de Roscoff), Amandine Vaslet (Stegastes consulting), Julien Wickel (GIE MAREX).

Introduction générale

L'Ifrer, Initiative française pour les récifs coralliens, a été créée en 1999. Elle agit pour la protection et la gestion durable des récifs coralliens et des écosystèmes associés (mangroves et herbiers marins) dans les collectivités d'outre-mer. S'inscrivant dans le cadre de la mise en œuvre du cinquième programme d'actions de l'Ifrer, ce guide a pour objectif d'informer les gestionnaires des récifs coralliens sur l'intérêt des méthodes innovantes de suivi de l'état des récifs coralliens. Il a été conçu pour l'ensemble des territoires coralliens des outre-mer français et vise également à informer les gestionnaires sur l'avancée du développement des méthodes. Certaines approches peuvent en effet susciter de fortes attentes alors que, encore en phase de recherche-développement, elles ne sont pas encore abouties pour la gestion. Chaque territoire ayant ses spécificités, le guide propose différentes façons d'aborder la méthode selon les moyens disponibles (financiers, humains...).

Le suivi de l'état des récifs coralliens représente une étape cruciale pour fournir des informations objectives aux décideurs et orienter la mise en place de mesures de gestion et de conservation adaptées. Les gestionnaires de récifs coralliens effectuent ce suivi en régie (le gestionnaire assure le suivi au sein de sa propre structure de gestion), en sous-traitance (le gestionnaire fait appel à une structure extérieure pour effectuer le suivi), souvent en collaboration avec des organismes scientifiques et parfois l'appui des sciences participatives. Ils s'appuient en général sur des méthodes d'observation visuelle sous-marine (UVC : Underwater Visual Census), structurées par des protocoles précis. Les méthodes de suivi de type UVC permettent l'évaluation des peuplements benthiques (à travers le Point Intercept Transect - PIT, le Line Intercept Transect - LIT, le Belt-transect, le quadrat, l'évaluation semi-quantitative par cotations de Dahl, etc.) et des populations de poissons (via la méthode des Belt-transect, des points de comptages stationnaires, des parcours aléatoires chronométrés-Timescores, des plongeurs tractés en manta tow, etc.) (Figure 1).

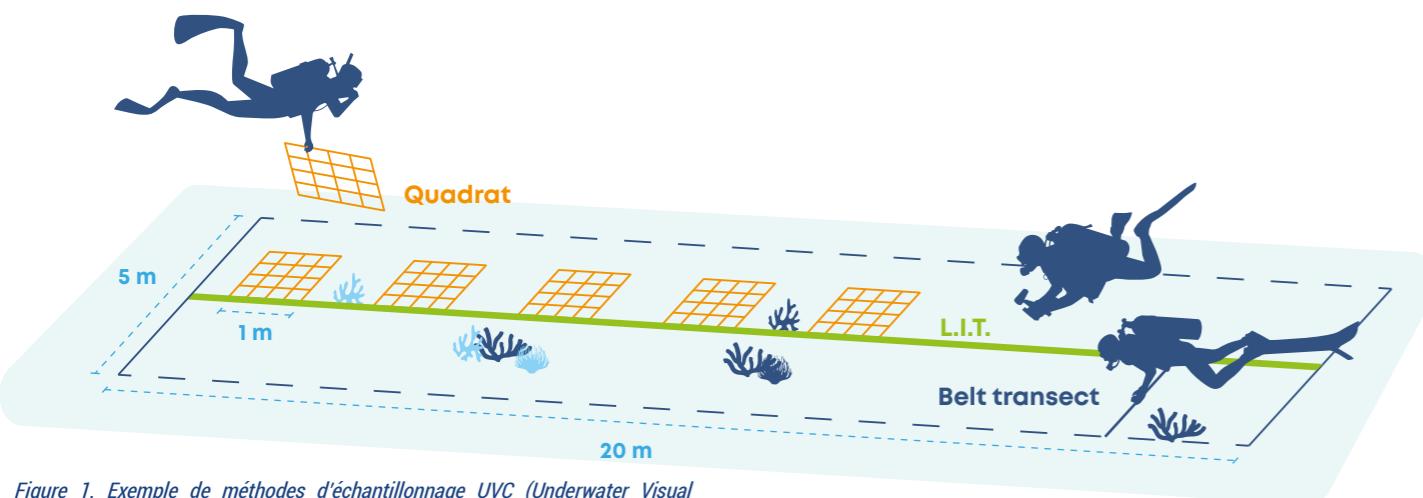


Figure 1. Exemple de méthodes d'échantillonnage UVC (Underwater Visual Census) le long d'un transect (LIT, Belt-transect et quadrat)

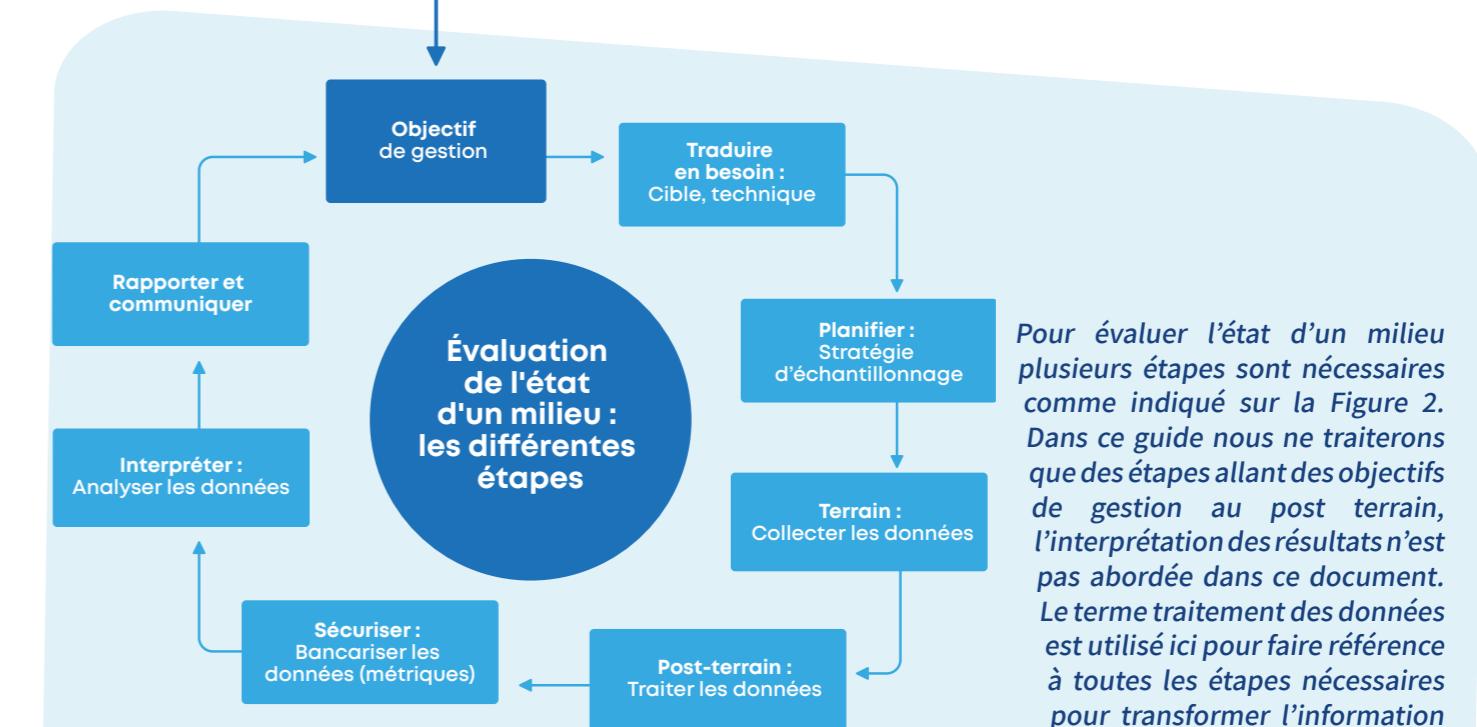


Figure 2. Cycle d'évaluation de l'état d'un milieu

Cela peut comprendre l'analyse des vidéos ou photos sous-marines afin d'obtenir des comptages d'espèces, les traitements informatiques pour analyser des sons, etc. Le terme analyse de données est, lui, utilisé pour la partie interprétation des données avec la création de graphiques, les analyses statistiques sur les métriques déjà bancarisées, etc.

d'optimisation du temps de terrain et d'amélioration de la précision des données collectées. Toutefois, la mise en œuvre de ces méthodes s'accompagne fréquemment d'un coût financier et humain ainsi que d'un temps post-terrain important et nécessite des outils de traitement des données complexes, impliquant des compétences techniques spécifiques et pouvant engendrer un recours fréquent à des prestations externes.

La construction du guide résulte de plusieurs phases de travail :

1. État de l'art : bibliographie internationale sur les méthodes innovantes et se focalisant sur les méthodes servant à l'évaluation de l'état dans le temps.
2. Analyse de la faisabilité des méthodes : réalisation d'une série d'entretiens avec les scientifiques/chercheurs ayant mis en place les méthodes (40 entretiens) et les gestionnaires utilisateurs des méthodes (11 entretiens).

Il convient de souligner que ces méthodes innovantes ne sont pas destinées à remplacer les protocoles de suivi type UVC qu'il faut absolument continuer à appliquer régulièrement. Ces derniers reposent sur des méthodes standardisées et reproductibles, qui restent essentielles pour assurer la continuité et la comparaison des observations. Les séries temporelles actuelles sont essentielles pour évaluer l'état des récifs et doivent être

poursuivies. Les approches émergentes, encore souvent en phase de recherche et développement, offrent des perspectives intéressantes, mais leur intégration dans les programmes de surveillance demeure aujourd'hui limitée.

Par ailleurs, l'expertise taxinomique est tout autant nécessaire pour les méthodes innovantes que pour les UVC. Si la précision taxinomique souhaitée est importante, une validation d'expert devra toujours être faite, soit en amont pour calibrer un outil de reconnaissance automatique soit au moment du traitement des données post terrain, pour la création des bases de références.

Ces méthodes innovantes se distinguent notamment par la diversité des échelles spatiales et temporelles qu'elles mobilisent, ainsi que par les différents moyens qu'elles utilisent (visuel, acoustique, biologique, etc.) : elles sont toutes complémentaires. Par exemple, l'imagerie satellitaire permet une vue d'ensemble à grande échelle et la cartographie des biocénoses, mais elle n'offre pas le niveau de détail obtenu par des prises de vue rapprochées. D'autres approches, comme l'acoustique passive, permettent d'intégrer des signaux tels que les sons produits par les invertébrés – des éléments absents des suivis de type UVC, mais ne permettent pas d'avoir accès à toutes les espèces ni à leurs abondances.

Ce guide porte principalement sur l'évaluation de l'état des récifs coralliens. Toutefois, les écosystèmes associés, tels que les herbiers de phanérogames et les mangroves, jouent un rôle fondamental et leur suivi régulier est tout aussi essentiel. La santé des récifs coralliens est en grande partie tributaire de celle de ces milieux connexes. Dans le temps imparti à la rédaction, il a été décidé d'inclure certains éléments concernant les herbiers, bien que l'accent reste résolument placé sur les récifs coralliens. Par ailleurs, plusieurs des méthodes présentées dans ce guide ont également été appliquées ou peuvent être adaptées à d'autres types d'écosystèmes, y compris en dehors des zones tropicales (coralligène en mer Méditerranée par exemple).

Méthode de travail pour la réalisation de ce guide

La réalisation de ce guide s'est déroulée sur huit mois et a suivi plusieurs étapes :

PHASE 1 : Une revue bibliographique, à la fois nationale et internationale, a été réalisée pour recenser les méthodes d'évaluation de l'état des récifs coralliens. Si la littérature scientifique et technique recommandée par les experts – notamment des articles spécialisés – a été consultée, l'orientation de ce guide se veut résolument pratique. Ainsi, ce sont surtout des rapports de gestion et des études opérationnelles qui ont servi de base à son élaboration.

PHASE 2 : Des échanges ont été établis avec les experts ayant contribué au développement et/ou utilisé ces méthodes (cf. partie “liste des contributeurs”). Ces rencontres, sous forme d'entretiens d'une à deux heures, ont permis d'obtenir des précisions techniques essentielles.

PHASE 3 : Des entretiens ont ensuite été réalisés avec les gestionnaires d'aires marines protégées AMP des territoires ultramarins français. Ces entretiens se sont basés sur un questionnaire mis en place en amont (cf. partie “liste des contributeurs”).

Ils ont permis de confronter le point de vue des experts avec les usages réels de ces méthodes sur le terrain. De plus, un questionnaire a été distribué à plusieurs acteurs de l'océan indien spécifiquement lors de la réunion du groupe de travail océan indien récifs coralliens de 2025,

Enfin, il est important de mentionner que l'évolution des méthodes et des technologies qui y sont associées (Intelligence Artificielle, etc.) est extrêmement rapide. À sa publication, le guide n'est peut-être déjà plus à jour sur certains éléments. L'idée essentielle est de faire un état des lieux global des méthodes innovantes en 2025.

Références liées à l'introduction :

Hill, J., Wilkinson, C., 2004. Methods for Ecological Monitoring of Coral Reefs: Version 1. Australian Institute of Marine Science, Townsville.

pour récolter les avis de chercheurs, acteurs privés non interviewés lors de la phase 2. C'est au cours de ces échanges et au travers des réponses du questionnaire que les avis présentés dans ce guide ont été collectés.

Par choix éditorial, aucune citation n'a été associée directement aux informations disponibles dans le guide, afin de privilégier une présentation collective et transversale des points de vue. En revanche, l'ensemble des références bibliographiques et des personnes expertes de la méthode interrogées est mentionné dans chaque chapitre.

Le guide propose différents niveaux de lecture :

- Un premier niveau offre des synthèses globales (schéma et tableau) pour se familiariser avec les grandes caractéristiques de chaque méthode.
- Un second niveau présente des fiches de synthèse permettant d'en saisir plus clairement les avantages et limites.
- Le troisième niveau fournit des tableaux détaillés avec les caractéristiques techniques.
- Le quatrième correspond au texte explicatif, qui décrit finement le fonctionnement de chaque méthode.
- Enfin, un cinquième niveau s'appuie sur des études de cas, offrant des exemples concrets d'application dans les territoires ultramarins. Dans ce cadre, les lecteurs sont encouragés à prendre contact avec les porteurs de projets pour obtenir des informations complémentaires.

Synthèse

Plusieurs méthodes innovantes viennent aujourd'hui compléter les suivis réalisés par UVC. Elles se distinguent en deux grandes catégories : les méthodes *in situ*, qui nécessitent une acquisition directe des données en mer, et la télédétection, qui repose sur des mesures effectuées à distance.



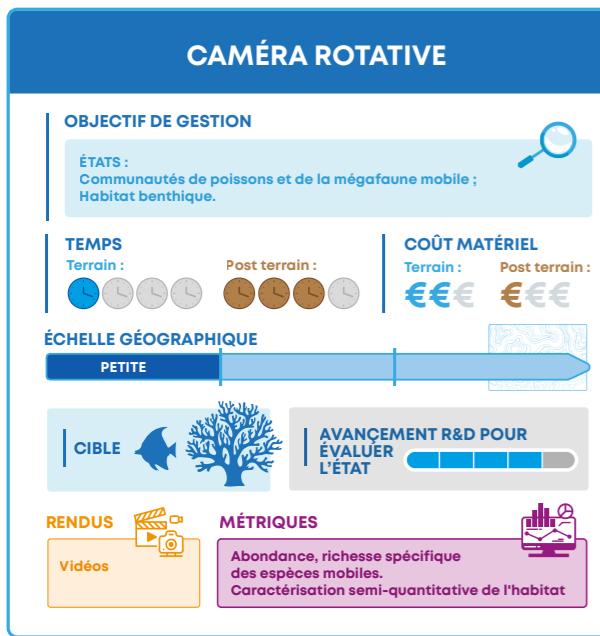
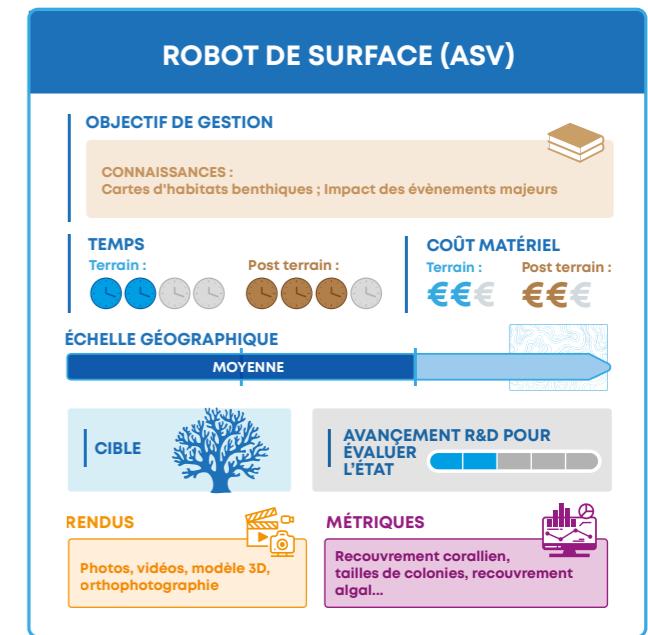
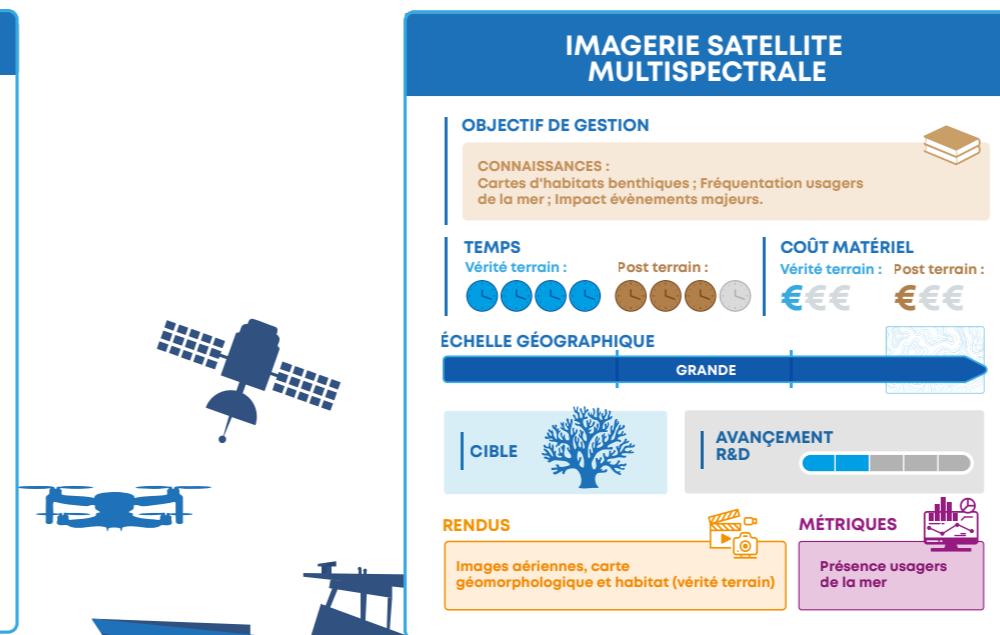
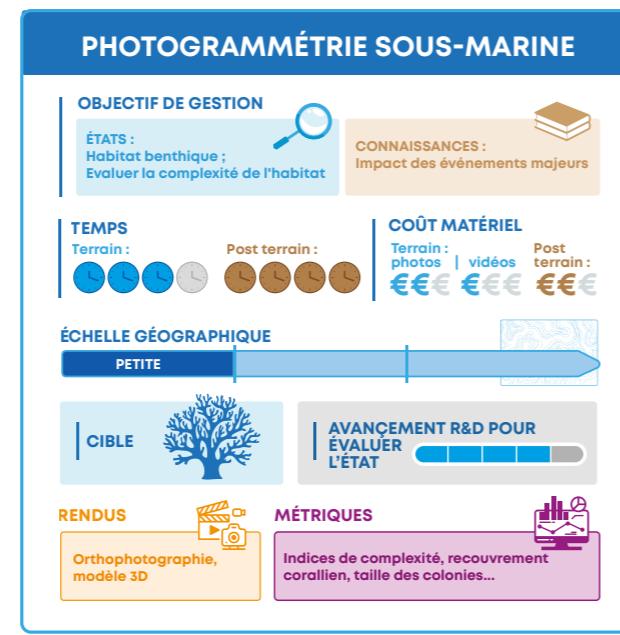
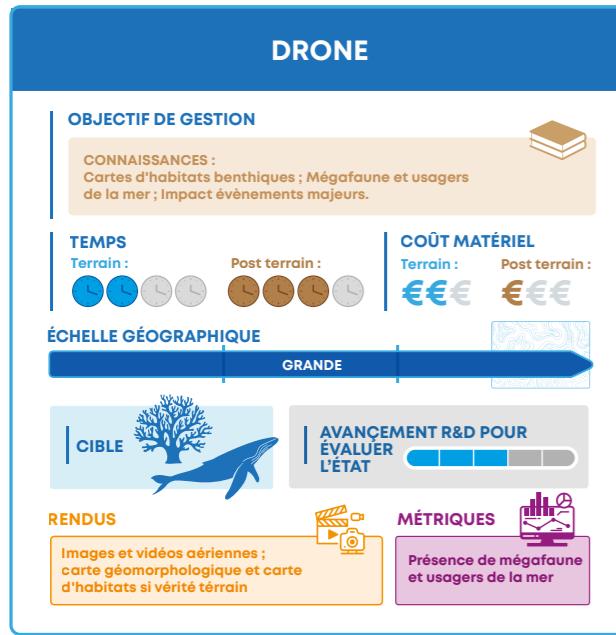
Photo : © Cinzia Azele Bismark

Les approches *in situ* regroupent notamment la **photogrammétrie**, qui permet de modéliser en trois dimensions un objet fixe, comme un récif corallien. Cette technique fournit des métriques physiques et biologiques, rend compte de la complexité des structures et offre des rendus visuels utiles pour la sensibilisation. On trouve également différents **systèmes d'acquisition d'images et vidéo sous marines**, soit **fixes** (comme les caméras rotatives ou appâtées), soit **mobiles** (ROV, AUV ou robots de surface). Ces dispositifs permettent d'observer les communautés mobiles, de caractériser un paysage sous-marin et, lorsqu'ils sont associés à des caméras stéréo, de mesurer plus précisément tailles d'individus et distances. **L'ADNe** constitue une autre méthode *in situ* : en prélevant de l'eau et en analysant l'ADN qu'elle contient, il devient possible d'établir un inventaire des espèces présentes. Enfin, l'**acoustique passive** enregistre en continu les sons produits par les communautés récifales, de nuit comme de jour, sur plusieurs jours, semaines ou mois. Cette approche permet non seulement d'évaluer l'activité biologique, mais aussi de mesurer la fréquentation humaine dans un espace marin.

Les méthodes de **télédétection** reposent quant à elles sur des observations réalisées par **satellite**, **avion**, **ULM** ou **drone**. Bien qu'elles soient limitées par la profondeur et la distance au substrat, elles offrent une vision d'ensemble à large échelle, difficile à obtenir autrement.

Une grande partie des méthodes innovantes nécessitent un traitement des données par des outils d'**intelligence artificielle** dont le principe est brièvement présenté dans le chapitre 6. Trois algorithmes d'annotation automatique (CoralNet, ReefCloud et MERMAID) sont aussi discutés dans ce chapitre.

À côté de ces approches principales, d'autres techniques existent mais moins détaillées dans le guide, car moins directement utiles pour l'évaluation de l'état des récifs coralliens : c'est le cas de l'acoustique active, de l'optique active pour la bathymétrie, ou encore de dispositifs d'échantillonnage de la faune tels qu'ARMS ou BioHut.



Synthèse des méthodes innovantes

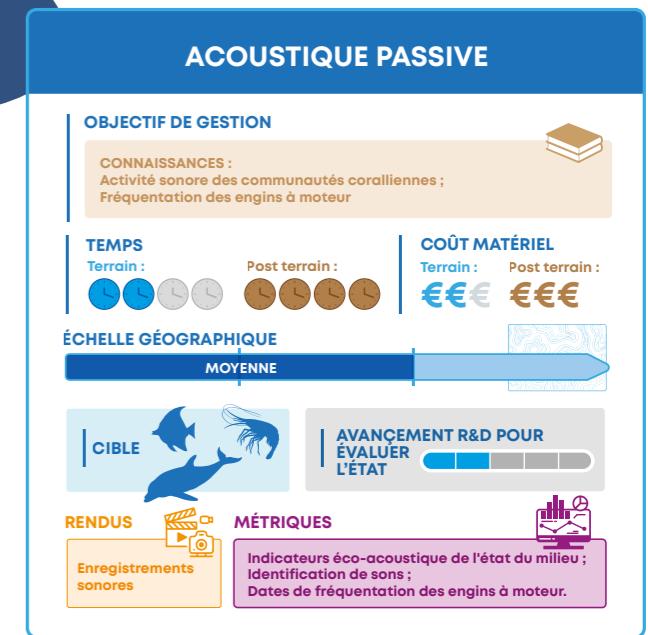
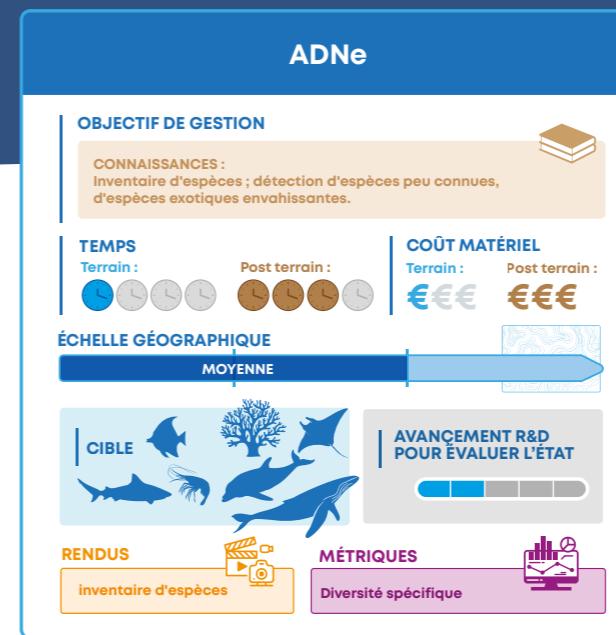
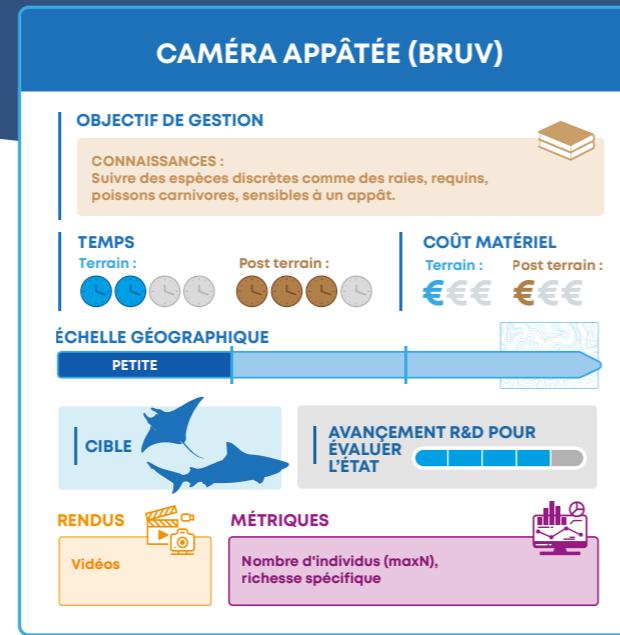
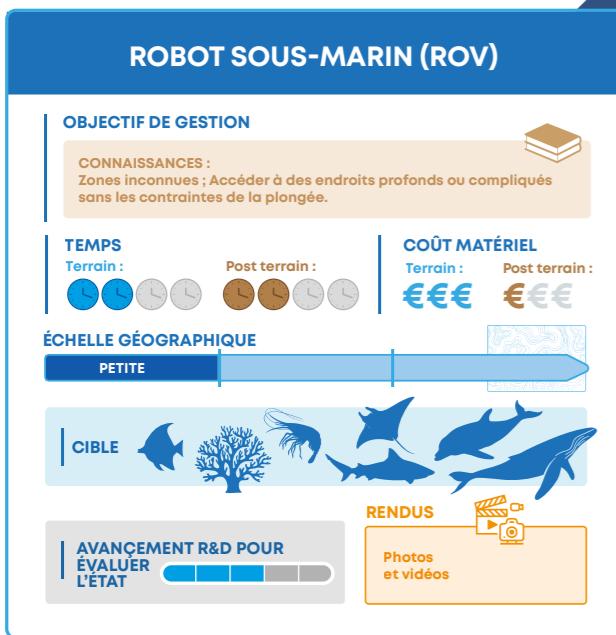
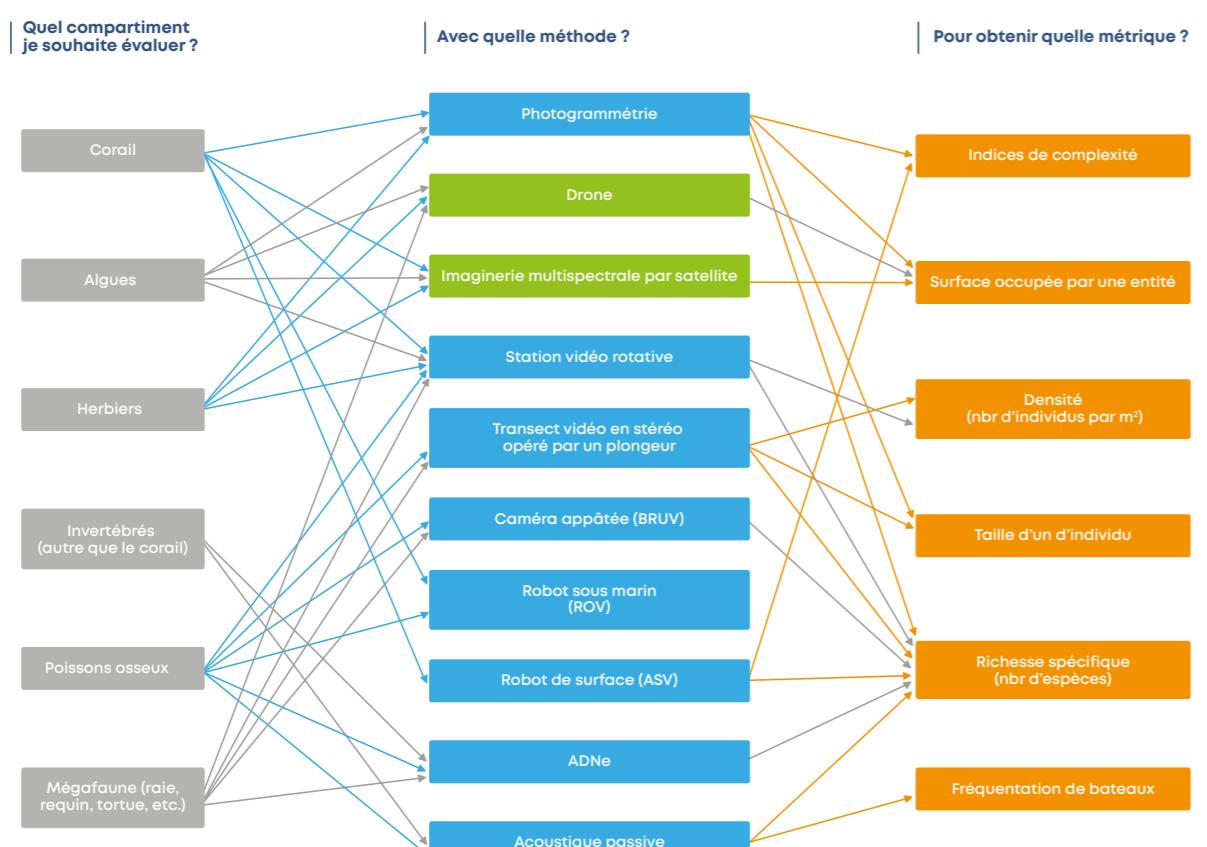
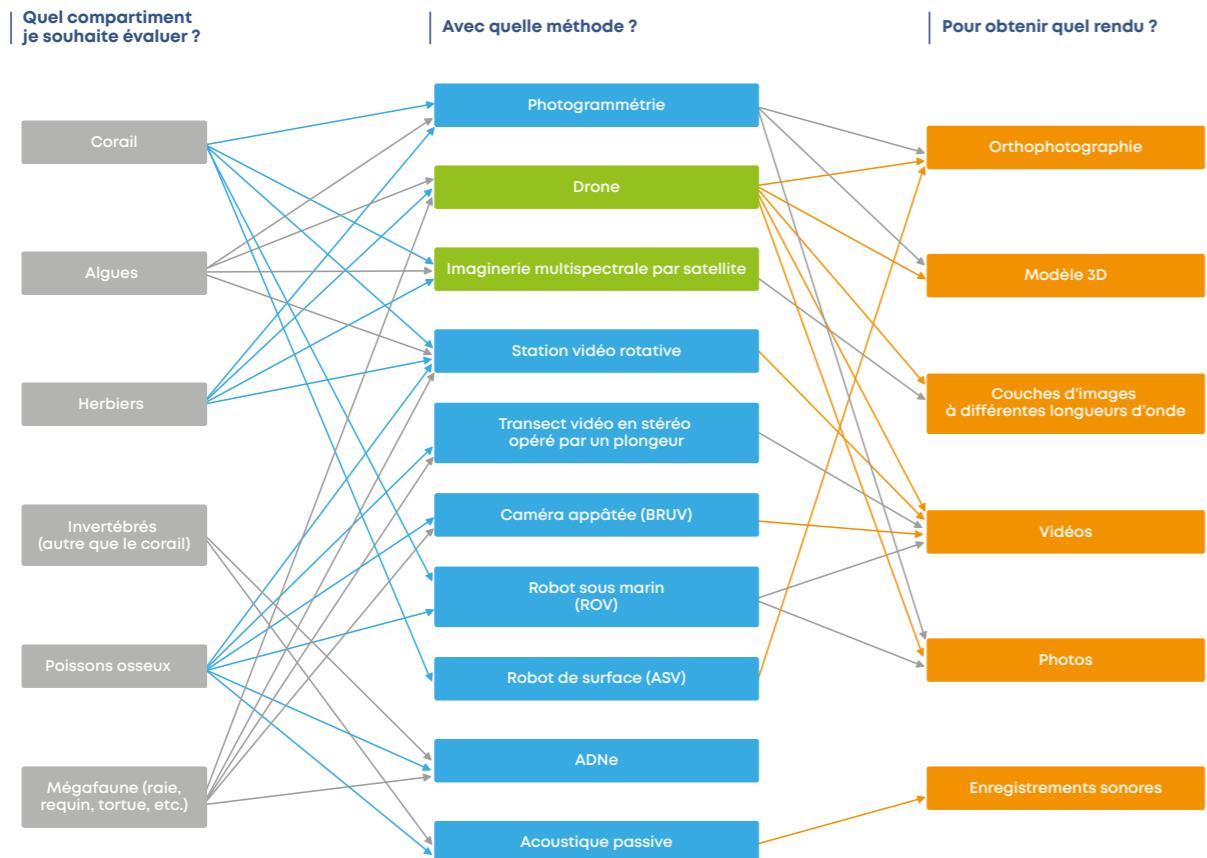


Tableau de synthèse des méthodes innovantes

Ces schémas présentent synthétiquement les compartiments que l'on peut évaluer avec les méthodes évoquées, les rendus et les métriques qu'il est possible d'obtenir.

Il est recommandé de lire en détail les chapitres dédiés pour plus de précision : ce schéma ne détaille pas toutes les métriques ni tous les rendus possibles.



Le coût est évalué par le nombre de «€». € = moins de 1000 euros, €€ = entre 1000 et 10 000 euros, €€€ = plus de 10 000 euros. Le coût matériel terrain comprend tout ce qui est nécessaire à l'acquisition (appareil photo, matériel de calibration, robot, etc). Le coût matériel post-terrain comprend tout ce qui est nécessaire au traitement (licence de logiciel, ordinateur, etc.).

EXPLICATIONS LIÉES AU TABLEAU ET FIGURES :

La tableau (pages 18-21) et les figures (pages 14-15) présentent les méthodes “de la façon“ la plus exhaustive et synthétique possible avec des informations portant sur la gestion, la description de la méthode, l’application sur le terrain et post-terrain, les temps et coûts matériels associés.

Dans la colonne «**objectif de gestion**», il est fait une distinction «**connaissance**» et «**état**». «**Connaissance**» fait référence à l’acquisition de données ponctuellement (inventaire), tandis que «**Etat**» fait référence à la possibilité de réaliser un suivi dans le temps.

La précision taxinomique concerne la précision jusqu'à laquelle la méthode peut aller. Basique = distinction des grands groupes (par exemple corail/herbier/sable pour la cartographie). Intermédiaire = distinction type MSA (corail blanchi/vivant/mort). Expert = identification jusqu'à l'espèce possible selon la qualité du support (qualité de la photo, etc.) et la capacité de l'analyste.

L'avancement R&D pour évaluer l'état est noté de 1 à 5. 1 désignant les méthodes qui nécessitent de la recherche et développement et qui ne sont pas encore directement applicables dans le contexte de la gestion. 5 désigne les méthodes qui ont passé le stade de la recherche et développement et qui sont utilisables facilement par les gestionnaires («clé en main»). Les notes prennent en compte le nombre de territoires où la méthode a été testée, la standardisation des protocoles, la facilité d'application de la méthode d'analyse (coût du matériel d'analyse, robustesse des modèles d'algorithme, etc.) pour un gestionnaire.

* Cette ligne est détaillée spécifiquement pour le robot de surface du projet PLANCHA (Ifremer)

** La vidéo en stéréo peut également être utilisée pour faire de la photogrammétrie (voir ligne photogrammétrie)

Méthodes	Gestion		Description					Application				Coût			
	Objectif de gestion	Intérêt pour le gestionnaire	Echelle géographique	Cibles	Métriques, rendus	Précision taxinomique	Avancement R&D pour évaluer l'état	Conditions d'applications	Terrain	Post terrain	Intérêt pour les herbiers	Temps terrain et post terrain	Répartition temps terrain et post terrain (% temps total)	Coût matériel terrain et post terrain	
Imagerie 3D	Photogrammétrie sous-marine	- Etat habitat benthique - Connaissance/ Etat impact des événements majeurs	- Evaluer la complexité de l'habitat, quantifier le recouvrement corallien, évaluer les tailles de colonies coraliennes	Centaine de mètres carrés. Résolution de 1 mm par pixel environ	Benthos	Rendus : orthophotographie, modèle 3D Métriques physiques et biologiques, indices de complexité	Expert	4/5	- Bonne visibilité - Ciel couvert - Profondeur : moins de 20 m (plongée) - Objet immobile	- En régie après une formation. Besoin de plongeurs professionnels - Matériel : appareil photo, balises	Besoin d'une expertise et de matériels spécifiques	Fort	Terrain: Moyen à long Post terrain : Long à très long	Terrain: 30 % Post terrain : 70 % Post terrain : \$\$	Terrain: \$\$ (photos) et \$ (vidéos)
Systèmes d'acquisition d'images et de vidéos sous-marines	Systèmes fixes	Caméra rotative	- Etat des communautés de poissons et de la mégafaune mobile - Etat habitat benthique	- Suivre et identifier sur vidéos les espèces mobiles - Analyse qualitative de l'habitat	Quelques m ² . Résolution de 1 mm par pixel environ	Poissons et benthos	Rendus : vidéos Métriques : abondance, richesse spécifique. Caractérisation semi-quantitative de l'habitat	Expert pour les poissons. Intermédiaire pour l'évaluation paysagère	4/5	- Bonne visibilité - Matériel : 2 systèmes par bateau	Possible en régie mais chronophage Connaissances en taxonomie nécessaire	Moyen	Terrain : Court Post terrain : Long	Terrain : 20 % Post terrain : 80 %	Terrain : \$\$
		Caméra appâtée (BRUV)	Connaissance sur les élastomébranches et poissons carnivores	Attirer des espèces discrètes (raies, requins sensibles à l'appât).	Quelques m ² . Résolution de 1 mm par pixel environ	Elasmo-branches et poissons carnivores	Rendus : vidéos Métriques : nombre d'individus (maxN), richesse spécifique	Expert	4/5	- En régie - Matériel : 1 ou 2 caméras, un appât, une structure porteuse.		Moyen (pour les espèces associées à l'herbier)	Terrain : Moyen Post terrain : Long	Terrain : 20 % Post terrain : 80 %	Terrain : \$ Post terrain : \$
	Systèmes mobiles	Robot sous-marin (ROV)	Connaissance sur des zones inconnues	Accéder à des endroits profonds, compliqués d'accès, sans les contraintes de la plongée	Centaine de mètres carrés. Résolution de 1 mm par pixel environ	Tout	Rendus : photos et vidéos	Expert	3/5	- Bonne visibilité - Peu de courant - Présence d'un support surface (pour le pilote).	Besoin d'une expertise et de matériels spécifiques	Faible	Terrain : Moyen Post terrain : Moyen	Terrain : 30 % Post terrain : 70 %	Terrain : \$\$\$ Post terrain : \$
		Robot de surface (ASV)	Connaissance et description des habitats peu profonds	Cartographier finement de grandes zones peu profondes	Hectares. Résolution de 1 mm par pixel environ	Benthos	Rendus : photos, vidéos, modèle 3D, orthophotographie Métriques physiques et biologiques	Expert	2/5	- En régie potentiellement. - Matériel : dépend du robot. Pour la planche du PLANCHA : robot de surface + GPS + caméra + échosondeur monofaisceau		Fort	Terrain : Moyen Post terrain : Long	Terrain : 20 % Post terrain : 80 %	Terrain : \$\$ Post terrain : \$\$
Systèmes fixes et mobiles	Vidéo en stéréo	Etat des communautés de macrofaune	Evaluer la taille de la macrofaune	Quelques m ² . Résolution de 1 mm par pixel environ	Poissons	Rendus : vidéos Métriques : mesure de tailles et distances	Expert	3/5	Bonne visibilité	- En régie. Besoin de plongeur professionnel. Etape assez technique de calibration. - Matériel : 2 caméras synchronisées	Besoin d'une expertise et de matériels spécifiques	Moyen	Terrain : Long Post terrain : Très long	Terrain : 30 % Post terrain : 70 %	Terrain : \$\$ Post terrain : \$\$

Résumé des méthodes innovantes pour l'évaluation de l'état des récifs coralliens															
Catégorie	Méthode	Gestion		Description					Application				Coût		
		Objectif de gestion	Intérêt pour le gestionnaire	Echelle géographique	Cibles	Métriques, rendus	Précision taxinomique	Avancement R&D pour évaluer l'état	Conditions d'applications	Terrain	Post terrain	Intérêt pour les herbiers	Temps terrain et post terrain	Répartition temps terrain et post terrain (% temps total)	Coût matériel terrain et post terrain
Echantillonnage biologique	ADNe	Connaissance inventaire d'espèces	Connaissances qualitatives : détection d'espèces rares, d'espèces exotiques envahissantes	Hectares	Tout	Rendus : inventaire d'espèces Métriques : diversité spécifique	Expert pour les poissons. Intermédiaire pour les autres taxons	2/5	- Peu de houle - Peu de courant	- En régie mais formation nécessaire. - Matériel : Pompe péristaltique et kit d'échantillonnage	Besoin d'une expertise et de matériels spécifiques.	Fort	Terrain : Court Post terrain : Long	Terrain : 10 % Post terrain : 90 %	Terrain : \$ Post terrain : \$\$\$
Son	Acoustique passive	- Connaissance des communautés corallines - Fréquentation d'engins à moteur en continu	- Suivre l'activité sonore des espèces en continu - Suivre la fréquentation des engins à moteur en continu	Hectares	Poissons, invertébrés et cétacés	Rendus : enregistrements sonores Métriques : - Indicateurs éco-acoustique de l'état du milieu - Identification de sons - Cartographie sonore des invertébrés - Dates de fréquentation des engins à moteur	Intermédiaire	2/5	Profondeur : plus de 8 m	- En régie. Besoin de plongeurs professionnels - Matériel : Hydrophone, enregistreur, système d'élévation de l'hydrophone, système de fixation	Besoin d'une expertise et de matériels spécifiques	Moyen	Terrain : Moyen Post terrain : Très long	Terrain : 10 % Post terrain : 90 %	Terrain : \$\$ Post terrain : \$\$\$
Télédétection	Drone	- Connaissance habitat benthique - Connaissance mégafaune et usages de la mer	- Obtenir une carte géomorphologique voire d'habitats - Evaluer l'impact en surface des événements exceptionnels - Déetecter la fréquentation des usagers de la mer et la mégafaune	Hectares. Résolution de 1 cm par pixel environ.	Benthos et mégafaune	Images et vidéos aériennes, carte, présence/absence de mégafaune et usagers de la mer	Basique	3/5	Avoir le certificat de pilote de drone CATS Bonnes conditions aériennes (luminosité, peu de vent, peu de vagues) Faible profondeur	- En régie si certificat de pilote de drone - Matériel : Drone et manette	En régie selon utilisation	Fort	Terrain : Moyen Post terrain : Moyen à long	Terrain : 40 % Post terrain : 60 %	Terrain : \$\$ Post terrain : \$
	Imagerie satellite multispectrale	- Connaissance habitat benthique - Connaissance fréquentation usagers de la mer	- Obtenir une carte géomorphologique voire d'habitats - Evaluer l'impact en surface des événements exceptionnels - Déetecter la fréquentation des usagers de la mer	Centaine d'hectares. Résolution de l'ordre du m par pixel	Benthos	Images et vidéos aériennes, carte, présence/absence usager de la mer	Basique	2/5	Pas de nuage, bonne luminosité Faible profondeur	Vérité terrain nécessaire	En régie si bonnes compétences en géomatique	Fort	Vérité terrain : Très long Post terrain : Moyen	Vérité terrain : 40 % Post terrain : 60 %	Vérité terrain : \$ Post terrain : \$

Tableau 1. Récapitulatif des méthodes présentées dans ce guide.



IEUX 2025

ÉTAT DES LIEUX 2025

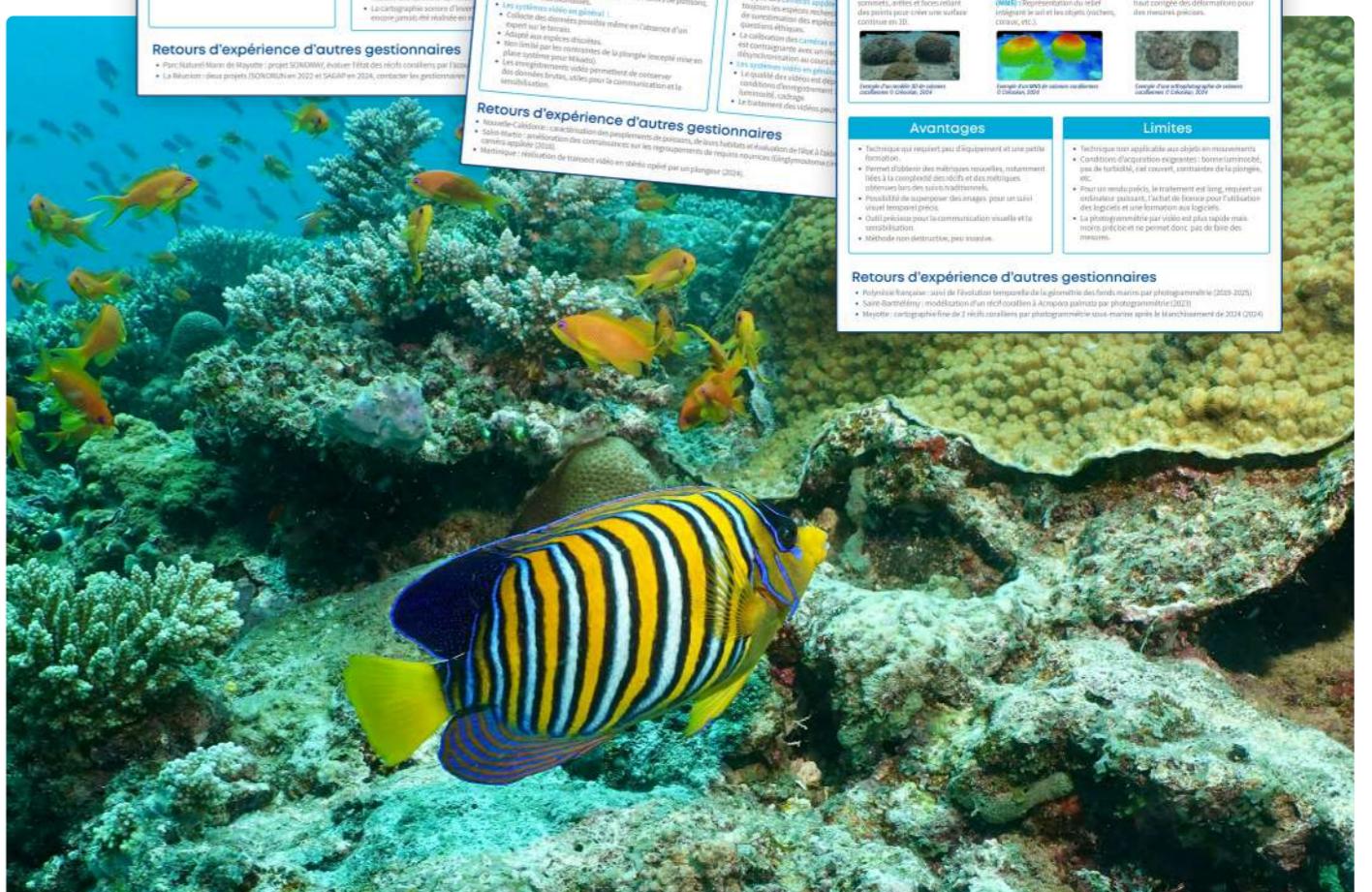


Photo : © Julien Wickel

La photogrammétrie sous marine

La photogrammétrie est une technique permettant d'obtenir des mesures précises à partir de multiples photographies d'un objet. Ce procédé, à travers des protocoles adaptés, reconstruit un objet en trois dimensions à partir de photographies en deux dimensions prises sous différents angles.

Matériel nécessaire

À l'acquisition :

- Appareil photo numérique standard/telephone portable/caméra d'action.
- Cibles au sol (Balises GCP).

Ordre de grandeur de la surface acquise sur le terrain : entre 100 et 1000 m² en une plongée

À la traitement :

- Ordinateur avec processeur rapide, carte graphique récente et mémoire RAM suffisante.
- Licence de logiciel de traitement photogrammétrique.

Métriques

- Descripteurs physiques** : distances, surfaces, volumes, pente, rugosité, dimension fractale.
- Descripteurs biologiques** : couverture corallienne, densité corallienne, distribution spatiale corallienne, taille des colonies, recrutement corallien, abondance de macro-invertébrés, valeur refuge. Possibilité de faire un LIT, PIT, quadrat sur les orthophotographies.

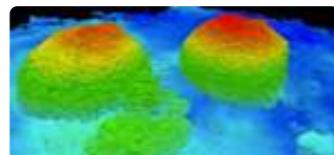
Exemples de rendus

Modèle 3D : Modèle formé de sommets, arêtes et faces reliant des points pour créer une surface continue en 3D.



Exemple d'un modèle 3D de colonies coraliennes © Créocean, 2024

Modèle Numérique de Surface (MNS) : Représentation du relief intégrant le sol et les objets (rochers, coraux, etc.).



Exemple d'un MNS de colonies coraliennes © Créocean, 2024

Orthophotographie : Image vue du haut corrigée des déformations pour des mesures précises.



Exemple d'une orthophotographie de colonies coraliennes © Créocean, 2024

Avantages

- Technique qui requiert peu d'équipement et une petite formation.
- Permet d'obtenir des métriques nouvelles, notamment liées à la complexité des récifs et des métries obtenues lors des suivis traditionnels.
- Possibilité de superposer des images pour un suivi visuel temporel précis.
- Outil précieux pour la communication visuelle et la sensibilisation.
- Méthode non destructive, peu invasive.

Limites

- Technique non applicable aux objets en mouvements
- Conditions d'acquisition exigeantes : bonne luminosité, pas de turbidité, ciel couvert, contraintes de la plongée, etc.
- Pour un rendu précis, le traitement est long, requiert un ordinateur puissant, l'achat de licence pour l'utilisation des logiciels et une formation aux logiciels.
- La photogrammétrie par vidéo est plus rapide mais moins précise et ne permet donc pas de faire des mesures.

Retours d'expérience d'autres gestionnaires

- Polynésie française : suivi de l'évolution temporelle de la géométrie des fonds marins par photogrammétrie (2019-2025)
- Saint-Barthélemy : modélisation d'un récif corallien à *Acropora palmata* par photogrammétrie (2023)
- Mayotte : cartographie fine de 2 récifs coralliens par photogrammétrie sous-marine après le blanchissement de 2024 (2024)

Acoustique passive

Le suivi par acoustique passive ("Passive Acoustic Monitoring") repose sur l'utilisation d'enregistreurs autonomes qui écoutent et enregistrent les sons environnants (paysage sonore).

Matériel nécessaire

À l'acquisition :

- Hydrophone + enregistreur.
- Support de fixation.

1 plongée pour l'installation d'un système acoustique et 2 plongées pour la maintenance

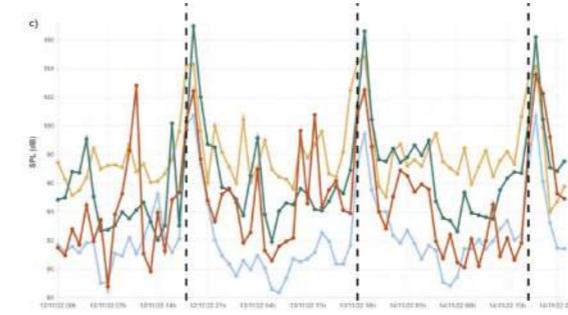
Au traitement :

- Ordinateur avec processeur rapide, carte graphique récente et mémoire RAM suffisante.
- Algorithme de reconnaissance des sons.
- Licence de logiciels.

Métriques

- Indicateurs éco-acoustiques de l'état du milieu au cours du temps : intensité sonore, complexité sonore, entropie spectrale...
- Détection de la fréquentation par les engins à moteur.
- Identification de sons de certaines familles de poissons (Scianidae, Serranidae, Pomacentraidae, Holocentridae, broutage de poissons-perroquets) et invertébrés (crevettes-pistolets).

Exemples de rendus



- Enregistrements acoustiques du paysage sonore.
- Courbe de l'intensité sonore au fil du temps.

Volume sonore moyen par heure dans les basses fréquences (ciblant plutôt les poissons). Chaque couleur représente différents sites autour de Mayotte (ReefPulse, 2024).

Avantages

- Suivi sur du long terme, en continu, en milieux isolés.
- Intéressant pour le suivi de la fréquentation par les bateaux.
- Non limité par la visibilité.
- Intéressant pour de la sensibilisation : diffusion d'enregistrement sonore.
- Permet de suivre l'activité sonore d'invertébrés, peu pris en compte dans les suivis UVC.

Limites

- Le son reçu par l'hydrophone dépend de l'intensité à la source, la sensibilité de l'hydrophone, le substrat entre l'hydrophone et la source...
- Toutes les espèces n'émettent pas des sons de manière uniforme : une espèce peut être associée à plusieurs sons ou aucun son.
- Les indicateurs éco-acoustiques ne font pas l'unanimité pour comparer les sites entre eux.
- L'identification des sons est conditionnée par la connaissance des sons émis par les espèces et l'entraînement de l'algorithme localement. Elle peut être réalisée manuellement, mais est très chronophage.
- La cartographie sonore d'invertébrés est coûteuse et n'a encore jamais été réalisée en routine.

Retours d'expérience d'autres gestionnaires

- Parc Naturel Marin de Mayotte : projet SONOMAY, évaluer l'état des récifs coralliens par l'acoustique passive (2022-2024)
- La Réunion : deux projets (SONORUN en 2022 et SAGAP en 2024, contacter les gestionnaires pour plus d'informations)

L'ADN environnemental, ou ADNe, correspond à l'ADN extrait à partir d'échantillons environnementaux. Cet ADN extrait est amplifié et comparé à des bases de référence permettant l'identification d'espèces si ces dernières sont référencées.

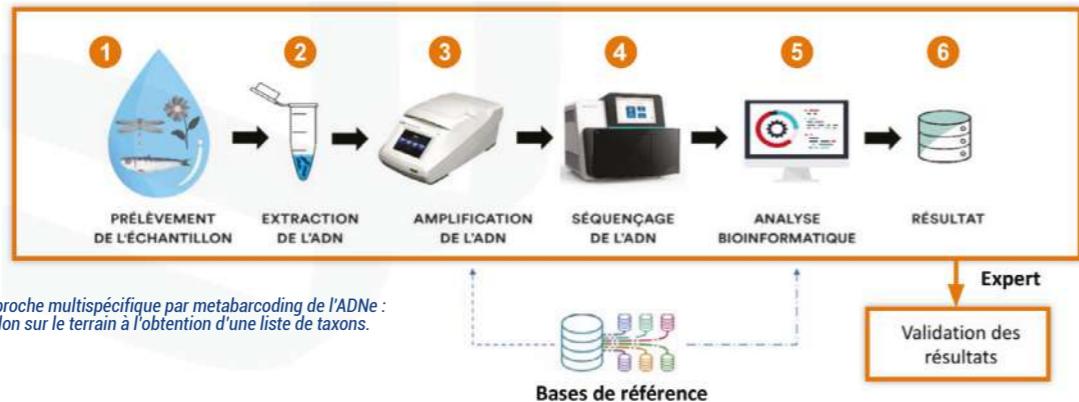
Matériel nécessaire

À l'acquisition :

- Pompe péristaltique de filtration ou mini-fusée tractable
- Kit d'échantillonnage (tuyau muni d'une crépine, capsule de filtration...)

Au traitement :

- Matériel de laboratoire pour l'extraction, l'amplification, le séquençage.



Avantages

- Détection potentielle de tout le vivant (et au moins multitaxons) en un seul prélèvement.
- Détection des espèces rares, discrètes, cryptiques, présentes en très faible densité localement, de petites tailles.
- Détection des espèces quel que soit leur stade de vie.
- Détection de l'arrivée d'espèces non indigènes voire invasives
- Les efforts et les coûts d'échantillonnage sur le terrain sont réduits.
- La méthode présente un caractère non destructif, non invasif.

Limites

- les bases de référence pour l'identification de taxons peuvent être difficiles d'accès (propriété intellectuelle de chercheurs) ou incomplètes et erronées (bases publiques).
- Les protocoles d'échantillonnage, de filtration et d'extraction PCR sont variables et non standardisés entre les laboratoires. Le protocole dépend du milieu (oligotrophe, eutrophe), du besoin, des espèces cibles...
- Le risque de contamination génétique, de faux-positifs et de faux-négatifs existe.
- Certaines espèces ne relâchent pas suffisamment d'ADN dans le milieu pour être identifiées.

Retours d'expérience d'autres gestionnaires

- Martinique : analyse de la biodiversité de la macrofaune marine (mammifères, poissons osseux, élastomébranches) par metabarcoding (ADNe) contenue dans l'eau de mer de surface (2019-2020).
- Polynésie française : l'ADN environnemental comme outil de surveillance des espèces invasives introduites par les navires et l'activité portuaire (2024).
- Réserve naturelle marine de Saint-Martin : détecter les espèces discrètes (contacter les gestionnaires).
- Réserve naturelle marine de la Réunion : détecter les espèces exotiques envahissantes (contacter les gestionnaires).

Les stations vidéo rotative (ex : KOSMOS) permettent une estimation de l'abondance de la macrofaune vagile et une analyse paysagère des habitats ; la caméra appâtée (BRUV : Baited-Remote Underwater Video) attire les espèces carnivores discrètes (raies, requins). La caméra en stéréo repose sur l'utilisation synchronisée de deux caméras permettant de produire une image en trois dimensions : elle peut être ajoutée à n'importe quel système d'imagerie fixe ou mobile.

Matériel nécessaire

À l'acquisition :

- Le système KOSMOS (Ifremer) est le nouveau système remplaçant STAVIRO et MICADO. Il peut être construit avec les moyens d'un FabLab.



In situ : 12 min/station (protocole "type STAVIRO") ou 4 hrs max/station (protocole "type MICADO")

- La caméra appâtée est une caméra sur un trépied avec un appât adapté monté dans le champ de vision de la caméra.

Système de caméra appâtée © Alain Goyau

Caméra en stéréo

- À l'acquisition : deux caméras (caméra d'action souvent type GoPro), une barre de 80 cm. et du matériel de calibration (cube 3D, damier).

- Au traitement : le traitement nécessite des logiciels de synchronisation des vidéos.

Transsect vidéo en stéréo opéré par un plongeur © Bruno Garel



Métriques & rendus

Rendus :

- Métriques de biodiversité : fréquence d'occurrence, richesse spécifique, nombre d'individus maximum, classe de taille (petit, moyen, gros). Possibilité d'estimer les tailles et les biomasses avec l'ajout des caméras en stéréo. Caractérisation des habitats possible.

Avantages

- KOSMOS : stations multiples (entre 10 et 20 stations pour 5 h en mer : protocole "type STAVIRO") ou suivi long terme avec enregistrement sur plusieurs jours ("protocole type MICADO"). Système accessible et réparable.
- La caméra appâtée attire des top-prédateurs, plutôt discrets.
- La caméra en stéréo permet d'accéder aux tailles de poissons, de calculer des biomasses.
- Les systèmes vidéo en général :
 - Collecte des données possible même en l'absence d'un expert sur le terrain.
 - Adapté aux espèces discrètes.
 - Non limité par les contraintes de la plongée (excepté mise en place système pour Mikado).
 - Les enregistrements vidéo permettent de conserver des données brutes, utiles pour la communication et la sensibilisation.

Limites

- Les KOSMOS et les caméras appâtées sont encombrants, contraints par la nature du fond (fond horizontal), le courant. La profondeur minimale est de 1,8 à 2 m.
- L'appât des caméras appâtées n'attire pas toujours les espèces recherchées avec un risque de surestimation des espèces attirées et pose des questions éthiques.
- La calibration des caméras en stéréo est contraignante avec un risque de désynchronisation au cours du temps.
- Les systèmes vidéo en général :
 - La qualité des vidéos est dépendante des conditions d'enregistrement : turbidité, luminosité, cadrage.
 - Le traitement des vidéos peut être chronophage.

Retours d'expérience d'autres gestionnaires

- Nouvelle-Calédonie : caractérisation des peuplements de poissons, de leurs habitats et évaluation de l'état à l'aide de STAVIRO (2014).
- Saint-Martin : amélioration des connaissances sur les regroupements de requins nourrices (*Ginglymostoma cirratum*) à l'aide de la caméra appâtée (2016).
- Martinique : réalisation de transect vidéo en stéréo opéré par un plongeur (2024).

Systèmes mobiles

Les robots sous-marins et de surface sont des outils technologiques polyvalents, utilisés pour observer, surveiller et collecter des données sur les écosystèmes marins. Modulables, ils peuvent être équipés de divers capteurs et instruments en fonction des objectifs de suivi environnemental. (Les AUV ne sont pas mentionnés dans cette fiche de synthèse car ils sont hors du budget des gestionnaires.)

Matériel nécessaire

À l'acquisition :

Le ROV :

- Le ROV (Remoted Operated Vehicle) est un robot sous-marin motorisé relié à une manette de guidage en surface par un ombilic. Il peut être muni d'une caméra (simple ou en stéréo), d'un système de sécurité contre les chocs, d'une pince, d'une pompe à ADNe...



Robot sous-marin déployé dans les îles Éparses © Grégoire Moutardier

L'ASV :

- L'ASV (Autonomous Surface Vehicle) est un robot de surface commandé à distance. La "planche" Ifremer est un exemple d'ASV constituée d'une planche de bodyboard équipée d'un échosondeur monofaisceau, d'une caméra classique et d'un système GPS.



Durée d'acquisition 1 h 30 pour 150 m x 150 m

Au traitement :

- Le traitement requiert du matériel de visionnage de photos/vidéos (ROV) et du matériel spécifique de traitement des photos du robot de surface

Métriques & rendus

Rendus :

- ROV : Photos et vidéos principalement. Il est possible d'ajouter une pince de prélèvement et une pompe à ADNe.
- ASV : orthophotographie, modèles 3D.

Métriques biologiques obtenues avec l'ASV :



Prédiction en acropore branchu à Trou d'eau (La Réunion) après le passage de la "planche" © Ifremer

Avantages

- Le ROV est utilisé pour prospection des zones difficiles d'accès ou inconnues, sans les contraintes de la plongée.
- L'ASV comme la "planche" permet d'accéder à des zones peu profondes, et de faire des orthophotographies sur de grandes surfaces, sans les contraintes de la plongée. Elle est facile à transporter et peu chère.

Les deux systèmes permettent d'exploiter les données facilement à des fins de communication et de sensibilisation.

Limites

- Les protocoles ayant recours au ROV sont encore exploratoires et difficilement réplicables dans le temps. Il est compliqué d'obtenir des métriques biologiques et coûteux d'intégrer un système de positionnement sur le ROV.
 - La manipulation du ROV requiert une bonne agilité du pilote, peu de courant et une bonne visibilité.
 - L'ASV "planche" est limitée par la visibilité : la profondeur de travail est environ de 5 m et en dehors de la zone de déferlement des vagues.
- Les systèmes mobiles en général :**
- La qualité des vidéos est fortement dépendante des conditions d'enregistrement : turbidité, luminosité, cadrage.
 - La faune peut être perturbée lors du déplacement du système.
 - Le traitement des vidéos peut être chronophage.

Retours d'expérience d'autres gestionnaires

- Tromelin (îles Éparses) : améliorer les connaissances sur les récifs coralliens de la zone mésophotique avec un ROV (2025)
- La Réunion : cartographie et caractérisation des habitats benthiques peu profonds (2024)

Drone & imagerie satellite multispectrale

Les méthodes de télédétection sont les techniques d'acquisition à distance d'informations sur la surface terrestre. Elles sont principalement fondées sur l'analyse d'images obtenues dans différentes gammes de longueurs d'onde à partir d'aéronefs ou de satellites. Dans cette fiche ne sont présentés que les outils accessibles aux gestionnaires : certaines images satellites et les drones.

Matériel nécessaire

À l'acquisition : Le satellite et le drone se distinguent par leur distance au sujet d'étude, leur fauchée (recouvrement d'une surface), leur coût d'utilisation.

Satellite :

- Les images satellite sont accessibles entre autres via le dispositif DINAMIS pour les entités institutionnelles françaises qui adhèrent au dispositif. Des images d'archive peuvent être disponibles directement, sinon, il faut commander.



Satellite Pléiade © Airbus DS/Master Image Films

Drone :

- Le drone est un aéronef civil circulant sans personne à bord et piloté à distance. Pour piloter un drone dans un cadre professionnel, il est nécessaire d'avoir obtenu le Certificat d'Aptitude Théorique de pilote à distance pour les Scénarios standard (CATS).



Drone © Loïc Giraud

Au traitement :

- Des logiciels de cartographie (par exemple QGIS ou ArcGIS) sont nécessaires à la visualisation et au travail sur les cartes.
- Le logiciel OpenDroneMap est un logiciel de traitement des données collectées avec un drone.

Métriques & rendus

Métriques :

- Surface d'herbiers
- Inventaire mégafaune (requins, raies, mammifères marins, tortues) en avion ou drone seulement

Rendus :

- Images
- Vidéos (spécifiquement pour le drone)
- Cartographie géomorphologique voire carte d'habitats si vérité terrain

Avantages

- Couverture de grande surface. Les images prises du ciel permettent d'avoir une vue d'ensemble de plusieurs écosystèmes.
- Les images via les satellites Pléiades sont gratuites (via DINAMIS).
- Drones : appareils de plus en plus accessibles financièrement. Certains permettent de programmer un plan de vol automatique pour des protocoles standardisés ou de faire des acquisitions photogrammétriques.

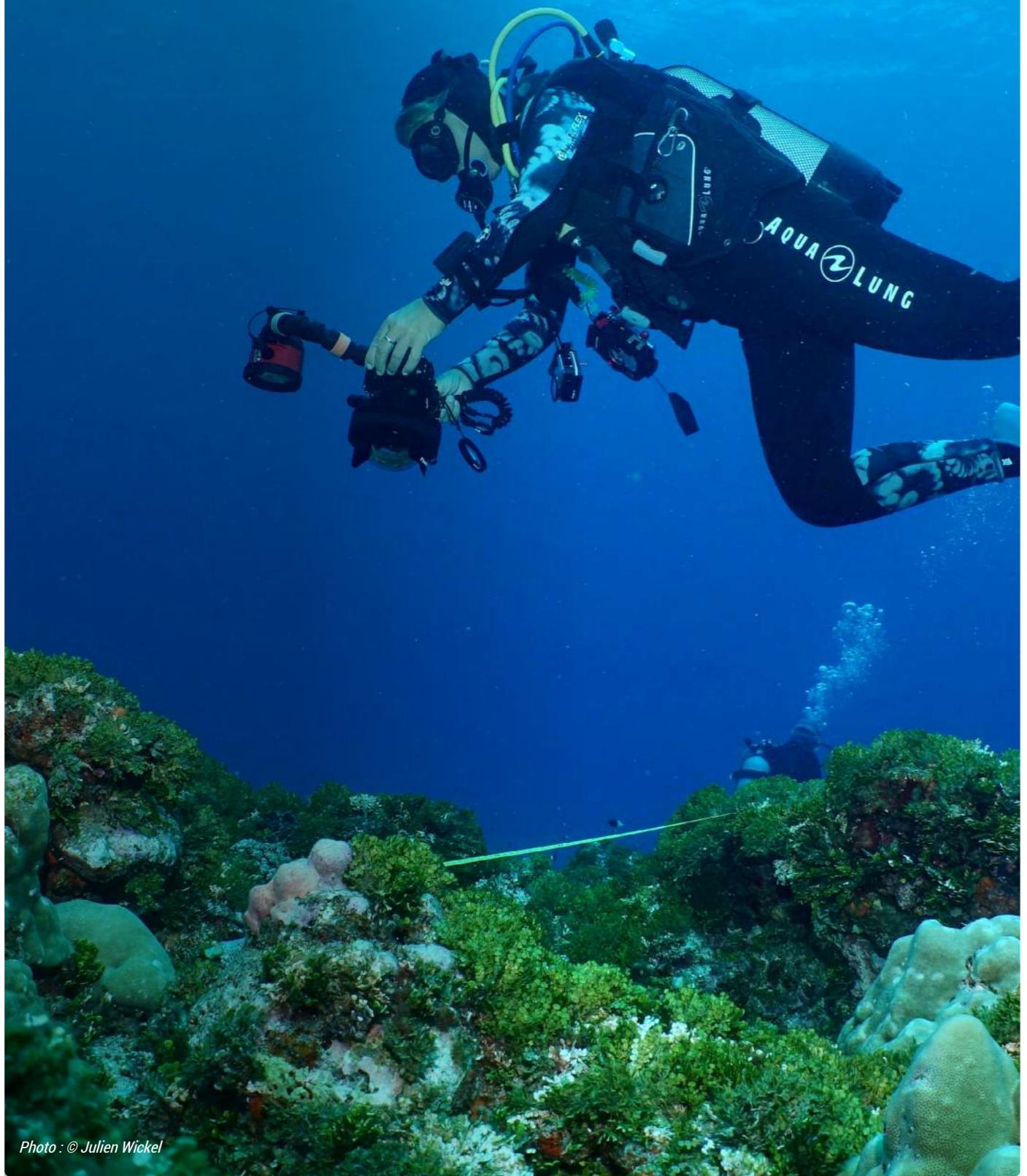
Limites

- La précision des méthodes de télédétection et la résolution des capteurs ne permettent pas d'égaler la précision des méthodes *in situ*. Par exemple, il est difficile de différencier un corail vivant d'un corail mort et donc de mesurer précisément le recouvrement corallien.
- Les données collectées par télédétection sont dépendantes d'une vérité terrain (en plongée, par ROV, par robot de surface, etc) ou d'autres méthodes complémentaires.
- La profondeur de l'eau, la présence de nuages, les conditions de luminosité, la réflexion de surface, la turbidité sont des facteurs limitants cruciaux qui peuvent limiter la détection.
- L'usage de drone peut être soumis à des contraintes logistiques et réglementaires, selon la zone d'étude.

Retours d'expérience d'autres gestionnaires

- Bassas da India (îles Éparses) : la cartographie avec vérité terrain : cartographie des habitats marins côtiers (0-40 m) de la Martinique (2024)
- Martinique : cartographie des habitats marins côtiers (0-40 m) de la Martinique via des méthodes de télédétection (2024)
- Polynésie française : quelques exemples d'utilisation du drone (2023)
- Mayotte : cartographie des habitats marins de Mayotte (projet de recherche CARMUHAM en cours)
- La Réunion : suivi des variables essentielles de la biodiversité côtière (projet de recherche BioEOS en cours)

La photogrammétrie sous marine



1.1 | Introduction



Photo : © Hendrik Sauvignet

La photogrammétrie via le principe de “structure acquise par le mouvement” (“structure from motion” en anglais) est une technique permettant d’obtenir des mesures précises à partir de multiples photographies d’un objet. Dans le cadre de ce guide, ne seront traitées que certaines méthodes applicables à l’évaluation de l’état de santé des récifs. Ces procédés, à travers des protocoles adaptés, permettent de reconstruire un objet en trois dimensions (3D) à partir de photographies en deux dimensions prises sous différents angles. La reproduction en 3D permet

d’obtenir les caractéristiques physiques d’habitats (topographie, bathymétrie) et les descripteurs associés tels que la complexité, la dimension fractale, la pente, la rugosité...

Les phases clés de la photogrammétrie sont (Figure 3) :

1. la préparation du terrain,
2. l’acquisition sur le terrain,
3. le traitement des données,
4. l’extraction des métriques.

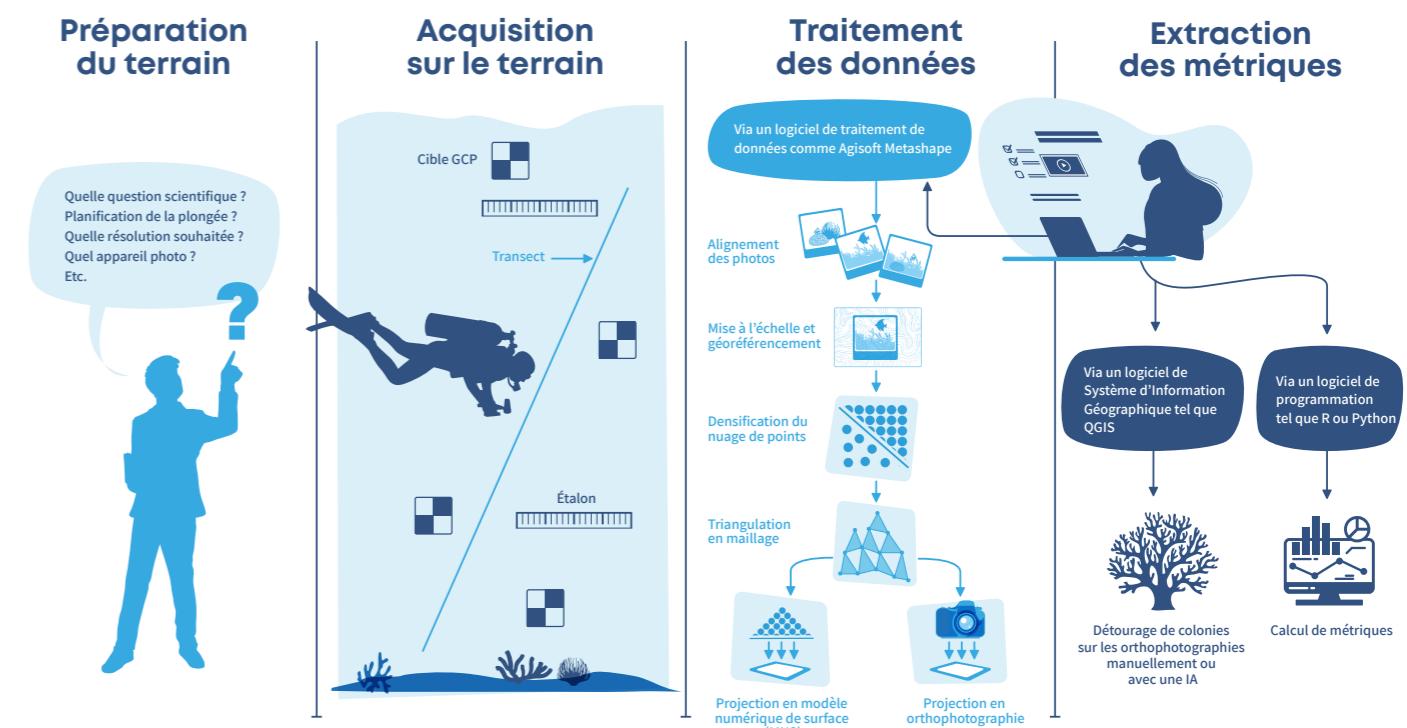


Figure 3. Présentation des différentes phases de la méthode de la photogrammétrie sous-marine. Adapté de Geolab (2022). GCP = Ground Control Point.

Méthodes	Objectif de gestion	Description											
		Echelle géographique	Echelle temporelle	Cible	Métriques, rendus	Précision rendus (quel paramètre fait varier la précision ?)	Avancement R&D	Nombre de territoires testés et type d'habitat testé	Conditions d'applications	Destructif/ invasif	Utilisation en sciences participatives	Communicabilité	
Photogrammétrie par photos	Suivre les métriques physiques et biologiques des habitats benthiques. Obtenir des supports de communication.	Selon la profondeur et la forme du site, entre 100 et 1000 m ² en une plongée.	Acquisition ponctuelle	Benthos	<ul style="list-style-type: none"> - Métriques physiques : distances, surfaces, volumes, rugosité, dimension fractale - Métriques biologiques : données obtenues à partir de détourage d'orthophotographies (couverture corallienne, distribution des classes de tailles des colonies, etc), valeur refuge Possibilité de faire LIT/PIT/quadrat sur l'orthophotographie. - Rendus : modèles 3D, orthophotographies 	1 mm par pixel environ : la précision du rendu dépend du type de capteur d'appareil photo, de la distance plongeur-substrat, de la résolution du capteur, des paramètres environnementaux, de la précision de l'enregistrement des points GPS...	Opérationnel : la méthode est opérationnelle sur le terrain. Encore au stade R&D : la génération de mesures 3D et le calcul d'indice de complexité requièrent des compétences techniques.	Testé dans de nombreux territoires ultra-marins pour les récifs coralliens. Testé sur l'herbier également : méthode intéressante pour étudier les limites d'herbier.	<ul style="list-style-type: none"> - Conditions météo : eaux non turbides, bonne luminosité, ciel couvert (éviter les reflets du soleil), peu de courant - Objet immobile - Contraintes de la plongée 	Non destructif. Très peu invasif.	Non	Rendus visuels : <ul style="list-style-type: none"> - à partir d'orthophotographie : superposition avant/ après - à partir de modèles 3D : réalité virtuelle, appréciation de l'aspect 3D d'un récif en bonne santé et des abris pour les autres espèces, etc. 	
Photogrammétrie par vidéos (exemple de DeepReefMap)	Evaluer rapidement sur de moyennes distances l'état de santé des coraux (blanchis ou non) et la diversité des morphotypes.	Transect d'une centaine de mètres sur 4 m de large	Acquisition ponctuelle		<ul style="list-style-type: none"> - Modèle 3D du transect - Orthophotographie - Segmentation et identification automatiques des morphotypes et de l'état des coraux (coraux vivants/blancs/morts) et quelques autres catégories benthiques 	La précision du modèle 3D est bien plus faible que celle obtenue par photogrammétrie par photos. Cela est principalement du au découpage de photos à partir de vidéos, qui dégrade la qualité. De plus, dans le protocole de DeepReefMap, la vidéo est prise dans un sens, une fois : il y a donc des zones d'ombre importantes.	R&D : Entrainé uniquement en mer Rouge. Algorithme de reconstitution 3D encore en développement Algorithme de segmentation et d'identification reconnaît les coraux blanchis ou non, certains morphotypes.	Mer Rouge			Potentiellement dans le futur	Vidéo intéressante et facile pour communiquer. Rendus d'orthophotographies non superposables.	

Méthodes	Terrain			Post Terrain				Coût			Complémentarité avec d'autres méthodes	
	Matériel spécifique nécessaire	Expertise/ en régie	Méthodes et données accessibles en open source / Licence	Matériel spécifique nécessaire	Expertise/ en régie	Méthodes et données accessibles en open source / Licence	Besoin d'une IA	Temps terrain	Temps post terrain pour obtenir les données brutes (court/moyen/long)	Coût matériel associé		
Photogrammétrie par photos	Appareil photo numérique standard/ caméra d'action, balises étalon/de géoréférencement	Possible en régie si plongeur professionnel	Sur la plateforme Zenodo, des protocoles sont mis à disposition	Ordinateur puissant avec un processeur rapide, une carte graphique récente et une mémoire RAM suffisante	Deux types d'expertise nécessaires : - pour reconstruire les modèles 3D et 2,5D avec géoréférencement fiable à partir des images : compétences nécessaires en photographie et géomatique. - pour calculer les métriques biologiques/physiques et analyser les résultats : compétences nécessaires en géomatique et en détermination d'espèces.	Logiciels spécifiques Logiciel R (calcul de la valeur refuge)	Non mais l'IA est un plus pour détourner les colonies sur une orthophotographie	Dépend de la précision du modèle attendu. Peut aller de 40 minutes pour une zone de 100 m ² à 20 m de profondeur (environ 100 photos) à 3 plongées pour prendre entre 2000 et 4000 photos sur 100 m ² .	Moyen à long : de quelques heures à plusieurs jours selon la précision attendue, l'ordinateur, le nombre de photos, etc.	Appareil photo : de 200 à 5000 euros Licence logiciel de traitement photogrammétrique : 500 à 3000 euros. La licence pour Agisoft Metashape est de 3000-4000 euros Prix des cibles GCP : environ 500 euros pour 5 cibles.	L'acquisition de photographies se fait via un appareil photo qui peut être placé sur différents supports, par exemple : - La « planche » du projet PLANCHA (Ifremer), robot de surface équipé de caméra et d'échosondeur monofaisceau : permet d'obtenir des orthophotographies sur le platier. - Les drones aériens et sous-marins (ROV, AUV, etc) peuvent également acquérir des images pour des modèles en 3D.	
Photogrammétrie par vidéos (exemple de DeepReefMap)	GoPro et tube en PVC		Protocole sur le terrain facile à mettre en place		Expertise nécessaire pour le moment, mais un portail accessible aux gestionnaires est prévu prochainement.	Oui dans le futur	Oui	5 min par transect + temps de pose de transect	Court : 5 min pour 100 m de transect	GoPro : de 200 à 600 euros		

Tableau 2. Récapitulatif des méthodes photogrammétrie par photos et photogrammétrie par vidéos (exemple de DeepReefMap)

1.2 | Description détaillée

Parmi les différentes possibilités d'acquisition, les deux manières les plus populaires pour l'obtention de photos dans un protocole photogrammétrique sont :

1. La photogrammétrie par photos, qui se base sur une série d'images en 2D.
2. La photogrammétrie par vidéos, qui repose sur l'acquisition de vidéos, qui sont ensuite découpées en images individuelles, puis traitées de la même manière que la photogrammétrie par photos.

La photogrammétrie produit des résultats dont la qualité et les types de rendus varient considérablement en fonction des choix effectués à chaque étape clé du processus. Ci-dessous sont présentées les différents points d'attention :

A | EN AMONT DU TERRAIN

Avant toute acquisition photogrammétrique sous-marine, une étape de planification rigoureuse est essentielle. Cela peut inclure une exploration préalable

Les deux processus s'appuient sur la détection et la mise en correspondance de points communs entre les images pour reconstruire la scène. Le géoréférencement et la mise à l'échelle du modèle est possible en positionnant des points de contrôle et des étalons au sol.

du site, une étude grossière de la surface ou de l'objet à modéliser, ainsi que la préparation de la plongée en fonction de la profondeur de travail.

Paramètres de plongée

Prise de Vue	Paysage	SONY A7 24MP +16mm			
Caméra	Taille image (pixels)	Overlap souhaité	Vitesse d'acquisition	Dimension zone d'acquisition	
Largeur capteur 35,8 mm	Largeur - 6000	Frontal 75%	4 s/photo	L (m) - 30	
Distance focale (réelle) sous l'eau 17,6	Hauteur - 4000	Latéral 75%	Temps d'installation 20	L (m) - 30	
	MP 24		Temps désinstallation 10		

Plongée	Résolution (cm/px)	Couverture photo (m)		Plan de plongée (m)		Nbr total de photos	Durée totale (h)	Durée totale	Surface modèle 3D (LxL)
		L	H	InterPhoto	Interligne				
1	0,03	2	1,4	0,34	0,51	5251	6,33	6h21m	31,25x31,25
2	0,07	4,1	2,7	0,68	1,02	1350	2	2h	32,5x32,5
3	0,1	6,1	4,1	1,02	1,53	600	1,17	1h10m	33,75x33,75
4	0,14	8,1	5,4	1,36	2,03	345	0,88	53m	35x35
5	0,17	10,2	6,8	1,7	2,54	216	0,74	45m	36,25x36,25
6	0,2	12,2	8,1	2,03	3,05	150	0,67	40m	37,5x37,5
7	0,24	14,2	9,5	2,37	3,56	117	0,63	38m	38,75x38,75
8	0,27	16,3	10,8	2,71	4,07	96	0,61	37m	40x40
9	0,31	18,3	12,2	3,05	4,58	70	0,58	35m	41,25x41,25
10	0,34	20,3	13,6	3,39	5,09	54	0,56	34m	42,5x42,5

Figure 4. Tableau développé par Geolab pour anticiper la planification d'une plongée d'acquisition photogrammétrique (dans cet exemple, spécifiquement avec un Sony A7II, un capteur de 24 mégapixels et un objectif de 16 mm). En jaune, les paramètres ajustables par le plongeur.

La planification passe notamment par la mise en place de transects ou d'un quadrillage de la zone à couvrir. Pour garantir une reconstruction 3D de qualité, il est recommandé d'assurer un recouvrement d'environ 75 % entre deux photos successives aussi bien frontalement que latéralement.

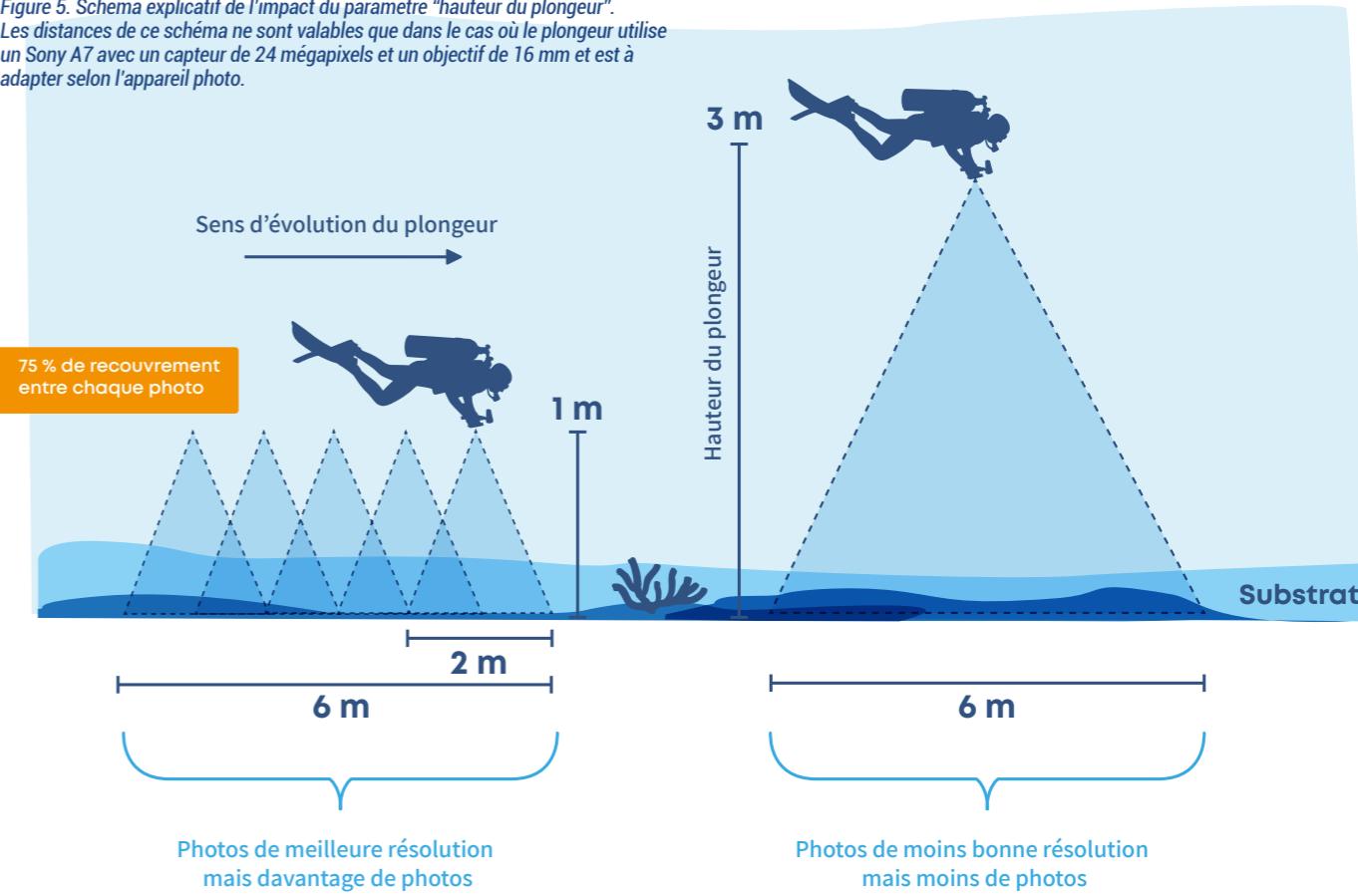
La préparation du terrain passe également par le choix de l'équipement photographique. Les éléments clés à prendre en compte sont :

- **le capteur photographique CCD de l'appareil photo :** il détermine la résolution des images, c'est-à-dire la finesse des détails discernables.

- **le type d'objectif optique :** ce dernier modifie la distance focale de l'appareil. Une distance focale courte offre un champ de vision plus large : cela permet de couvrir de vastes zones, mais entraîne une résolution plus faible des objets photographiés. À l'inverse, une distance focale plus longue permet de «zoomer» sur des détails spécifiques, augmentant la résolution des éléments ciblés, mais réduit le champ de vision.

À titre d'exemple, l'entreprise Geolab a mis au point des tableaux d'aide à la planification de la photogrammétrie sous-marine. La Figure 4, adaptée à un Sony A7II avec un capteur de 24 mégapixels et un objectif de 16 mm, décrit les paramètres de plongée. Dans ce tableau la zone d'acquisition mesure 900 m². Mais il est possible de travailler sur des surfaces plus grandes ou plus petites selon les moyens, le temps, les ressources humaines disponibles.

Figure 5. Schéma explicatif de l'impact du paramètre "hauteur du plongeur". Les distances de ce schéma ne sont valables que dans le cas où le plongeur utilise un Sony A7 avec un capteur de 24 mégapixels et un objectif de 16 mm et est à adapter selon l'appareil photo.



Ces réglages ont un impact direct sur les conditions de prise de vue, notamment :

- la hauteur de prise de vue (en mètres),
- la distance entre les photos (interphoto),
- la distance entre les lignes d'un quadrillage (interligne),
- la durée totale estimée de la plongée,
- la couverture photo (mètres),
- le nombre total de photos,
- etc.

B | LORS DE L'ACQUISITION SUR LE TERRAIN

Sur le terrain, il est important d'avoir quelques compétences en photographies, pour ajuster au mieux la prise de vue et obtenir des photos exploitabless :

- **La hauteur du plongeur** par rapport au substrat impacte directement la résolution spatiale des images. Si le plongeur est proche du substrat, il capturera des détails plus fins, essentiels pour l'identification d'organismes de petite taille. Inversement, si le plongeur est éloigné, la résolution sera plus faible, le nombre d'images moins important, diminuant le temps d'acquisition et le traitement ultérieur.
- **La visibilité** (turbidité, particules, courants, houle) et les conditions d'éclairage (naturel et artificiel) impactent le rendu. Dans des très petits fonds, le ciel

doit être couvert pour limiter les reflets du soleil, tout en maintenant une bonne luminosité. Les conditions doivent inclure peu de vagues, un courant faible et une excellente visibilité.

Certains paramètres sont à prendre en compte spécifiquement pour la photogrammétrie par vidéos :

- **La fréquence d'images** (Frame Rate - FPS) de la vidéo c'est-à-dire le nombre d'images disponibles par unité de temps. Plus il y a d'images, plus le rendu sera précis.
- **La vitesse de déplacement de la caméra** : Si la caméra se déplace trop rapidement, il peut y avoir un flou de mouvement dans chaque image extraite, réduisant la netteté des détails et diminuant le nombre d'images.
- **La densification du nuage de points** permet de créer un nuage de points dense décrivant finement la forme de l'objet.
- **La création d'un maillage 3D** ("mesh" en anglais) à partir du nuage de points dense permet de générer une surface continue et ainsi de visualiser le modèle 3D.
- **La projection** :

- en Modèle Numérique de Surface ou MNS (représentation 2,5D du récif) : le nuage de points dense est projeté pour former une image représentant l'altitude/la profondeur de chaque point du modèle. Elle peut servir à générer des isobathes, tracer des profils d'élévation ou calculer des volumes, des pentes et des rugosités de surface.
 - en orthophotographie : le contenu des photographies est projeté sur le Modèle Numérique de Surface pour générer une orthophotographie unique par assemblage de toutes les photos. Chaque pixel de l'orthophotographie est ramené à sa véritable position géographique, créant une image plane à l'échelle uniforme. L'orthophotographie est géoréférencée et orthorectifiée, et permet de visualiser des changements, numériser des éléments.
 - La visualisation du modèle est possible sur des logiciels en libre accès tels que VisualSFM, COLMAP, Regard3D, OpenDroneMap, Bundler. La visualisation de l'orthophotographie est possible sur QGIS.
- **La sélection des images** est nécessaire pour supprimer les images floues, sous-exposées, surexposées, etc.
- **La correction de la colorimétrie des images** est optionnelle mais permet un rendu visuel plus proche de la réalité.
- **L'alignement des images** (aussi appelé aérotriangulation) est le processus qui permet de mettre en correspondance des points communs entre les différentes images et créer un nuage de points épars.
- **La mise à l'échelle et géoréférencement** est l'étape pendant laquelle les cibles au sol (GCPs = Ground Control Points) et les étalons sont intégrés au modèle.



Figure 6. Les différents rendus de la photogrammétrie permettent de visualiser trois colonies coraliennes en un modèle 3D (à gauche), une orthophotographie (au milieu) et un Modèle Numérique de Terrain (à droite).

Dans le cadre d'un suivi et pour comparer deux acquisitions photogrammétriques dans le temps, il est nécessaire de prendre en compte l'orientation du modèle. En effet, l'orientation définit l'alignement de deux ou plusieurs modèles 3D dans un même système de coordonnées (c'est le processus de co-enregistrement). Sans un alignement précis, il est impossible de mesurer correctement les changements dans le temps.

- **La densification du nuage de points** permet de créer un nuage de points dense décrivant finement la forme de l'objet.
- **La création d'un maillage 3D** ("mesh" en anglais) à partir du nuage de points dense permet de générer une surface continue et ainsi de visualiser le modèle 3D.
- **La projection** :



Figure 7. Avant/Après blanchissement de récifs coralliens à Mayotte dans le cadre du projet REBIOMA © Crécéan

Les rendus des orthophotographies sont particulièrement intéressants pour la sensibilisation. Ci-dessus par exemple figurent deux photographies avant/après un blanchissement corallien (Figure 7).

C | TRAITEMENT DES DONNÉES

Le **traitement** des données transforme les séries d'images brutes en produits photogrammétriques exploitables. Cette étape comprend plusieurs phases essentielles et sont réalisables par différents logiciels photogrammétriques tels que Agisoft Metashape, Pix4D, Autodesk, Photomodeler. Cette étape nécessite un ordinateur puissant avec un processeur rapide, une carte graphique récente et une mémoire RAM suffisante. En effet, plusieurs centaines voire milliers de photos doivent être traitées. La plupart du temps, cette étape est réalisée en prestation avec les étapes suivantes :

- **La sélection des images** est nécessaire pour supprimer les images floues, sous-exposées, surexposées, etc.
- **La correction de la colorimétrie des images** est optionnelle mais permet un rendu visuel plus proche de la réalité.
- **L'alignement des images** (aussi appelé aérotriangulation) est le processus qui permet de mettre en correspondance des points communs entre les différentes images et créer un nuage de points épars.
- **La mise à l'échelle et géoréférencement** est l'étape pendant laquelle les cibles au sol (GCPs = Ground Control Points) et les étalons sont intégrés au modèle.

D | EXTRACTION DE MÉTRIQUES

L'**extraction de métriques** permet de quantifier et traiter les informations contenues dans les modèles 3D et les orthophotographies.

- **Les métriques physiques** sont des métriques telles que des distances, des surfaces, des volumes, une pente. Il y a aussi des métriques qui prennent en compte la complexité du substrat: rugosité, dimension fractale.

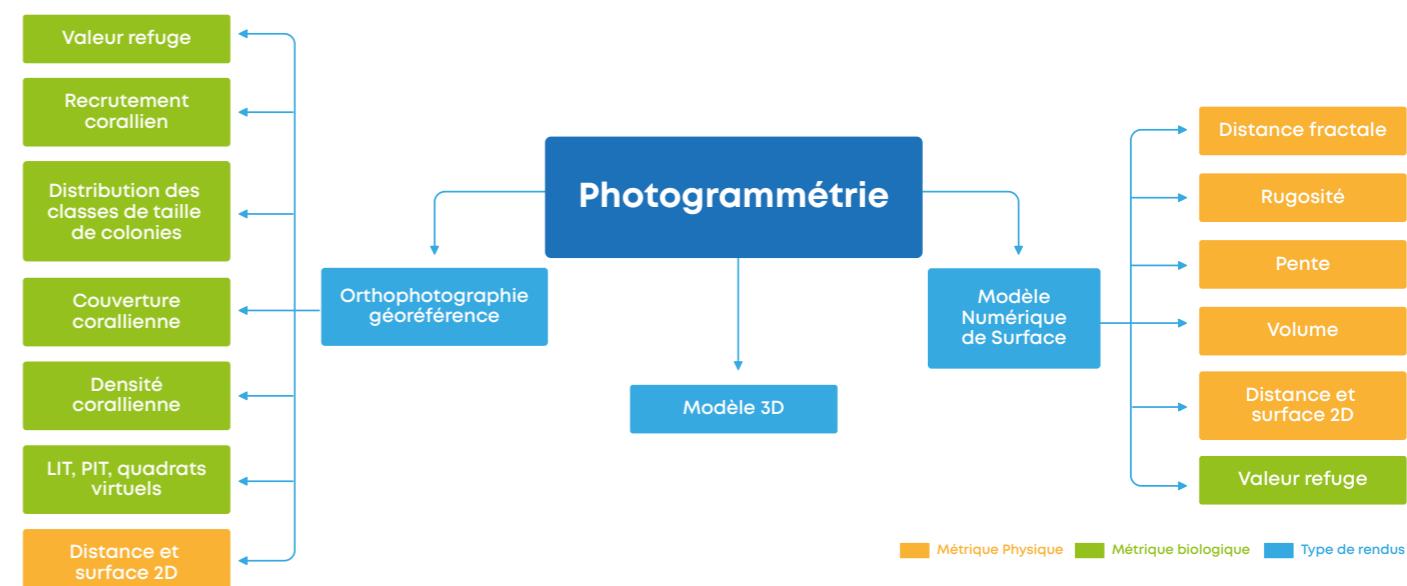


Figure 8. Schéma inspiré du rapport de Crécéan (2024) représentant les métriques et les rendus que l'on peut obtenir avec la photogrammétrie

La photogrammétrie apporte des métriques "nouvelles" par rapport aux métriques calculées en routine dans les suivis en UVC à l'aide d'un PIT, d'un LIT, d'un Belt transect ou de photoquadrats. Ces métriques ne sont pas "nouvelles" dans l'absolu, la rugosité était par exemple calculée avant l'essor de la photogrammétrie.

Mais elles ne sont pas prises en compte dans les suivis de l'état des récifs coralliens, bien qu'elles apportent des informations d'une valeur non négligeable. Les tableaux ci-après détaillent leur utilité et leur importance.

	Définition	Comment ces métriques sont calculées ?	Qu'apportent ces métriques ?
Rugosité 2D ou 3D	Décrit la présence de reliefs, d'irrégularités, de bosses et de creux sur une surface.	Elle correspond au rapport entre la distance (ou la surface) qui épouse le relief et son équivalent à plat. Elle est calculée sur un logiciel de SIG.	Indique la complexité d'une zone récifale. Elle prend aussi bien en compte les structures corallines que le substrat (roche notamment).

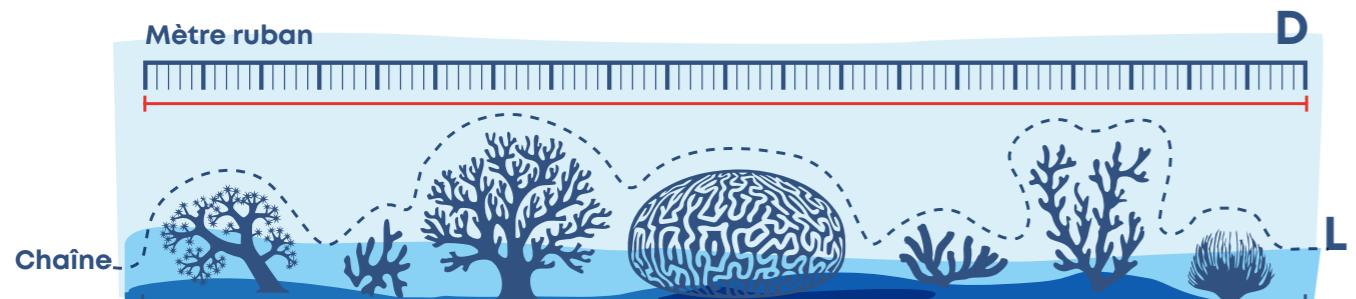


Figure 9. Schéma explicatif de la rugosité : le rapport entre la distance qui épouse le relief et son équivalent à plat (en rouge) (adapté de Hill & Wilkinson, 2004)

	Définition	Comment ces métriques sont calculées ?	Qu'apportent ces métriques ?
Valeur refuge	La valeur refuge correspond à la différence entre le volume strict du sujet d'étude (corail) et le volume englobant (volume comprenant toutes les cavités délimitées par les sommets de l'objet). $R = V_e - V_s$ où R = Refuge (m^3), V_e = volume englobant (m^3) et V_s = volume du sujet (m^3)	Cette métrique a été développée dans le cadre de la thèse d'Urbina-Barreto (2020). Elle est calculée à partir d'une régression linéaire qui prend en entrée la surface de la colonie et la forme corallienne (branchu, columnnaire, tabulaire, massif). Elle est calculée sur un logiciel de type R ou Excel.	Quantification des abris pour l'ichtyofaune et les macro-invertébrés mobiles.

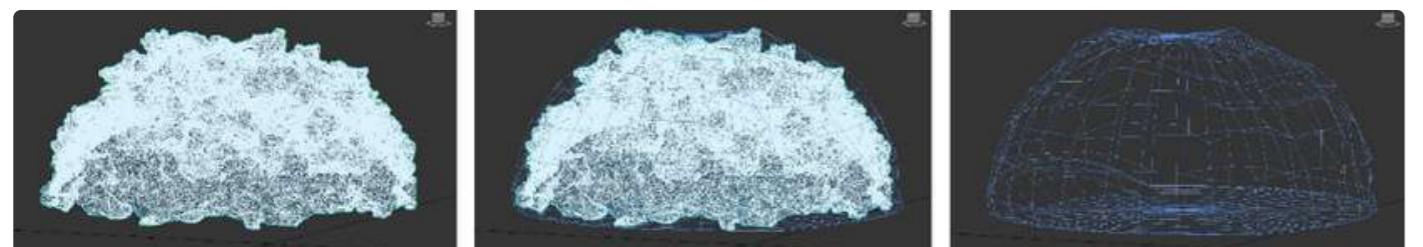


Figure 10. Explication de la valeur refuge : sujet (gauche), volume du sujet délimité en bleu (milieu) et volume englobant (droite). © Urbina-Barreto

	Définition	Comment ces métriques sont calculées ?	Qu'apportent ces métriques ?
Dimension fractale	Une mesure numérique de la complexité et de l'irrégularité de la surface qui se caractérise par des motifs de complexité ou d'irrégularité qui se répètent (de manière approximative) à différentes échelles. Elle quantifie comment une surface remplit l'espace.	Des grilles de plus en plus petites sont superposées sur le modèle 3D du récif. Puis, la vitesse à laquelle le nombre de cases contenant une partie du récif augmente est mesurée en fonction de la réduction de la taille des cases. Elle est calculée sur un logiciel de type R.	Fournit une mesure quantitative de la rugosité du récif.

	Définition	Comment ces métriques sont calculées ?	Qu'apportent ces métriques ?
Couverture corallienne	Pourcentage de la surface du fond marin recouverte par des coraux vivants.	Par détourage, sur des logiciels de SIG à partir de l'orthophotographie.	Fournit une mesure quantitative du recouvrement corallien.
Densité corallienne	Nombre de colonies de coraux par unité de surface.	Par détourage, sur des logiciels de SIG à partir de l'orthophotographie.	Indique à quel point les colonies sont regroupées ou dispersées.

Un récif peut être rugueux avec une faible dimension fractale s'il présente de grandes bosses et quelques creux. Dans ce cas, il offre quelques abris simples et une surface étendue, mais peu de niches fines. En revanche, un récif rugueux avec une grande dimension fractale développe une complexité qui se déploie à toutes les échelles. Ses surfaces sont constellées de replis, de petites branches et de micro-crevasses, créant une multitude de micro-habitats variés, des plus grands aux plus minuscules. Cette complexité multi-échelle est cruciale pour la biodiversité, offrant davantage de cachettes et de niches écologiques pour une plus grande diversité d'espèces.

Deux récifs peuvent avoir la même couverture corallienne mais une densité différente (par exemple, un avec peu de grandes colonies, un autre avec beaucoup de petites colonies).

L'obtention des métriques telles que la couverture corallienne ou la densité corallienne passe par une étape de détourage manuel qui peut être chronophage. Sans logiciel semi-automatique, il faut compter 1 jour par

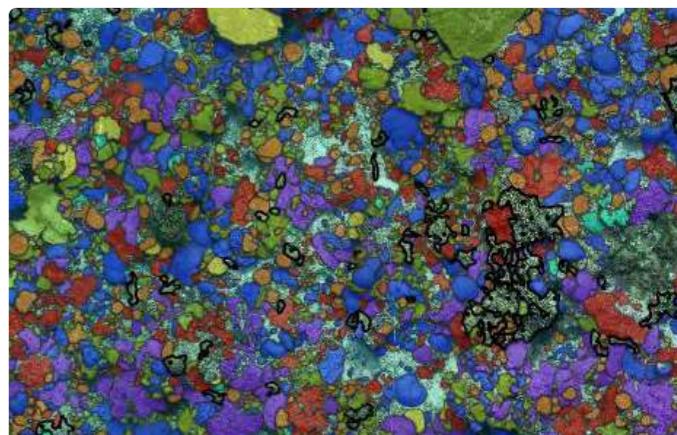


Figure 11. Analyse spatiale d'une orthophotographie prise à Europa. Les polygones représentent des coraux détournés: branchu (orange), massif (bleu), etc. © Urbina-Barreto (2020)

100 m² environ. L'utilisation de logiciels semi-automatiques ou automatiques comme RapidBenthos (voir Figure 12) (voir chapitre 6) peut accélérer le processus. Il est aussi possible de réaliser virtuellement des PIT, LIT, quadrats sur l'orthophotographie à condition que la mise à l'échelle soit suffisamment précise.

	Définition	Comment ces métriques sont calculées ?	Qu'apportent ces métriques ?
Distribution des classes de taille de colonies	Répartition des colonies de coraux selon leur taille, généralement mesurée par le diamètre ou la surface des colonies et regroupée en classes de taille.	Par détourage, sur des logiciels de SIG à partir de l'orthophotographie.	Fournit des informations sur le recrutement, la croissance du récif.

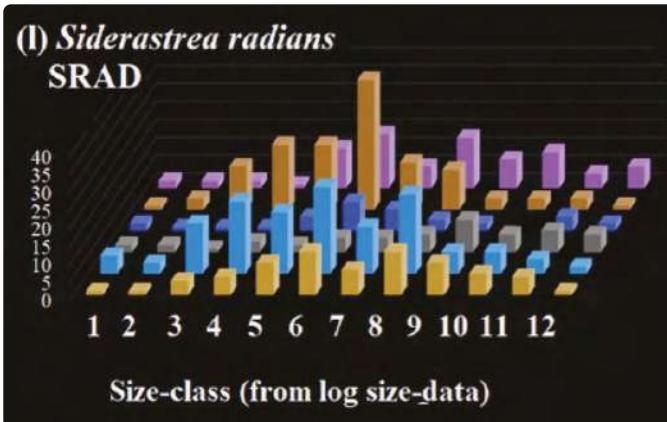


Figure 12. Distribution des classes de taille (de 1 à 12) de l'espèce de corail *Siderastrea radians* sur différents sites (de couleurs différentes) (Hernández-Landa et al., 2020)

DeepReefMap

La méthode DeepReefMap a été développée par l'École Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL, Suisse) et appliquée en mer Rouge uniquement pour le moment.

Cette méthode permet une évaluation rapide de l'état des récifs coralliens à une échelle plus large que celle offerte par la photogrammétrie classique fondée sur des photographies. Elle repose sur un protocole simple à mettre en œuvre. Le principe consiste à filmer un transect à l'aide d'une GoPro, avec une vue plongeante à 45°. La vidéo est ensuite découpée en images. La qualité et la résolution du modèle 3D et des orthophotographies sont

bien moindres avec la vidéo que celles obtenues en photos, car la qualité intrinsèque des images extraites d'un flux vidéo est généralement inférieure à celle de photographies haute résolution.

À noter que le protocole ne repose pas sur l'utilisation de cibles au sol (GCP) ni d'étalons. Par conséquent, il n'est pas possible d'effectuer des mesures (impossibilité d'obtenir les métriques liées à la mesure de surface, de volume, de pente, etc.). La superposition précise d'orthophotographies n'est pas faisable car les GPS utilisés pour positionner les transects opèrent depuis la surface.

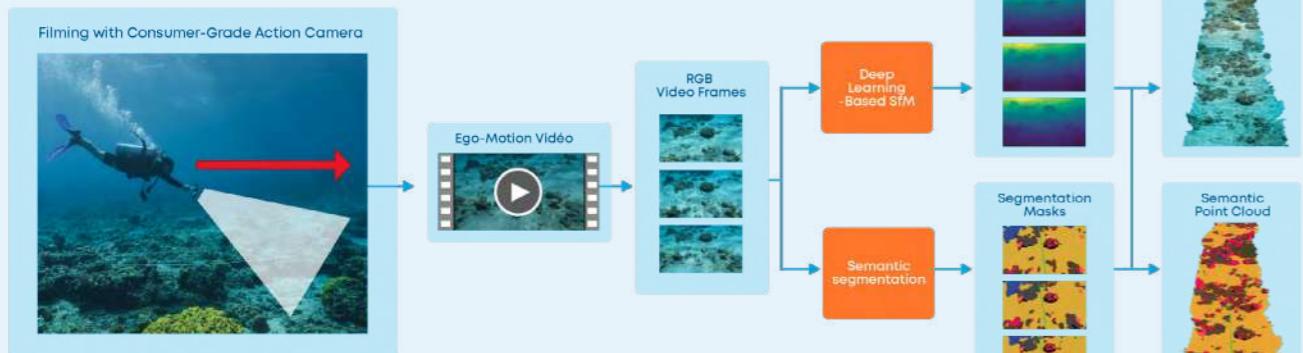


Figure 13. Schéma expliquant la méthode DeepReefMap (Sauder et al., 2024)

Le traitement repose sur des techniques de machine learning et mobilise deux modèles complémentaires :

- un modèle de reconstruction 3D, basé sur le même principe que la photogrammétrie traditionnelle, qui projette les images successives les unes sur les autres. À la différence de Metashape qui compare toutes les photos collectées à l'aveugle, le modèle suit le transect pour réaliser la projection. Le transect ne peut être filmé que dans un sens.

L'algorithme de traitement ne peut pas encore identifier ni intégrer des données provenant de zones déjà filmées (la recherche est en cours pour une amélioration en ce sens). La conséquence est que des zones d'ombre apparaissent derrière le relief (coraux, rochers, etc.) dans le modèle 3D final, car l'angle de prise de vue du plongeur (45°)

ne permet pas de capturer toutes les facettes des objets, et il est impossible de revenir pour filmer les parties cachées.

- un modèle de segmentation des catégories benthiques, entraîné à partir des données collectées (notamment à partir du jeu de données CoralScapes), majoritairement en mer Rouge. Il existe différents niveaux de distinction :

- un niveau faible qui distingue le type de substrat : coraux vivants / blanchis / morts / couverts d'algues, etc.
- un niveau intermédiaire qui distingue les coraux selon leur forme de croissance : branchu, massif, etc.
- un niveau avancé qui distingue certains genres de coraux communs dans les récifs peu profonds (0 – 30m) de l'Indo-Pacifique, comme Stylophora, Pocillopora, Acropora, et Turbinaria.

Il est possible de tester la méthode sur une image directement sur internet, via le lien "demo" sur ce site <https://josauder.github.io/coralscapes>

Le traitement des données est particulièrement rapide : environ 5 minutes pour un transect de 100 mètres avec un ordinateur puissant, et environ 40 min pour un ordinateur non équipé d'une carte graphique dédiée. Néanmoins, il n'est pas possible d'obtenir les mêmes métriques qu'avec la photogrammétrie par photos détaillée ci-dessus : le faible niveau de précision lors de l'acquisition ne le permet pas.

Contacts liés à la méthode :

- Dr. Guilhem Banc-Prandi, directeur scientifique du Transnational Red Sea Center : guilhem.banc-prandi@epfl.ch
- Professeur Devis Tuia, responsable du laboratoire ECEO à l'École Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL, Suisse) : devis.tuia@epfl.ch
- Jonathan Sauder, doctorant du Professeur Devis Tuia : jonathan.sauder@epfl.ch

1.3 | Synthèse des avantages-inconvénients de la photogrammétrie

À QUOI ÇA SERT ?

La photogrammétrie est une méthode de plus en plus accessible. Après une formation, elle est relativement facile à mettre en œuvre en régie sur le terrain par des plongeurs professionnels. Par rapport aux méthodes utilisées dans les suivis réalisés en routine, elle renseigne sur de nombreuses métriques, notamment liées à la complexité de l'habitat, la couverture corallienne, la distribution des classes de tailles des colonies. Les rendus (orthophotographie, Modèle Numérique de Surface, modèle 3D) permettent de communiquer sur les épisodes majeurs (superposition d'images avant-après par exemple) ou de visualiser des dégradations chroniques (par exemple diminution de 20% du recouvrement corallien en un certain nombre d'années). De plus, les rendus présentent l'avantage de pouvoir être conservés et ré-analysés a posteriori. Il est intéressant de noter qu'un expert peut

effectuer un LIT, un PIT ou un quadrat sur une orthophotographie. La précision et la fiabilité de l'identification dépendra alors de la résolution de l'orthophotographie et de la qualité des photos acquises sur le terrain.

QUELLES SONT LES LIMITES ET LES CONTRAINTES ?

L'acquisition des données est chronophage (pour la photogrammétrie par photographies) et requiert de bonnes compétences en photographie et des conditions environnementales optimales. Sur le terrain, l'acquisition est contrainte par la plongée. Le traitement de la donnée et l'extraction des métriques sont des étapes techniques et chères souvent dépendantes de l'expertise d'un prestataire externe et d'un ordinateur puissant.

1.4 | Etudes de cas et exemples d'applications

L'article scientifique suivant propose quelques recommandations pour l'application de la photogrammétrie pour l'étude des récifs coralliens : Bayley, D.T.I., Mogg, A.O.M., 2020. A protocol for the large-scale analysis of reefs using Structure from Motion photogrammetry. *Methods Ecol Evol* 11, 1410–1420. <https://besjournals.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/2041-210X.13476>

Ce lien conduit vers les protocoles ("Standard Operational Procedures" ou SOP) utilisés par l'équipe chargée du suivi des récifs coralliens de AIMS (Australian Institute of Marine Sciences). Le SOP 14 détaille le travail de terrain et la collecte de données. Le SOP 16 détaille le traitement des données. Le SOP 17 détaille la digitalisation et l'extraction de métriques 2D. Le SOP portant sur l'extraction de métriques 3D est à venir prochainement. <https://www.aims.gov.au/research-topics/monitoring-and-discovery/monitoring-great-barrier-reef/reef-monitoring-sampling-methods#SOPreefmonitoring>

POLYNÉSIE FRANÇAISE

En Polynésie française, la photogrammétrie est utilisée dans le cadre des suivis du Service National d'Observation du Corail pour observer l'évolution dans le temps de la géométrie des fonds marins (2019-2025). Accessible sur le site de l'Ifrecor

- **Porteur du projet** : Service National d'Observation du Corail (SNO-CORAIL CRIODE UAR 3278 CNRS/EPHE-PSL/UPVD)

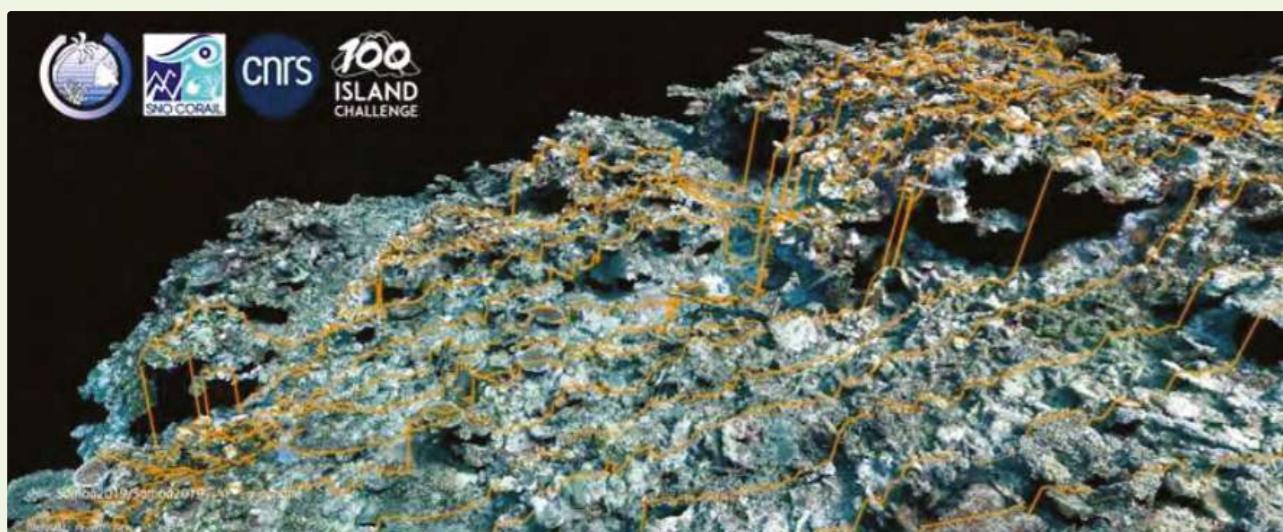


Figure 14. Extrait de modèles 3D avec paramètres de rugosité et de dimension fractale qui reflètent la complexité géométrique du récif corallien.

- **Prestataire** : CRIODE (CNRS/EPHE-PSL/UPVD)
- **Objectif** : extraire directement des modèles 3D, les paramètres de rugosité et de dimension fractale qui reflètent la complexité géométrique du récif corallien (voir Figure 14).

• **Matériels et méthodes** : suivi biennal de la même portion du récif. Les plongeurs récoltent 2000 photos en grand angle qui permettent de produire un modèle atteignant une résolution de l'ordre du millimètre sur une surface de 100 mètres carrés. En complément, 2000 autres photos prises avec un objectif plus long permettent d'identifier les coraux et autres grandes catégories de substrat au niveau du genre. Allié à un système de reconnaissance par IA ou simplement de détourage manuel, cela permet d'analyser la distribution spatiale ouvrant la porte à des études fines de la dynamique écologique.

• **Résultats** : ces données permettent de générer des images et vidéos avant / après permettant une meilleure appréhension du milieu des enjeux par des non spécialistes, ce qui est parfois plus utilisé pour toucher le plus grand nombre (voir Figure 15). Ces rendus très visuels permettent d'informer les décideurs de l'évolution des récifs coralliens face aux perturbations et de sensibiliser les plus jeunes à l'évolution de leur milieu.

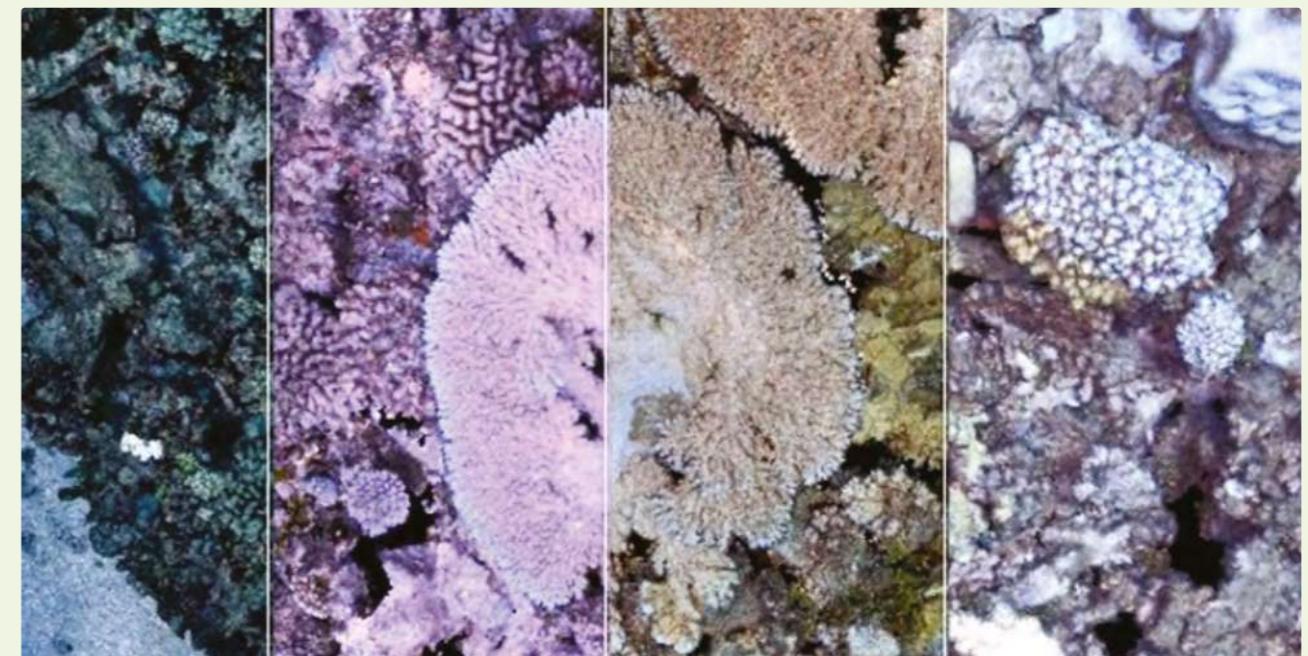


Figure 15. Evolution du recouvrement corallien sur une même zone de gauche à droite entre 2019, 2021, 2023 et 2025 © CRIODE.

SAINT-BARTHÉLÉMY

Une étude utilisant la photogrammétrie a été menée au sein de la Réserve Naturelle Nationale de Saint-Barthélémy commandée par l'Agence Territoriale de l'Environnement et réalisée par un prestataire extérieur (2023). Accessible sur le site de l'Ifrecor

- **Porteur du projet** : l'Agence Territoriale de l'Environnement de Saint-Barthélémy.
- **Prestataire** : Bureau d'études Créocean
- **Objectif** : disposer d'une cartographie 3D d'un massif corallien unique d'*Acropora palmata* situé dans la baie de Grand Cul-de-Sac (Saint-Barthélémy).
- **Matériels et méthodes** : deux types d'appareil photo ont été déployés : Nikon D500 et Canon G7x mark III. Le site était à très faible profondeur (inférieure à 2 mètres) et d'une grande superficie (environ 1000 m²). L'acquisition a été réalisée en snorkeling, et était compliquée du fait de l'agitation de la surface de la mer. Par ailleurs, la présence de courant ne permettait pas l'établissement de transects permanents. Plus de 29 000 photographies ont été nécessaires pour couvrir l'intégralité de la zone d'étude, en raison de la faible distance maintenue entre le plongeur et le substrat. Ces images ont été traitées via Adobe Lightroom avant d'être

exportées vers le logiciel Agisoft Metashape. Ce dernier a effectué l'alignement des clichés, un processus nécessitant environ 7 à 8 heures de traitement.

- **Résultats** : ce projet a permis la production de plusieurs éléments clés pour la visualisation : une orthophotographie géoréférencée, un modèle numérique de surface et un objet 3D.
- **Coût total** : 25 000 euros
- **Suggestion du prestataire** : à l'avenir, il pourrait être intéressant de comparer ces données avec une nouvelle acquisition afin d'étudier la croissance, la régression, la dégradation physique des récifs, par exemple. Il aurait aussi pu être intéressant d'obtenir des métriques telles que la rugosité, la valeur refuge, la pente, etc.

MAYOTTE

À Mayotte une cartographie fine de deux récifs coralliens par photogrammétrie sous-marine a été réalisée après le blanchissement de 2024 (2024). Accessible sur le site de l'Ifrecor

1.5 | En savoir plus - autres systèmes d'acquisition pour la photogrammétrie



Photo © Julien Wickel

Outre l'acquisition manuelle par plongeur, d'autres plateformes technologiques (sans contraintes liées à la plongée) sont disponibles pour la collecte de données visuelles destinées à la modélisation 3D :

- **Véhicules Opérés à Distance (ROV)** : Ces systèmes robotisés sous-marins offrent la possibilité d'acquérir des images pour créer des orthophotographies, modèles 2,5 et 3D dans des environnements plus profonds ou difficiles d'accès. La principale difficulté associée à leur utilisation réside dans la maîtrise précise du pilotage de l'appareil afin d'assurer un recouvrement photographique adéquat et une qualité d'image optimale.
- **Robots de Surface** : Des plateformes autonomes de surface, tel que le prototype «planche» du projet PLANCHA (*voir chapitre 2*) développé par l'Ifremer, représentent une alternative pour l'acquisition d'images des zones récifales peu profondes, notamment les platiers. Cette approche est cependant soumise à des limitations liées à la profondeur du sujet, aux courants en surface, aux variations de l'illumination de surface, et à l'angle de prise de vue de la caméra, qui peut être restreint.
- Lors du processus d'acquisition, il est possible d'utiliser des **caméras en stéréo**, ce qui double le nombre de photos et assure un recouvrement latéral maîtrisé. Cela permet également de réaliser des mesures plus

facilement, mais la nécessité de calibration demande une bonne connaissance de la technique et des logiciels.

- **Des systèmes de visionnage en temps réel** peuvent également être intégrés. Ces technologies, à l'instar des solutions SubSLAM proposées par IVM Technologies ou Mantis Robotics, permettent une corrélation instantanée des points communs entre les photographies en cours d'acquisition. Cela permet alors d'éviter les zones d'ombre dans le modèle. Le lien suivant offre un aperçu de la méthode : <https://www.ivm-technologies.com/products/ivm-slam>
- Enfin, il est possible de faire des **acquisitions photogrammétriques par drone** afin de suivre l'érosion du trait de côte ou de cartographier des habitats marins par exemple. Ainsi, il est possible de programmer un plan de vol pour obtenir une orthophotographie des structures récifales émergées ou très peu profondes. A noter que les parties immergées sur les photos ne sont pas exactement à leur vraie position en raison de la réfraction à l'interface air/eau. Il peut être nécessaire d'utiliser des algorithmes de correction supplémentaires pour prendre en compte ce facteur (en particulier pour corriger la profondeur). D'autres usages peuvent être faits du drone dans le cadre du suivi de l'état des récifs coralliens (*voir chapitre 5*).

1.6 | Références

- CREOCEAN. (2024). REBIOAMA Blanchissement - Cartographie fine de deux récifs coralliens par photogrammétrie sous-marine après le blanchissement de 2024 (59 pp.) [Rapport technique].
- CREOCEAN. (2024). Modélisation d'un récif corallien à *Acropora palmata* par photogrammétrie (33 pp.) [Rapport technique].
- Cullen, N. D., Verma, A. K., & Bourke, M. C. (2018). A comparison of structure-from-motion photogrammetry and the traversing micro-erosion meter for measuring erosion on shore platforms. *Earth Surface Dynamics*, 6, 1023–1039. <https://doi.org/10.5194/esurf-6-1023-2018>
- Fonstad, M. A., Dietrich, J. T., Courville, B. C., Jensen, J. L., & Carboneau, P. E. (2013). Topographic structure from motion: A new development in photogrammetric measurement. *Earth Surface Processes and Landforms* (38 pp.) <https://doi.org/10.1002/esp.336>
- GeoLab. (2022). Photogrammétrie sous-marine : traitement et exemples de réalisations (25 pp.) [Présentation PowerPoint non publiée].
- Gordon, S., Aston, E., Lechene, M., Harianto, J., Figueira, W., Gonzalez Rivero, M., & Ferrari, R. (2023). Field photogrammetry in 4D – Standard Operational Procedure Number 1: Overview and in-field workflow (44 pp.). Reef Restoration and Adaptation Program (EcoRRAP). <https://doi.org/10.25845/SE7T-PS86>
- Gordon, S., Aston, E., Lechene, M., Remmers, T., Piccaluga, A., Brinker, E., Cowasji, Z., Harianto, J., Bray, P., Millar, G., Watkin, B., Figueira, W., Gonzalez Rivero, M., & Ferrari, R. (2025). Field photogrammetry in 4D: Model Processing – Standard Operational Procedure 16 (2 of series): Model processing. Australian Institute of Marine Science, Townsville, 57 pp. https://www.aims.gov.au/sites/default/files/2025-02/AIMS_EcoRRAP_SOP16_V1_Field-Photogrammetry4D_3D-Model-Processing.pdf
- Hernández-Landa RC, Barrera-Falcon E, Rioja-Nieto R. 2020. Size-frequency distribution of coral assemblages in insular shallow reefs of the Mexican Caribbean using underwater photogrammetry. PeerJ8:e8957 <http://doi.org/10.7717/peerj.8957>
- Hill, J., & Wilkinson, C. (2004). Methods for ecological monitoring of coral reefs (Version 1). Australian Institute of Marine Science, Townsville, Australia. 117 pp.
- Lange, I.D., Perry, C.T., 2020. A quick, easy and non-invasive method to quantify coral growth rates using photogrammetry and 3D model comparisons. *Methods Ecol Evol* 11, 714–726. <https://doi.org/10.1111/2041-210X.13388>
- Lechene, M. A., Figueira, W. F., Murray, N. J., Aston, E. A., Gordon, S. E., & Ferrari, R. (2024). Evaluating error sources to improve precision in the co-registration of underwater 3D models. *Ecological Informatics*, 81, 102632.
- Remmers, T., Boutros, N., Wyatt, M., Gordon, S., Toor, M., Roelfsema, C., Fabricius, K., Grech, A., Lechene, M., Ferrari, R., 2025. RAPIDBENTHOS: Automated segmentation and multi-view classification of coral reef communities from photogrammetric reconstruction. *Methods Ecol Evol* 16,
- Remondino, F., & El-Hakim, S. (2006). Image-based 3D modelling: A review. *The Photogrammetric Record*, 21(115), 269–291. <https://doi.org/10.1111/j.1477-9730.2006.00383.x>
- Rivero, M. G., Bray, P., Jonker, M., & Ferrari, R. (n.d.). 3D habitat reconstructions of benthic communities.
- Sauder, J., Banc-Prandi, G., Meibom, A., & Tuia, D. (2024). Scalable semantic 3D mapping of coral reefs with deep learning. *Methods in Ecology and Evolution*, 15(4), 916–934. <https://doi.org/10.1111/2041-210X.14307>
- Sauder, J. (n.d.). The Coralscapes Dataset : Semantic Scene Understanding in Coral Reefs. Consulté sur <https://josauder.github.io/coralscapes/>
- Talpaert Daudon, J., Contini, M., Urbina-Barreto, I., Elliott, B., Guilhaumon, F., Joly, A., Bonhommeau, S., Barde, J., 2023. GEOAI FOR MARINE ECOSYSTEM MONITORING: A COMPLETE WORKFLOW TO GENERATE MAPS FROM AI MODEL PREDICTIONS. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.* XLVIII-4/W7-2023, 223–230. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLVIII-4-W7-2023-223-2023>
- Urbina-Barreto, I. (2020). New quantitative indices from 3D modeling by photogrammetry to monitor coral reef environments (Thèse de doctorat). Université de La Réunion. <https://theses.hal.science/tel-03027095>
- Urbina-Barreto, I. (2025, 25 février). Entretien personnel.
- Facon, M., & Cuvillier, A. (2025, 14 février). Entretien personnel.
- Banc-Prandi, G. (2025, 14 mars). Entretien personnel.
- Cheminée, A. (2025, 13 mai). Entretien personnel.
- Velin, O. (2025, 13 mai). Entretien personnel.
- Ferrari Legorreta, R. (2025, 14 mai). Entretien personnel.
- Pinel, R. (2025, 15 mai). Entretien personnel.
- Tuia, D., & Sauder, J. (2025, 19 mai). Entretien personnel.

Systèmes d'acquisition d'images et de vidéos sous-marines



Photo : © Ifremer

2.1 | Introduction

Ce chapitre présente les différents systèmes utilisés pour acquérir des images et des vidéos sous-marines. Ils sont séparés en deux catégories : les systèmes fixes et les systèmes mobiles.



Figure 16. Prise de vue d'une caméra rotative dans les îles Glorieuses (campagne STAVIRO 2021) © Clément Lelabousse

Les systèmes fixes sont installés directement sur le fond marin (le substrat) :

- La station vidéo rotative : caméra fixée sur un support motorisé qui effectue une rotation de 360°. Ce dispositif, inspiré de la méthode du point fixe de comptage poissons, permet de déterminer les espèces de poissons et d'estimer leurs abondances avec un dérangement limité et d'avoir une idée de l'habitat ;
- La caméra appâtée (BRUV, pour “Baited-Remote Underwater Video”) : caméra fixe associée à un appât qui attire les carnivores dans le champ de vision. Ce système permet d'inventorier les espèces mobiles et discrètes comme les requins et les raies.

Les systèmes mobiles déplacent la caméra au cours de l'acquisition :

- Le ROV (“Remotely Operated Vehicle”) : robot sous-marin motorisé, relié à la surface par un câble (ombilic), qui transmet un retour vidéo en temps réel et est guidé à l'aide d'une manette. Il permet d'acquérir des données sous-marines sans les contraintes de la plongée ;
- L'AUV (“Autonomous Underwater Vehicle”) : robot sous-marin autonome, non relié à la surface, généralement de forme allongée rappelant une torpille, pour acquérir des données sous-marines sans les contraintes de la plongée, ni de l'ombilic. ;

- Le robot de surface ou ASV (“Autonomous Surface Vehicle”) : robot de surface, autonome ou téléopéré, utilisé pour cartographier les zones peu profondes.

Aujourd'hui, la plupart de ces systèmes peuvent exister en version stéréo (voir [Chapitre 2.4 : Camera en stéréo](#)), c'est-à-dire qu'ils comportent deux caméras synchronisées filmant la même scène. Grâce à la triangulation, cette technique permet d'obtenir des mesures de la taille des individus et des distances.

Il est important de noter qu'il existe de nombreuses façons d'intégrer la photo/vidéo dans le suivi des récifs coralliens. Dans ce chapitre, n'est présentée qu'une approche globale avec quelques exemples des méthodes les plus utilisées par les gestionnaires et celles qui font appel à un protocole dédié. Par exemple, la caméra en rosette (plusieurs caméras installées en cercle), la caméra en 360°, le transect vidéo opéré par un plongeur ne sont pas présentés ici. La caméra en rosette est toujours en recherche et développement et peu utilisée en gestion pour le moment. L'usage de la caméra en 360° est plutôt tourné vers la sensibilisation. Le transect vidéo complète les transects réalisés en UVC.

Méthodes	Objectif de gestion	Description												
		Echelle géographique	Echelle temporelle	Cible	Métriques, rendus	Précision rendus	Avancement R&D	Nombre de territoires testés et type d'habitat testé	Conditions d'applications	Destructif/ invasif	Utilisation en sciences participatives	Communi-cabilité		
Caméra rotative (ex. KOSMOS)	Suivre les communautés de poissons, étudier le paysage sous-marin.	5 m autour de la caméra	Protocole «type STAVIRO» : enregistre sur 12 min. Protocole «type MICADO» : enregistre sur 3-4 jours.	- Poissons et espèces remarquables - Habitats avec une approche MSA (Medium-Scale Approach)	- Métriques poissons : abondance relative, richesse spécifique, taille (petit, moyen, gros). - Métriques pour la caractérisation des habitats - Rendus : vidéos	Conditionné à la visibilité	Opérationnel : Les systèmes STAVIRO et MICADO ont été éprouvés plusieurs fois. Le système KOSMOS n'a pas encore été mis en oeuvre par des gestionnaires. R&D : algorithme d'identification automatique des poissons	Nouvelle-Calédonie, Réunion, Mayotte, Martinique, Glorieuses, etc.	Profondeur de 2 m à 60 m. Fonds plats Peu de courant L'échantillonnage doit avoir lieu en milieu de journée pour une bonne luminosité Eaux non turbides	Non	KOSMOS est en libre accès pour la construction du système et le déploiement. Analyses possibles sur listes de poissons simplifiées en sciences participatives	Oui : possible de diffuser des vidéos de faune mobile et de paysages marins		
Caméra appâtée (BRUV)	Suivre les requins, les espèces discrètes sensibles à l'appât.	Quelques m ² autour de la caméra	En moyenne une heure d'enregistrement	Faune mobile (Elasmo-branches, poissons)			Opérationnel	Mis en place dans de nombreux territoires français (Antilles) et internationaux, notamment en Australie, Amérique du Sud, Amérique centrale.	Non invasif. La mise à disposition d'appât peut poser des questions d'éthique.	Non				
Robot sous-marin (ROV)	Prospecter des zones difficiles d'accès en plongées ou inconnues	La plupart des «petits» ROV peuvent aller jusqu'à 100 m, mais ils sont plus facilement maniables jusqu'à 30 m.	Acquisition ponctuelle	Tous	Rendus : photos et vidéos	La précision du rendu dépend de la qualité de la caméra, de l'agilité du robot, de la puissance du moteur du robot contre le poids de l'ombilic et du courant.	Opérationnel : faire de l'exploration R&D : positionnement GPS	La Réunion, Tromelin, Glorieuses	Peu de courant, conditionné à la visibilité, présence d'un support surface (pour le pilote).	Destructif si prélèvement.				
Robot de surface (ASV)	Cartographier les zones peu profondes sur de grandes surfaces	De l'ordre de l'hectare	Acquisition ponctuelle. Protocole réplicable dans le temps sur le même site.	Benthos	Rendus : - Orthophotographie - Détourage et annotations de catégories benthiques (coraux, oursins et les holothuries, etc) selon entraînement de l'IA	La précision du rendu dépend de la qualité de la caméra, de la précision du GPS. Chaque pixel fait 1 mm sur les images de la planche.	Opérationnel : déploiement de la Plancha R&D : annotation automatique d'images	Océan Indien Europa, Madagascar, Maurice, etc.	"Objet immobile Profondeur maximale de 5 m Peu de déferlement de vagues Présence d'une station de base avec un point gps de référence"	Non	Exemple du projet Seatizen : collecte de données sur le platier à l'île Maurice avec caméras + gps placés sous des planches de kite-surf d'usagers.			
Vidéo en stéréo (applicable sur toutes méthodes vidéo fixes ou mobiles)	- Mesurer la taille de la macrofaune (poissons) - Mesurer des distances	Quelques m ² autour de la caméra	NA (dépend du protocole)	Poissons	Métriques : mesure de distances (surface, visibilité) et de tailles de faune mobile. Abondance relative, richesse spécifique. Rendus : Vidéos	La précision du rendu varie selon la visibilité (turbidité, luminosité). Elle varie aussi selon la méthode de calibration.	Opérationnel : la configuration du système avec une distance de 80 cm entre les 2 caméras et une inclinaison de 4 degrés. R&D : les méthodes de calibration et d'analyse automatisée de vidéos	Beaucoup de territoires	Bonne visibilité	Peut être légèrement invasif lors des prises de vues	Non			

Méthodes	Terrain			Post Terrain				Coût			Complémentarité avec d'autres méthodes	
	Matériel spécifique nécessaire	Expertise/ en régie	Méthodes et données accessibles en open source / Licence	Matériel spécifique nécessaire	Expertise/ en régie	Méthodes et données accessibles en open source / Licence	Besoin d'une IA	Temps terrain	Temps post terrain pour obtenir les données brutes (court/moyen/long)	Coût matériel associé		
Caméra rotative (ex. KOSMOS)	KOSMOS à monter soi-même avec un fablab	En régie	Oui	Actuellement, l'analyse des vidéos est manuelle et ne nécessite pas de matériel spécifique.	Selon l'expertise taxonomique de l'utilisateur. Possible en régie ou en prestation externe.	Oui	Non, IA optionnelle en cours de réalisation	Avec 2 systèmes : 10 à 20 stations par jour (~5h en mer) 12 min d'immersion par station.	Long : entre 15 et 90 minutes nécessaires pour analyser 12 min de vidéos	KOSMOS : environ 1400 euros	Un système de stéréo est en développement pour KOSMOS.	
Caméra appâtée (BRUV)	Caméra, support de la caméra, cage pour l'appât.		Des protocoles et des vidéos des rendus sont disponibles (ex : site Global Finprint)			Non	Non	30 à 60 min par station (15 stations par jours soit entre 7 et 10 h de terrain)	Long	de 200 à 2000 euros (dépend du type de caméra, du caisson, du matériel utilisé pour les structures)		
Robot sous-marin (ROV)	ROV et manette ou téléphone portable avec application.		En régie, avec formation/ entraînement à la manipulation du ROV.	Quelques tutoriels disponibles pour apprendre pilotage (dépend des marques).		Non	Non	Selon autonomie du ROV : plusieurs heures.	Long	de 1 500 à 15 000 euros	Possible de réaliser des prélèvements d'espèces, d'obtenir des modèles 3D (photogrammétrie), de mettre une pompe à ADNe.	
Robot de surface (ASV)	Robot de surface + GPS + caméra + échosondeur monofaisceau (accessoires modu-ables selon besoin)	En régie	La Plancha est acheminable en avion facilement.	Ordinateur puissant avec un processeur rapide, une carte graphique récente et une mémoire RAM suffisante. Algorithme de segmentation et d'identification de coraux Algorithme de reconstruction d'une orthomosaïque.	Expertise pour utilisation du logiciel associé.	Oui	Oui	Selon autonomie du robot de surface : 2 h pour 150 m x 150 m	long: 1h	2500 euros pour une Plancha complète à l'Ifremer Océan Indien.	La Plancha est utilisé en complémentarité du drone : les vérités terrain obtenues avec la Plancha sont extrapolées à l'aide du drone.	
Vidéo en stéréo (applicable sur toutes méthodes vidéo fixes ou mobiles)	Deux caméras et une barre entre les deux. Matériel de calibration : damier en 2D ou cube en 3D.	Possible en régie si plongeur professionnel.	Oui, des articles scientifiques présentent des protocoles pour la stéréo	- Logiciels de traitement de la stéréo - L'analyse de vidéos peut être manuelle (1 h de vidéo = 2 h d'analyse). De l'IA est en développement. - Ordinateur puissant avec un processeur rapide, une carte graphique récente et une mémoire RAM suffisante.	Expertise pour l'utilisation des logiciels de synchronisation. Selon l'expertise "poissons" de l'utilisateur. Possible en régie ou en prestation externe.	NA	Non	Dépend du protocole + temps de calibration plutôt long	Long : 1 h d'enregistrement = 2 h d'analyse	Appareil photo ou caméra : de 200 à 5000 euros Licence pour les logiciels de calibration : certains logiciels sont gratuits. Licence pour Seagis = 2000€. Logiciel event measure = 2000€. Cube de calibration spécifique = 2000€.	La caméra en stéréo peut être appliquée dans différentes méthodes qui utilisent l'imagerie : photogrammétrie, BRUV, vidéo rotative, transect plongeur	

Tableau 2. Récapitulatif des systèmes d'acquisition d'images

et de vidéos sous-marines fixes et mobiles

Apports des méthodes innovantes POUR L'ÉVALUATION DE L'ÉTAT DES RÉCIFS CORALLIENS | 2025

2.2 | Description détaillée des systèmes fixes

A | STATION VIDÉO ROTATIVE

Matériel et protocole

Dans cette partie, est détaillé un exemple de station vidéo rotative développée par l'Ifremer : KOSMOS (Kit d'Observation Sous-Marine en Open Source).

KOSMOS correspond à la nouvelle version de STAVIRO (STATION de Vidéo ROTative) et MICADO (Module d'Imagerie Côtier, Autonome pour le Développement de l'Observation sous-marine). STAVIRO et MICADO sont utilisés depuis 2007 et KOSMOS prend la suite de ces deux stations vidéo depuis 2021.



Figure 18. À droite, le système STAVIRO et à gauche le système MICADO © Dominique Pelletier.

Le système KOSMOS est une version en libre accès du STAVIRO et du MICADO. Il pallie un problème de discontinuité dans la reproduction des systèmes (modèles de caméra rapidement obsolètes) et un manque de contrôle sur les paramètres des caméras d'action (type GoPro par exemple).

Il est possible de construire sa station vidéo rotative KOSMOS soi-même avec les moyens d'un FabLab (un espace collaboratif qui met à disposition des outils de fabrication numérique pour permettre aux utilisateurs de donner vie à leurs idées et leurs prototypes) ou équivalents (lycée professionnel, école d'ingénieur, prestataire en électronique ou mécatronique). Le projet KOSMOS fonctionne en mode collaboratif avec une communauté d'utilisateurs et de développeurs (<http://kosmos.fish>). La documentation en libre accès est disponible via ce lien : <https://kosmos.fish/>.

KOSMOS peut être configuré pour réaliser les deux protocoles.

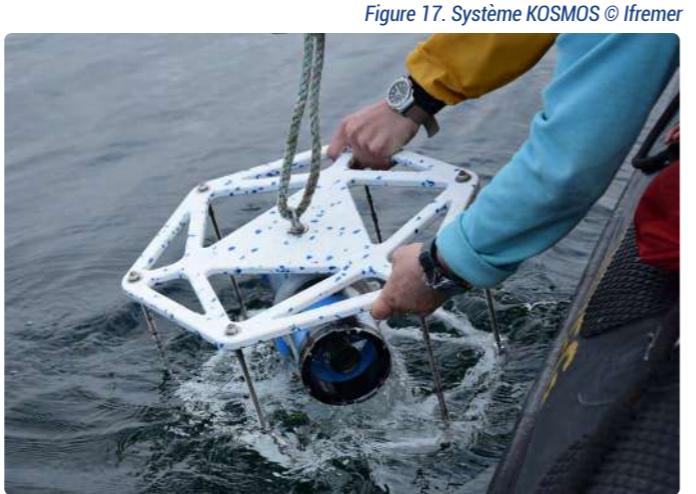


Figure 17. Système KOSMOS © Ifremer



De la documentation sur les protocoles et les rendus "type STAVIRO" et "type MICADO" est disponible :

- sur le site de l'Ifremer : <https://archimer.ifremer.fr/doc/00357/46859/>,
- via ce lien sur YouTube https://www.youtube.com/watch?v=C_uzdRguTgs,
- via ce lien vers le site d'Ocean Best Practice <https://repository.oceanbestpractices.org/handle/11329/1939>.

Traitement des données et métriques obtenues

Le traitement des vidéos de KOSMOS se fait par un observateur (entre 15 min et 90 min par vidéo de 12 min). À noter qu'une séquence est jugée non exploitable si la visibilité estimée est inférieure à cinq mètres. L'observateur s'appuie sur une liste d'espèces, définie selon les objectifs de l'étude.

L'identification se fait au genre ou à la famille ou par complexe d'espèces lorsque la reconnaissance de l'espèce n'est pas avérée.

Les poissons se voient aussi attribuer une classe de taille, en "petit", "moyen" ou "gros", déterminée par rapport à la longueur maximale de l'espèce. Pour déterminer la classe, les observateurs des images disposent de silhouettes (voir Figure 17) de différentes tailles et couleurs, situées à différentes distances.



Figure 19. Exemple de silhouettes de poisson (ici poissons de 1 m situés à une distance de 2 m de la caméra) servant à la calibration © Ifremer

Chaque métrique est calculée soit par espèce, par niveau taxonomique, ou par groupe d'espèces.

A l'échelle de plusieurs stations, le grand nombre de stations permet de calculer la fréquence d'occurrence par niveau taxonomique ou par groupe d'espèces.

L'habitat est décrit dans les vidéos prises selon une méthode paysagère semi-quantitative similaire à une "Medium-Scale Approach" utilisée par les plongeurs lors des comptages UVC, et adaptée à la vidéo rotative. Plusieurs descripteurs sont saisis : topographie, recouvrement en substrat abiotique, etc. Grâce à ces données, des cartes d'habitat peuvent être produites. Une typologie des habitats est aussi obtenue qui permet entre autres l'interprétation des métriques relatives aux poissons.



19.3 m

26.8 °C



20.2 m

26.4 °C

Figure 20. Extraits de vidéos capturées par le système STAVIRO à Mayotte © OFB

Les différentes métriques calculées peuvent être analysées statistiquement avec l'outil de calcul PAMPA (Indicateurs de la Performance d'Aires Marines Protégées pour la gestion des écosystèmes côtiers, des ressources et de leurs usages) afin de suivre leurs évolutions temporelles et de renseigner les indicateurs des tableaux de bord des AMP.

Les images, comptages, métadonnées des stations et les métriques obtenues sont archivés et disponibles sur les outils Ifremer : Sextant (catalogue AMBIO), archimer (rapports d'évaluation) et sur l'Océanothèque (en cours).

Avantages-inconvénients des stations vidéo rotatives

Une partie "Caractéristiques communes des systèmes fixes" expose les avantages et inconvénients généraux relatifs à ces systèmes : elle s'applique donc aussi à la station vidéo rotative. Les avantages et inconvénients supplémentaires spécifiques à cette méthode sont exposés ci-après.

À quoi ça sert ?

Les stations vidéo rotatives permettent d'obtenir un aperçu de la biodiversité et du paysage depuis un point fixe sur un grand nombre de stations, à de multiples profondeurs sur un laps de temps court, sans les contraintes de la plongée.

A l'inverse, il est possible de programmer le système afin d'effectuer un suivi sur plusieurs jours et il doit être solidement fixé au fond par des plongeurs. Cette fonction a par exemple été utilisée dans une passe du Grand Lagon Sud en Nouvelle-Calédonie pour évaluer l'importance des regroupements de poissons reproducteurs.

L'avantage de la station rotative KOSMOS par rapport à une caméra fixe est la possibilité de calculer une abondance moyenne sur les trois rotations. Cette métrique moyennée est robuste aux variations dues aux mouvements des poissons.

Enfin, KOSMOS a été conçu pour un usage facilité par les gestionnaires : sa fabrication artisanale le rend plus accessible, reproductive à coût raisonnable, et réparable localement.

Quelles sont les limites ou les contraintes ?

KOSMOS nécessite l'accès à un FabLab ou à des pièces détachées spécifiques pour sa fabrication qui est documentée de bout en bout sur internet.

Dans sa dernière version, le système pèse 9 kg à sec et lesté, équivalent à 5 kg dans l'eau (sans compter le poids des lests si besoin, soit jusqu'à 20 kg en tout), ce qui rend les manipulations répétées fatigantes. La répétition de déploiements notamment profonds peut bénéficier de l'utilisation d'un vire-ligne ou poulie.

Etude de cas

Tous les articles, guides et rapports d'évaluation utilisant le protocole STAVIRO sont disponibles sur <https://archimer.ifremer.fr/> (Aucune étude utilisant KOSMOS n'est disponible pour le moment).

NOUVELLE-CALÉDONIE

Evaluation de l'état de santé des récifs de Petrie et de l'Astrolabe, Parc de la Mer de Corail (2014). Accessible sur le site de l'Ifremer

Porteur du projet : Unité de Recherche lagons, Ecosystèmes et Aquaculture Durable de la Délégation IFREMER de Nouvelle-Calédonie, puis UMR DECOD, Ifremer Lorient (personne contact : Dominique Pelletier).

Objectif : caractériser les peuplements de poissons et leurs habitats et en évaluer l'état.

Matériels et méthodes : en 6 jours de terrain, 111 stations vidéo rotatives ont été déployées entre 3 et 26 m. 95 stations se sont avérées exploitables pour le traitement. Les espèces appartenant à

la liste complète des espèces identifiables par STAVIRO ont été dénombrées. Le temps moyen de traitement d'une vidéo pour l'ichtyofaune a été de 56 minutes. L'habitat a été caractérisé par la méthode paysagère de la Medium-Scale Approach. Le temps moyen de traitement d'une vidéo pour l'habitat a été de 24 minutes.

Résultats :

Habitats : trois des cinq habitats identifiés dans la typologie de Nouvelle-Calédonie ont été observés sur Astrolabe, Pétrie et Walpole : "corail vivant", "détritique", "fond lagonaire". Aucune station d'herbier ou d'algueaie n'a été observée parmi les 111 stations. Les recouvrements en corail vivant sont plus élevés sur les récifs éloignés, sur les récifs isolés et sur les pentes externes.

Poissons : 171 espèces de poissons appartenant à 33 familles ont été observées. 71 % ont été identifiés au niveau de l'espèce, 7 % au niveau du genre et 23 % au niveau de la famille. Cette étude constate que les espèces pêchées sont en général abondantes et/ou fréquentes,

principalement sur les habitats de fonds durs sur les trois sites. La situation est meilleure à Astrolabe, qui montre le meilleur état observé en Nouvelle-Calédonie pour plusieurs indicateurs

liés aux ressources halieutiques. Les poissons-chirurgiens, carangues et loches sont bien plus abondants que sur d'autres sites.

FRÉQUENCE

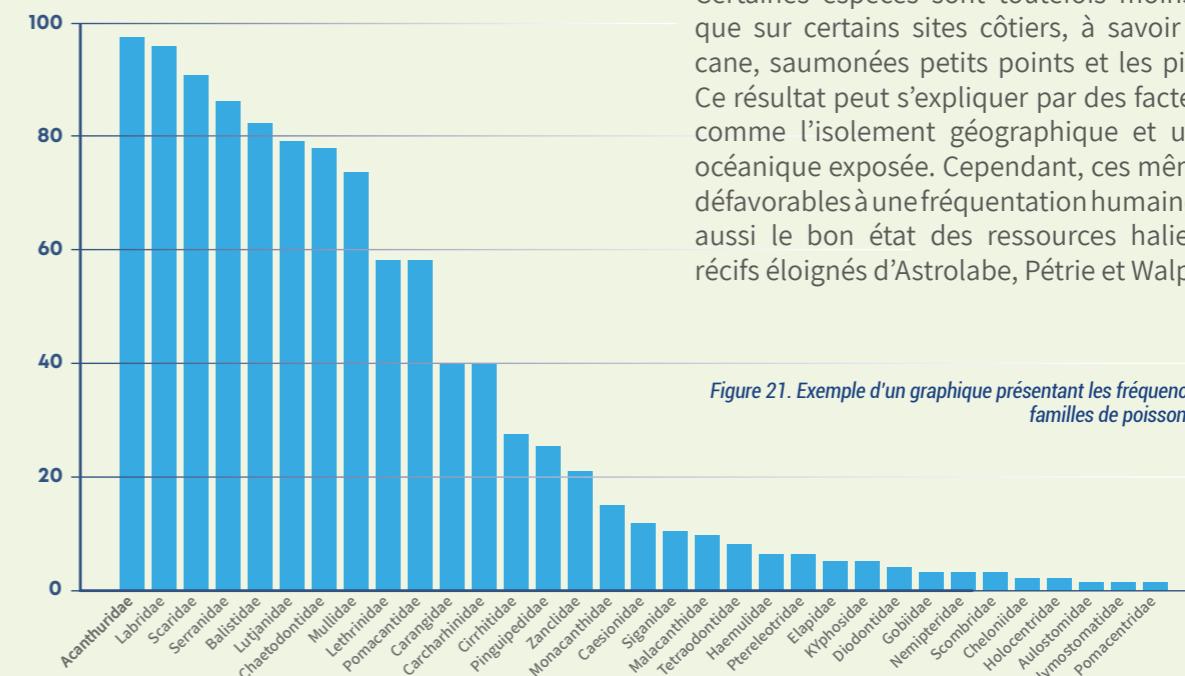


Figure 21. Exemple d'un graphique présentant les fréquences d'occurrence de 33 familles de poissons observées © Ifremer

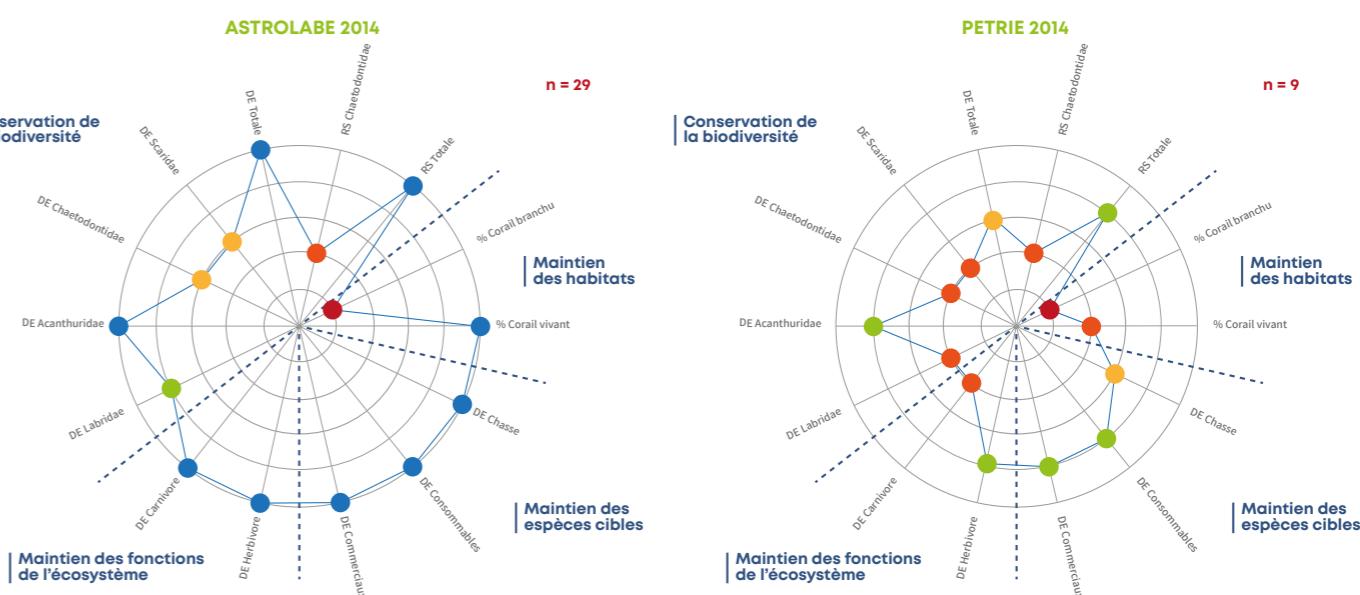


Figure 22. Exemple d'un radarplot montrant les différents indicateurs sur l'habitat Corail vivant (DE = densité, RS = Richesse spécifique) en 2014 sur le récif de l'Astrolabe (à gauche) et sur le récif de Pétrie (à droite) © Ifremer

Etude de cas MAYOTTE

Au sein du Parc Naturel Marin de Mayotte des systèmes de caméras rotatives ont également été mis en place en 2017 et en 2022 avec près de 250 stations de suivis. Des listes d'espèces

stables ont été conçues pour réaliser des suivis à long terme. Les films sont disponibles via ce lien : <https://parc-marin-mayotte.fr/editorial/le-suivi-des-peuplements-de-poissons>

B | CAMÉRA APPÂTÉE OU BRUV (BAITED-REMOTE UNDERWATER VIDEO)

Matériel et protocole

Une caméra appâtée est composée d'une caméra de type caméra d'action (telle que GoPro) contenue dans un caisson avec une tige au bout de laquelle est placé l'appât. Le système est largué depuis un bateau et placé dans l'eau pendant 1h environ. Des caméras avec un retour surface ou en stéréo ou 360° peuvent être utilisées sur un système appâté.

L'appât est à choisir en fonction de l'espèce visée à attirer. Il en existe une grande diversité : 58 % de Clupeidae, 15 % de Scombridae, 5 % de céphalopodes, 5 % de Sphyraena spp., 2 % de Caranx spp., etc. L'idéal est d'utiliser un poisson gras et le même appât au cours de l'étude, pour réduire les biais d'échantillonnage.

L'usage d'une cage permet de réduire les risques de nourrissage des individus, on utilise l'attraction par l'odeur ("smelling"), ce qui est différent du nourrissage ("feeding").

Le protocole varie selon les objectifs du projet et les espèces ciblées : de jour/de nuit, nombre de réplicats, profondeur, durée de mise à l'eau, etc. La profondeur de déploiement varie de peu profond (0,5 m) à très profond (8074 m). La majorité des études est réalisée dans la zone des 20 m.



Figure 24. Mission STAVIRO du Parc Naturel Marin de Mayotte. © PNMM



Figure 23. Exemple de caméra appâtée ou BRUV in situ © Alain Goyeau

L'initiative "Global FinPrint" a été développée par la fondation Paul G. Allen pour l'étude des raies, requins et autres animaux des récifs coralliens grâce au BRUV. Les données collectées par les chercheurs utilisant la méthode sont renseignées sur une base de données commune et traitée. Le protocole de "Global FinPrint" est disponible via ce lien : https://globalfinprint.org/about/_assets/global-finprint-basic-bruvs-protocol.pdf

Traitement de données et métriques obtenues

Les vidéos issues des BRUV sont traitées avec la méthode maxN : nombre maximum d'individus d'une espèce observés simultanément sur une même vidéo à un moment donné. Plusieurs métriques peuvent être obtenues : abondance relative, richesse spécifique, liste d'espèces, etc.

De manière générale :

- si l'étude est menée uniquement sur les élasmobranches, il faut compter en moyenne pour 1h d'enregistrement et entre 1h30-2h pour le visionnage et la saisie des données,
- si l'étude est menée sur tous les taxons, il faut compter en moyenne 3h de travail pour 1h d'enregistrement.

Avantages-inconvénients de la caméra appâtée

Une partie "Caractéristiques communes des systèmes fixes" expose les avantages et inconvénients généraux relatifs à ces systèmes : elle s'applique donc aussi à la caméra appâtée. Les avantages et inconvénients supplémentaires spécifiques à cette méthode sont exposés ci-après.

À quoi ça sert ?

La caméra appâtée (BRUV) permet de cibler les carnivores très mobiles et difficiles à observer en vidéo et UVC, notamment des animaux discrets comme les raies ou les requins. Cette méthode a également été utilisée avec succès pour étudier les poissons osseux. Les animaux omnivores et herbivores peuvent également être attirés par le dispositif en lui-même (les ondes de la caméra, la structure en elle-même, etc.). C'est une méthode facile à déployer et peu chère. L'objectif n'est pas de quantifier les densités absolues mais de détecter la présence d'espèces rares/éminemment rares.

cette pratique est interdite dans certaines réserves, nécessitant alors des dérogations spécifiques.

En outre, l'appâtage attire certaines espèces plutôt que d'autres, ce qui fausse la perception de la distribution naturelle des espèces, et biaise l'estimation de la surface réellement observée.

La durée d'immersion nécessaire pour chaque station est relativement longue, il faut donc prévoir plusieurs structures pour optimiser le temps d'échantillonnage et couvrir une large zone. De plus, le matériel est volumineux et lourd, ce qui peut compliquer sa manipulation.

La métrique maxN, souvent utilisée comme indice d'abondance pour limiter le risque de double comptage, correspond au nombre maximum d'individus d'une espèce observés simultanément sur une image dans une séquence vidéo. Or il a été montré qu'une moyenne de plusieurs dénombrements était proportionnelle à l'abondance réelle tandis que le maxN était lié de manière non-linéaire à cette abondance réelle, générant ainsi des biais aux abondances faibles et élevées.

La méthode ne permet pas d'obtenir une estimation fiable de l'abondance car les espèces sédentaires et abondantes sont souvent surestimées, tandis que les espèces rares, cryptiques ou très mobiles tendent à être sous-représentées.

Étude de cas

SAINT-MARTIN

Etude du phénomène d'agrégation de requins nourrice (*Ginglymostoma cirratum*) à Saint Martin, Petites Antilles (2016). Accessible sur le site de l'[Ifremer](#)

- **Porteur du projet :** association Kap Natiel
- **Objectif :** améliorer les connaissances sur les regroupements de requins nourrices (*Ginglymostoma cirratum*) présentes à Saint Martin
- **Matériels et méthodes :**
 - Repérage depuis un bateau/ depuis le rivage/ en immersion

- BRUV et photogrammétrie laser.
- 59 heures d'enregistrement ont été réalisées sur deux sites à Saint-Martin à l'aide de BRUV.
- La photogrammétrie laser consiste à utiliser deux lasers afin d'obtenir des mesures des individus qui passent dans le champ de vision de la caméra.

Résultats :

- Au cours de cette étude, et avec ces trois méthodes, 49 observations de requin nourrice ont été réalisées ;
- Sur les images, il a été possible de constater la présence d'individus matures qui sont

exclusivement des femelles, et pour la plupart gestantes. Ces femelles forment des agrégations de plusieurs individus (entre 2 et 4) dans des zones calmes et protégées de la houle avec des eaux peu profondes, une température élevée et un substrat sableux et/ou recouvert d'herbiers. Elles n'ont pas été attirées par l'appât mais ont été filmées dans le champ de vision de la caméra ;

- 100 % des requins nourrice immatures ont montré un intérêt pour les appâts ;
- Il n'a pas été possible de mesurer la taille des requins nourrice car il est essentiel d'obtenir des

images du profil complet des individus (l'animal doit être perpendiculaire aux faisceaux des lasers).

De nombreuses autres études utilisant la méthode des caméras appâtées ont été réalisées dans les Antilles françaises. Une des études porte sur le "Suivi des populations côtières de raies et de requins dans les Antilles françaises par la méthode des caméras appâtées (2016-2022)" et est disponible via ce lien : [2023_BRUVs_AF_V1.pdf](https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960834822000125)

CARACTÉRISTIQUES COMMUNES AUX SYSTÈMES FIXES

À quoi ça sert ?

Les systèmes fixes permettent d'acquérir des vidéos en deux dimensions depuis un point fixe. Ils présentent des caractéristiques communes pour l'étude et le suivi des communautés marines. Ces caractéristiques sont présentées ici pour éviter les redondances dans chaque partie.

- Les enregistrements vidéo permettent de conserver des données brutes, analysables a posteriori par des experts (pas de nécessité d'experts taxonomistes sur le terrain), et exploitables également à des fins de communication et de sensibilisation.
- Ils offrent une collecte précieuse d'informations sur les habitats et le comportement des poissons, tout en étant plus discrets que les observations directes (UVC). Cela favorise l'observation d'espèces sensibles à la présence humaine, notamment les espèces commerciales. La mégafaune (requins, tortue, raie, etc) peut également être observée. De plus, certains biais liés à l'observation in situ sont fortement réduits (possibilité d'arrêt pour compter les bancs, vérification taxonomique facilité, etc.)
- Comme ils ne dépendent pas des contraintes liées à la plongée, un plus grand nombre de déploiements peut être réalisé sur une même journée, à des profondeurs allant de quelques mètres jusqu'à 80 m et même au-delà selon les conditions.

Quelles sont les limites ou les contraintes ?

- La qualité des enregistrements est fortement dépendante de l'environnement : turbidité et luminosité limitent parfois la possibilité d'utiliser la donnée.
- Ces dispositifs sont généralement volumineux et parfois délicats à manipuler. Ils doivent être installés à l'horizontale, sur une surface plane, ce qui représente une contrainte forte pour échantillonner les habitats à forte déclivité (pentes externes, tombants verticaux, etc). En règle générale, ils ne sont pas placés dans des zones soumises à de forts courants. Un basculement de la caméra peut en effet rendre les données inexploitables. Enfin, fonctionnant sur batterie, leur autonomie limite la durée d'enregistrement.
- La pose des systèmes est effectuée "à l'aveugle" depuis la surface, donc sans grande précision sur la localisation de la station d'échantillonnage (particulièrement pour les habitats profonds), ce qui introduit un biais pour des habitats fragmentés et rend difficile le retour exact sur un point spécifique au fil du temps.
- Le traitement des vidéos comporte plusieurs limites : risque de double comptage, impossibilité d'estimer précisément les tailles avec une seule caméra, identification difficile des petits poissons, de la faune cryptique ou nocturne. Enfin, même si l'intelligence artificielle est en cours de développement pour automatiser certaines tâches, son usage reste encore limité et le traitement des vidéos manuellement est chronophage.

2.3 | Description détaillée des systèmes mobiles

A | ROBOT SOUS-MARIN DE TYPE ROV (REMOTE OPERATED VEHICLE)

Cette section présente uniquement les caractéristiques des "petits" ROV, dont le prix se situe entre 1 500 et 15 000 euros, par opposition aux "modèles industriels" dont le coût dépasse généralement 100 000 euros. Entre 1 500 et 5 000 euros, les "petits" ROV sont davantage destinés à un usage de loisir, mais pour des suivis réguliers, il faut se placer dans la gamme supérieure des 5 000 à 15 000 euros. Ces "petits" ROV sont plutôt "faciles" à manier dans la zone des 30 mètres mais peuvent aller jusqu'à 100 voire 200 mètres : ils s'avèrent plus difficiles à diriger avec la profondeur.

Matériel et protocole

Le ROV, ou "Remotely Operated Vehicle", est un robot sous-marin motorisé, télécommandé depuis la surface via un cordon ombilical. Ce cordon ombilical est essentiel, car il assure à la fois la transmission des commandes de l'opérateur vers le robot, l'alimentation électrique du ROV, et le retour des données collectées vers la surface.

La conception de la plupart des ROV permet d'intégrer divers équipements pour s'adapter à des besoins spécifiques. Ces équipements ne sont pas toujours cumulables :

- Caméras simples ou stéréoscopiques pour l'acquisition de photos et de vidéos sous-marines ;
- Systèmes de sécurité contre les chocs ;
- Système de positionnement en USBL (Ultra-Short Baseline, cf encart sur "[Le positionnement des robots sous marins](#)") ;
- Autres accessoires : caméra supplémentaire, éclairages, sondeurs, capteurs, une pince ou un bras manipulateur, etc. facilitant la collecte d'échantillons ;
- Pompe à ADN (ADN environnemental) : système peu accessible pour des petits ROV.

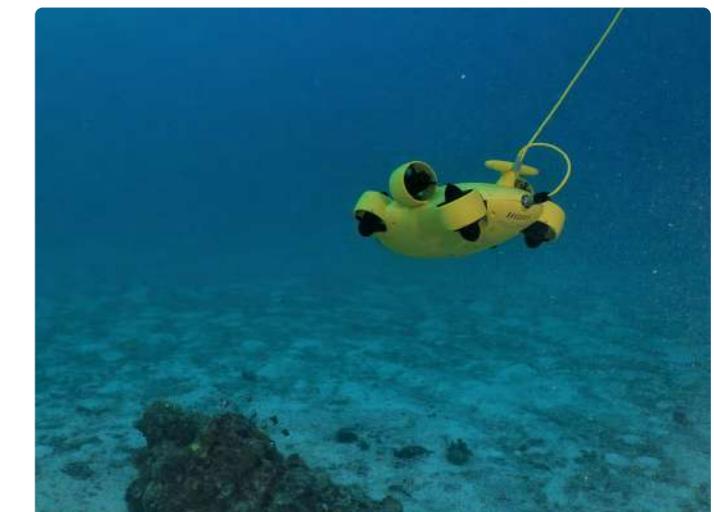


Figure 25. Exemple de robot sous-marin : ROV déployé dans les îles Eparses © Grégoire Moutardier

Plusieurs marques et modèles de "petits" ROV existent et sont accessibles aux gestionnaires. Voici quelques exemples non exhaustifs ci-dessous :

- [Les ROV FIFISH](#)
- [Les ROV BlueRobotics](#)
- [Les ROV Chasing](#)

Traitements de données et métriques obtenues

Les photos et vidéos sous-marines constituent les principales données collectées par le ROV. Ces informations visuelles peuvent être exploitées de différentes manières : support visuel pour de la communication, présence/absence d'espèces, etc.. Au-delà des données visuelles, le ROV peut également être utilisé pour collecter des prélèvements d'ADN ou d'autres

échantillons biologiques. Ces échantillons sont ensuite analysés en laboratoire, fournissant des informations complémentaires sur la génétique des populations ou la santé de l'écosystème.

Avantages-inconvénients du ROV

Une partie “[Caractéristiques communes des systèmes mobiles](#)” expose les avantages et inconvénients généraux relatifs à ces systèmes : elle s’applique donc aussi au ROV. Les avantages et inconvénients supplémentaires spécifiques à cette méthode sont exposés ci-après.

À quoi ça sert ?

Le ROV constitue un outil adapté pour des explorations ponctuelles en milieu sous-marin ainsi que pour réaliser des inventaires faunistiques à une échelle générale dans des zones ciblées. Il présente un intérêt particulier lorsque l’intervention de plongeurs s’avère difficile ou risquée, que ce soit en raison de la profondeur ou du caractère encore inconnu du site. Son utilisation permet d’augmenter significativement le nombre de points d’observation, pouvant atteindre une trentaine par jour.

Il offre ainsi une solution pertinente pour l’inspection et la prospection préalable à la sélection de sites destinés à un suivi en plongée, mais également pour l’acquisition de données de base telles que la cartographie des habitats ou l’évaluation semi-quantitative du blanchissement.

Quelles sont les limites ou les contraintes ?

Son utilisation pour le suivi à long terme d’une zone d’étude présente certaines limites. L’absence de système GPS intégré sous l’eau ne permet pas de réaliser des suivis géolocalisés précis, ce qui rend

difficile le retour exact sur un point spécifique au fil du temps. Maintenir un cap stable et suivre des transects de manière rigoureuse est également un défi, ce qui impacte la précision des cartographies répétées.

L’ombilic représente une contrainte opérationnelle significative. Sa gestion peut s’avérer délicate pour l’opérateur en raison du risque d’emmêlement. Cette difficulté s’accroît avec la profondeur, car le poids du câble limite la maniabilité du ROV et réduit sa vitesse de déplacement. Plus le ROV est petit, plus il est sujet à cette contrainte de déplacement. Le courant marin est également un facteur limitant crucial ; un courant de 2 nœuds est généralement considéré comme la limite supérieure pour une utilisation efficace, au-delà de laquelle la stabilité et le contrôle sont compromis. La manipulation du ROV requiert une maîtrise technique de l’appareil et une capacité à s’orienter uniquement à l’aide des caméras embarquées. L’efficacité des missions est par ailleurs fortement dépendante des conditions de visibilité sous-marine et des courants. Pour atténuer certaines de ces difficultés, il est possible de descendre le ROV dans une cage stabilisatrice, ce qui réduit la longueur d’ombilic déployée et facilite la manipulation du ROV en profondeur autour d’un point fixe, améliorant ainsi la stabilité et le contrôle.

Étude de cas

TROMELIN (ÎLES ÉPARSES)

Récifs isolés 2 - Connaissance des écosystèmes marins récifaux : évaluation de l’état de santé des récifs coralliens isolés dans le Canal du Mozambique (2025). [Accessible sur le site de l’Ifremer](#)

- **Porteur du projet :** Terres Australes et Antarctiques Françaises
- **Objectif :** améliorer les connaissances sur les récifs coralliens de la zone mésophotique (Tromelin, mont La Feuillée).
- **Matériels et méthodes :** dans le cadre de la mission “Récifs isolés 2”, un robot sous-marin a été déployé pour explorer plusieurs sites, notamment le mont La Feuillée et la pente externe de Tromelin. Le robot sous-marin de la marque Chasing (modèle
- **Coût du ROV :** 13 000 euros



Figure 26. Images prises par ROV. Poulpe de nuit à Glorieuses (en haut à gauche) © Grégoire Moutardier, Carangue grosse tête sur les pentes de Tromelin (en haut à droite) © Clément Lelabousse, recouvrement avoisinant les 100 % sur le sommet du mont La Feuillée (en bas à gauche) © Clément Lelabousse et à la limite de zone mésophotique (en bas à droite). © Clarisse Thellier

B | ROBOT SOUS-MARIN DE TYPE AUV (AUTONOMOUS UNDERWATER VEHICLE)

Dans cette partie l’AUV est présenté à titre informatif. En effet, ces systèmes ne permettent pas encore de suivre finement les récifs coralliens et ont un prix très élevé (plus de 100 000 euros). Ainsi, il n’y a pas d’étude de cas associée à cette partie.

Matériel et protocole

Un AUV (Autonomous Underwater Vehicle) est un robot sous-marin motorisé qui opère de manière autonome, sans connexion physique continue avec la surface, et se présente fréquemment sous une forme de torpille. Sa navigation repose sur un système de positionnement GPS lorsqu’il est en surface, mais une fois immergé, il s’appuie sur des technologies plus complexes (cf “[Encart sur les systèmes de positionnement des robots sous-marins](#)”). Son fonctionnement est principalement régi par un protocole de mission préalablement programmé, bien que des commandes puissent être envoyées par l’utilisateur durant la mission, la communication sous-marine rendant cette interaction plus complexe et limitée.

Les gliders sont des types d’AUV qui gèrent leur profondeur avec un système de ballasts comparable aux sous-marins. Des ailettes orientables donnent les directions à suivre sur deux axes, pente et trajectoire.



Figure 27. Robot sous-marin de type AUV en forme de torpille © Island Robotics

Traitement de données et métriques obtenues

En termes de collecte de données, l'AUV partage de nombreuses capacités avec le ROV. Il peut acquérir des photos et des vidéos de haute résolution, essentielles pour l'inspection visuelle et la cartographie. Il est également capable de collecter des échantillons d'ADN (ADN environnemental), offrant des perspectives pour l'étude de la biodiversité sans contact direct. De plus, les AUV sont couramment équipés de capteurs bathymétriques (sonars multifaisceaux), de capteurs océanographiques (température, salinité, profondeur) et d'autres instruments spécifiques à la mission,

permettant de collecter une gamme complète de données environnementales et topographiques. Le traitement de ces données s'effectue généralement après la mission, une fois l'AUV récupéré et les informations téléchargées. En recherche, des projets utilisent des AUV en "meute" pour collecter des informations sur de larges surfaces.

Avantages-inconvénients de l'AUV

Une partie "Caractéristiques communes des systèmes mobiles" expose les avantages et inconvénients généraux relatifs à ces systèmes : elle s'applique donc aussi à l'AUV. Les avantages et inconvénients supplémentaires spécifiques à cette méthode sont exposés ci-après.

À quoi ça sert ?

L'avantage principal de l'AUV réside dans son autonomie, qui lui permet de couvrir de vastes zones sans la présence constante d'un navire de surface, optimisant ainsi les coûts opérationnels sur la durée. La présence quasi systématique d'un système de positionnement et d'une centrale inertie permet de géolocaliser relativement finement les données, contrairement aux ROV. Il est particulièrement bien adapté aux missions de cartographie de grande envergure et aux levés systématiques, où la reproductibilité et une large couverture spatiale sont nécessaires. Son indépendance le rend également idéal pour des missions dans des zones à haut risque ou difficiles d'accès car il n'est pas contraint par l'ombilic ou le pilote.

Quelles sont les limites ou les contraintes ?

La limite principale de l'AUV est son coût très élevé (dû au système de positionnement, cf encart ci-contre, rendant son acquisition peu accessible pour de nombreux gestionnaires. Comme tout système

robotique autonome, il existe un risque inhérent de dysfonctionnement dans sa programmation ou de problèmes techniques, ce qui peut potentiellement conduire à la perte de l'appareil. Par ailleurs, l'AUV est optimisé pour parcourir de grandes surfaces à une certaine vitesse. Sa vitesse minimale est d'environ un nœud pour garantir une stabilité optimale, ce qui peut limiter la précision de l'acquisition de photos pour la photogrammétrie, qui requiert souvent des déplacements plus lents et contrôlés pour un chevauchement d'images optimal. La flexibilité en temps réel est également réduite, car l'interaction avec l'opérateur est limitée par la faible bande passante des communications acoustiques sous-marines : il n'est pas possible de voir la vidéo en temps réel.

Il existe aussi des hybrides ROV/AUV, qui combinent les avantages des deux systèmes. Ces robots offrent une plus grande autonomie dans leurs déplacements tout en conservant une capacité de liaison facile avec la surface pour un contrôle plus direct si nécessaire. Cependant, le prix de ces systèmes hybrides est généralement très élevé, supérieur à 100 000 euros.

Positionnement des robots sous-marins

La géolocalisation des robots sous-marins (ROV et AUV) représente un défi technique important, et les systèmes employés peuvent être coûteux et parfois

limités selon l'environnement. Parmi les principales technologies, on retrouve :

	Utilité	Prix	Contrainte
USBL (Ultra-Short Baseline)	Déterminer les coordonnées relatives du robot par rapport au navire de surface.	- Moins de 1000 euros pour certains ROV - Au-delà de 10 000 euros pour la plupart des AUV	Peut rencontrer des difficultés en eaux peu profondes en raison de réflexions multiples du signal sur le fond et la surface.
Modem acoustique	Communiquer des données simples (pas de vidéos) sans fil sous l'eau.	Dès 2000 euros	Le débit de données est assez faible et la latence est élevée.
DVL (Doppler Velocity Log)	Mesurer la vitesse du robot par rapport au fond marin	Environ 15 000 euros	Doit être utilisé à proximité du fond.
Centrale inertie	Fournir des informations sur l'attitude du robot (roulis, tangage, lacet) et les accélérations.	Autour de 2000 euros	La précision est moins fiable dans le temps (à l'échelle d'une immersion).

C | LE ROBOT DE SURFACE DE TYPE ASV (AUTONOMOUS SURFACE VESSEL)

Il existe plusieurs types de robots de surface, ces engins sont modulables selon le besoin du gestionnaire. Dans ce guide, l'exemple de "la planche" développée dans le cadre du projet PLANCHA (IFREMER - antenne de la Réunion / CNRS-LIRMM) est décrit (personne contact : Sylvain Bonhommeau/Magali Duval/Matteo Contini).

La description de ce robot aurait pu figurer dans le chapitre 1 (Photogrammétrie sous-marine) ou dans le chapitre 5 (Télédétection). En effet, grâce à ce robot, il est possible d'obtenir une orthophotographie (photogrammétrie) à large échelle d'un platier, de cartographier les habitats (télédétection) et de caractériser l'état des communautés coraliennes.

Matériel et protocole

La "planche" est un robot de surface constitué d'une planche de bodyboard équipée de :

- un autopilote avec un GPS intégré,
- un échosondeur permettant de mesurer la bathymétrie jusqu'à 50 m,
- une caméra pour identifier les habitats/espèces via Deep Learning (cf. chapitre 6).

Ce robot de surface permet de cartographier une surface de 150 m x 150 m en 1 h 30 jusqu'à 20 m de profondeur maximum pour l'identification des habitats et 50 m pour la bathymétrie.

Les composants nécessaires à la fabrication de cette "planche" sont disponibles en ligne, et elle peut être assemblée dans un FabLab. Il n'y a cependant que très peu de pièces qui nécessitent une imprimante 3D ou des machines d'un Fablab. Les spécifications techniques



Figure 28. "Planche" munie d'un échosondeur, d'un GPS, et de caméras © Ifremer

sont détaillées dans cet article : <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S002980182500914X>

Entre les achats des composants et la calibration d'une planche, il faut prévoir un délai d'environ un mois pour la réalisation complète.

Traitement de données et métriques obtenues

Pour les données acquises avec la “planche”, entre 2 et 3 heures de post-traitement sont nécessaires depuis le traitement des données brutes jusqu'à la mise en ligne sur Zenodo. Actuellement, les utilisateurs doivent passer par l’Ifremer pour être accompagnés dans le traitement des données. Toutefois, une plateforme en libre accès est en cours de développement pour permettre aux usagers de traiter leurs données “imagerie” de manière autonome.

La compilation des données bathymétriques (issues de l'échosondeur) et des photographies permet de générer automatiquement des orthophotographies, qui servent ensuite à identifier les habitats marins à l'aide de modèles d'intelligence artificielle.

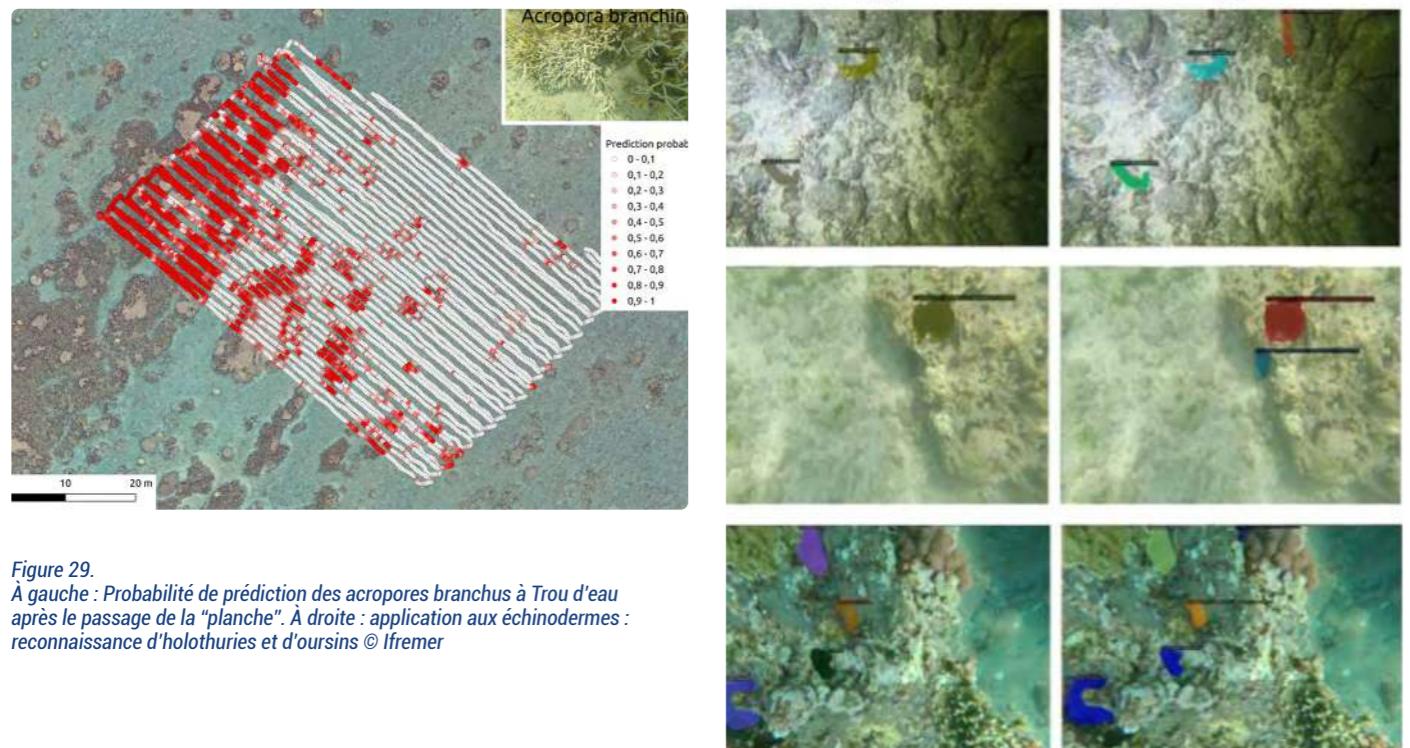


Figure 29.
À gauche : Probabilité de prédiction des acropores branchus à Trou d'eau après le passage de la “planche”. À droite : application aux échinodermes : reconnaissance d'holothuries et d'oursins © Ifremer

Des déploiements de la planche ont été réalisés sur plusieurs sites de l'océan Indien dans le cadre du projet “4SEA” (Explorateurs de Monaco/Ifremer/CNRS-LIRMM, etc.) et un déploiement du catamaran est en cours dans le cadre du projet “GPMLDR-ADNe” (GPMLDR/Ifremer/CNRS-LIRMM/COOOL).

Une base de données collaborative nommée Seatizen Atlas a également été créée. Elle centralise les données

Des images et des rendus sur le platier de La Réunion sont disponibles via ce lien : <https://zenodo.org/records/13951435>.

Les données acquises avec la « planche » peuvent également servir à valider celles obtenues par un drone aérien. Cette approche permet de détecter des catégories benthiques sur une zone plus vaste que la zone initialement couverte par la « planche ».

Finalement, l'algorithme est capable de reconnaître 30 classes parmi lesquelles des habitats (sable, débris, roches, herbier), des morphotype de coraux (branchu, tabulaire, massif), différents types d'échinodermes (holothuries, oursins, étoiles de mer). L'objectif étant à terme de pouvoir évaluer leur état à large échelle (voir figure 28).

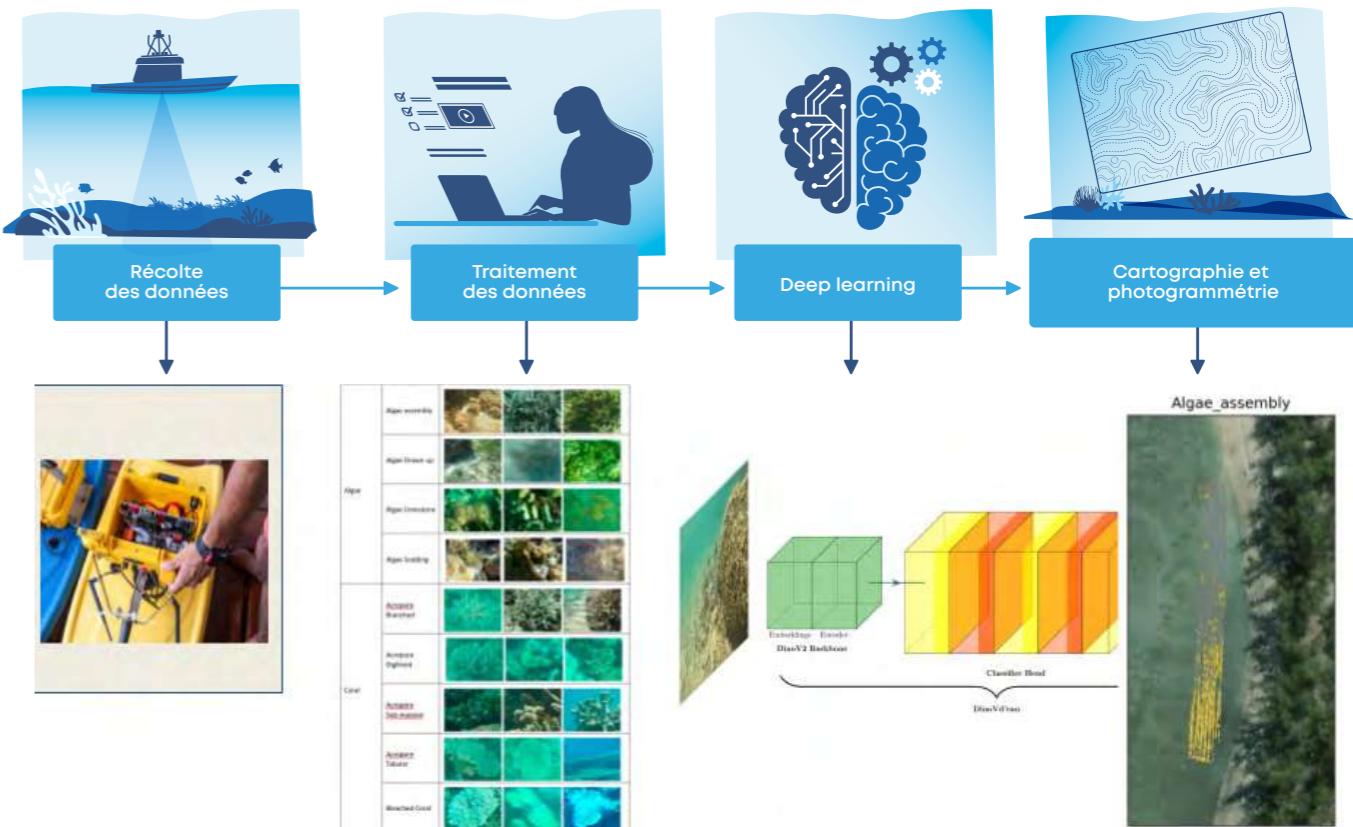


Figure 30. De la collecte de données au rendu final avec la “planche” © Ifremer

collectées depuis différentes plateformes dans le sud-ouest de l'océan Indien (La Réunion, Seychelles, île Maurice). Cette base est ouverte et modifiable par le grand public, qu'il s'agisse de données recueillies via des robots de surface, du kitesurf, paddle, plongée, etc. Elle contribue à enrichir la base d'images annotées et à améliorer la précision des algorithmes de reconnaissance.

Avantages-inconvénients du robot de surface

À quoi ça sert ?

Le robot de surface tel que la “planche” est un outil léger d'acquisition rapide de données, conçu pour des opérations en surface facilement réplicables.

Il permet d'obtenir une carte des habitats à partir d'une orthophotographie précise d'une zone peu profonde (entre 0 et 5 m) et d'un modèle d'Intelligence Artificielle de reconnaissance des catégories benthiques. Ce modèle est toujours en développement à l'Ifremer. Avec un coût d'environ 2 500 euros, la “planche” est considérée comme facile à déployer et économiquement accessible.

Il peut également servir de support de communication et éducatif dans le cadre de programmes de sciences participatives.

Quelles sont les limites ou les contraintes ?

Le déploiement de ces robots de surface est conditionné par les conditions environnementales. Pour une acquisition optimale, un plan d'eau calme, sans déferlement de vagues, est nécessaire pour assurer la stabilité de l'appareil.

Pour la “planche”, des conditions de luminosité suffisantes sont requises, en évitant les reflets intenses (temps nuageux) et les zones de surexposition. Un milieu peu turbide est également préférable pour la qualité des images. Les acquisitions sont idéalement réalisées tôt le matin, entre le lever du soleil et 9h afin de minimiser les ombres portées et les brillances sur l'eau. Étant donné qu'il s'agit de traitement photogrammétrique, les lignes d'acquisition doivent être relativement proches afin d'assurer un recouvrement suffisant des images et de réduire les zones d'ombre dans le modèle. Il est à noter que des zones d'ombre peuvent subsister, ce qui limite la capacité à générer des modèles 3D complets et peut restreindre le rendu à des orthophotographies. L'autonomie de la “planche” offre environ deux heures d'opération.



Photo : © Julien Wicker

CARACTÉRISTIQUES COMMUNES DES SYSTEMES MOBILES (ROV ET AUV)

À quoi ça sert ?

Les ROV et AUV permettent d'acquérir des vidéos en mouvement en deux dimensions. Ils présentent des caractéristiques communes pour l'étude et le suivi des communautés marines. Ces caractéristiques sont présentées ici pour éviter les redondances dans chaque partie.

- Les enregistrements vidéo permettent de conserver des données brutes, analysables a posteriori par des experts, et exploitables également à des fins de communication et de sensibilisation. De plus, certains biais liés à l'observation *in situ* sont fortement réduits (possibilité d'arrêt pour compter les bancs, vérification taxonomique facilité, etc.).
- Grâce aux ROV, AUV, les contraintes liées à la plongée sont supprimées, ce qui facilite les déploiements et élargit les possibilités d'exploration.
- Lorsqu'il est possible de suivre un transect, une surface plus importante que les systèmes fixes est couverte, ce qui permet de lisser les variations liées aux micro-habitats et d'obtenir une meilleure représentativité de l'habitat, comparé aux systèmes fixes.
- Le risque de double comptage est plus faible, ce qui améliore la fiabilité des données récoltées.

Quelles sont les limites ou les contraintes ?

- La qualité des enregistrements est fortement dépendante de l'environnement : turbidité, luminosité limitent parfois la fiabilité des données. La qualité de l'enregistrement dépend également de la qualité du cadrage.
- Ce sont des systèmes sur batterie, qui ont une durée d'enregistrement limitée. Et ils dépendent de la puissance du moteur pour effectuer le déplacement souhaité.
- La faune est davantage perturbée par le déplacement du système qu'avec un système fixe : les systèmes mobiles ciblent plutôt les espèces moins discrètes, cryptiques.
- Le traitement des vidéos comporte plusieurs limites : impossibilité d'estimer précisément les tailles avec une seule caméra, identification difficile des petits poissons. Enfin, même si l'intelligence artificielle est en cours de développement pour automatiser certaines tâches, son usage reste encore limité et le traitement des vidéos manuellement est chronophage.

2.4 | Caméra en stéréo

Un dispositif stéréo peut être intégré à n'importe quelle technique reposant sur l'imagerie vidéo, telles que la station vidéo rotative, la caméra appâtée, le ROV, etc., afin d'enrichir les données collectées. Elle occupe une partie à part entière mais aurait pu être intégrée à chaque partie de ce chapitre.

A | MATÉRIEL ET PROTOCOLE

Une caméra en stéréo (ou caméra stéréoscopique) désigne un dispositif composé de deux caméras synchronisées, placées côté à côté à une distance fixe. Ce système permet de capturer une scène sous deux angles légèrement différents, à l'image de la vision binoculaire humaine. Les deux images capturées permettent de reconstruire la profondeur (distance) par triangulation. Chaque point visible sur les deux images peut être corrélé, et la différence de position entre les deux images donne des informations sur la distance du point à la caméra. Une fois la distance connue, on peut calculer la taille réelle d'un objet (ici, un poisson) dans l'image (Figure 31).

Dans le cadre des suivis de communautés de poissons, il est recommandé d'opter pour une caméra avec une résolution Full HD d'au moins 1920 × 1080 pixels et un taux de capture de 30 images par seconde. La plupart du temps, les caméras d'action type GoPro sont utilisées car pratiques et peu chères. Les protocoles standardisés mettent en place une barre séparant les caméras de 80 cm. Les caméras sont inclinées de 4° par rapport à la barre pour un recouvrement optimal entre les images des deux caméras.

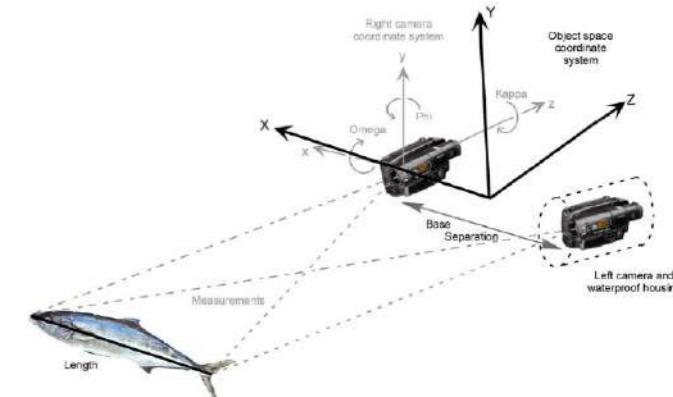


Figure 31. Schéma explicatif de la mesure de poisson via des caméra stéréo (Boutros et al., 2015)

Sur le terrain, la calibration est un aspect important pour que les caméras soient synchronisées. Plusieurs méthodes sont possibles :

- utilisation d'un damier en 2D que l'on promène devant les caméras avant l'enregistrement. C'est une méthode précise si les poissons sont latéraux mais moins précise si les poissons sont de face,
- utilisation d'un cube 3D que l'on positionne devant les caméras, et dont les coordonnées sont connues dans le volume mesuré. À noter qu'il est toutefois encombrant de transporter le cube sur un bateau.



Figure 32. Présentation du système de caméra en stéréo (en haut) (Photo extraite de Goetze et al., 2019) et du transect vidéo en stéréo opérée par un plongeur (en bas)

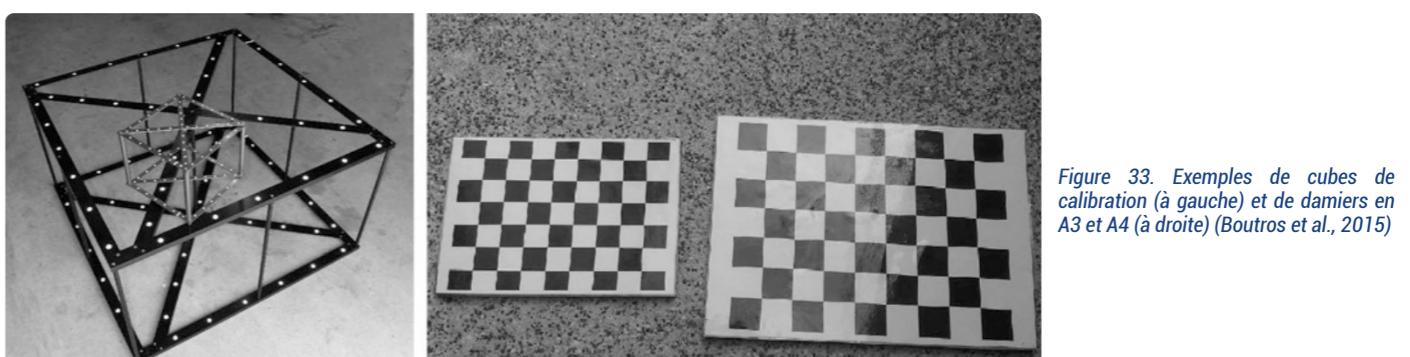


Figure 33. Exemples de cubes de calibration (à gauche) et de damiers en A3 et A4 (à droite) (Boutros et al., 2015)



Photo : © Ifreco

B | TRAITEMENT DES DONNÉES

Des logiciels de synchronisation des vidéos en stéréo sont indispensables au traitement des vidéos. Il en existe plusieurs :

- Un pack de logiciels payants développés par l'entreprise SeaGIS : le logiciel Cal utilisé pour créer un fichier de calibration qu'il faut ensuite importer dans le logiciel Eventmeasure pour synchroniser les 2 caméras, annoter et faire des mesures ;
- VidSync : un logiciel gratuit mais qui n'existe que sur mac ;
- StereoMorph qui est un package de R.

Une partie traitement des vidéos s'ensuit, manuellement ou à l'aide d'un algorithme.

C | MÉTRIQUES OBTENUES

La vidéo en stéréo permet de mesurer des tailles, estimer la biomasse d'individus, mesurer des distances, estimer des densités (en connaissant les surfaces).

Cette publication explique pas à pas les étapes de déroulement de la méthode du transect opéré par vidéo avec une caméra en stéréo.

Goetze, J.S., Bond, Todd., McLean, D.L., Saunders, B.J., Langlois, T.J., Lindfield, S., Fullwood, Laura.A.F., Driessen, D., Shadrawi, G., Harvey, E.S., 2019. A field and video analysis guide for diver operated stereo-video. Methods in Ecology and Evolution 10, 1083–1090. <https://doi.org/10.1111/2041-210X.13189>

Etude de cas

MARTINIQUE

Réalisation de transect vidéo en stéréo opéré par un plongeur.

Un stage de fin d'étude a eu lieu, en 2024, au sein du parc marin de Martinique au sujet de la méthode du transect vidéo en stéréo opérée par un plongeur. Il n'existe pas de rapport présentant cette étude.

En dix jours de terrain, dix séances de calibration ont été effectuées. En moyenne, trois transects de 50 mètres étaient réalisés en 30 minutes. Au total, 103 transects ont permis d'échantillonner huit biocénoses. Cela a conduit à l'identification de 192 individus appartenant à 22 espèces.

Le principal constat concerne la complexité de la mise en œuvre du protocole de calibration. Celui-ci consiste à utiliser un cube en trois dimensions, placé successivement dans cinq positions (face, côté droit, côté gauche, incliné, décliné) pour chacune de ses quatre faces, soit un total de 20 positions. La procédure exige une attention particulière à la turbidité et aux particules en suspension, qui peuvent réduire la précision de la calibration. Il est également nécessaire de choisir une zone calme et de soigner le cadrage. Enfin, le traitement des vidéos requiert une synchronisation minutieuse des séquences, une opération chronophage qui suppose une bonne maîtrise du processus.

Avantages-inconvénients de la caméra en stéréo

À quoi ça sert ?

Le système de caméra en stéréo permet une estimation précise des tailles, des biomasses, et des distances. Il offre également un moyen efficace d'évaluer la visibilité sous-marine, permettant ainsi de comparer ce paramètre entre différentes études.

Quelles sont les limites ou les contraintes ?

L'étape de calibration doit être faite avant chaque déploiement, et peut poser certaines difficultés. Le choix de l'outil de calibration a un impact direct sur

la précision : un damier est plus simple à manipuler qu'un cube, mais moins précis. Il fonctionne bien lorsque les sujets sont vus latéralement, mais perd en fiabilité en vue frontale. En conditions aquatiques, l'erreur moyenne est d'environ 0,5% avec le cube, 1,7% avec une planche A3, et 11,6 % avec une planche A4. De plus, les caméras peuvent se désynchroniser après deux heures d'enregistrement. Enfin, le traitement des données demande deux fois plus de stockage et de temps qu'une vidéo classique.



Figure 34. Extrait de vidéo montrant la prise de taille de poissons © Théo Granier/Office Français de la Biodiversité



Figure 35. Séries de photographies présentant la calibration pour une face du cube © Théo Granier/Office Français de la Biodiversité

2.5 | Références



AIMS. (n.d.). Site web de AIMS. <https://www.aims.gov.au/research-topics/monitoring-and-discovery/mapping/video-monitoring>

Andradi-Brown, D. A., Macaya-Solis, C., Exton, D. A., Gress, E., Wright, G., & Rogers, A. D. (2016). Assessing Caribbean shallow and mesophotic reef fish communities using baited-remote underwater video (BRUV) and diver-operated video (DOV) survey techniques. *PLOS ONE*, 11, e0168235. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0168235>

Beaufort O., Kap Natirel, 2021, Suivi des populations côtières de poissons (téléostéens et chondrichtyens) en Martinique par la méthode des caméras appâtées. 25p.

Contini, M., Illien, V., Barde, J., Poulain, S., Bernard, S., Joly, A., & Bonhommeau, S. (2025). From underwater to drone: A novel multi-scale knowledge distillation approach for coral reef monitoring. *Ecological Informatics*, 89, 103149. <https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2025.103149>

Contini, M., Illien, V., Julien, M., Ravitchandiran, M., Russias, V., Lazennec, A., Chevrier, T., Rintz, C. L., Carpentier, L., Gogendeau, P., Leblanc, C., Bernard, S., Boyer, A., Talpaert Daudon, J., Poulain, S., Barde, J., Joly, A., & Bonhommeau, S. (2025). Seatizen Atlas: A collaborative dataset of underwater and aerial marine imagery. *Scientific Data*, 12, 67. <https://doi.org/10.1038/s41597-024-04267-z>

Ifremer. (n.d.). Site web de Ifremer. <https://rd-technologiques.ifremer.fr/Nos-Projets-Theses/Nos-Projets/KOSMOS>

Goetze, J. S., Bond, T., McLean, D. L., Saunders, B. J., Langlois, T. J., Lindfield, S., Fullwood, L. A. F., Driessen, D., Shedrawi, G., & Harvey, E. S. (2019). A field and video analysis guide for diver operated stereo-video. *Methods in Ecology and Evolution*, 10, 1083–1090. <https://doi.org/10.1111/2041-210X.13189>

Harvey, E. S., Goetze, J. S., McLaren, B., Langlois, T., & Shortis, M. R. (2010). Influence of range, angle of view, image resolution, and image compression on underwater stereo-video measurements: High-definition and broadcast-resolution video cameras compared. *Marine Technology Society Journal*, 44(1), 75–85.

Harvey, E. S., & Shortis, M. R. (1995). A system for stereo-video measurement of sub-tidal organisms.

Ifremer. (2024). Automatisation de la bancarisation de données et de métadonnées issues d'acquisitions d'images de projets scientifiques et de sciences citoyennes (30 pp.) [Présentation PowerPoint non publiée].

Ifremer. (2024). Plateformes instrumentées pour l'évaluation de l'état de santé des habitats récifaux et de la biodiversité associée (projets PLANCHA et p-PUMPIIT) (24 pp.) [Présentation PowerPoint non publiée].

Ifremer. (n.d.). Site web de Ifremer. <https://rd-technologiques.ifremer.fr/Nos-Projets-Theses/Nos-Projets/KOSMOS>

Island Robotics. (n.d.). Site web de Island Robotics. <https://islandrobotics.nc/>

Kap Natirel (n.d.). Site web de Kap Natirel. <https://kapnatirel.org/documents>

Koenig, C. C., & Stallings, C. D. (2015). A new compact rotating video system for rapid survey of reef fish populations. *Bulletin of Marine Science*, 91, 365–373. <https://doi.org/10.5343/bms.2015.1010>

Kosmos. (n.d.). Site web de KOSMOS. <https://kosmos.fish/index.php/>

Langlois, T., Chabanet, P., Pelletier, D., & Harvey, E. (2006). Baited underwater video for assessing reef fish populations in marine reserves.

Leonetti, F. L., Bottaro, M., Giglio, G., & Sperone, E. (2024). Studying chondrichthyans using baited remote underwater video systems: A review. *Animals*, 14, 1875. <https://doi.org/10.3390/ani14131875>

Mallet, D., & Pelletier, D. (2014). Underwater video techniques for observing coastal marine biodiversity: a review of sixty years of publications (1952–2012). *Fisheries Research*, 154, 44–62.

Moutardier G., LELABOUSSE C., Rapport de mission Récifs Isolés 2 Tromelin 2025 / OP1, TAAF

Mulochau, T., Durville, P., & Mathey, J. (2020). Exploration de la zone mésophotique de quelques pentes externes de Mayotte à l'aide d'un ROV – Inventaire faunistique non exhaustif. [Rapport de recherche] BIORECIF.

Mulochau, T., et al. (2020). Inventaire faunistique non exhaustif des écosystèmes coralliens mésophotiques à Mayotte. [Rapport de recherche] BIORECIF.

Nader Boutros, Shortis, M. R., & Harvey, E. S. (2015). A comparison of calibration methods and system configurations of underwater stereo-video systems for applications in marine ecology.

Pelletier, D., Bissery, C., & Gonson, C. (2014). Guide d'utilisation des outils du projet PAMPA. Rapport IFRECOR. Convention n° AAMP/12/089 - IFREMER 12/212 911/F. 96 p.

Pelletier, D., Carpentier, L., Roman, W., & Bockel, T. (2015). La vidéo rotative autonome pour l'observation des habitats et de la macrofaune côtières : guide

méthodologique des systèmes STAVIRO et MICADO. Rapport AMBIO/A/1. IFREMER Nouméa. 89 p. Version du 3 novembre 2016.

Powell, A., Pelletier, D., Roman, W., Giraud-Carrier, C., Jac, C., Gins, N., & Preuss, B. (2014). Avantages et inconvénients de la stéréo vidéo : applicabilité au protocole pour STAVIRO. Ref. AMBIO/A/19. <https://archimer.ifremer.fr/doc/00274/38570/>

Saulnier, E., Breckwoldt, A., Robert, M., Pelletier, D., Remote underwater video for monitoring reef fish spawning aggregations, ICES Journal of Marine Science, Volume 82, Issue 1, January 2025, fsae194, <https://doi.org/10.1093/icesjms/fsae194>

Schobernd, Z. H., Bachelier, N. M., & Conn, P. B. (2014). Examining the utility of alternative video monitoring metrics for indexing reef fish abundance. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 71(3), 464–471.

Schohn, T., Bockel, T., Carpentier, L., & Pelletier, D. (2017). État de santé des habitats et peuplements de poissons des îles et récifs éloignés Astrolabe, Pétrie et Walpole – Évaluation initiale par stations vidéo rotatives STAVIRO 2014. Rapport AMBIO/A/28. IFREMER Nouméa. 73 p + 96 p. Version du 19/05/2017.

Whitmarsh, S. K., Fairweather, P. G., & Huveneers, C. (2017). What is Big BRUVver up to? Methods and uses of baited underwater video. *Reviews in Fish Biology and Fisheries*, 27, 53–73. <https://doi.org/10.1007/s11160-016-9450-1>

Cuvillier, A. (2025, 14 février). Entretien personnel.

Claverie, T. (2025, 20 février). Entretien personnel.

Mathey, J. (2025, 4 mars). Entretien personnel.

Macaigne, V. (2025, 21 mars). Entretien personnel.

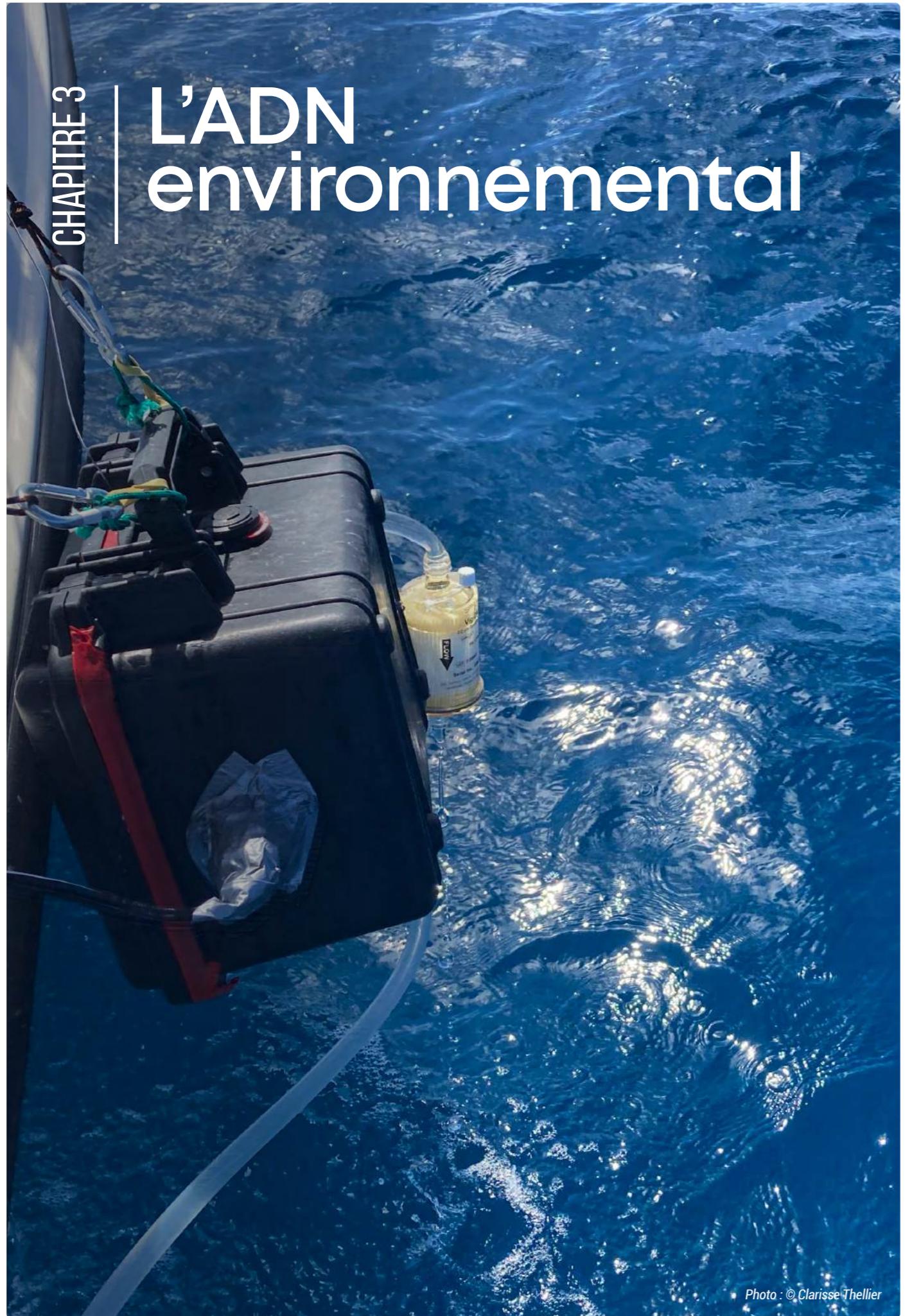
Field, M. (2025, 24 avril). Entretien personnel.

Bonhommeau, S., Duval, M., Contini, M., & Illien, V. (2025, 4 avril). Entretien personnel.

Pelletier, D. (2025, 17 avril). Entretien personnel.

Beaufort, O. (2025, 23 juillet). Entretien personnel.

L'ADN environnemental



3.1 | Introduction

L'ADN environnemental, ou ADNe, correspond à l'ADN extrait à partir d'échantillons environnementaux – comme l'eau, les sols, les sédiments, l'air, la végétation ou les fèces. Cet ADN extrait est amplifié et comparé à des bases de référence permettant l'identification d'espèces si ces dernières sont référencées. Cette technique offre un moyen non-invasif et non destructif de réaliser des inventaires de biodiversité, y compris pour des espèces rares, cryptiques ou invasives.

Il existe deux approches principales pour identifier des espèces à partir d'ADNe :

- L'approche spécifique, privilégiée lorsqu'une seule espèce cible est recherchée. Cette approche ne sera pas détaillée dans cette partie.
- L'approche multispécifique ("metabarcoding" de l'ADNe), privilégiée lorsque l'objectif est de détecter simultanément plusieurs espèces au sein d'un même échantillon. C'est la méthode utilisée le plus souvent.

Les phases clés de l'approche multispécifique de l'ADNe sont :

1. le prélèvement de l'échantillon,
2. l'extraction de l'ADN,
3. l'amplification d'un fragment d'ADN (PCR),
4. le séquençage de l'ADN,
5. l'analyse bioinformatique
6. l'accès aux résultats (Figure 36)

Figure 36. Schéma extrait du rapport de Lacoëuilhe et al. (2024) présentant les étapes de l'approche multispécifique de l'ADNe : du terrain aux résultats



CONTOUR DU CHAPITRE

L'ADNe peut être extrait à partir de différents supports autre que l'eau, comme les sédiments, les squelettes de coraux ou encore le mucus corallien. Toutefois, ces approches restent principalement utilisées dans le cadre de travaux de recherche et ne seront donc pas développées dans ce chapitre.

Une autre approche complémentaire est la métagénomique. Contrairement aux méthodes ciblées reposant sur des amorces spécifiques (par exemple le gène 12S pour l'identification des poissons), la métagénomique permet de séquencer l'ensemble du matériel génétique présent dans un échantillon. Cette méthode est particulièrement pertinente pour l'étude

des organismes pour lesquels il est difficile de cibler une région précise du génome, comme les pathogènes, les champignons ou certains microorganismes.

En pratique, la métagénomique est largement utilisée en recherche fondamentale, notamment pour la surveillance des pathogènes, l'étude des communautés microbiennes et la découverte de nouvelles espèces. Toutefois, son application dans les suivis de routine reste encore limitée, principalement en raison de coûts plus élevés, d'analyses bioinformatiques complexes et d'un manque de standardisation des protocoles.

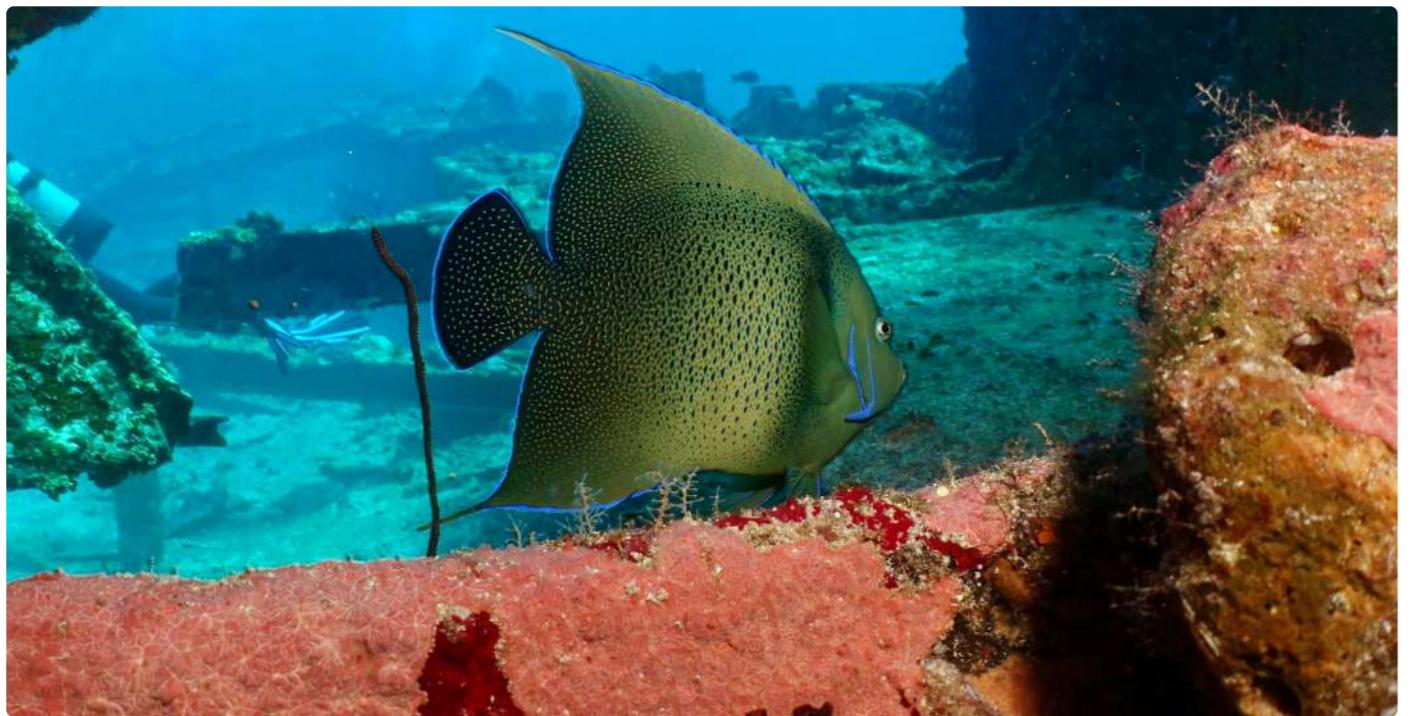


Photo : © Julien Wickel

L'essentiel des informations présentées dans ce chapitre sont directement issues des documents de référence suivants, que nous vous invitons à consulter pour plus d'informations :

- Giraud, C., Boissery, P., Dalongeville, A., Dejean, T., Deter, J., Lacoeuilhe, A., & Mouillot, D. (2024). Guide d'utilisation de l'ADN environnemental en milieu marin. Connaître, comprendre et utiliser l'ADNe pour préserver la biodiversité marine (88 p.).
- Lacoeuilhe, A., Hérard, K., Poncet, L., & Touroult, J. (2024). Intérêts et enjeux de l'utilisation de l'ADN environnemental pour l'inventaire, le suivi et la surveillance de la biodiversité des milieux dulcicoles, marins et terrestres (52 p.). PatriNat (OFB-MNHN-CNRS-IRD). <https://hal.science/hal-04561160>
- Lacoeuilhe, A., Denys, G. P. J., Dupont, P., Archambeau, A.-S., Bed'hom, B., et al. (2025). Référentiel des séquences génétiques des espèces de France: note pour la mise en place d'un nouvel outil national. PatriNat (OFB-MNHN-CNRS-IRD), 25 p. + annexes. (hal-04931482)
- Lacoeuilhe, A., Pamerlon, S., d'Hollande, L., Maurel, N., Robert, S., et al. (2025). Données issues d'ADN environnemental (ADNe): Recommandations pour les partager, les stocker et les diffuser. <https://hal.science/hal-05008115>

Objectif de gestion	Description											
	Echelle géographique	Echelle temporelle	Cible	Métriques, rendus	Précision rendus (quel paramètre fait varier la précision ?)	Avancement R&D	Nombre de territoires testés et type d'habitat testé	Conditions d'applications	Destructif/ invasif	Utilisation en sciences participatives	Communicabilité	
- Enrichir les inventaires d'espèces - Déetecter les espèces exotiques envahissantes - Déetecter les espèces rares	Transects de plusieurs kilomètres ou point fixe	Prélèvement ponctuel, mais protocole répliable dans le temps sur le même site	Tous les taxons. Les bases de référence sont plus complètes pour les poissons.	Rendus : inventaire espèces Métriques : métriques de biodiversité	Précision influencée par l'écologie de l'ADNe (cycle de vie, vitesse de dégradation...) mal connue. Risque de contamination (faux-positif) Risque de non détection d'une espèce présente (faux-négatif) Les bases de référence peuvent être erronées ou non complètes	Opérationnel : inventaire d'espèces R&D : apporter des informations quantitatives sur des populations	Beaucoup de territoires ultramarins français (Guadeloupe, Martinique, la Réunion, Mayotte...)	Pour le déploiement sur des transects : peu de houle, peu de courant, peu de vent, profondeur sous le bateau	Non	Oui	Pas de rendus visuels faciles à communiquer	

Terrain			Post Terrain				Cout			Complémentarité avec d'autres méthodes
Matériel spécifique nécessaire	Expertise/ en régie	Méthodes et données accessibles en open source / Licence	Matériel spécifique nécessaire	Expertise/ en régie	Méthodes et données accessibles en open source / Licence	Besoin d'une IA	Temps terrain	Temps post terrain pour obtenir les données brutes (court/moyen/long)	Coût matériel associé	
Pompe péristaltique et kit d'échantillonnage. Il est possible de fixer la pompe sur un bateau, un locoplongeur (scooter sous-marin), un ROV, robot de surface.	En régie après courte formation	Il existe des ressources en ligne qui expliquent les protocoles (mais les protocoles varient selon les objectifs de l'étude)	Matériel de laboratoire	Expertise	Logiciels et algorithmes spécifiques nécessaires. Certaines bases sont mutualisées comme GenBank ou Boldbase mais il y a des erreurs. Un projet de base de référence mutualisée est en cours avec PatriNat.	Non	Court pour un transect	Long	Environ 1 500 € par 5-10 km ² d'un type d'écosystème pour l'analyse de trois groupes taxonomiques (par exemple : poissons, crustacés et mammifères marins)	Les pompes à ADNe peuvent être installées sur n'importe quel type de support (robot de surface, bateau, ROV). L'ADNe est une méthode qui peut être utilisée en complémentarité des comptages visuels UVC et des BRUVs.

Tableau 3. Récapitulatif du système d'échantillonnage biologique : ADNe

3.2 | Description détaillée

A | EN AMONT DU TERRAIN

Avant le prélèvement, la stratégie d'échantillonnage permet de déterminer le nombre d'échantillons à collecter, leur répartition dans le temps et l'espace ainsi que les méthodes et les réglementations à respecter. Elle répond à 4 questions clés :

Comment échantillonner ?

Le volume d'eau à filtrer doit être choisi en fonction des objectifs de l'étude. Plus le volume est important, plus les chances de détecter des traces d'ADN rares augmentent. Cependant, filtrer de grandes quantités d'eau peut être limité par le risque de colmatage des filtres. Certains auteurs préconisent de filtrer 30 L pendant 30 min le long d'un transect quand d'autres, au moins 30 L par réplicats avec 2 réplicats par site. Ces valeurs ont été déterminées expérimentalement comme un optimum.

Le type de filtre utilisé (matériaux, taille de pores) a également un impact sur la détection de l'ADN environnemental. Les tailles de pores les plus couramment utilisées varient entre 0,2 µm (dans la majeure partie des études en milieu marin) et 10 µm. Le nombre de réplicats est aussi un paramètre à prendre en compte. Lorsque les conditions environnementales (turbidité, courant, stratification thermique) ou biologiques (densité d'organismes, comportement saisonnier) réduisent la probabilité de détection, il est recommandé d'augmenter le nombre d'échantillons et le volume d'eau filtrée par échantillon pour améliorer la représentativité des résultats.

A noter qu'il est également possible d'utiliser les ARMS (Autonomous Reef Monitoring Structure) pour réaliser une approche multispécifique de l'ADNe extrait des organismes fixés ou de l'eau contenue dans la structure (*cf chapitre 7*).

Où échantillonner ?

Les prélèvements peuvent s'effectuer en surface ou en profondeur, soit le long d'un transect (de 2 à 5 km), soit à l'arrêt sur un point fixe. Les transects permettent de couvrir une zone plus vaste et détecter un plus grand nombre d'espèces, alors que le point fixe offre une vision localisée et ponctuelle de la biodiversité.

Quand échantillonner ?

La quantité d'ADN libérée par les organismes dans le milieu n'est pas constante et mal connue pour certaines espèces. Elle varie selon la période de l'année, de la journée ou des conditions physiologiques de l'individu. Certaines espèces sont susceptibles de libérer de l'ADN en plus faible quantité. Selon les conditions du milieu, les molécules d'ADN se dégradent plus ou moins vite et il est compliqué de déterminer précisément jusqu'à quelle distance le signal ADN est présent. D'après certaines études, l'ADNe peut être détecté de quelques dizaines à quelques centaines de mètres de sa source. La demi-vie de l'ADNe est de l'ordre de quelques heures à 72 h environ. La recherche travaille sur des modèles prédictifs pour estimer l'abondance réelle des espèces à partir de l'ADNe.

Pour optimiser la stratégie d'échantillonnage, il est préférable d'organiser les prélèvements en fonction de l'activité des espèces cibles (reproduction, etc.) et d'éviter les périodes de grand froid (peu d'activités de certaines espèces) ou de grosse chaleur (bloom algal possible).

Les conditions météorologiques doivent également être favorables et stables.

Selon quelles réglementations en vigueur ?

Le Protocole de Nagoya régit l'accès aux ressources génétiques (comme l'ADNe) et assure un partage juste des avantages découlant de leur utilisation. En France, la loi biodiversité de 2016 l'applique sur le territoire national, y compris dans les DROM (Guadeloupe, Martinique, Guyane, La Réunion, Mayotte).

Les collectivités d'Outre-mer comme la Nouvelle-Calédonie, Saint-Barthélémy et la Polynésie française ont leurs propres réglementations locales spécifiques, même si elles s'alignent sur les principes du Protocole.

Pour l'ADNe, la simple collecte d'échantillons environnementaux n'est généralement pas soumise aux règles du Protocole. C'est l'analyse et l'utilisation des

informations génétiques contenues dans cet ADNe qui déclenchent l'application du Protocole. Une déclaration est requise pour la recherche non commerciale, tandis qu'une autorisation est nécessaire pour un usage commercial.

Il est nécessaire de toujours consulter les autorités compétentes (nationales ou locales selon le territoire) et d'obtenir le consentement des communautés locales si leurs connaissances traditionnelles sont associées aux ressources génétiques utilisées.

Il est essentiel d'optimiser préalablement le protocole de terrain et les techniques de laboratoire en tenant

compte de la persistance de l'ADNe avec la mise en place d'une étude pilote afin de s'assurer que le plan d'échantillonnage est approprié.

Une note de PatriNat, précisant la manière optimale de bancariser les données d'ADNe avec le renseignement des protocoles suivis ainsi que des métadonnées associées, a été élaborée afin d'harmoniser les pratiques des producteurs de données : <https://www.patrnat.fr/fr/actualites/un-cadre-pour-partager-stocker-et-diffuser-des donnees-issues-dadn-environnemental-7335>

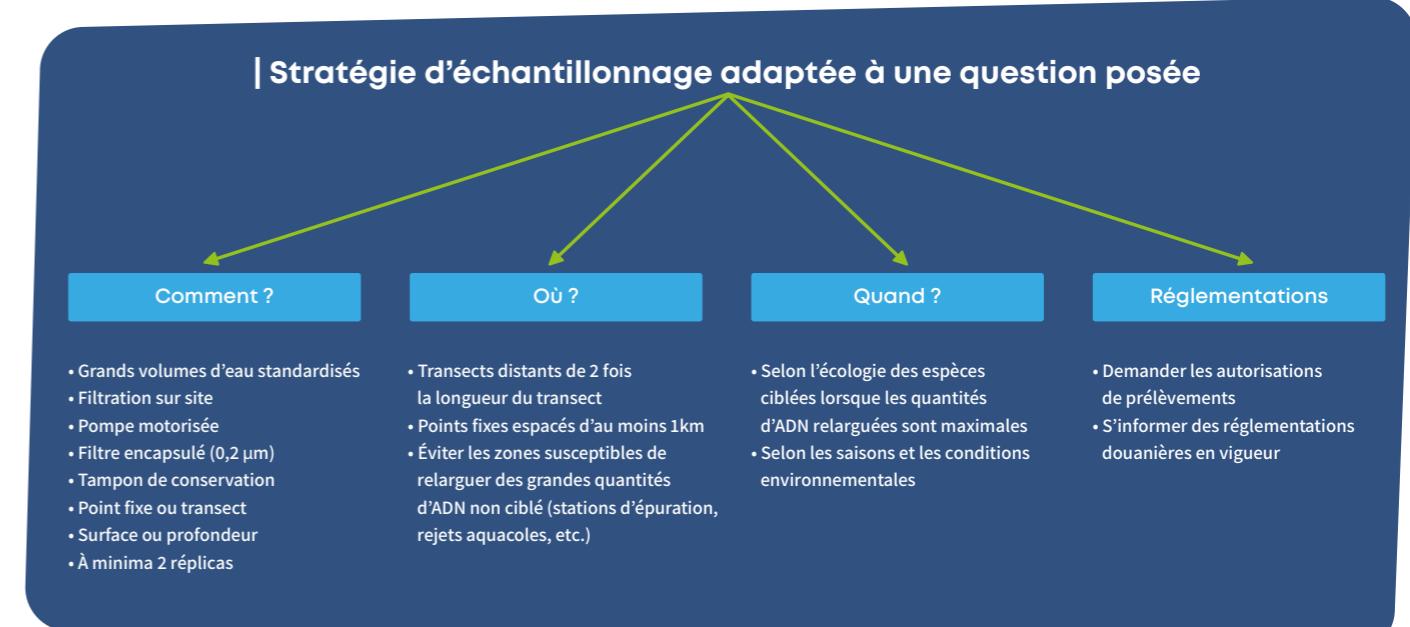


Figure 37. Présentation de la stratégie d'échantillonnage adaptée à une question posée issue de Giraud et al. (2024)

B | SUR LE TERRAIN

La collecte d'échantillons en milieu aquatique repose sur le prélèvement de plusieurs litres d'eau, dont l'ADN est ensuite capturé à l'aide d'un filtre fermé. Cette filtration peut être réalisée directement sur site ou après transport en laboratoire.

Dans les deux cas, les prélèvements sont réalisés à l'aide d'une pompe, d'une capsule de filtration, d'un tuyau et d'une crèpaine.

Des précautions strictes doivent être prises pour éviter la contamination : changement systématique de gants et de matériel entre les échantillons, et nettoyage rigoureux des équipements. Ces étapes sont indispensables pour garantir la fiabilité des données issues du séquençage.



Figure 38. Photo d'une pompe motorisée © Clarisse Thellier



Figure 39. Capsule de filtration, bouchons et tampon de conservation (gauche) et tuyau muni d'une crépine et paire de gants. Images extraites du rapport Giraud et al. (2024) © SPYGEN

C | EXTRACTION, AMPLIFICATION ET SÉQUENÇAGE

Extraction de l'ADNe

L'extraction permet d'isoler l'ADNe contenu dans les échantillons collectés, en le purifiant au maximum. Ce processus comprend généralement 4 étapes :

- lyse : les membranes cellulaires sont détruites par méthodes mécaniques (broyage), chimiques (solvants), et/ou enzymatiques (protéinases),
- clarification : l'ADNe est séparé des composantes cellulaires et solubilisé,
- lavages et élution : les substances organiques et inorganiques résiduelles sont éliminées par lavages successifs (éthanol ou tampon). L'ADN ainsi purifié est résolubilisé.

Amplification grâce à une PCR

L'objectif est d'amplifier un fragment d'ADN prélevé jusqu'à des quantités détectables, ce qui est indispensable car l'ADN est généralement très dilué dans le milieu. La PCR est une technique qui permet de "photocopier" des millions de fois de petits fragments d'ADN. La PCR est possible grâce à des amorces spécifiques de petits morceaux d'ADN synthétiques qui se fixent à la séquence de l'espèce ou du groupe recherché.

Plusieurs variantes de PCR sont utilisées, en fonction des objectifs et des moyens :

- PCR : fournit une détection qualitative (présence/absence de l'espèce).
- qPCR (quantitative PCR) : offre une information semi-quantitative sur l'ADN cible. Le signal fluorescent, s'intensifiant à mesure que l'ADN s'accumule, est comparé à celui produit par une quantité connue d'ADN, permettant d'estimer si une espèce est «plus ou moins présente».
- dPCR (digital PCR) ou ddPCR (digital droplet PCR) : permet une approche semi-quantitative plus précise, comptant le nombre exact de molécules d'acide nucléique pour chaque espèce.

Le choix de la méthode de PCR, ainsi que le nombre de cycles et de réplicats, dépendent des objectifs de l'étude et des ressources disponibles.

Séquençage

Le séquençage permet de «lire» le code génétique des fragments d'ADN amplifiés et de les traduire en texte. La profondeur de séquençage est un paramètre important à prendre en compte : elle correspond au nombre de fois qu'un même fragment d'ADN est lu lors du séquençage. Plus la profondeur de séquençage est importante, plus on peut espérer trouver de l'ADN peu abondant dans l'échantillon analysé. Mais le coût de l'échantillon augmente. En général, les études sur l'ADN visent une profondeur de séquençage comprise entre 50 000 et 200 000 séquences par échantillon mais peuvent aller jusqu'à un million de séquences. Il est donc utile d'augmenter cette profondeur si l'objectif est la détection d'espèces rares.

D | ANALYSES BIOINFORMATIQUES & RÉSULTATS

Les logiciels de bioinformatique comparent les séquences d'ADN obtenues avec des bases de référence (telles que GenBank ou Bold, bases de référence en libre accès) afin d'associer chaque fragment d'ADN à un taxon probable et ainsi identifier le taxon (à la famille, au genre, à l'espèce, etc.).

Ces bases de référence en libre accès peuvent être incomplètes ou contenir des erreurs. De plus, l'accès à d'autres bases de référence est souvent restreint en raison de la propriété intellectuelle des chercheurs. Et certaines bases de référence couvrent préférentiellement certaines zones ou certains taxons. Par conséquent, l'assignation taxonomique peut se révéler être un processus complexe et parfois incertain. Le Muséum National d'Histoire Naturelle et PatriNat portent un projet de référentiel national de séquences génétiques pour les espèces des territoires français rattaché à TaxRef (<https://www.patrinat.fr/fr/actualites/vers-un-referentiel-national-des-sequences-genetiques-des-espices-des-territoires>).



Sciences participatives

L'ADNe peut être un bon outil pour les sciences participatives et le grand public peut facilement être mobilisé. La société SPYGEN spécialisée en ADNe a par exemple participé à différents programmes de sciences participatives : en 2022, l'équipe de chercheurs LIENSs s'est rendue en Corse pour collecter des données d'ADNe avec l'aide de classes de primaires.

Le Cawthron Institute a mis en place l'initiative de sciences participatives "Citizens of the sea" : des outils qui permettent d'extraire l'ADNe de l'eau sont mis à disposition gratuitement pour les usagers de la mer (bateau de plaisance, bateau de marchandises, bateau de courses, etc.).

La TorpeDNA est un outil tracté derrière le bateau, utilisé dans le cadre de cette initiative pour la filtration



Photo : Capture vidéo du protocole de collect ADNe © Citizen of the sea

de l'eau. De la même façon, le DNAautic est une pompe à ADNe qui s'installe dans les bateaux de course, sèchent le filtre à ADN. Ainsi, les données collectées par les usagers de la mer sont analysées par le laboratoire Cawthron Institute dans le but d'évaluer la santé des océans. (<https://www.citizensofthesea.org/>).

Le protocole est standardisé et détaillé dans cette vidéo : https://youtu.be/9k-31_44THk

référentiel-national-des-sequences-genetiques-des-espices-des-territoires).

Actuellement, les poissons constituent le taxon le plus étudié pour alimenter les bases de séquences de référence : il est assez facile de détecter de l'ADN de poissons dans l'eau (marqueurs génétiques efficaces bien établis). Par exemple, avec le marqueur 12S, environ 36 % des espèces de poissons ont été séquencées dans l'océan Indien, 25 % aux Antilles et 44 % en Polynésie (données disponibles sur le site : <https://shiny.cefe.cnrs.fr/GAPeDNA/>). En revanche, pour des taxons tels que les coraux, les algues et les invertébrés, les bases de référence sont actuellement moins fournies (mais des travaux sont en cours pour pallier ce manque) et l'identification de marqueurs ADN adéquats s'avère plus complexe. Si un bon marqueur associé à ces groupes était mis en évidence, l'ADNe pourrait constituer un outil prometteur pour le recensement des coraux, permettant potentiellement une identification précise jusqu'au niveau de l'espèce (voir le paragraphe "En savoir plus sur les marqueurs").

E | MÉTRIQUES & RENDUS

L'ADNe permet de générer un inventaire de la biodiversité présente dans un écosystème donné, en identifiant les organismes à différents niveaux taxonomiques — famille, genre, espèce — en fonction de la qualité et de l'exhaustivité des bases de séquences de référence utilisées pour l'assignation taxonomique.

Les résultats obtenus peuvent être traduits en métriques écologiques telles que la richesse spécifique, la diversité alpha et bêta, la composition des communautés, ou encore la détection d'espèces indicatrices, rares ou envahissantes.

3.3 | Synthèse des avantages-inconvénients de l'ADNe

À QUOI ÇA SERT ?

L'ADN environnemental (ADNe) est une méthode qui permet de détecter la présence d'espèces en analysant l'ADN qu'elles laissent dans leur environnement, sans nécessiter leur observation ou capture directe. Cette approche est particulièrement utile pour faire un inventaire d'espèces, notamment les poissons, détecter des

espèces rares ou difficiles à observer en suivi UVC et pour identifier l'arrivée d'espèces exotiques envahissantes. Sur le terrain, sa mise en œuvre est relativement simple après une formation, ce qui facilite l'échantillonnage sur de grandes étendues et peut même soutenir des projets de science participative.

QUELLES SONT LES LIMITES ET LES CONTRAINTES ?

Un des principaux obstacles à l'utilisation de l'ADNe est lié aux bases de séquences de référence. En effet, l'efficacité de l'identification taxonomique repose sur la qualité et l'accessibilité des bases de référence. Or, ces bases sont souvent incomplètes voire erronées, et de nombreuses séquences restent la propriété de laboratoires ou de chercheurs, ce qui freine leur intégration dans des outils de diagnostic partagés et ouverts.

D'autre part, les protocoles d'échantillonnage sur le terrain et en laboratoire sont très variables selon l'objectif de l'étude et les préconisations des laboratoires. Les variations méthodologiques entre les études — volumes d'eau filtrés, types de filtres utilisés, durées et conditions d'échantillonnage, etc. — compliquent la comparaison des résultats et nuisent à la reproductibilité des analyses à l'échelle globale.

Par ailleurs, le coût encore élevé des analyses en laboratoire, associé à la nécessité de disposer d'équipements spécialisés est à prendre en compte.

Un autre défi concerne la sensibilité élevée de l'ADNe à la contamination, ce qui accroît le risque de faux positifs (détectio

La recherche se tourne vers des matériaux réutilisables ou biodégradables.

De plus, les processus de dégradation, de transport et de persistance de l'ADN dans les milieux aquatiques sont encore insuffisamment compris. En milieu marin, les molécules d'ADN restent détectables pendant quelques jours. Cette incertitude limite la capacité à relier précisément les signaux d'ADNe à la présence réelle, dans le temps et dans l'espace, des espèces ciblées.

Enfin, bien que l'ADNe permette de détecter la présence d'organismes, il ne fournit actuellement pas d'informations fiables sur leur abondance ou leur biomasse : l'approche reste semi-quantitative et au stade de la recherche. Réaliser des analyses quantitatives de structure de communautés ou de dynamique de population reste aujourd'hui mieux abordé par des approches complémentaires.



Photo : © Julien Wickel

3.4 | Eléments complémentaires

- Les pompes à ADNe peuvent être installées sur n'importe quel type de support (robot de surface, bateau, ROV, etc.). Un robot de surface ou ASV (Autonomous Surface Vessel) a été utilisé à la Réunion pour faire des analyses d'ADNe (projet "p-PUMPIIT" Ifremer antenne de La Réunion). Ce "catamaran" est équipé d'une pompe ADNe de la marque Blue Robotics (<https://bluerobotics.com/store/boat/blueboat/blueboat/>). Il est caractérisé par une robustesse accrue, ce qui est un avantage pour l'emport de charges plus importantes (pompe à ADNe) sans compromettre la stabilité de la plateforme. L'emport possible était de 18 filtres soit 6 sites (trois filtres par site). Dans les conditions testées dans le lagon de La Réunion le robot filtre 18 litres d'eau par station (6 L par filtre). En parallèle, un ordinateur relie le prélèvement à la position GPS.
- L'ADNe est une méthode qui peut être utilisée en complémentarité des comptages visuels UVC et des BRUVs. En effet, l'ADNe permet de voir les espèces

cryptiques, cachées, le BRUV attire les espèces craintives, les super prédateurs, et les UVC recensent les espèces moins craintives, directement associées à l'habitat.



Figure 40. "catamaran" muni des filtres ADNe - projet p-PUMPIIT © Ifremer

3.5 | En savoir plus sur les marqueurs

L'identification taxinomique repose fortement sur les marqueurs et les amores choisis. Les marqueurs correspondent aux régions spécifiques de l'ADN ayant une localisation connue dans le génome (par exemple un gène ou une partie d'un gène) : c'est la zone qui sera amplifiée. Les amores sont de courtes séquences synthétiques d'ADN qui servent de point de départ à la synthèse du brin complémentaire par une ADN-polymérase lors de l'amplification.

Les marqueurs choisis dépendent des groupes taxonomiques : plutôt mitochondriaux pour les animaux et chloroplastiques pour les plantes. Un bon marqueur doit être suffisamment variable pour distinguer les espèces entre elles (résolution taxinomique) mais suffisamment ubiquitaire pour permettre une

amplification universelle. Tous les marqueurs ne présentent pas la même performance de détection.

Pour les poissons, les marqueurs du gène 12S MiFish, 12S-V5 et Teleo sont les plus utilisés. Les poissons sont d'ailleurs les plus représentés dans les bases de références telles que GenBank ou BOLD (Barcode Of Life Data System).

À l'inverse, il n'existe pas encore de marqueurs "standards" aussi performants et largement adoptés pour les coraux et les algues par exemple. La recherche de marqueurs est un défi constant. De plus, l'effort de séquençage a été davantage tourné vers les poissons, ce qui a enrichi les bases de références en conséquence.

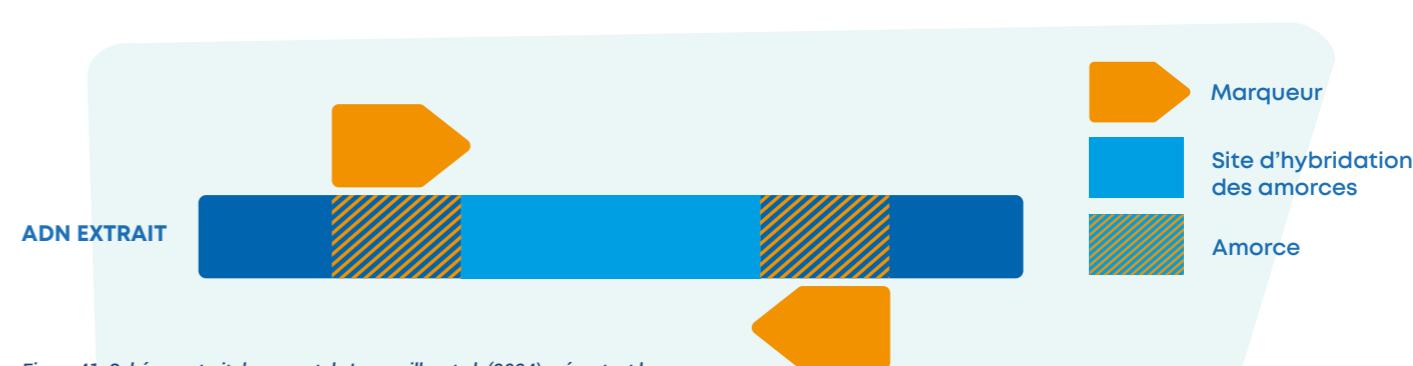


Figure 41. Schéma extrait du rapport de Lacoeulhe et al. (2024) présentant les marqueurs pour l'amplification

3.6 | En savoir plus sur les bases de séquence de références

L'approche multispécifique de l'ADNe produit, depuis la collecte des échantillons sur le terrain jusqu'à l'identification des taxons, plusieurs types de jeux de données :

1. les données brutes : séquences d'ADN directement en sortie de séquenceur
2. les données analysées : séquences après analyses bio-informatiques et comparaisons avec un ou des bases de séquences de référence

Les données brutes et les données analysées doivent être conservées dans les archives ou entrepôts de données thématiques.

- Si le jeu de données a une couverture nationale ou infranationale, il faut le déposer dans l'entrepôt thématique ENA (European Nucleotide Archive) : <https://www.ebi.ac.uk/ena/browser/home>.
- Si le jeu de données a une couverture internationale, il faut le déposer dans le GBIF: <https://www.gbif.org/>

L'European Nucleotide Archive (ENA), hébergé par l'Institut Européen de Bioinformatique du Laboratoire Européen de Biologie Moléculaire (EMBL-EBI), est l'une des principales bases de données internationales de séquences moléculaires. Deux autres bases jouent un rôle équivalent :

- GenBank, gérée par le National Center for Biotechnology Information (NCBI) aux États-Unis,
- DNA Data Bank of Japan (DDBJ), au Japon.

Ces trois bases sont interconnectées et fonctionnent comme des miroirs, tout en conservant certaines informations propres. Bien que GenBank soit souvent considérée comme la plus complète, certaines séquences n'y figurent pas ; il est donc généralement recommandé de privilégier l'ENA.

Le Barcode of Life Datasystems (BOLD : <https://boldsystems.org/>) est une plateforme d'acquisition, de stockage, d'analyse et de publication de données génétiques constituant une base de référence moléculaire à vocation d'identification des espèces. GenBank et Bold proposent non seulement une base de données, accessible via un portail d'accès, mais aussi un outil de comparaison de séquences avec toutes les séquences présentes en base pour une éventuelle identification moléculaire. GenBank et Bold peuvent donc être utilisées comme base de référence mais ces outils ne garantissent pas une expertise taxonomique car les données ne sont pas vérifiées. Beaucoup de bases de référence sont la propriété de chercheurs et ne sont pas accessibles publiquement. Le Muséum Nationale d'Histoire Naturelle et PatriNat portent un projet de référentiel national de séquences génétiques pour les espèces des territoires français rattaché à TaxRef (<https://www.patrnat.fr/fr/actualites/vers-un-referentiel-national-des-sequences-genetiques-des-espices-des-territoires>).

3. les données d'occurrence : nombre de taxons assignés validés de préférence par un expert, associés à minima au lieu, à la date de prélèvement et au collecteur de l'échantillon.
- Si le jeu de données a une couverture nationale ou infranationale, il faut le déposer dans le SINP : [https://www.patrnat.fr/fr/systeme-d'information-de-l'inventaire-du-patrimoine-naturel-sinp-6044](https://www.patrnat.fr/fr/systeme-d-information-de-linventaire-du-patrimoine-naturel-sinp-6044)
- Si le jeu de données a une couverture internationale, il faut le déposer dans le GBIF : <https://www.gbif.org/>

3.7 | Étude de cas

MARTINIQUE

Une étude utilisant la méthode de l'ADNe a été menée au sein du Parc Naturel Marin de Martinique (de 2019 à 2022). Accessible sur le site de l'Ifremer

- **Porteur du projet** : Parc Naturel Marin de Martinique et sanctuaire Agoa en partenariat avec la Marine Nationale Française.
- **Prestataire** : SPYGEN
- **Objectif** : analyse de la biodiversité de la macrofaune marine (mammifères, poissons osseux, élastomébranches) contenue dans l'eau de mer de surface.
- **Matériels et méthodes** : les prélèvements ont été réalisés pendant des transects de 5 km de long réalisés sur des semi-rigides à une vitesse de quatre à cinq nœuds et d'une durée de 30 minutes chacun. Les prélèvements ont été réalisés sur neuf sites.

Résultats :

- Des mammifères ont été détectés avec l'ADNe mais pas aperçus visuellement :
 - dauphin tacheté pantropical
 - dauphin de Fraser
 - espèces appartenant à la sous-famille des Delphinidae
 - opossum à queue de rat : son aire de répartition se situe en Amérique du Sud (erreur ou première ?)
- Des élastomébranches : raie pastenague violette, raie léopard.
- Des poissons osseux : 102 taxons identifiés

Coût :

55 677 euros.

POLYNÉSIE FRANÇAISE

En Polynésie française, l'ADN environnemental est devenu un outil essentiel pour surveiller les espèces invasives introduites par les navires et l'activité portuaire (2024).

- **Porteur du projet** : Centre de Recherches Insulaires et Observatoire de l'Environnement - CRIOBE (Douard et al. 2024)
- **Objectif** : Certaines espèces invasives peuvent être vecteurs d'agents pathogènes susceptibles de menacer les mollusques locaux et l'industrie perlière, vitale pour l'économie polynésienne (Ardura et al., 2021). Une étude, publiée en 2020 (Garcia-Vazquez et al., 2021), a montré que près d'un cinquième des mollusques et cirripèdes analysés dans les ports et sur les coques de bateaux appartenaient à des espèces exotiques, avec une concentration plus forte dans les ports abrités.
- **Matériels et méthodes** : L'étude de 2024 a combiné le barcoding d'individus et le métabarcoding d'échantillons mixtes pour révéler la présence d'organismes envahissants dans six ports : barnacles, bryozoaires, algues et huîtres.
- **Résultats** : Même s'il reste encore des procédures à mettre en place pour optimiser et homogénéiser les protocoles d'échantillonnage et d'analyse, les résultats montrent le caractère prometteur de l'outil ADNe dans le suivi des espèces invasives pour la biosécurité maritime (Douard et al., 2024) mais aussi pour les suivis de biodiversité des écosystèmes coralliens. Ces recherches ont

également mis en évidence des différences entre les communautés fixées aux navires et celles présentes sur les quais. Ces résultats démontrent une fois de plus l'importance du trafic maritime dans la transformation de la biodiversité locale dans les îles du Pacifique.

Références étude de cas: Il est possible de consulter les études dans les articles scientifiques suivants :

- Garcia-Vazquez E, Ardura A, Planes S. 2020. DNA mtCOI Barcodes for Maritime Biosecurity: A Proof of Concept in French Polynesia Ports. *Frontiers in Ecology and Evolution*, 8, 2020.00179.
- Ardura A, Gonzalez-Sanz A, Clua E, Planes S, Garcia-Vazquez E. 2021. Beware of oysters. Rapid advance of non-native species in tropical Pacific islands. *Marine Environmental Research*, 170, 105436.
- Douard M, Fernandez S, Garcia-Vazquez E, Planes S. 2024. Rapid expansion and ecosystem health risk of invasive biopollutants dispersed by maritime traffic in French Polynesia. *Marine Pollution Bulletin*, 208, 116927.
- Ardura A, Fernandez S, Hagenauer A, Planes S, Garcia-Vazquez E. 2021. Ship-driven biopollution: How aliens transform the local ecosystem diversity in Pacific islands. *Marine Pollution Bulletin*, 166, 112251

3.8 | Références

- Bunholi, I. V., Foster, N. R., & Casey, J. M. (2023). Environmental DNA and RNA in aquatic community ecology: Toward methodological standardization. *Environmental DNA*, 5(6), 1133–1147. <https://doi.org/10.1002/edn3.476>
- Gao, C., Garren, M., Penn, K., Fernandez, V. I., Seymour, J. R., Thompson, J. R., Raina, J.-B., & Stocker, R. (2021). Coral mucus rapidly induces chemokinesis and genome-wide transcriptional shifts toward early pathogenesis in a bacterial coral pathogen. *The ISME Journal*, 15(12), 3668–3682. <https://doi.org/10.1038/s41396-021-01024-7>
- Collins, R. A., Bakker, J., Wangensteen, O. S., Soto, A. Z., Corrigan, L., Sims, D. W., Genner, M. J., & Mariani, S. (2018). Persistence of environmental DNA in marine systems. *Communications Biology*, 1, 185. <https://doi.org/10.1038/s42003-018-0192-6>
- Dalongeville, A. & Boulanger, E. & Marques, V. & Charbonnel, E. & Hartmann, V. & Santoni, M.C. & Deter, J. & Valentini, A. & Lefant, P. & Boissery, P. & Dejean, T. & Velez, L. & Pichot, F. & Sanchez, L. & Arnal, V. & Bockel, T. & Delaruelle, G. & Holon, F. & Milhau, T. & Romant, L. & Manel, S. & Mouillot, D. (2022). Benchmarking eleven biodiversity indicators based on environmental DNA surveys: More diverse functional traits and evolutionary lineages inside marine reserves. *Journal of Applied Ecology*, 59(11), 2803–2813 DOI: 10.1111/1365-2664.14276
- Giraud, C., Boissery, P., Dalongeville, A., Dejean, T., Deter, J., Lacoueilhe, A., & Mouillot, D. (2024). Guide d'utilisation de l'ADN environnemental en milieu marin. Connaître, comprendre et utiliser l'ADNe pour préserver la biodiversité marine (88 p.).
- González Goñi, S. (2017). Comparación de herramientas de análisis de imagen: eficiencia y uso en ecología bentónica de sustrato duro.
- Harrison, J. B., Sunday, J. M., & Rogers, S. M. (2019). Predicting the fate of eDNA in the environment and implications for studying biodiversity. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 286(1915), 20191409. <https://doi.org/10.1098/rspb.2019.1409>
- Aurélie Lacoueilhe, Gaël P.J. Denys, Pascal Dupont, Anne-Sophie Archambeau, Bertrand Bed'hom, et al. Référentiel des séquences génétiques des espèces de France: note pour la mise en place d'un nouvel outil national. PatriNat (OFB-MNHN-CNRS-IRD). 2025, 25 p. + annexes. hal-04931482
- Lacoueilhe, A., Hérard, K., Poncet, L., & Touroult, J. (2024). Intérêts et enjeux de l'utilisation de l'ADN environnemental pour l'inventaire, le suivi et la surveillance de la biodiversité des milieux dulcicoles, marins et terrestres (52 p.). PatriNat (OFB-MNHN-CNRS-IRD). <https://hal.science/hal-04561160>
- Lacoueilhe, A., Pamerlon, S., d'Hollande, L., Maurel, N., Robert, S., et al. (2025). Données issues d'ADN environnemental (ADNe): Recommandations pour les partager, les stocker et les diffuser. <https://hal.science/hal-05008115>
- Marcelino, V., Verbruggen, H. Multi-marker metabarcoding of coral skeletons reveals a rich microbiome and diverse evolutionary origins of endolithic algae. *Sci Rep* 6, 31508 (2016). <https://doi.org/10.1038/srep31508>
- Marques, V., Milhau, T., Albouy, C., Dejean, T., Manel, S., Mouillot, D., & Juhel, J. B. (2021). GApPeDNA: Assessing and mapping global species gaps in genetic databases for eDNA metabarcoding. *Diversity and Distributions*, 27(10), 1880–1892.
- Mathon, L., Marques, V., Manel, S., Albouy, C., Andrello, M., Boulanger, E., ... & Mouillot, D. 2023. The distribution of coastal fish eDNA sequences in the Anthropocene. *Global Ecology and Biogeography*, 32(8), 1336–1352.
- Miya, M., Sato, Y., Fukunaga, T., Sado, T., Poulsen, J. Y., Sato, K., Minamoto, T., Yamamoto, S., Yamanaka, H., Araki, H., Kondoh, M., & Iwasaki, W. (2015). MiFish, a set of universal PCR primers for metabarcoding environmental DNA from fishes: Detection of more than 230 subtropical marine species. *Royal Society Open Science*, 2(7), 150088. <https://doi.org/10.1098/rsos.150088>
- Murakami, H., Yoon, S., Kasai, A., Minamoto, T., & Yamamoto, S. (2019). Dispersion and degradation of environmental DNA from caged fish in a marine environment. *Fisheries Science*, 85(2), 327–337. <https://doi.org/10.1007/s12562-018-1282-6>
- National Coral Reef Monitoring Program. (n.d.). Assessing and monitoring cryptic reef diversity of colonizing marine invertebrates using autonomous reef monitoring structures (ARMS) deployed at coral reef sites across Wake Atoll in the Pacific Remote Island Areas from 2014-03-16 to 2017-04-23 (NCEI Accession 0176227) [Data set]. <https://www.ncei.noaa.gov/access/metadata/landing-page/bin/iso?id=gov.noaa.nodc:0176227> (consulté le 19 mars 2025)
- Prié, V., A. Danet, A. Valentini, M. Lopes-Lima, P. Taberlet, A. Besnard, N. Roset, O. Gargominy & T. Dejean. 2023. Conservation assessment based on large-scale monitoring of eDNA: application to freshwater mussels. *Biological Conservation* 283, 110089. DOI: 10.1016/j.biocon.2023.110089
- Riaz, T., Shehzad, W., Viari, A., Pompanon, F., Taberlet, P., & Coissac, E. (2011). EcoPrimers: Inference of new DNA barcode markers from whole genome sequence analysis. *Nucleic Acids Research*, 39(21), e145. <https://doi.org/10.1093/nar/gkr732>
- Sato, M., Inoue, N., Nambu, R., Furuichi, N., Imaizumi, T., & Ushio, M. (2021). Quantitative assessment of multiple fish species around artificial reefs combining environmental DNA metabarcoding and acoustic survey. *Scientific Reports*, 11, 19477. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-98926-5>
- Scriver, M., Rees, E. E., Young, N., & McKee, J. (2023). Harnessing decay rates for coastal marine biosecurity applications: A review of environmental DNA and RNA fate. *Environmental DNA*. <https://doi.org/10.1002/edn3.405>
- Takahashi, M., Saccò, M., Kestel, J. H., Nester, G., Campbell, M. A., Van Der Heyde, M., Heydenrych, M. J., Juszkiewicz, D. J., Nevill, P., Dawkins, K. L., Bessey, C., Fernandes, K., Miller, H., Power, M., Mousavi-Derazmahalleh, M., Newton, J. P., White, N. E., ... Allentoft, M. E. (2023). Aquatic environmental DNA: A review of the macro-organismal biomonitoring revolution. *Science of The Total Environment*, 873, 162322. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.162322>
- Thurber, R. V., Willner-Hall, D., Rodriguez-Mueller, B., Desnues, C., Edwards, R. A., Angly, F., ... & Rohwer, F. (2009). Metagenomic analysis of stressed coral holobionts. *Environmental microbiology*, 11(8), 2148–2163.
- Valentini, A., Taberlet, P., Miaud, C., Civade, R., Herder, J., Thomsen, P. F., Bellemain, E., Besnard, A., Coissac, E., Boyer, F., Gaboriaud, C., Jean, P., Poulet, N., Roset, N., Copp, G. H., Geniez, P., Pont, D., ... Dejean, T. (2016). Next-generation monitoring of aquatic biodiversity using environmental DNA metabarcoding. *Molecular Ecology*, 25(4), 929–942. <https://doi.org/10.1111/mec.13428>
- Wegley, L., Edwards, R., Rodriguez-Brito, B., Liu, H., & Rohwer, F. (2007). Metagenomic analysis of the microbial community associated with the coral *Porites astreoides*. *Environmental microbiology*, 9(11), 2707–2719.
- Couëdel, M. (2024, 10 mars). Entretien personnel.
- Planes, S. (2025, 20 mars). Entretien personnel.
- Lacoueilhe, A. & Poncet, R. & Simian, G. (2025, 27 mars). Entretien personnel.
- Pochon, X. (2025, 28 mars). Entretien personnel.
- Cheminée, A. (2025, 13 mai). Entretien personnel.
- Maréchal, J-P (2025, 16 avril). Entretien personnel.
- Ritson-Williams, R. (2025, 4 juin). Entretien personnel.
- Claes, J. (2025, 4 juillet). Entretien personnel.

L'acoustique passive

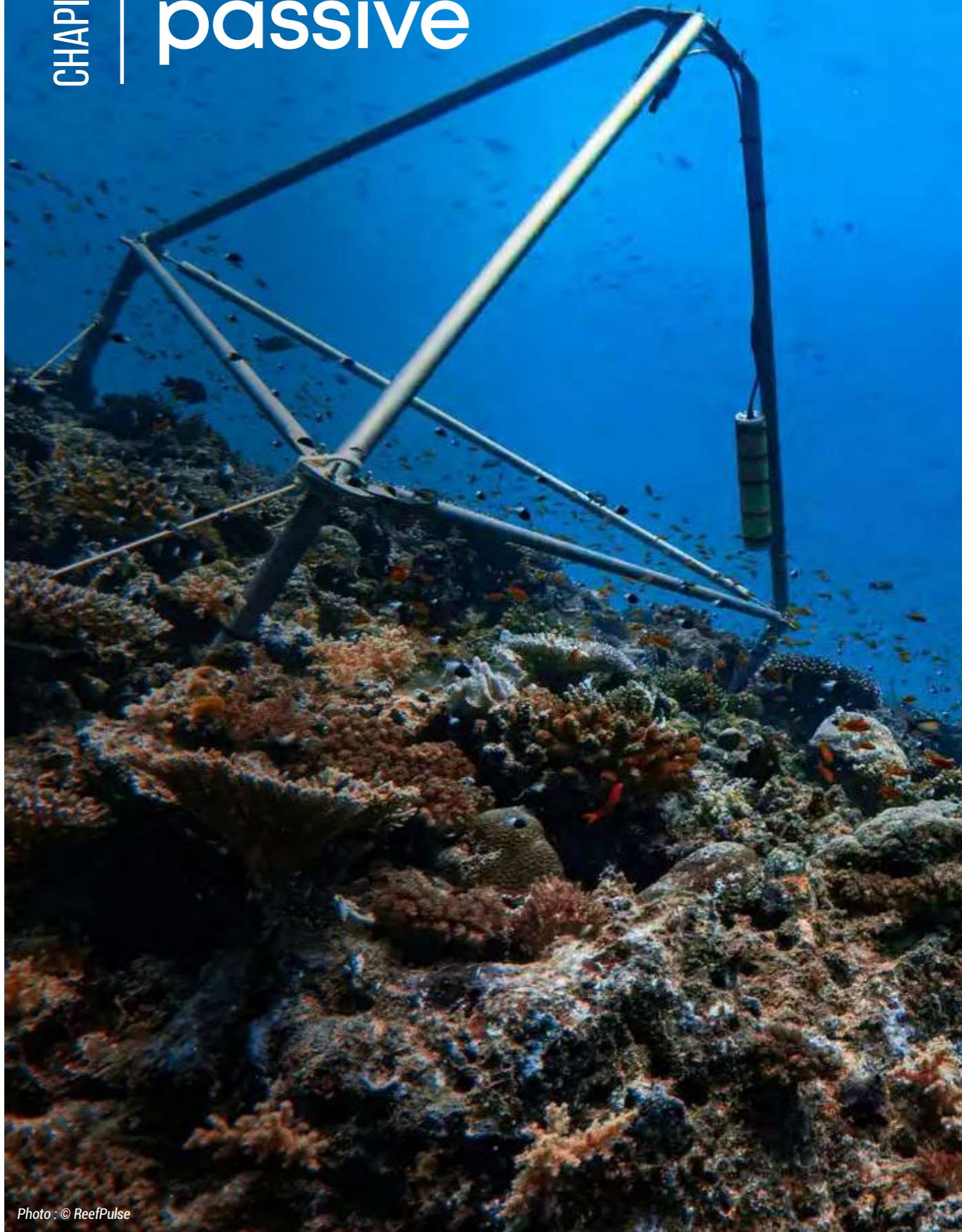


Photo : © ReefPulse

4.1 | Introduction

Dans le milieu marin, l'utilisation de l'acoustique passive a longtemps été cantonnée aux études bioacoustiques en particulier à celles relatives à la pollution sonore et aux cétacés. Alors que les études bioacoustiques sont focalisées sur l'étude du comportement des individus d'une espèce, l'éco-acoustique s'intéresse à l'ensemble des espèces et à leurs interactions en proposant une nouvelle forme d'approche écosystémique fondée sur l'enregistrement du son ambiant, ou « paysage sonore ». Par analogie avec la musique, la bioacoustique se focalise sur un instrument en particulier alors que l'éco-acoustique étudie l'orchestre dans sa globalité.

Le paysage sonore des récifs coralliens résulte des activités acoustiques volontaires (e.g. vocalisations lors de parades nuptiales, signaux de défense...) ou involontaires (e.g. déplacements sur le substrat, prédation, fuite...) de la multitude d'organismes qu'ils abritent, mais aussi des sons créés par des processus physiques (e.g. vagues, vent, pluie...) et par les activités humaines (e.g. moteurs de bateaux, plongeurs, explorations sismiques,...).

Les phases clés d'un suivi par acoustique passive sont :

1. l'installation du système d'enregistrement acoustique,
2. la récolte de données et désinstallation du système d'enregistrement acoustique,
3. le traitement des données.

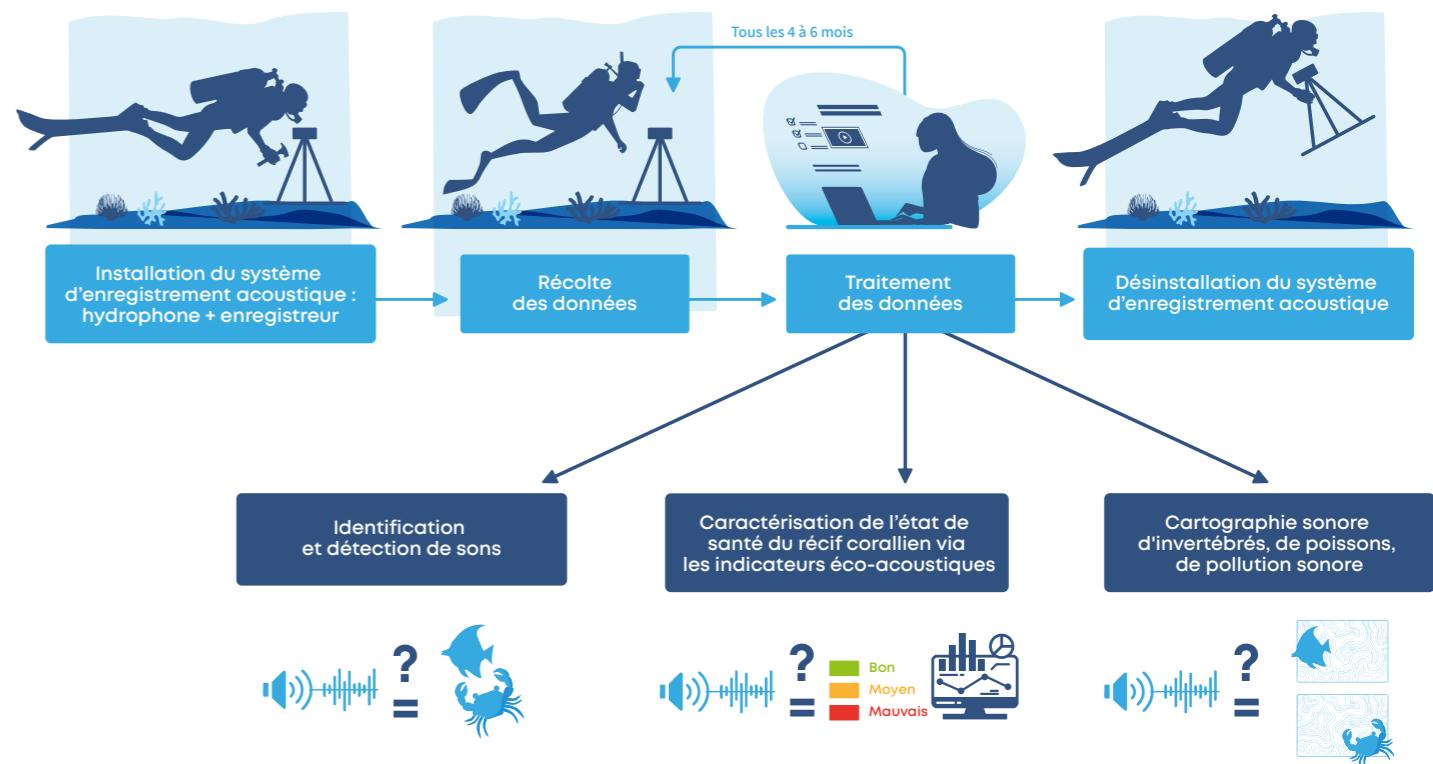


Figure 42. Présentation des différentes phases de la méthode de suivi par acoustique passive

Objectif de gestion	Description											
	Echelle géographique	Echelle temporelle	Cible	Métriques, rendus	Précision rendus (quel paramètre fait varier la précision ?)	Avancement R&D	Nombre de territoires testés et type d'habitat testé	Conditions d'applications	Destructif/invasif	Utilisation en sciences participatives	Communicabilité	
- Suivre en continu sur du long terme le paysage sonore d'un site - Déetecter la fréquentation d'engins à moteur - Identifier des sons associés à certaines espèces	Rayon de détection des sons mal connu : dépend de la source, de la sensibilité de l'hydrophone et substrat. (Estimation de rayon de détection : rayon de 1 à 2 km pour les invertébrés et 50 à 200 m pour les poissons).	Plusieurs mois (4 à 6 mois selon l'autonomie et la maintenance)	Poissons, invertébrés et cétacés Engins à moteur	- Indicateur éco-acoustique de l'état du milieu - Détection d'engins à moteur (fréquentation) - Identification de sons associés à quelques familles d'espèces de poissons selon l'entraînement de l'algorithme dans la région	La précision des algorithmes de détection et d'identification des sons varie selon les régions du monde et l'entraînement des modèles.	Encore au stade R&D	Testé en océan indien (PNM de Mayotte, RNNM de la Réunion, TAAF), et en Polynésie française En cours aux Antilles (Saint-Barthélémy, Guadeloupe), à la Réunion et en Nouvelle-Calédonie	Fonds de plus de 8 m (bruit de surface à éviter)	Non, excepté la fixation du support	Non	Oui : sur quelques extraits d'enregistrement acoustique.	

Terrain			Post Terrain				Cout			Complémentarité avec d'autres méthodes	
Matériel spécifique nécessaire	Expertise/ en régie	Méthodes et données accessibles en open source / Licence	Matériel spécifique nécessaire	Expertise/ en régie	Méthodes et données accessibles en open source / Licence	Besoin d'une IA	Temps terrain	Temps post terrain pour obtenir les données brutes (court/moyen/long)	Coût matériel associé		
Hydrophone, enregistreur, système d'élévation de l'hydrophone, système de fixation, (caméra optionnelle pour les suivis court terme). Maintenance : plongée tous les 4 à 6 mois pour changer la batterie et la carte SD.	Possible en régie si plongeur professionnel.	Non	Ordinateur puissant et logiciel spécial	Besoin d'une expertise	La plupart des bibliothèques sont la propriété d'experts.	Oui	1 plongée pour l'installation/désinstallation. 2 plongées par maintenance.	Long	Prix du matériel : entre 3000 et 10 000 euros et il faut ajouter les coûts d'installation.	L'acoustique passive gagne à être systématiquement intégrée à d'autres approches complémentaires (visuel, ADNe, etc.), permettant une caractérisation multidimensionnelle des communautés et des dynamiques écologiques	

Tableau 4. Récapitulatif du système d'acquisition par le son : l'acoustique passive

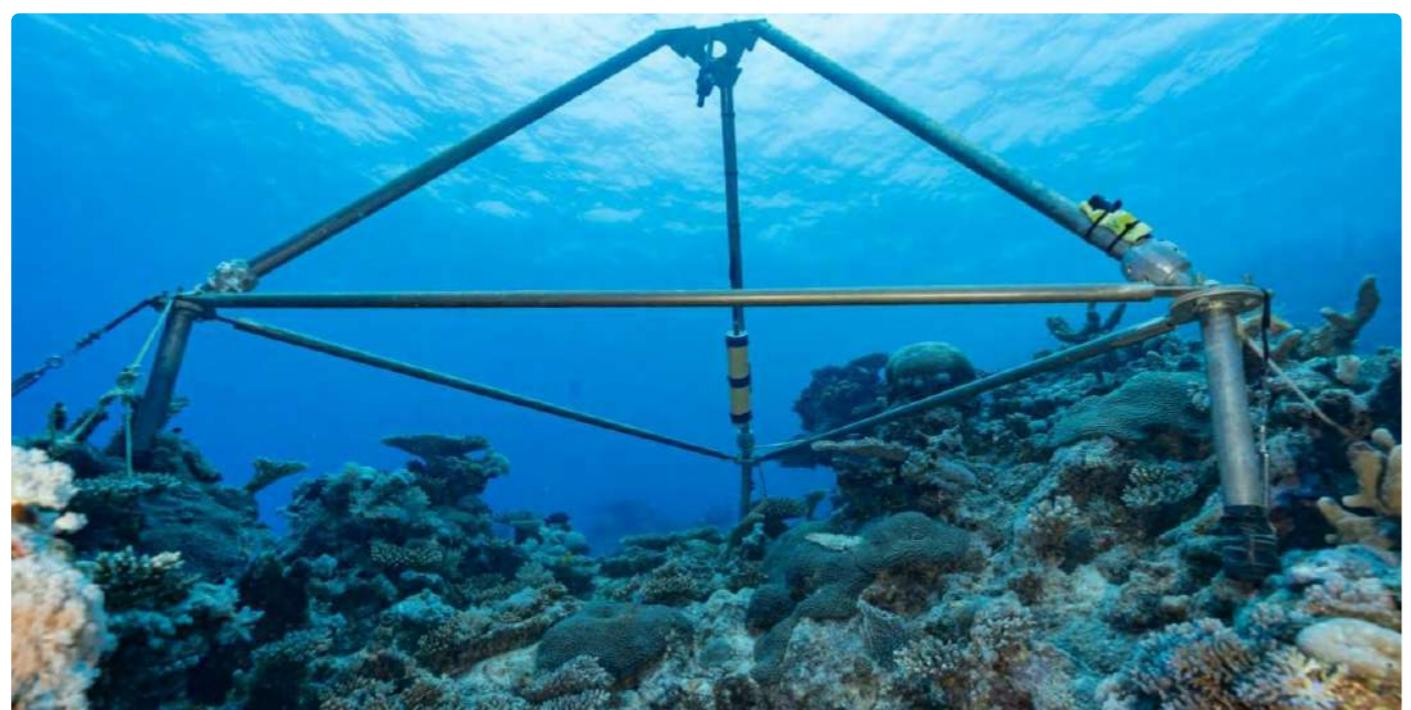


Figure 43. Photo d'un dispositif déployé par ReefPulse dans le cadre du projet SONOMAY © Sébastien Quaglietti / OFB - Parc Naturel Marin de Mayotte.

4.2 | Description détaillée

A | INSTALLATION DU SYSTÈME D'ENREGISTREMENT ACOUSTIQUE

Un système d'enregistrement acoustique se compose principalement de deux éléments indissociables :

L'Hydrophone

C'est le «micro» sous-marin, un transducteur qui convertit les ondes de pression sonores en signaux électriques. Selon la sensibilité (capacité à détecter des sons plus faibles ou des sources plus éloignées) et la gamme de fréquences d'intérêt, il faut adapter le type d'hydrophone.

- L'étude des dauphins et cachalots nécessite un hydrophone capable de capter les hautes fréquences (clics et siflements pouvant aller de plusieurs kHz à plus de 100 kHz).

Certains hydrophones, relativement coûteux, sont omnidirectionnels (ils captent le son de toutes les directions), d'autres sont unidirectionnels et plus

- L'étude des paysages sonores de récifs coralliens nécessite des hydrophones sensibles aux basses



Figure 44. Photo d'une caméra installée sur un trépied © Elise Delcour / Reef Pulse

abordables. Par exemple, certaines solutions d'entrée de gamme comme les HydroMoth (développés par Open Acoustic Devices), sont souvent moins précis car ils captent le son sur une seule «façade», limitant la

capacité à localiser précisément la source sonore. Ils sont plus adaptés à de la simple détection (ex: présence d'engins à moteur). Leur prix est d'environ 150 euros.

L'Enregistreur (ou Datalogger)

Il reçoit et stocke les signaux de l'hydrophone. Il est caractérisé par plusieurs éléments :

- Taux d'échantillonnage : c'est la vitesse à laquelle les ondes sonores sont capturées et converties en numérique. Sa valeur n'est pas fixe, elle peut être adaptée au moment du paramétrage des enregistrements. Il doit être au moins le double de la fréquence maximale que l'on souhaite capter (Théorème de Nyquist-Shannon). Ainsi, pour les récifs, un taux faible peut suffire (exprimé en Hz).
- Capacité de stockage : dépend de la durée d'enregistrement souhaitée et du taux d'échantillonnage.
- Autonomie énergétique : les batteries doivent permettre un enregistrement prolongé sans intervention.

Les systèmes acoustiques sont souvent montés sur un trépied fixé au substrat. Cette méthode assure la stabilité du dispositif face aux courants, aux vagues et aux animaux, garantissant des enregistrements

fiables et non perturbés. Elle nécessite une plongée d'installation du système acoustique avec fixation du trépied. Puis, lors du suivi (de tous les jours à tous les 4 à 6 mois en fonction du protocole d'échantillonnage), il faut envisager 2 plongées : une première plongée pour remonter l'enregistreur à la surface, enlever la carte SD et la batterie, et une deuxième plongée pour remettre l'enregistreur à l'eau.

L'association d'une caméra au système acoustique est une pratique courante et intéressante. Le retour visuel qu'elle procure facilite grandement le traitement des données acoustiques. Par exemple, observer simultanément un poisson chanter et sortir de son abri peut aider à corrélérer des sons spécifiques à des comportements ou des espèces visuellement identifiables.

B | TRAITEMENT DES DONNÉES

Identification de sons

L'identification de sons et l'association à des espèces est un aspect attrayant de l'acoustique passive. Elle est réalisée en comparant le signal sonore à identifier, avec des bibliothèques de signaux sonores déjà connus. Il n'existe pas de bases de référence mutualisées mais des bibliothèques sonores en libre accès sont disponibles sur internet, comme [GLUBS](#) (Global Library of Underwater Biological Sound) ou [FishSounds](#), cette dernière étant spécifique aux poissons. Sinon, la plupart des bibliothèques sonores sont la propriété d'experts.

L'identification peut aussi être réalisée à l'aide d'images collectées par la caméra installée sur le système d'enregistrement.

Dans le cadre du suivi des récifs coralliens, les types de sons biologiques détectables et identifiables peuvent être :

- des vocalisations de poissons, notamment chez certaines familles bien documentées : les Sciaenidae, les Serranidae, les Pomacentridae, les Holocentridae. Elles peuvent être de plusieurs types : sons comportementaux, liés à la reproduction (chants de cour, appels de frai) ou à des interactions agonistiques (défense de territoire, agressions).
- les sons de broutage, en particulier ceux émis par les poissons-perroquets, associés au raclage du substrat.
- les sons d'invertébrés benthiques, comme les claquements des crevettes-pistolets de la famille des Alpheidae, ou les bruits de grattement d'oursins et crabes.

Il est aussi possible d'identifier des cétacés, à condition que le type d'hydrophone et le taux d'échantillonnage le permette. La détection d'engins à moteur par l'acoustique peut également s'avérer être un outil intéressant d'évaluation de la fréquentation au sein d'une Aire Marine Protégée.

Il convient de souligner que l'attribution précise d'un son à une espèce reste complexe, et dépend souvent du croisement entre données acoustiques, visuelles, et contextuelles. Des approches de classification automatique, basées sur le Machine Learning ([voir chapitre 7](#)), sont de plus en plus utilisées pour faciliter cette tâche. Mais alimenter des modèles de Machine Learning est particulièrement chronophage. Pour y remédier, des algorithmes de détection sont en cours de développement dans plusieurs régions du monde. Toutefois, leur utilisation reste limitée : leur efficacité est souvent restreinte à la région pour laquelle ils ont

été conçus. Par exemple, un algorithme de détection automatique de sons de mérous qui a fait ses preuves pour des espèces caribéennes, ne sera pas opérationnel en Océan Indien et nécessitera un entraînement local. Bien que les vocalisations soient similaires, celles des mérous de l'Océan Indien diffèrent suffisamment de celles des espèces caribéennes pour induire des erreurs. En outre, le paysage acoustique (le bruit de fond) varie entre les deux régions, ce qui perturbe encore davantage les performances des algorithmes.

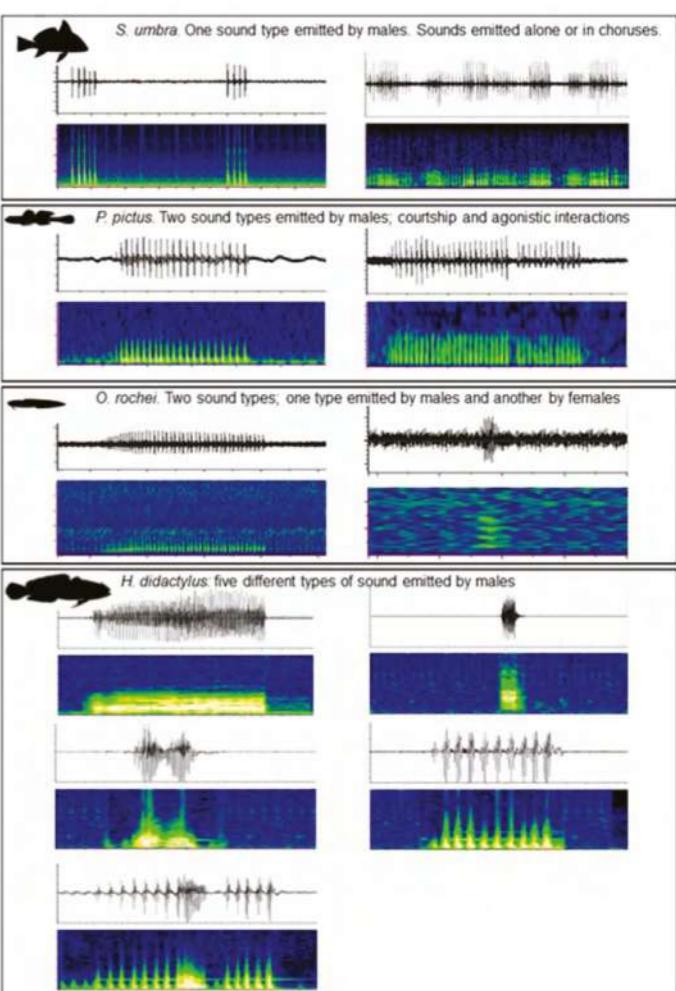


Figure 45. Exemple de signaux sonores émis par quatre espèces de poissons différents. La même espèce peut émettre plusieurs sons (Parmentier, 2018)

Identifier et associer des sons à des espèces relève encore du domaine de la R&D à ce jour.

Caractérisation de l'état d'un récif corallien via des indicateurs éco-acoustiques

Trois grands types de métriques parmi la quinzaine de métriques qui existe sont principalement retenus pour étudier l'état des récifs coralliens et comparer des sites entre eux et/ou dans le temps :

- L'intensité sonore ou "Sound Pressure Level" (SPL) mesure le volume sonore à proximité de l'hydrophone.
- La complexité sonore ou "Acoustic Complex Index" (ACI) mesure la complexité d'un enregistrement en combinant l'analyse de la variabilité du volume sonore à la fois entre bandes de fréquences et dans le temps.
- L'entropie spectrale ou "Spectral Entropy" (Hs) permet d'évaluer l'utilisation de l'espace sonore par les espèces. Elle peut mettre en évidence la dominance d'une espèce ou d'un groupe d'espèces qui émet un type de signal.

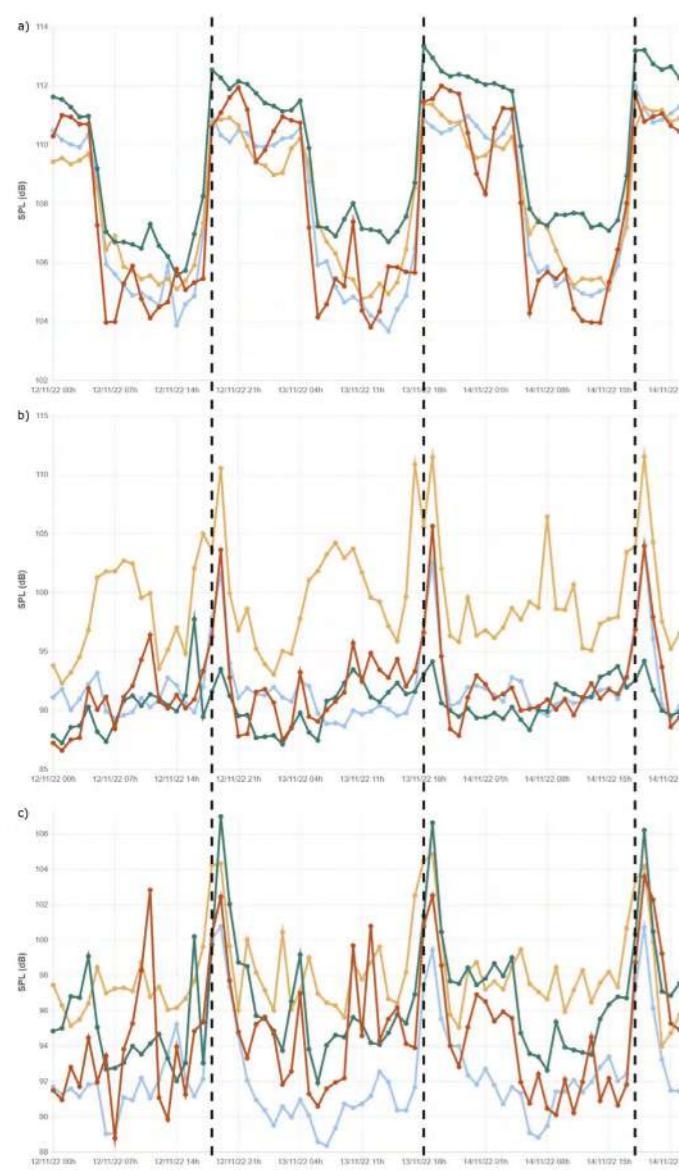


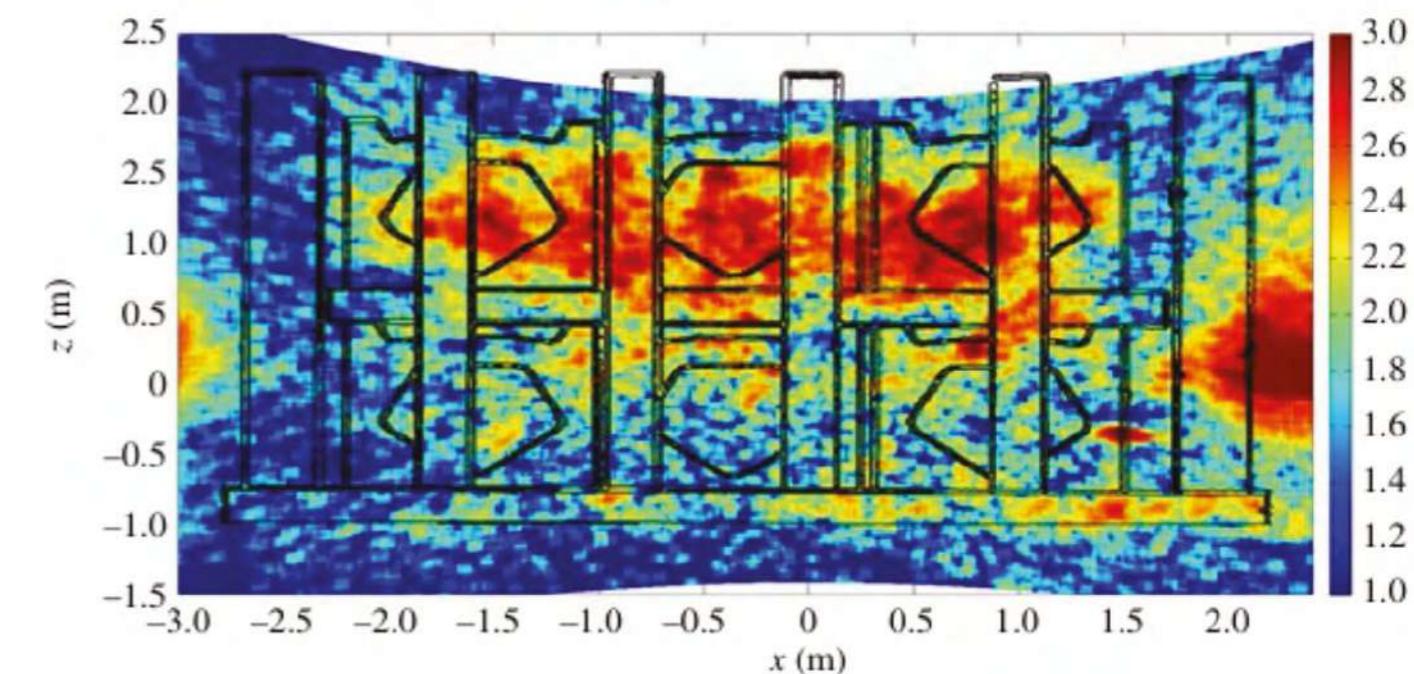
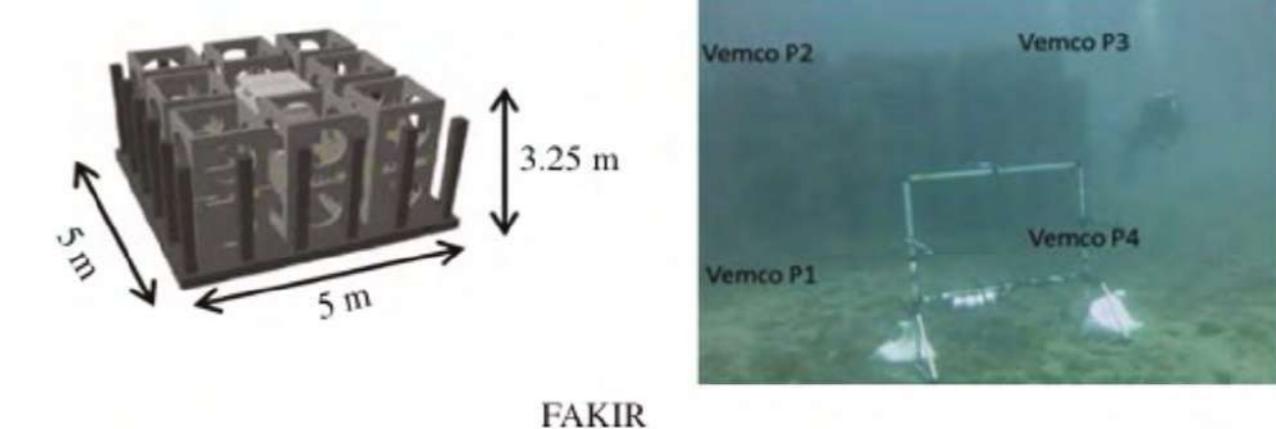
Figure 46. Volume sonore moyen par heure dans les basses fréquences sur trois jours. Chaque couleur représente un site différent autour de Mayotte (ReefPulse, 2024)

La cartographie d'invertébrés benthiques

Des études ont été menées pour réaliser de la cartographie acoustique de communautés benthiques en 3 dimensions. Par exemple l'étude de Gervaise et al. (2019) utilise la cartographie sonore pour localiser et quantifier des sons d'invertébrés dans les récifs artificiels (Méditerranée). Pour ce faire, les sons d'invertébrés benthiques ont été cartographiés en trois dimensions à l'aide d'un réseau compact ($2 \text{ m} \times 2 \text{ m} \times 2 \text{ m}$) de quatre hydrophones. Chaque son individuel émis par un invertébré benthique a été enregistré. Puis toutes les positions des sons individuels ont été accumulées pour faire une cartographie.

Cette technique de cartographie n'est pas utilisée dans les suivis pour le moment car elle est encore au stade R&D du fait d'un manque de précision dans la localisation.

Figure 47. Cartographie sonore d'invertébrés dans un récif artificiel : en rouge, les surfaces avec les plus grandes densités d'invertébrés et en bleu, les surfaces avec les plus faibles densités (Gervaise et al., 2019)



4.3 | Synthèse des avantages-inconvénients de l'acoustique passive

À QUOI ÇA SERT ?

L'acoustique passive est une technique qui permet de faire des suivis en continu, de jour comme de nuit, sur de longues périodes temporelles. Elle permet d'appréhender la courbe d'activité de certaines populations, de suivre l'activité sonore des macroinvertébrés peu pris en compte dans les suivis UVC, détecter des comportements (reproduction, agression, etc), des phénomènes de broutage. Par conséquent, elle complète les suivis visuels à des périodes stratégiques.

QUELLES SONT LES LIMITES ET LES CONTRAINTES ?

L'acoustique passive appliquée à l'étude des récifs coralliens reste une méthode en cours de développement, encore largement exploratoire. L'un des défis majeurs réside dans la diversité et la variabilité des émissions sonores au sein des communautés récifales. Toutes les espèces n'émettent pas des sons de manière uniforme : certaines produisent plusieurs types de signaux en fonction du comportement ou du moment de la journée, tandis que d'autres restent silencieuses. Cette hétérogénéité rend l'attribution des sons à des espèces spécifiques particulièrement complexe.

L'identification des sources sonores repose souvent sur des observations visuelles synchronisées (via caméra ou plongée) ou sur la capture directe des individus. Cependant, de nombreux sons sont produits dans des contextes spécifiques — liés à la reproduction, à l'alimentation ou à des interactions sociales — ce qui limite la capacité à établir une correspondance exhaustive entre sons et espèces. À cela s'ajoute la complexité physique du milieu aquatique : la propagation sonore y est influencée par la nature du substrat, la présence d'obstacles, la température, la salinité et la bathymétrie locale. Ces facteurs peuvent entraîner des distorsions, des réflexions ou des amplifications, rendant l'interprétation des signaux reçus par l'hydrophone plus incertaine.

De plus, les systèmes d'enregistrement acoustique peuvent être installés dans des lieux isolés et la donnée peut être récoltée plusieurs mois après.

La détection d'engins à moteur possible avec cette méthode est un outil intéressant pour évaluer la fréquentation.

Les principales limites se concentrent aujourd'hui sur la phase de traitement des données. L'identification des sons et leur classification automatique exigent des algorithmes performants, dont l'efficacité dépend fortement de la qualité des bases de données utilisées pour l'apprentissage. Ce processus reste chronophage et encore peu automatisé à grande échelle. Par ailleurs, les algorithmes d'identification de signatures sonores doivent souvent être entraînés sur des données locales : par exemple un modèle issu des Antilles ne fonctionnerait pas à Mayotte en raison d'un fond sonore différent. D'autre part, l'utilisation d'indices éco-acoustiques pour évaluer l'état des récifs coralliens ne fait pas encore consensus. Si le suivi temporel d'un même site paraît offrir une certaine fiabilité, la comparaison entre sites distincts demeure sujette à caution en raison des nombreuses variables non contrôlées.

En complément, la cartographie acoustique des invertébrés benthiques manque encore de précision et de résolution.

Enfin, le coût élevé des équipements, associé au temps important requis pour le traitement des données, freine considérablement la généralisation de cette méthode dans les programmes de suivi environnemental à long terme.

4.4 | En savoir plus

L'acoustique dans les récifs coralliens se focalise sur trois bandes de fréquences distinctes qui permettent d'étudier l'activité de trois grandes communautés récifales :

- Basses fréquences (entre 100 et 500 Hz) : cette bande de fréquences est largement dominée par les activités acoustiques des poissons, de ce fait, elle est connue sous la catégorie "poissons". Les mérous peuvent même vocaliser plus bas, sous les 100 Hz. Quelques signaux émis par d'autres organismes y sont enregistrés, comme les frottements des antennes de langoustes.
- Moyennes fréquences (entre 500 et 1000 Hz) : cette bande de fréquences est caractérisée par les signaux d'un nombre plus limité d'espèces de poissons. Elle reflète aussi les activités de macro-invertébrés tels que les oursins de grande taille. C'est la catégorie "poissons et invertébrés de grande taille".
- Hautes fréquences (entre 4000 et 8000 Hz) : cette bande de fréquences est caractérisée par les signaux émis par les activités d'oursins de petite taille, de bivalves et de crustacés. L'activité des espèces de crevettes-pistolets domine le paysage sonore sur cette bande de fréquences. C'est la catégorie "petits invertébrés".

Il convient de noter que toutes les espèces n'émettent pas des sons de manière uniforme. Certaines produisent des sons à des fréquences spécifiques, d'autres à des périodes particulières de l'année, et certaines émettent plus ou moins fort que d'autres. Chez les poissons, la majorité des sons sont liés à des comportements de reproduction ou d'agression. Quatorze familles de poissons, telles que les Antennariidae, Atherinidae ou Mugilidae, ont, dans l'état actuel des connaissances, été identifiées comme silencieuses. Toutefois, ces familles n'ont pas été observées pendant leur période de reproduction. Par ailleurs, une même espèce peut produire plusieurs types de sons, et un même son peut être partagé par différentes espèces.

D'autre part, le rayon de détection des sons est mal connu, il dépend de plusieurs éléments : l'intensité à la source, la sensibilité de l'hydrophone, le substrat entre l'hydrophone et la source. Il semblerait néanmoins que les invertébrés soient détectables dans un rayon de 1 à 2 km, et les poissons de 50 à 200 m. Certains poissons ne peuvent pas être détectés à plus de 10 m. Des variations significatives peuvent exister entre des points d'enregistrement espacés de seulement quelques mètres.

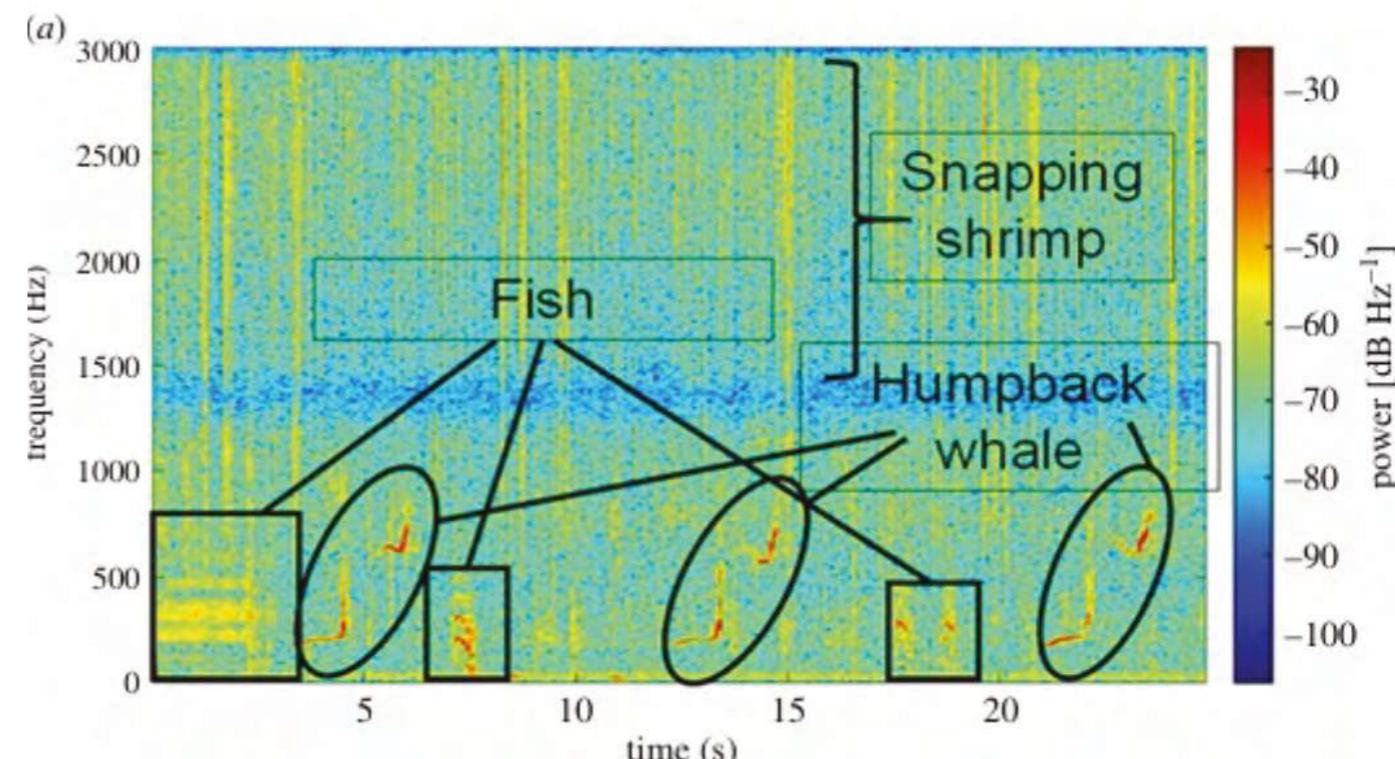


Figure 48. Extrait d'un enregistrement de paysage sonore sous-marin du récif corallien Tektite aux îles Vierges américaines, révélant une diversité de sons présents sur ce récif (poissons, crevettes-pistolets et mammifères marins). À noter que des sons de mammifères marins peuvent être retrouvés dans les trois bandes de fréquences (Mooney et al., 2020)



Photo : © IfreCOR

4.5 | Étude de cas

MAYOTTE

Évaluer l'état des récifs coralliens par l'acoustique passive (2022-2024). Accessible sur le site de l'IfreCOR

- Porteur du projet :** Parc Naturel Marin de Mayotte
- Objectifs :** le projet SONOMAY porte sur l'étude acoustique des récifs coralliens à Mayotte.
- Matériels et méthodes :** quatre dispositifs d'enregistrement acoustique ont été utilisés (hydrophones + enregistreurs) pour remplir les différents objectifs :

1. Définir un état de référence des paysages sonores de la pente externe récifale de Mayotte, à la fois dans l'espace et dans le temps.

2. Établir des modèles de prédiction éco-acoustique permettant d'évaluer la diversité, l'abondance et la biomasse des poissons par groupe trophique à partir des paysages sonores enregistrés durant 24 h sur les 43 sites.

3. Étudier les variations temporelles sur quatre sites pilotes en enregistrant leur paysage sonore en continu durant un an.

4. Évaluer les redondances et les complémentarités entre une méthode visuelle de suivi (Medium Scale Approach (MSA)) et la méthode éco-acoustique.

Contre-temps : Une modification majeure a été apportée à l'objectif 3. Le suivi temporel a été étendu de 12 à 21 mois (août 2022 à mai 2024) en raison de dysfonctionnement des enregistreurs acoustiques durant la première année, qui ont généré des périodes de plusieurs semaines sans données.

De plus, l'objectif 4 n'a pas pu être rempli car la collecte de données acoustiques sur les sites de suivi MSA, initialement prévue en avril 2022, a été retardée de plus de 8 mois en raison d'un dysfonctionnement du matériel acoustique reçu en mars 2022.

Résultats :

- Il a été possible d'obtenir des courbes de variation de l'activité sonore du récif et d'en déduire que les communautés récifales ont des rythmes d'activité cycliques (journée, lunes, saisons). Le crépuscule semble être une période clé pour le suivi acoustique, du fait de l'augmentation d'activité sonore.
- Le stress thermique de 2024 a réduit le volume sonore et l'activité des petits invertébrés : les petits invertébrés mériteraient d'être intégrés aux suivis.
- La pollution sonore des engins à moteur est significative dans la passe en S, atteignant parfois des niveaux nocifs. Il est recommandé

de surveiller et de contrôler les vitesses des engins à moteur.

- Certains sites ont des communautés acoustiques particulièrement dynamiques, avec des activités spécifiques (par exemple, des mérous dans la passe Bouéni).
- Des cartes d'identité acoustique de 40 sites ont été créées : elles serviront de référence si une nouvelle étude est mise en place.

Il a été possible de distinguer trois bandes de fréquences : poissons, poissons et invertébrés de grande taille et petits invertébrés mais il est encore compliqué de réaliser une identification jusqu'à l'espèce et d'obtenir des mesures liées à la taille ou à la biomasse.

Le broutage par les poissons-perroquets et les vocalisations de mérous ont été quantifiées sur les quatre sites. La phénologie de ces deux types d'événements varie d'un site à l'autre. Le broutage augmente durant le stress thermique de mars-avril 2024 et jusqu'à 4000 coups de becs de poissons-perroquets ont été identifiés en une journée. A noter : relativement peu de vocalisations de mérous ont été détectées dans la passe en S, alors que les mérous y sont souvent observés visuellement. Des hypothèses sont envisagées :

soit les espèces présentes ne sont pas celles dont les vocalisations sont reconnues par l'algorithme, soit les mérous de la passe en S réduisent leur activité vocale du fait de la pollution sonore par les bateaux à moteur.

Dans ce projet, l'écoute d'extraits sonores et l'annotation des spectrogrammes a été très chronophage. Cette démarche a représenté 8 mois de travail par une personne à temps plein dans le cadre de ce projet. Ces annotations ont permis de nourrir l'algorithme d'identification.

Avec les études en cours menées dans d'autres localités (Guadeloupe, La Réunion, ...), l'obtention d'un algorithme performant dans une nouvelle localité d'étude devrait être plus rapide à l'avenir.

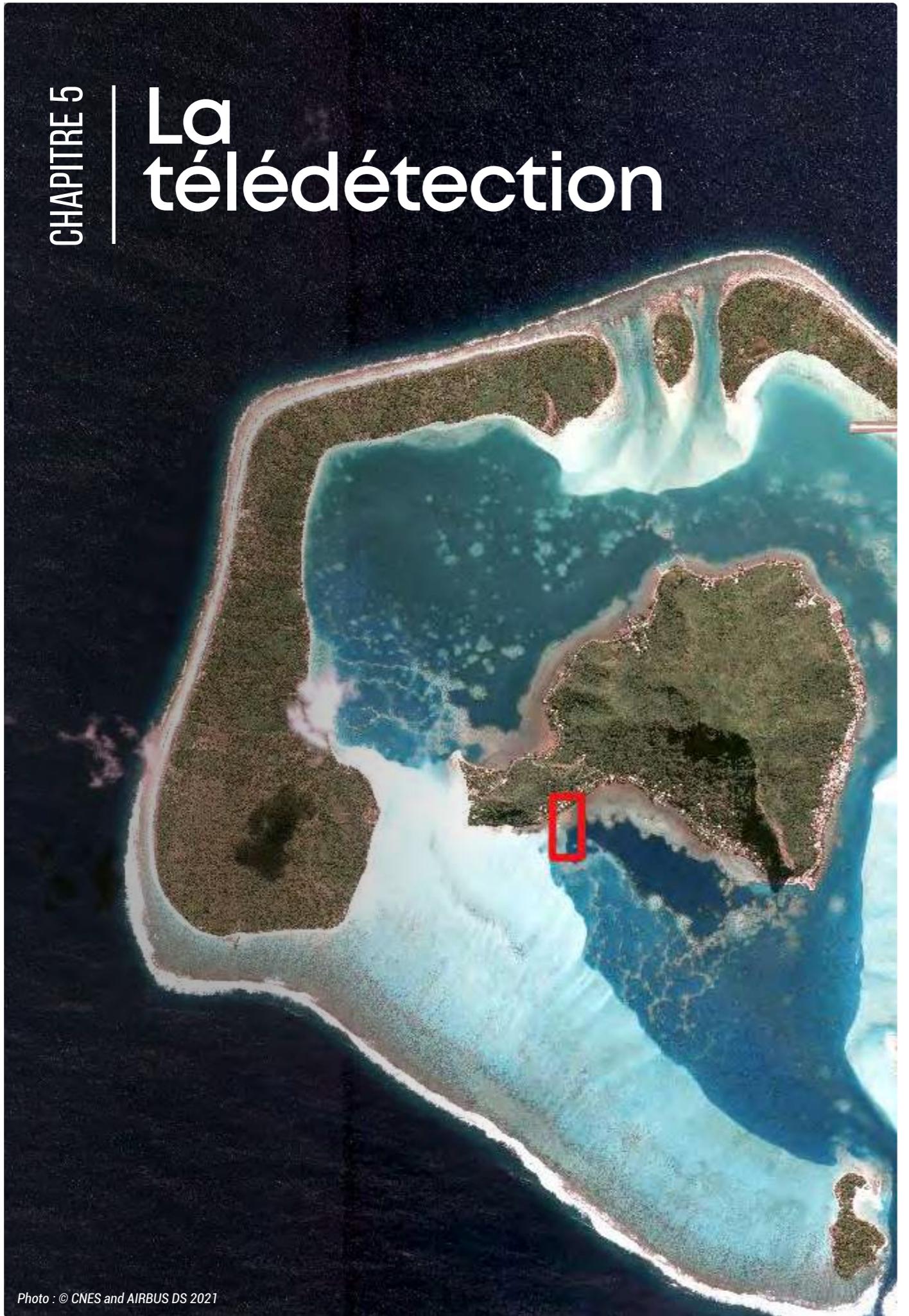
Globalement, l'étude des récifs coralliens par l'acoustique passive dans ce projet est encore au stade de la recherche et développement. L'outil est prometteur mais il manque de l'entraînement aux algorithmes d'identification. De plus, les courbes de variations d'activité sonore semblent intéressantes mais il faut répéter l'expérience plusieurs années de suite pour apporter de la robustesse au suivi.

- Coût total de l'étude :** 200 000 euros.
- Coût des quatre enregistreurs + hydrophones :** 33 000 euros

4.6 | Références

- Bertucci, Frédéric et al. (sept. 2016). « Acoustic indices provide information on the status of coral reefs : an example from Moorea Island in the South Pacific ». en. In : *Scientific Reports* 6.1. Number : 1 Publisher : Nature Publishing Group, p. 33326. ISSN : 2045-2322. DOI : 10.1038/srep33326. URL : <https://www.nature.com/articles/srep33326> (visité le 12/02/2024) (cf. p. 8, 15, 17, 40, 43).
- Buxton RT, McKenna MF, Clapp M, Meyer E, Stabenau E, Angeloni LM, Crooks K, Wittemyer G. 2018 Efficacy of extracting indices from largescale acoustic recordings to monitor biodiversity. *Conserv. Biol.* 32, 1174–1184. (doi:10.1111/cobi.13119)
- Coquereau, Laura (2016). « Sound production and associated behaviours of benthic invertebrates from a coastal habitat in the north-east Atlantic ». In : *Marine Biology* May. Publisher: Springer Berlin Heidelberg. ISSN : 1432-1793. DOI : 10.1007/s00227-016-2902-2 (cf. p. 7).
- Desiderà E, Guidetti P, Panzalis P, Navone A, Valentini-Poirier CA, Boissery P, Gervaise C, Iorio L. 2019 Acoustic fish communities: sound diversity of rocky habitats reflects fish species diversity. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 608, 183–197. (doi:10.3354/meps12812)
- Elise, Simon et al. (déc. 2019a). « An optimised passive acoustic sampling scheme to discriminate among coral reefs' ecological states ». en. In : *Ecological Indicators* 107, p. 105627. ISSN : 1470160X. DOI : 10.1016/j.ecolind.2019.105627. URL : <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1470160X19306193> (visité le 10/03/2024) (cf. p. 8, 15, 17, 40, 43).
- Elise S, Urbina-Barreto I, Pinel R, Mahamadaly V, Bureau S, Penin L, Adjeroud M, Kulbicki , Bruggemann JH. 2019 Assessing key ecosystem functions through soundscapes: a new perspective from coral reefs. *Ecol. Indic.* 107, 105623. (doi:10.1016/j.ecolind.2019.105623)
- Freeman, Lauren A. et al. (déc. 2016). « Rapidly obtained ecosystem indicators from coral reef soundscapes ». en. In : *Marine Ecology Progress Series* 561, p. 69-82. ISSN : 0171-8630, 1616-1599. DOI : 10.3354/meps11938. URL : <https://www.int-res.com/abstracts/meps/v561/p69-82/>
- Gervaise, C., Lossent, J., Valentini-Poirier, C.A., Boissery, P., Noel, C., Di Iorio, L., 2019. Three-dimensional mapping of the benthic invertebrates biophony with a compact four-hydrophones array. *Applied Acoustics* 148, 175–193. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2018.12.025>
- Ibrahim, Ali K. et al. (juill. 2024). « Fish Acoustic Detection Algorithm Research : a deep learning app for Caribbean grouper calls detection and call types classification ». English. In : *Frontiers in Marine Science* 11. Publisher : Frontiers. ISSN : 2296-7745. DOI : 10.3389/fmars.2024.1378159. URL : <https://www.frontiersin.org/journals/marine-science/articles/10.3389/fmars.2024.1378159/full> (visité le 31/07/2024) (cf. p. 38, 69).
- Jézéquel, Youenn et al. (jan. 2023). « Acoustic properties and shallow water propagation distances of Caribbean spiny lobster sounds (*Panulirus argus*) ». en. In : *The Journal of the Acoustical Society of America* 153.1, p. 529-537. ISSN : 0001-4966, 1520-8524. DOI : 10.1121/10.0016898.
- Johnson, Martin W. et al. (1947). « The Role of Snapping Shrimp (*Crangon* and *Synalpheus*) in the Production of Underwater Noise in the Sea ». In : *Biological Bulletin* 93.2. Publisher: Marine Biological Laboratory, p.122-138. ISSN : 0006-3185. DOI : 10.2307/1538284. URL : <https://www.jstor.org/stable/1538284>
- Júnior, Ubirajara Gonçalves De Melo et al. (2019). « Characterization of the acoustic activity of *Perna perna* (bivalve mollusc) under laboratory conditions ». en. In : Bruges, Belgium, p. 010010. DOI : 10.1121/2.0001254. URL : <https://pubs.aip.org/asa/poma/article/982147>
- Kaplan, Mb et al. (août 2015). « Coral reef species assemblages are associated with ambient soundscapes ». en. In : *Marine Ecology Progress Series* 533, p. 93-107. ISSN : 0171-8630, 1616-1599. DOI : 10.3354/meps11382. URL : <http://www.int-res.com/abstracts/meps/v533/p93-107/> (visité le 29/06/2023) (cf. p. 7, 8, 15, 17, 40, 43)
- Lammers MO, Brainard RE, Au WWL, Mooney TA, Wong KB. 2008 An ecological acoustic recorder (EAR) for long-term monitoring of biological and anthropogenic sounds on coral reefs and other marine habitats. *J. Acoust. Soc. Am.* 123, 1720–1728. (doi:10.1121/1.2836780)
- Lillis, Ashlee et al. (juin 2018). « Snapping shrimp sound production patterns on Caribbean coral reefs : relationships with celestial cycles and environmental variables ». en. In : *Coral Reefs* 37.2, p. 597-607. ISSN : 0722-4028, 1432-0975. DOI : 10.1007/s00338-018-1684-z. URL : <http://link.springer.com/10.1007/s00338-018-1684-z>
- Lobel, Phillip et al. (oct. 2010). « Acoustical Behavior of Coral Reef Fishes ». In : *Reproduction and Sexuality in Marine Fishes : Patterns and Processes*, p. 307-386. ISSN : 9780520264335. DOI : 10.1525/california/9780520264335.003.0010 (cf. p. 7, 19, 39, 71).
- Mooney TA, Iorio LD, Lammers M, Lin T-H, Nedelec SL, Parsons M, Radford C, Urban E, Stanley J. 2020 Listening forward: approaching marine biodiversity assessments using acoustic methods. *R. Soc. Open Sci.* 7: 201287. <http://dx.doi.org/10.1098/rsos.201287>
- Parmentier, E. (2018). Acoustic Complexity of vocal fish communities: a field and controlled validation. *Scientific Reports*. <https://doi.org/10.1038/S41598-018-28771-6>
- Pieretti, N et al. (2011). « A new methodology to infer the singing activity of an avian community : The Acoustic Complexity Index (ACI) ». In : *Ecological Indicators* 11.3. Publisher : Elsevier Ltd ISBN : 0722304269, p. 868-873. ISSN : 1470-160X. DOI : 10.1016/j.ecolind.2010.11.005. URL : <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecolind.2010.11.005> (cf. p. 14, 19).
- Radford, Craig et al. (2008). « Resonating sea urchin skeletons create coastal choruses ». In : *Marine Ecology Progress Series* 362. ISBN : 0171-8630, p. 37-43. ISSN : 01718630. DOI : 10.3354/meps07444 (cf. p. 7).
- Reef Pulse – Parc Naturel Marin de Mayotte (Office Français de la Biodiversité - OFB) Projet SONOMAY: Suivi des récifs coralliens de Mayotte par acoustique passive. Rapport final. Novembre 2024. 99 p.
- Towsey, Michael (août 2017). The calculation of acoustic indices derived from long- duration recordings of the natural environment. Rapp. tech. Brisbane, Australia : UT Ecoacoustics Research Group, p.12. URL : https://eprints.qut.edu.au/110634/1/QUTePrints110634_TechReport_Towsey2017August_AcousticIndices%20v3.pdf (cf. p. 14).
- Staaterman, Erica et al. (juill. 2017). « Bioacoustic measurements complement visual biodiversity surveys : preliminary evidence from four shallow marine habitats ». en. In : *Marine Ecology Progress Series* 575, p. 207-215. ISSN : 0171-8630, 1616-1599. DOI : 10.3354/meps12188. URL : <https://www.int-res.com/abstracts/meps/v575/p207-215/> (visité le 12/02/2024) (cf. p. 8, 17).
- Sueur, J., Farina, A. Ecoacoustics: the Ecological Investigation and Interpretation of Environmental Sound. *Biosemiotics* 8, 493–502 (2015). <https://doi.org/10.1007/s12304-015-9248-x>
- Tricas, Timothy C et al. (sept. 2014). « Acoustic behaviors in Hawaiian coral reef fish communities ». en. In : *Marine Ecology Progress Series* 511, p. 1-16. ISSN : 0171-8630, 1616-1599. DOI : 10.3354/meps10930. URL : <https://www.int-res.com/abstracts/meps/v511/p1-16/>
- Villanueva-Rivera, Luis J. et al. (2011). « A primer of acoustic analysis for landscape ecologists ». In : *Landscape Ecology* 26.9. ISBN : 0921-2973, p. 1233-1246. ISSN : 09212973. DOI : 10.1007/s10980011-9636-9 (cf. p. 14).
- Elise. S, (2025, 14/02 & 20/05). Entretien personnel.
- Gervaise. C, (2025, 13 mars). Entretien personnel.
- Rossard, T, (2025, 13 mars). Entretien personnel.
- Bertucci. F, (2025, 22 avril). Entretien personnel.
- Parson. M, (2025, 25 avril). Entretien personnel.

La télédétection



5.1 | Introduction

Les méthodes de télédétection sont les techniques d'acquisition à distance d'informations sur la surface terrestre. Elles sont principalement fondées sur l'analyse d'images obtenues dans différentes gammes de longueurs d'onde à partir d'aéronefs ou de satellites. Ces méthodes permettent d'obtenir une vision à large échelle d'une zone, mais ne permettent pas encore de caractériser l'état des récifs aussi finement que les méthodes in situ (UVC, photogrammétrie sous-marine, station vidéo rotative, etc.). Ce chapitre présente l'avancement des méthodes pour caractériser l'état d'un récif corallien par télédétection.

Un guide Ifreco intitulé “Aide pour la réalisation et la commande de cartes d'habitats normalisées par télédétection en milieu récifal sur les territoires français” a été réalisé en août 2015. Il reprend dans le détail toutes les notions clefs pour appréhender une carte d'habitats des récifs coralliens, la démarche pour réaliser une carte d'habitats et rédiger un cahier des charges, les critères de normalisation (homogénéisation des critères de construction d'une carte). Ce chapitre 5 est complémentaire du guide publié en 2015.

Deux phases sont distinguées dans les méthodes de télédétection : 1. l'acquisition d'images (choix du type de vecteur, du type de capteur) 2. l'exploitation des données et la vérification (nécessaire la plupart du temps pour évaluer l'état des récifs).

La phase de collecte de données peut être réalisée via plusieurs types de vecteurs : les satellites, les avions/ULM, les drones. Ces types de vecteurs se distinguent principalement par leur distance au sujet d'étude, leur fauchée (recouvrement d'une surface), leur coût d'utilisation.

Ces vecteurs peuvent être munis de différents types de capteurs. Majoritairement sont utilisés les capteurs

panchromatique, RVB (Rouge-Verte-Bleu), multispectral et hyperspectral (définis dans la partie “les différents types de capteurs”).

Selon les objectifs, les méthodes de télédétection peuvent être associées à une phase de vérification : plongée/apnée avec description qualitative ou semi quantitative (type MSA), photos, vidéos, etc. Les données de vérification permettent de valider les cartes, développer et contrôler les algorithmes et méthodes de traitement...

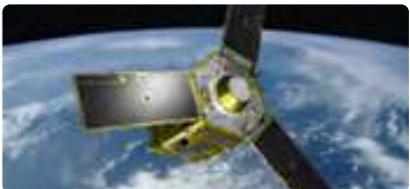


Figure 49. Trois types de vecteurs : un satellite (©Astrium) en haut à droite, un avion de type ULM (© El Grafo) en bas à droite et un drone (©Loic Giraud) en bas à gauche.

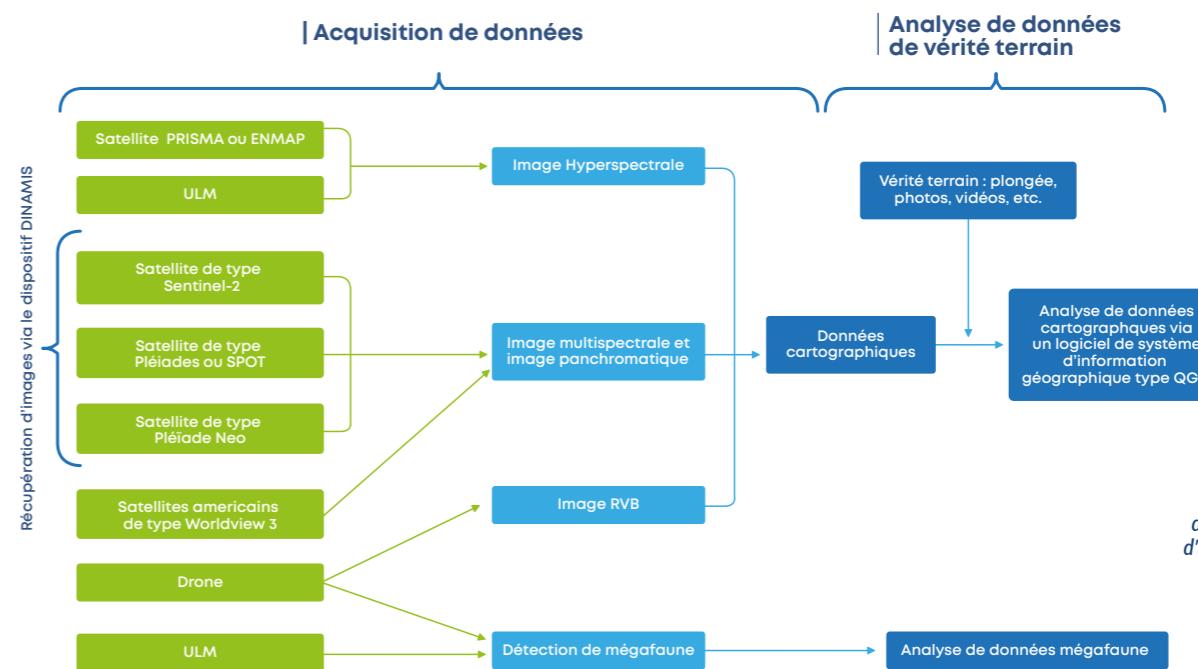


Figure 50. Schéma présentant les étapes des différentes méthodes d'acquisition d'images par télédétection

CONTOUR DU CHAPITRE

Ce chapitre n'évoque pas les méthodes de télédétection acoustique (sonar monofaisceau, sondeur multifaisceau, sonar latéral), ni les méthodes de télédétection optique active (LiDAR). Ces dernières, très utilisées en cartographie, permettent d'accéder à des données de topographie et de bathymétrie, et sont présentées succinctement dans le [chapitre 7](#). Ce sont des méthodes complémentaires des méthodes présentées dans le [chapitre 5](#), qui apportent des informations sur la

bathymétrie et la structure 3D du fond, mais qui ne permettent pas directement d'accéder à des données sur l'évaluation de l'état des récifs coralliens.

D'autre part, la partie "[exploitation des données cartographiques et vérité terrain](#)" se focalise uniquement sur la cartographie d'habitats via l'imagerie multispectrale par satellite et l'imagerie par drone, deux outils accessibles aux gestionnaires et opérationnels.

Une deuxième partie "[En savoir plus](#)" décrit les projets qui tentent de caractériser l'état des récifs coralliens à large échelle. Cette partie est plutôt orientée "recherche" : en effet il est encore difficile de caractériser d'emblée l'état d'un récif corallien depuis le ciel. Les méthodes *in situ* sont plus précises à ce sujet.

Enfin, dans la fiche de synthèse des méthodes de télédétection, dans le tableau général en début de guide et dans le tableau récapitulatif ci-dessous, ne sont présentés que l'imagerie multispectrale par satellite et

le drone. En effet, l'imagerie hyperspectrale par satellite, par avion/ULM ou par drone reste peu accessible financièrement pour les gestionnaires du fait du prix du capteur. Néanmoins, il a paru cohérent de développer ces aspects dans la partie "[acquisition des images](#)" afin que les gestionnaires soient familiers des termes associés et des projets qui les utilisent.

Méthodes	Objectif de gestion	Description											
		Echelle géographique	Echelle temporelle	Cible	Métriques, rendus	Précision rendus	Avancement R&D	Nbre de territoires testés et type d'habitat testé	Conditions d'applications	Destructif/invasif	Utilisation en sciences participatives	Com-municabilité	
Drone	- obtenir une carte de la géomorphologie voire d'habitats - évaluer l'impact des événements majeurs (cyclones, blanchissement) - cartographier les herbiers marins - détecter la présence de bateaux et la macrofaune (nurseries de requins, raies, mammifères marins, etc)	Milliers de mètres carrés	Acquisition ponctuelle, mais possibilité de programmer le drone afin qu'il ait un plan d'échantillonnage réplicable dans le temps sur le même site.	Benthos et mégafaune	Rendus : images et vidéos, orthophotographies, inventaire de mégafaune, Métriques : surface d'herbiers	Dépend de la résolution du capteur, de la vérité terrain. Résolution de l'ordre de 10 cm.	Opérationnel : - faire des cartes d'habitats (si vérité terrain) - évaluer la surface des herbiers - détecter la présence de mégafaune - évaluer l'impact des événements majeurs R&D : détecter le corail vivant	Beaucoup de territoires	- Avoir le certificat de pilote de drone CATS - Eaux peu profondes - Bonnes conditions aériennes (luminosité, peu de vent) - Eaux claires, pas de vagues	Non	Oui, des photos de drones du grand public peuvent être utilisées	Oui : possible de diffuser des photos, vidéos, modèles 3D.	
Imagerie multispectrale par satellite	- obtenir une carte de la géomorphologie voire d'habitats - évaluer l'impact des événements majeurs (cyclones, blanchissement) - cartographier les herbiers marins	Quelques m ² autour de la caméra	Acquisition ponctuelle, dépendante de la trajectoire du satellite ou de la disponibilité des images d'archive.	Benthos	Rendus : cartographie géomorphologique voire d'habitats (si vérité terrain) Métriques : surface d'herbiers	Dépend de la résolution des capteurs du satellite, du géoréférencement, de la radiométrie (rayonnement, luminosité), de la performance des algorithmes et de la quantité de vérité terrain. La résolution des satellites Pléiades est de 2m en multispectral/50 cm en panchromatique.	Opérationnel : - faire des cartes d'habitats (si vérité terrain) - évaluer la surface des herbiers - évaluer l'impact des événements majeurs R&D : détecter le corail vivant	Tous les territoires coralliens ont été cartographiés (cartographie géomorphologique). Des images Pléiades sont disponibles dans de nombreux territoires.	- Pas de nuages - Eaux peu profondes - Bonnes conditions aériennes (luminosité, peu de vent) - Eaux claires, pas de vagues		Non	Oui : possible de diffuser des cartes.	

Méthodes	Terrain			Post Terrain					Coût			Complémentarité avec d'autres méthodes
	Matériel spécifique nécessaire	Expertise/ en régie	Méthodes et données accessibles en open source / Licence	Matériel spécifique nécessaire	Expertise/ en régie	Méthodes et données accessibles en open source / Licence	Besoin d'une IA	Temps terrain	Temps post terrain pour obtenir les données brutes (court/moyen/long)	Coût matériel associé		
Drone	Drone (et accessoires)	Possible en régie si acquisition du CATS	Non	Dépend de l'utilisation. Besoin d'algorithmes spécifiques pour le traitement d'images et l'extrapolation de la vérité terrain. Des application en libre accès permettent la visualisation de modèle, comme OpenDroneMap.	Possible en régie	Non	Oui pour appuyer la vérité terrain	Dépend de l'autonomie du drone : de 30 min à 1 h en général.	Dépend de l'objectif de l'étude. Moyen à long.	de 300 à 2500 euros	- Les drones permettent également d'obtenir un modèle 3D, des orthophotographies (photogrammétrie) - Le splash drone est un drone amphibie, qui fait des «touch'n'go» à la surface de l'eau. Cela permet d'obtenir des vérités terrain de manière rapide.	
Imagerie multispectrale par satellite	NA mais besoin de vérité terrain	NA mais besoin de vérité terrain	NA mais besoin de vérité terrain	Dépend de l'utilisation. Besoin d'algorithmes spécifiques pour le traitement d'images et l'extrapolation de la vérité terrain.	Expertise (algorithmes spécifiques, compétences en géomatique, etc)	Le dispositif DINAMIS est gratuit pour les adhérents. QGis est gratuit. ArcGis n'est pas en open access.		NA mais besoin de vérité terrain	Long	L'acquisition de certaines images est gratuite pour les entités institutionnelles qui adhèrent au dispositif DINAMIS. Les images fournies par des opérateurs privés type Maxar (pour les images satellite Worldview par exemple) sont plus chères : entre 10 et 80 euros par km ² .	Les différentes méthodes de télédétection (avec différents vecteurs et différents capteurs) sont complémentaires les unes avec les autres. Ces méthodes sont également difficilement dissociables de toutes les méthodes permettant de faire de la vérité terrain (suivi en plongée ou en PMT, ROV...)	

Tableau 5. Récapitulatif des systèmes de télédétection

5.2 | Description détaillée

A | L'ACQUISITION D'IMAGES

Les différents types de vecteurs

LE SATELLITE

Les images satellite (obtenues avec des satellites français) sont accessibles entre autres via le catalogue DINAMIS (Dispositif Institutionnel National d'Accès Mutualisé en Imagerie Satellitaire) <https://dynamis.data-terra.org/catalogue/> qui est une plateforme nationale de l'Infrastructure de Recherche Data Terra. DINAMIS assure l'approvisionnement en images satellitaires de très haute résolution spatiale (type SPOT, Pléiades, Pléiades Neo...) aux entités institutionnelles françaises qui adhèrent au Dispositif : laboratoires scientifiques, Agences et services de l'Etat, Collectivités et entités publiques territoriales : **les gestionnaires sont donc concernés, l'accès en est gratuit.** Selon le type de satellites, l'obtention d'images en programmation implique des délais, par exemple :

- Sentinel-2 fournit des images tous les 5 jours par défaut.
- Pléiades, Pléiades Neo, SPOT fournissent des images selon la programmation demandée : l'acquisition d'images peut être planifiée pour capturer une zone précise à la demande du client, à une date ou dans une période déterminée, en fonction des passages du satellite et des conditions d'observation (par exemple absence de nuages).

Il est également possible d'obtenir des images d'archive, sans délai, c'est-à-dire des images déjà acquises et stockées dans les bases de données des opérateurs, pouvant être livrées immédiatement si elles couvrent la zone d'intérêt.

D'autre part, il existe des images fournies par des opérateurs privés non accessibles via DINAMIS (ex : Maxar), payantes, parfois de meilleure résolution, acquises avec les satellites Worldview (résolution spatiale de 40 cm pour Worldview 3), Planets, Quickbird, Ikonos etc. En archive, ces images sont moins chères.

L'AVION/ULM

L'acquisition d'images par avion est réalisée à la demande. Elle reste relativement coûteuse, dépend de prestataires privés, ce qui la rend difficilement accessible pour les gestionnaires à budget limité. Toutefois, cette méthode a le potentiel d'offrir une résolution spatiale supérieure à celle des satellites (1-10cm), du fait de la distance plus faible au sujet d'étude. Les images par ULM (avion ultra-léger motorisé) sont également utilisées pour des applications spécifiques telles que la détection de mégafaune (mammifères marins, tortues, oiseaux, etc.) et la surveillance des usages, notamment dans le cadre de l'évaluation de la fréquentation humaine dans les zones protégées ou sensibles. Les vols ULM restent accessibles financièrement.

LE DRONE

Le drone est un aéronef civil sans personne à bord et piloté à distance. Pour piloter un drone dans un cadre professionnel, il est nécessaire d'être titulaire du Certificat d'Aptitude Théorique de pilote à distance pour les Scénarios standard (CATS).



Figure 51. Pilote de drone © Loïc Giraud

Plusieurs types de capteurs peuvent équiper un drone : RVB (Rouge-Vert-Bleu), multispectral, hyperspectral. Les drones les plus courants sont équipés d'une caméra RVB (Rouge-Vert-Bleu), comme sur un appareil photo classique.



Photo : © Ifreco

Il est possible de programmer un plan de vol automatique pour mettre en place des protocoles standardisés, réaliser des suivis ou acquérir des orthophotographies (photogrammétrie).

Des drones "amphibies" (comme le SplashDrone) ont également été développés : il s'agit de drones aériens pouvant se poser sur l'eau. Ils sont équipés d'une caméra étanches pouvant faire des observations sur de petits fonds (environ 10 m selon la visibilité) afin d'obtenir des vérités terrain instantanément (touch'n'go).

Le drone constitue un outil intermédiaire particulièrement accessible et intéressant : il offre une excellente résolution spatiale. Il peut être utile pour évaluer l'état des communautés benthiques (à l'aide d'orthophotographies), mais également pour étudier les nurseries de requins, suivre la mégafaune marine (tortues, mammifères marins, etc), suivre l'érosion du trait de côte, ainsi que la fréquentation des usagers de la mer.

Les différents types de capteurs

Les satellites, les avions/ULM, les drones peuvent être munis de différents types de capteurs. Selon le principe de mesure et la résolution spectrale utilisée, ces capteurs produisent trois grandes catégories d'images : RVB (Rouge-Vert-Bleu), panchromatique, multispectrale et hyperspectrale.

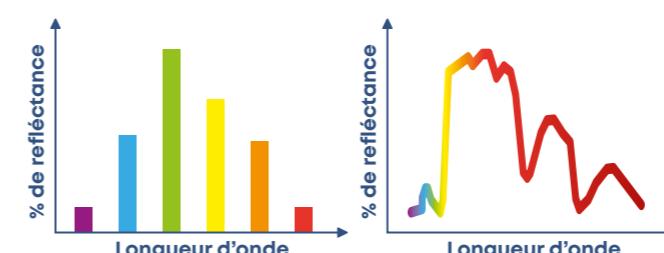


Figure 52. Comparaison des spectres de réflectance de deux types de capteurs : à gauche un capteur multispectral, et à droite un capteur hyperspectral

Un capteur RVB capte la lumière visible dans 3 bandes spectrales larges : rouge (~600-700 nm), vert (~500-600 nm) et bleu (~400-500 nm) et permet d'obtenir une image proche de ce que perçoit l'œil humain. Les images drone et les images d'appareils photos classiques utilisent plutôt ces capteurs.

Une image multispectrale possède plusieurs bandes spectrales (moins de 10), réparties habituellement sur



Figure 53. Exemple d'une image multispectrale Pléiades (50 cm de résolution spatiale après pansharpening) de Maupiti en Polynésie française © CNES and AIRBUS DS 2021

une gamme de valeurs s'étendant du domaine visible à l'infrarouge. Les images satellite les plus couramment rencontrées sont de ce type.

Par opposition aux images multispectrales, les images panchromatiques ne sont composées que d'une seule large bande spectrale (en noir et blanc). Ces images offrent une résolution spatiale intéressante, mais leur résolution spectrale est moins satisfaisante, ce qui rend plus difficile la discrimination des entités benthiques. Une image hyperspectrale se compose de dizaines de bandes spectrales très fines et continues (quelques

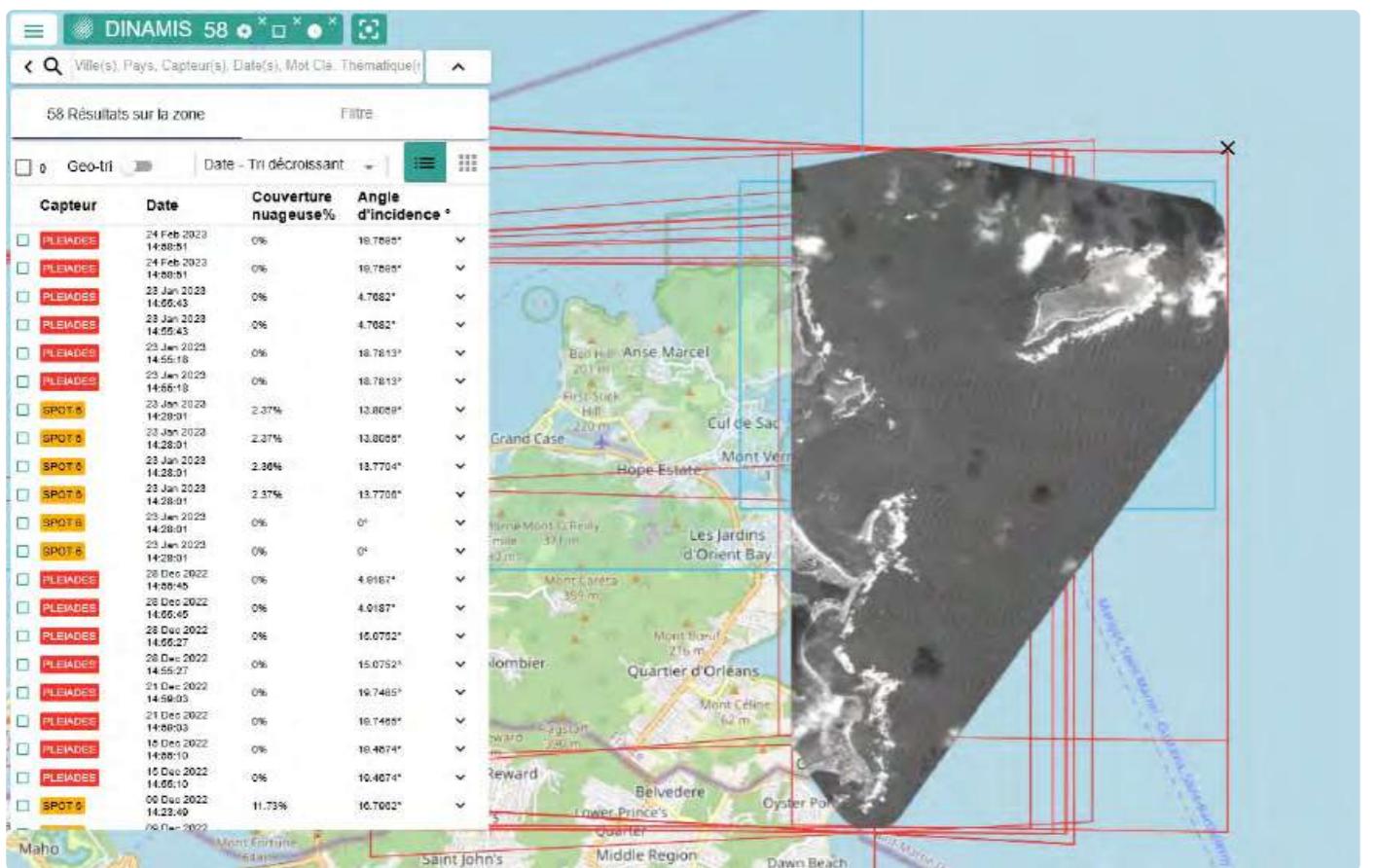


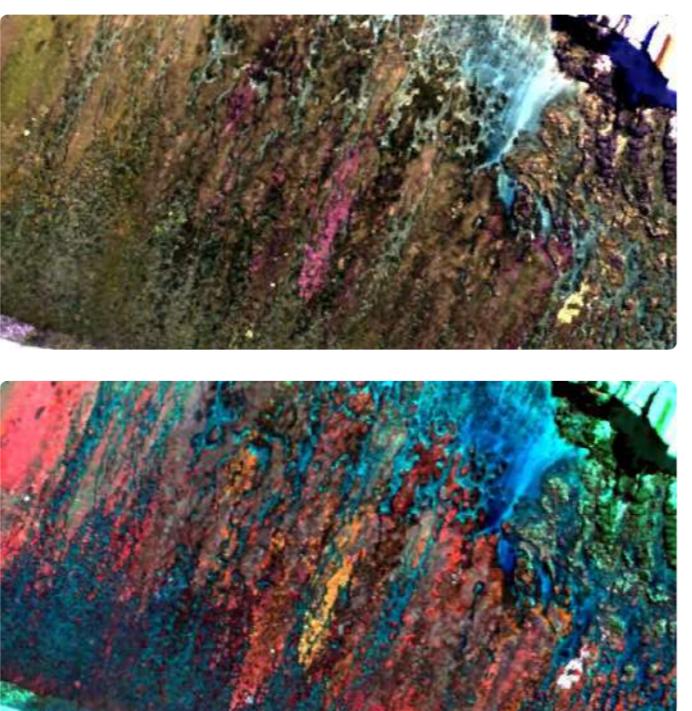
Figure 54. Exemple d'une image panchromatique Pléiades à Saint-Martin (50 cm de résolution) © DINAMIS

nanomètres de largeur), couvrant l'ensemble du spectre du visible jusqu'au proche infrarouge. La figure ci-dessous illustre une même image représentée selon différentes combinaisons de bandes. Chaque "version" met en évidence des contrastes particuliers, ce qui facilite la distinction entre les éléments observés. L'intérêt de l'imagerie hyperspectrale pour la cartographie récifale a été surtout démontré par des acquisitions aéroportées.



Figure 55. Trois images de récifs coralliens à La Réunion obtenues avec un avion muni d'un capteur hyperspectral (40 cm de résolution spatiale). (Projet HYSCORES 2015, Office de l'Eau Réunion, Ifremer, Université de Bretagne Occidentale)

L'imagerie hyperspectrale par satellite est possible grâce à des satellites comme PRISMA ou ENMAP, avec une résolution spatiale de l'ordre de 30 m.



Critères de choix d'une image

Faut-il privilégier une image satellite multispectrale ou une image hyperspectrale acquise par avion ? Une image drone ou satellite ? Les possibilités sont nombreuses et chacune influence directement le rendu final. Chaque type d'image présente ses avantages et limites, et le choix dépendra de plusieurs critères essentiels :

- La résolution spatiale : niveau de détail de l'image (taille du pixel au sol) ;
- La résolution spectrale : nombre et largeur des bandes spectrales disponibles ;
- La qualité des conditions d'acquisition : influence des nuages, du vent, de la houle ou d'autres perturbations ;
- La résolution temporelle : fréquence ou période à laquelle des images peuvent être obtenues ;
- Le coût d'acquisition : budget nécessaire selon le type de capteur et la plateforme utilisée.

La résolution spatiale des images numériques est définie par le nombre de pixels par unité de surface (millimètres). En télédétection, on exprime la résolution des images par la taille de la zone couverte par un pixel. Chaque pixel de l'image correspond à une partie de la surface de la Terre. On parle alors de « résolution spatiale au sol ».

Pour être détecté et caractérisé, un objet doit faire au moins quatre fois la taille de la résolution spatiale. Or les satellites Pléiades par exemple permettent d'obtenir des images dont la résolution peut aller jusqu'à 50 cm, ce qui est équivalent à des objets de 2 m. La résolution spectrale est la capacité du capteur à distinguer des rayonnements électromagnétiques de fréquences différentes. Par exemple, un capteur multispectral est capable de distinguer entre 4 et 6 bandes spectrales. Sa résolution spectrale est moins intéressante qu'un capteur hyperspectral qui peut en distinguer plusieurs dizaines (cf. Figure 53).

Les satellites d'observation de la Terre, comme ceux de la famille Pléiades sont souvent équipés de deux types de capteurs : un capteur panchromatique à haute résolution spatiale (par exemple 50 cm), et un capteur multispectral à résolution spatiale plus basse (par exemple 2 m). Le capteur panchromatique enregistre dans un unique intervalle de longueur d'onde situé dans le domaine du visible (en noir et blanc), tandis que le multispectral capture plusieurs bandes spectrales (bleu, vert, rouge, proche infrarouge, etc.), mais avec une résolution spatiale moins intéressante. L'utilisation d'algorithme de fusion dit « pansharpening » peut permettre d'injecter des détails spatiaux provenant d'une bande panchromatique dans une image multi ou hyperspectrale, conservant ainsi les meilleures résolutions spatiales et spectrales des différents systèmes exploités, augmentant ainsi le potentiel de discrimination. C'est une méthode très courante en cartographie pour améliorer la résolution spatiale.

La qualité des conditions d'acquisition dépend de nombreux paramètres environnementaux tels que la couverture nuageuse, l'état de la mer (vagues), la turbidité, la profondeur ou encore les reflets solaires à la surface de l'eau. Ces paramètres peuvent constituer des limitations majeures lors de l'acquisition d'images par satellite, avion ou drone. Des corrections peuvent être apportées à l'image avant traitement pour aider à la détermination d'objets mais ces corrections ne sont pas toujours justes : l'effet de la réflexion du soleil sur les masses d'eau ("glint") (cf. Figure 52), l'absorption des couleurs par la colonne d'eau (pour du benthos cela peut aller jusqu'à 10 m, toujours dépendant des conditions), la turbidité de l'eau. Ces corrections peuvent être appliquées si la bande proche infrarouge est présente (dans le cas du multispectral ou de l'hyperspectral notamment). Si cette bande n'est pas présente, l'image n'est pas corrigable. Pour une image drone prise avec

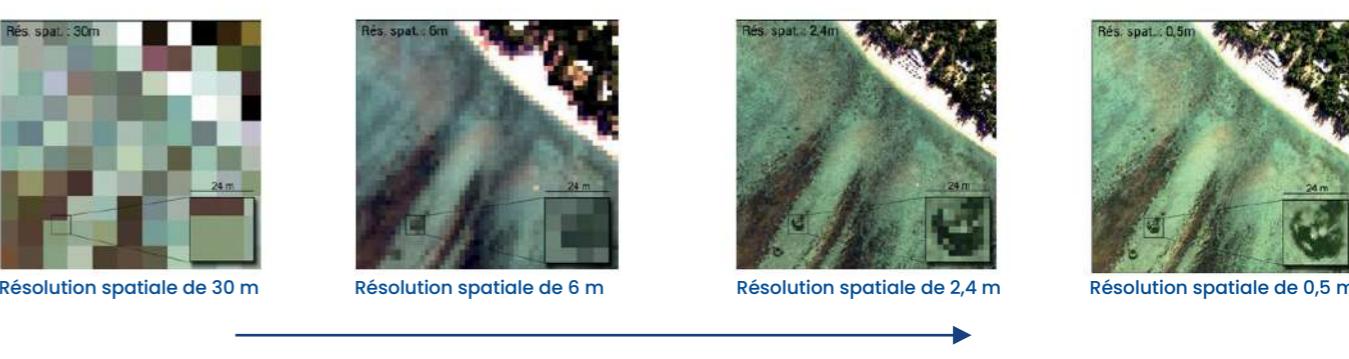


Figure 56. Illustration de la notion de résolution spatiale, inspirée de Nicet et al., 2016

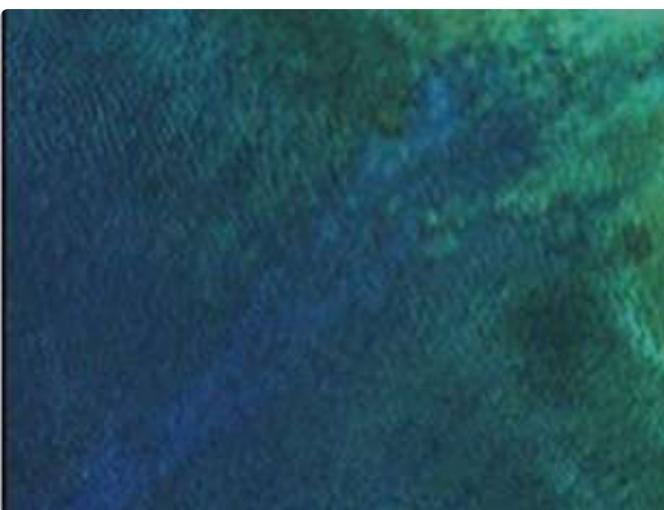


Figure 57. Comparaison avant/après "déglinting", sur une image Pléiades au niveau de la pente externe de la passe de l'Hermitage à La Réunion en 2023 (Bajjouk et al., 2025)



Photo : © Julien Wicker

un capteur RVB (sans la bande proche infrarouge), il n'est pas possible de corriger ces effets.

Certains ordres de grandeur permettent de caractériser les milieux en fonction de la profondeur et du type d'objet :

- les herbiers peuvent être identifiés jusqu'à environ 30 m,
- les substrats durs sont repérables jusqu'à 15 à 20 m,
- le corail vivant peut être détecté jusqu'à environ 5 m.

L'efficacité des drones aériens demeure intéressante entre 0 et 3 mètres de profondeur.

Il est important de noter que la réfraction modifie le chemin de la lumière lorsqu'elle traverse l'interface air-eau, entraînant une perception décalée de la position réelle des objets immersés. Il en résulte une altération des mesures de dimensions et des profondeurs calculées. Des algorithmes spécifiques sont disponibles pour le traitement de ces données et la correction des effets de la réfraction.

La fréquence d'acquisition, c'est-à-dire la fréquence à laquelle une même zone peut être imagée par un capteur (satellite, drone, avion...), est un critère essentiel à prendre en compte. En effet, un satellite circule en orbite autour de la Terre, et ne reste pas au-dessus d'une même zone. Une faible résolution temporelle signifie qu'il peut s'écouler plusieurs jours, voire semaines, entre deux prises de vue exploitables, ce qui peut limiter le suivi d'événements rapides ou saisonniers.

Système satellite	Résolution spatiale	Nbre de bandes spectrales	Domaine spectral	Coût associé
Pléiades	2 m (multispectral) 50 cm (panchromatique)	4 + 1 bande panchromatique	430-950 nm	Gratuit via le dispositif DINAMIS
Pléiades NEO	1,2 m (multispectral) 30 cm (panchromatique)	6 + 1 bande panchromatique	400-950 nm	Accessible via le dispositif DINAMIS. Moins facile d'obtenir des images que les images Pléiade mais possible d'avoir des images d'archive gratuites.
SPOT6/7	1,5 m (panchromatique) 6 m (multispectral)	4 + 1 bande panchromatique	450-890 nm	Gratuit via le dispositif DINAMIS
Sentinel 2	10 ou 20 ou 60 m	4 bandes à 10 m 6 bandes à 20 m 3 bandes à 60 m	440-2200 nm	Gratuit via Copernicus/ESA
ENMAP	30 m	228-246	420-2450 nm	Payant, coût élevé, voir avec des organismes de recherche
PRISMA	30 m (hyperspectral) 5 m (panchromatique)	239 + bande panchromatique	400-2505 nm	Payant, coût élevé, voir avec des organismes de recherche
WorldView-4 (satellite américain)	31 cm (panchromatique) 1,24 m (multispectral)	4 à 16 bandes spectrales	400-2500 nm	Payant, coût élevé, voir avec des organismes de recherche
ULM/avion avec capteur multispectral ou hyperspectral	5-30 cm	5 à plus de 200 (avec un capteur hyperspectral)	400-2500 nm	Payant, coût élevé, voir avec un organisme de recherche
Drone avec capteur RVB	2-10 cm	plus de 100	400-2500 nm	Payant, coût accessible

Figure 53. Tableau comparatif de différents satellites multi- et hyperspectraux inspiré du rapport BioEOS (Bajjouk et al., 2025). Ce tableau n'est pas exhaustif et de nombreux autres satellites existent (satellites américains, chinois, etc.).

B| EXPLOITATION DE DONNÉES CARTOGRAPHIQUES ET VÉRITÉ TERRAIN

Cette partie se focalise uniquement sur des projets de cartographie d'habitats via l'imagerie multispectrale par satellite et par drone, deux outils accessibles aux gestionnaires. Deux exemples sont présentés : sans vérité terrain, et avec vérité terrain. Cette dernière option est fortement recommandée quand c'est possible, pour valider une carte. Les études de cas sont directement intégrées à cette partie.

Moyens d'exploitation des données

Les images acquises par satellite, avion ou drone sont traitées via des logiciels de géomatique type SIG (Système d'Information Géographique) : QGIS, ArcGis en sont des exemples.

Pour une exploitation fine des images obtenues par satellite, il peut être intéressant de traiter les images avec des algorithmes entraînés à l'amélioration de la qualité de l'image (diminution du reflet, modification de l'absorption du rouge par la colonne d'eau ...).

La cartographie sans vérité terrain : carte de la géomorphologie marine de Bassas da India (0-30 m)

La cartographie de milieux isolés peut éventuellement se faire sans vérification directe sur le terrain. L'absence de données de terrain rend alors la validation impossible,

Ces algorithmes sont développés au sein des organismes de recherche. De la même façon, après la vérité terrain, des algorithmes peuvent aider à valider des catégories benthiques.

Les images acquises en drone peuvent permettre d'obtenir facilement une orthophotographie grâce à des applications disponibles en libre accès (par exemple OpenDroneMap).

Etude de cas

BASSA DA INDIA (ÎLES ÉPARSES)

Accessible sur le site de l'Ifreror (et bientôt sur le catalogue TAAF de SEXTANT)

- **Porteur du projet** : les Terres Australes et Antarctiques Françaises
- **Prestataire** : GIE MAREX
- **Objectifs** : Réalisation de la carte de la géomorphologie marine de Bassas da India dans le cadre du projet Récif Isolés 2
- **Matériels et méthodes** : L'atoll de Bassas da India est particulièrement isolé, difficile d'accès et il n'a pas été possible de réaliser de vérité terrain. Plusieurs jeux de données ont été utilisés :
 - les images satellites Pléiades acquises en 2016 et 2020.
 - les données aériennes hyperspectrales acquises en 2009 dans le cadre du programme Litto3D Océan Indien.
 - les données bathymétriques LiDAR ([voir chapitre 7](#)) Litto3D acquises en 2009.

et le résultat obtenu correspond davantage à des cartes géomorphologiques. L'exemple étudié ci-dessous illustre cette situation (2024).

- **Résultats** : Des cartes de l'atoll ont été réalisées à plusieurs niveaux pour caractériser la morphologie des fonds. Ces niveaux se basent sur le système de classification géomorphologique hiérarchique du projet «Coral Reef Millennium Project» ([Millennium Outre-Mer Français Downloads : UMR ENTROPIE](#)) et sur les classes de géomorphologie détaillée décrites dans Battistini et al. (1976). Applicable à l'échelle mondiale, ce système permet de comparer de manière objective les différentes structures récifales entre les régions. Un intérêt écologique a été attribué à chaque type de formation géomorphologique sur la base d'avis d'experts. Cet intérêt repose principalement sur des critères tels que la complexité du paysage, la capacité potentielle d'accueil de formations coraliennes denses, ainsi que le niveau de biodiversité attendu. Toutefois, en l'absence de données *in situ* sur les peuplements, cette évaluation demeure approximative et qualitative :
 - niveau 1 : distinction récifs continentaux et océaniques

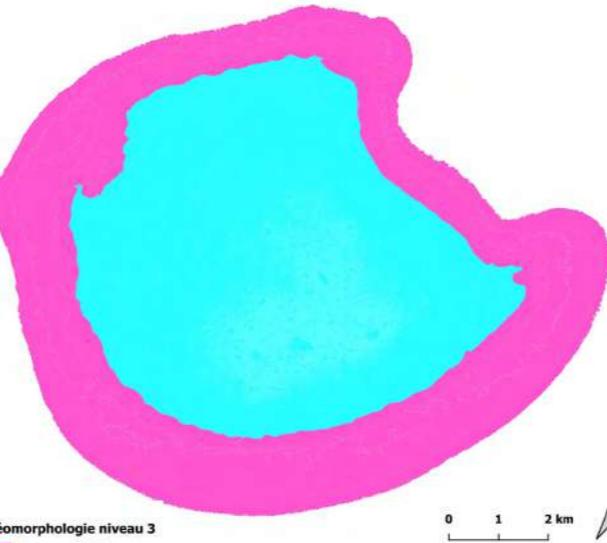
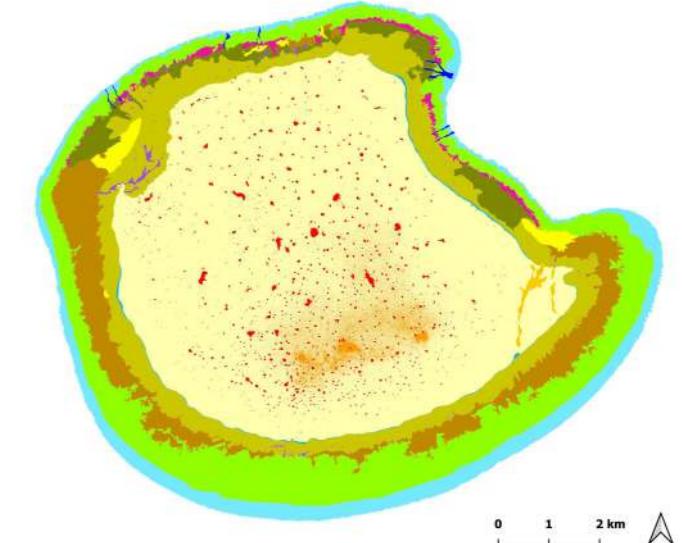


Figure 58. Extrait du rapport de Nicet et al. (2024) : à gauche, carte de la géomorphologie de niveau 3 de l'atoll de Bassas da India. À droite, carte de la géomorphologie de niveau 5 de l'atoll de Bassas da India



• niveau 2 : distinction entre les grands complexes récifaux (atolls, bancs, récifs barrières, etc)

- niveau 3 : distinction en fonction de leur géomorphologie, positions et structures (récf-barrière externe, récf-barrière interne, etc)
- niveau 4 : distinction d'unités géomorphologiques récifales, avec une information sur la profondeur (platier intertidal, platier infratidal, etc)
- niveau 5 : combinaison des niveaux 1 à 4 auxquels sont ajoutées des classes géomorphologiques détaillées.

Le niveau de détail de ces cartes ne permet pas d'avoir des informations sur les habitats.

- **Coût de l'étude** : 5 425 euros (sans prendre en compte le coût des données LiDAR et des images hyperspectrales, déjà acquises préalablement).

Note : lors de cette étude, un patch de chlorophylle avait été détecté et avait été désigné "herbier". En allant sur le terrain lors d'une mission, à la suite de cette étude, l'équipe de plongeurs a réalisé qu'il s'agissait en réalité d'un patch d'algues. La vérité terrain reste essentielle pour la validation.

La cartographie avec vérité terrain : cartographie des habitats marins côtiers (0-40 m) de la Martinique

Lorsque la vérité terrain est accessible, elle permet de produire des cartes plus précises et fiables. Cette vérification sur le terrain peut être réalisée grâce à différentes méthodes, telles que les transects linéaires (LIT, PIT), les transects en bande (Belt transects), les photoquadrats, l'approche par MSA (Medium-Scale Approach), le manta tow (plongeur tracté), les ROVs (robots sous-marins) ou encore les drones de surface (comme la "planche" dans le cadre du projet PLANCHER, [cf chapitre 2](#)). A partir de données de vérité terrain, des modèles d'intelligence artificielle peuvent

également être utilisés pour extrapoler ces observations à l'ensemble de l'image. Une attention particulière doit être portée pour valider le degré d'exactitude de l'extrapolation ([utilisation de matrices de confusion ou de modèles "Random Forest"](#)).

Pour la description des habitats il convient de se référer à la typologie des habitats éditée par le MNHN pour les territoires ultramarins français ([site de Patrinat](#)). L'étude de cas suivante l'illustre : cartographie des habitats marins côtiers (0-40 m) de la Martinique (2024).

Etude de cas MARTINIQUE

Accessible sur le site de l'Ifrécor

- Porteur du projet :** Parc naturel marin de Martinique, OFB
- Prestataire :** Marex, Aquasearch
- Objectif :** réaliser une carte des habitats marins benthiques de la Martinique entre 0 et 40 m de profondeur environ.
- Matériaux et méthodes :**
 - Vérité terrain : PMT, caméra sous-marine, plongée sous-marine, ROV, sonar...
 - des orthophotographies IGN de la campagne 2017 et plusieurs images Pléiades (2019).
 - des données LiDAR du SHOM/IGN (pour la bathymétrie)
- Résultats :** Des cartes d'habitats ont pu être obtenues en superposant la carte de la géomorphologie (avec notion de l'exposition hydrodynamique et profondeur), la carte du substrat, la carte des peuplements. La typologie

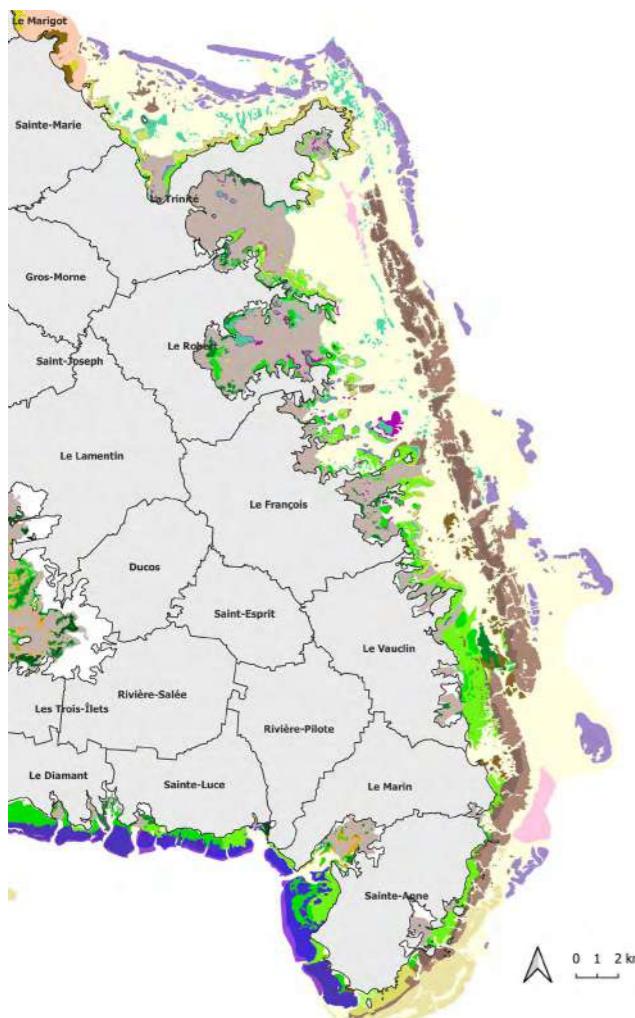


Figure 59. Carte des habitats de la zone côtière (0-40 m) du secteur de l'Atlantique Sud de la Martinique

des habitats benthiques de la Martinique proposée par Patrinat a ensuite été appliquée.

La carte (Figure 60) de l'état des coraux résulte de vérité terrain. Selon le taux de nécrose, le taux de recouvrement algal, la sédimentation, une note entre 1 (très bon état) et 4 (très dégradé) est attribuée à la station. Cette méthode permet d'avoir un aperçu de l'état à l'échelle de l'île mais ce sont des informations assez ponctuelles.

Une carte des pressions (agriculture, bâtiment, carrières, distillerie, élevage de porcs...) a également été dressée pour tenter d'établir des corrélations.

- Coût total de l'étude :** 85 070 euros HT (92 300,50 euros TTC) (sans inclure les coûts d'acquisitions des données LiDAR).

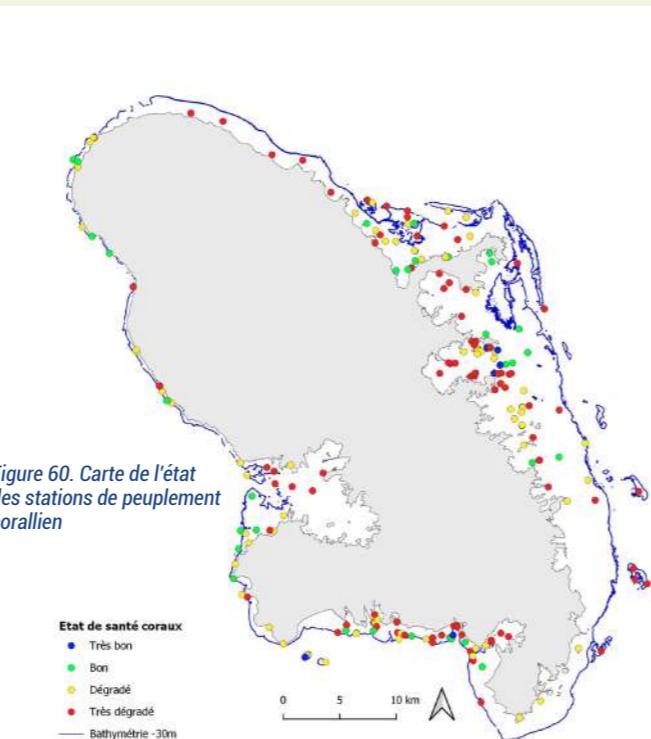


Figure 60. Carte de l'état des stations de peuplement corallien

Quelques exemples d'utilisation du drone en Polynésie française

- Le CRIOBE développe en Polynésie française le suivi par drone pour le dénombrement d'organismes benthiques (couverture algale, coraux, macro-

invertébrés) et la mégafaune dans les programmes ou études suivantes.

Etude de cas POLYNÉSIE FRANÇAISE

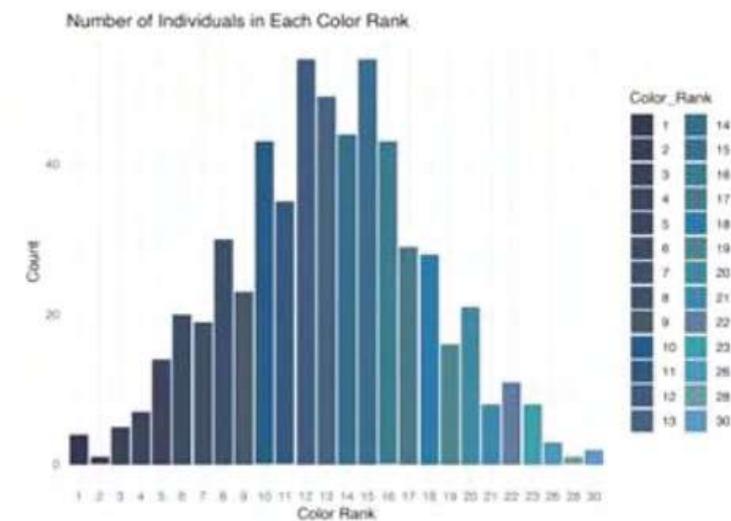
- Caractérisation 3D de la composition du substrat et évaluation des densités** de bénitiers *Tridacna maxima* sur l'atoll de Tatakoto en 2023 (voir Figure 61).
- Caractérisation de faciès récifaux peu profonds** en remplacement à terme des suivis d'état de santé en immersion : Casella, E., Collin, A., Harris, D., Ferse, S., Bejarano, S., Parravicini, V., Hench, J. L., & Rovere, A. (2017). Mapping coral reefs using consumer-grade drones and structure

from motion photogrammetry techniques. *Coral Reefs*, 36(1), 269–275. <https://doi.org/10.1007/s00338-016-1522-0>

- Comportement des juvéniles de requins ; enregistrement du mouvement** des requins à plusieurs moments de la journée. Les images sont analysées à l'aide d'un logiciel permettant d'extraire les vitesses de déplacement, la surface de déplacement et le comportement leader/suiveur des requins. (Shamil F. Debaere, et al. Searching for signs of stress in baby blacktip reef sharks, *Carcharhinus melanopterus*, en cours).



Figure 61 : Utilisation d'un drone pour le dénombrement et l'analyse colorimétrique des bénitiers de l'atoll de Tatakoto. © CRIOBE



5.3 | Synthèse des avantages-inconvénients de la télédétection

À QUOI ÇA SERT ?

Les méthodes de télédétection représentent des moyens intéressants de gestion pour la représentation à large échelle d'un territoire marin. Certaines images satellite sont accessibles gratuitement via des programmes institutionnels (ex : Sentinel-2, SPOT, Pléiades, via DINAMIS pour un usage non commercial).

Plusieurs objectifs peuvent être accessibles aux gestionnaires :

- réaliser une carte géomorphologique et éventuellement une carte d'habitats s'il y a eu suffisamment de vérité terrain,
- évaluer l'impact d'un événement majeur (cyclone, blanchissement, etc.),
- étudier la fréquentation (usagers de la mer) et la mégafaune marine,
- étudier les limites d'herbiers (en progression, en régression, stable) et leur surface.

QUELLES SONT LES LIMITES ET LES CONTRAINTES ?

Les approches de cartographie par télédétection, qu'il s'agisse d'imagerie satellitaire ou par drone, sont limitées par de nombreux facteurs physiques et environnementaux. La profondeur constitue l'une des principales contraintes, ces techniques étant surtout adaptées aux zones peu profondes. L'acquisition est également influencée par la présence de nuages, les conditions de luminosité, la réflexion de surface (glint) ou encore la turbidité de l'eau.

Un facteur technique majeur est la résolution spatiale des capteurs : elle est souvent insuffisante pour détecter directement les organismes benthiques. En général, un objet doit faire au moins quatre fois la taille de la résolution spatiale pour être identifié de manière fiable. À cela s'ajoutent des contraintes liées à la résolution spectrale (capacité à distinguer des matériaux ou organismes différents) et à la résolution temporelle (fréquence de revisite, souvent compromise par la météo).

Le suivi des récifs coralliens dans le temps reste compliqué en comparant les images d'une date sur l'autre. Les superpositions temporelles d'images pour suivre l'évolution d'un site nécessitent des recalages complexes (géométriques, radiométriques), rarement automatisés, et encore plus difficiles lorsque les images proviennent de capteurs ou de dates très différentes.

Par conséquent, aucune méthode de télédétection ne peut être utilisée de manière isolée. Il est important de croiser les données issues de différents vecteurs (satellites, drones, avions/ULM) et de plusieurs capteurs (multispectral, hyperspectral, LiDAR...), mais surtout de les compléter par de la vérité terrain (ex. plongées, observations *in situ*). Ces données terrain sont cruciales pour valider les classifications issues des images et pour entraîner des modèles d'intelligence artificielle. L'IA ([voir chapitre 6](#)) joue aujourd'hui un rôle central : elle permet d'extrapoler des observations locales à l'ensemble d'une scène satellite ou aérienne, mais reste fortement dépendante de la qualité, de la représentativité des données d'apprentissage, du temps disponible pour l'apprentissage. Les modèles utilisés demeurent encore en recherche et développement et nécessitent des compétences techniques.

Enfin, il existe aussi des contraintes logistiques et réglementaires, notamment pour l'usage des drones dans les zones littorales, ou pour l'accès à certaines images commerciales à très haute résolution (souvent restreintes pour des raisons militaires ou de coût).

Contrôle de l'ancrage par les méthodes de télédétection

| Projet mené au sein de l'Agence Territoriale de l'Environnement

L'application DONIA, utilisée largement par les yachts en Europe, notamment dans le bassin méditerranéen, peut être utilisée dans la Réserve Naturelle de Saint-Barthélémy.

Un travail de cartographie des biocénoses marines (typologies des fonds marins), mené par l'Agence Territoriale de l'Environnement, a été effectué en 2024 tout autour de l'île. Le projet a été subventionné par l'Office Français de la Biodiversité dans le cadre de l'appel à projets ReCorea.

Il a permis de collecter des informations importantes qui, dans ce cas, permettent aux capitaines de bateaux de :

- discerner les zones sableuses, plus propices à l'ancrage, des zones d'herbiers marins ou de récifs coralliens qui sont protégées,
- les zones de la Réserve Naturelle,
- l'interdiction d'ancrer dans les sites concernés.

Le travail de cartographie se poursuit cette année sur des profondeurs de 18m à 30m.



Photo : © Ifreco



Photo : © Julien Wicker

5.4 | En savoir plus

Plusieurs projets de recherche sont menés pour essayer de détecter du corail vivant et de caractériser l'état d'un récif corallien. L'avion est utilisé pour augmenter la résolution spatiale, l'hyperspectral aide à la discrimination des communautés benthiques, des algorithmes permettent d'extrapoler les données de vérité terrain à une zone plus large ...

Malgré les progrès technologiques, l'évaluation de l'état des communautés benthiques à grande échelle n'est pas encore opérationnelle.

Etude de cas

MAYOTTE

Cartographie des habitats marins de Mayotte (projet de recherche CARMUHAM). Accessible sur le site de l'Ifremer

- **Porteur du projet :** IRD/Créocéan/OFB (personne contact : Priscilla Dupont)
- **Objectif :** Le projet CARMUHAM vise à caractériser l'état des habitats marins à l'échelle des récifs frangeants de Mayotte en les classant selon des catégories descriptives comme : corail vivant, corail mort, herbier, vase, sable, etc. Il se découpe en trois axes :
 - Axe 1 : Évaluation des projets cartographiques déjà réalisés sur les écosystèmes tropicaux en fonction des besoins multi-spécifiques des utilisateurs/gestionnaires pour élaborer un guide.
 - Axe 2 : Développement d'une méthode cartographique automatique en intégrant les pressions environnementales grâce à des méthodes automatiques de cartographie
 - Axe 3 : Caractérisation des zones vulnérables d'habitat de Mayotte en analysant le lien entre les états de santé des habitats et l'évaluation des impacts cumulés des pressions des bassins versants

Deux études de cas sont présentées pour illustrer cela :

1. la cartographie des habitats marins de Mayotte (projet de recherche CARMUHAM en cours),
2. la cartographie des habitats marins de la Réunion sur plusieurs années en utilisant de l'imagerie multispectrale et hyperspectrale (projet de recherche BioEos en cours).

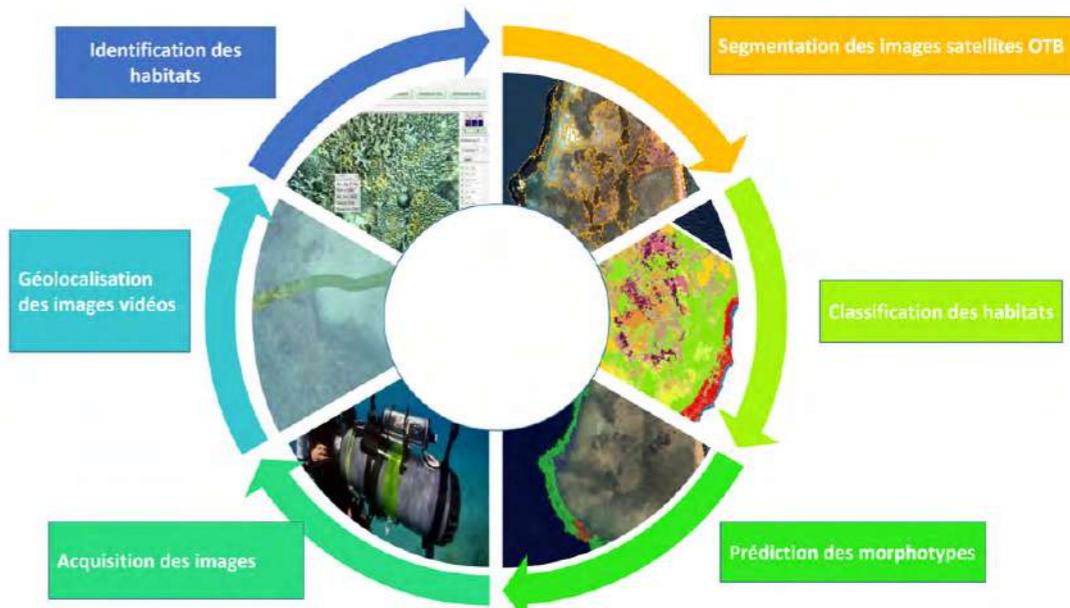
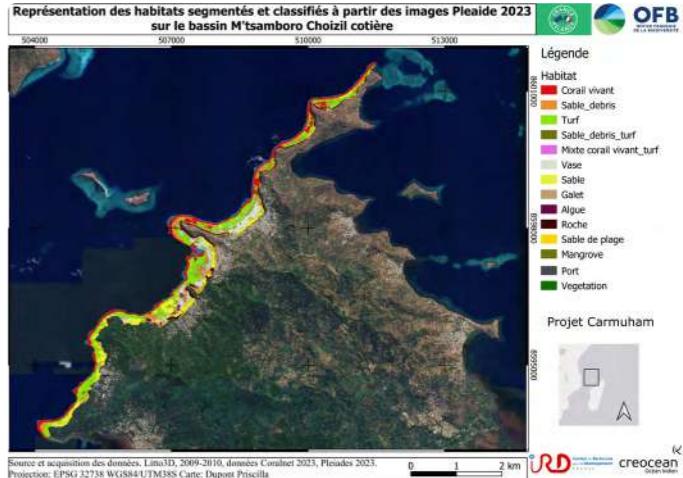


Figure 62. Projet CARMUHAM. À gauche : locoplongeur permettant l'acquisition de photos et vidéos géoréférencées (à gauche) © Priscilla Dupont. A droite : Carte de différents habitats segmentés et classifiés à Mayotte. En bas : Méthodologie de production des cartes CARMUHAM (Dupont et al., 2025) OTB = Orfeo Toolbox, bibliothèque open source développée initialement par le CNES (Centre National d'Études Spatiales) pour le traitement d'images satellitaires et de télédétection.



Photo : © Ifremer

Etude de cas

LA RÉUNION

BioEOS - Suivi des Variables Essentielles de la Biodiversité Côtière : Mise en œuvre sur le site pilote de La Réunion (projet en cours). [Accessible sur le site de l'Ifrécor](#)

- **Porteur du projet :** IFREMER/DYNECO-Centre de Brest (personne contact : Touria Bajjouk)
- **Objectif :** 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 métriques proxys, la biodiversité côtière :
 - en caractérisant la distribution spatiotemporelle de la biodiversité par analyse des séries temporelles d'images satellite multi-capteurs ;
 - en cartographiant les changements et en produisant des indicateurs pour rendre compte de l'impact des changements globaux sur la trajectoire de l'état de la biodiversité des écosystèmes côtiers.
- **Zone d'étude :** Sites pilotes sur les territoires de l'Outre-Mer (La Réunion, Mayotte, Glorieuses et

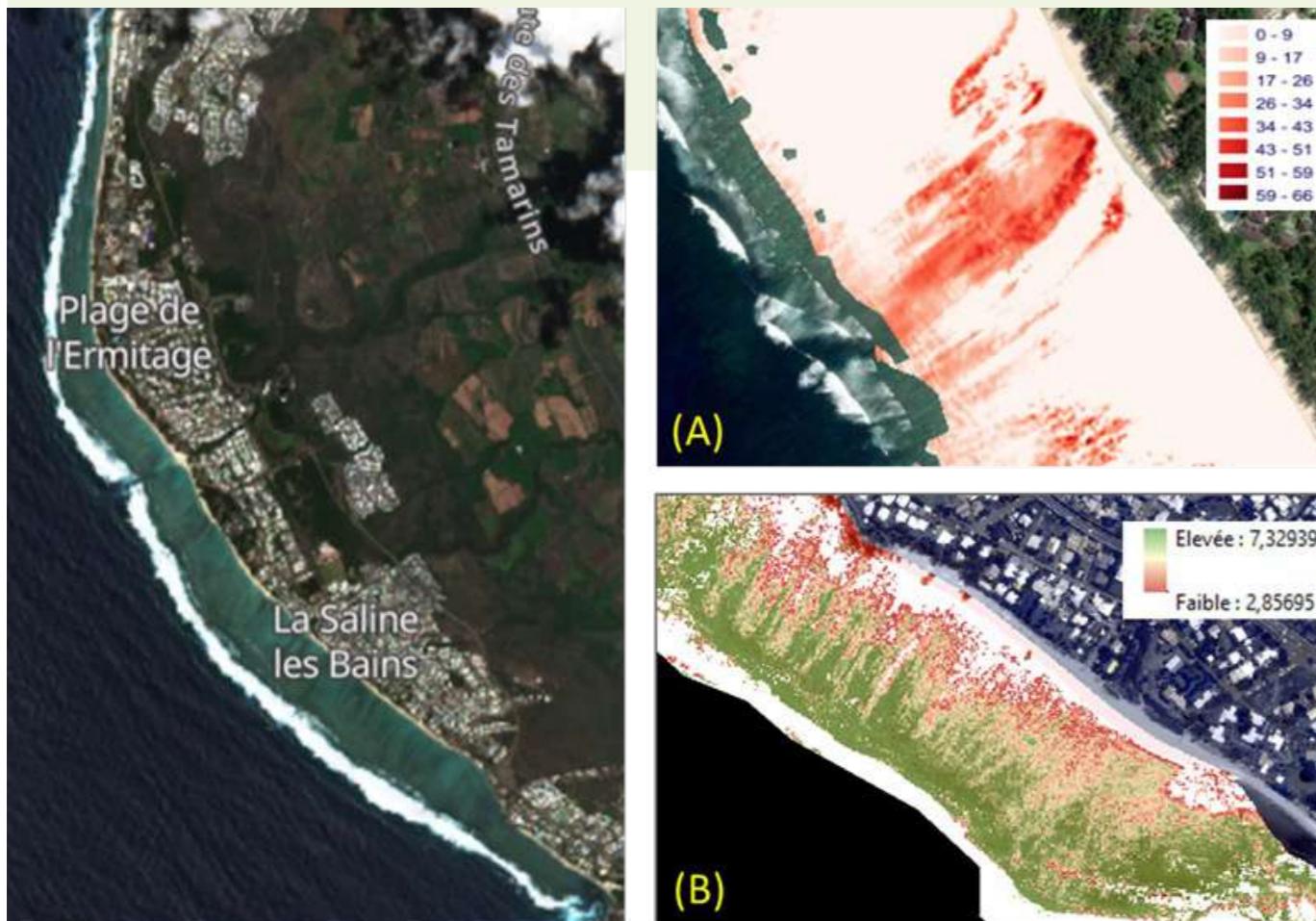


Figure 63. Cartographie du recouvrement corallien (A) et de la vitalité corallienne (B) à partir d'image satellite du capteur Pléiades

Bassa Da India).

- **Matériels et méthodes :** Labellisé par le SCO (Space for Climate Observatory) du CNES, ce projet vise la production et la visualisation facilitée dans une interface web dédiée en cours de développement, d'une diversité d'informations spatialisées pour les besoins de gestion des écosystèmes côtiers. Différentes méthodes de traitement (algorithmes de Machine Learning, méthodes physiques basées sur le modèle de transfert radiatif exploitant les propriétés optiques de la colonne d'eau, etc.), sont appliquées aux séries temporelles d'images satellites multispectraux (Pléiades, Pléiades Néo, Sentinel 2) et hyperspectraux (PRISMA et EnMAP), en synergie avec des données *in situ* et topo-bathymétriques issues de programmes de suivi ou de projets scientifiques (UTOPIAN, Litto3D).
- **Résultats :** Les travaux menés dans le cadre de BioEOS ont permis de générer des connaissances spatialisées sur la bathymétrie, les herbiers et les récifs coralliens sur l'île de La Réunion (Bajjouk et al. 2025).

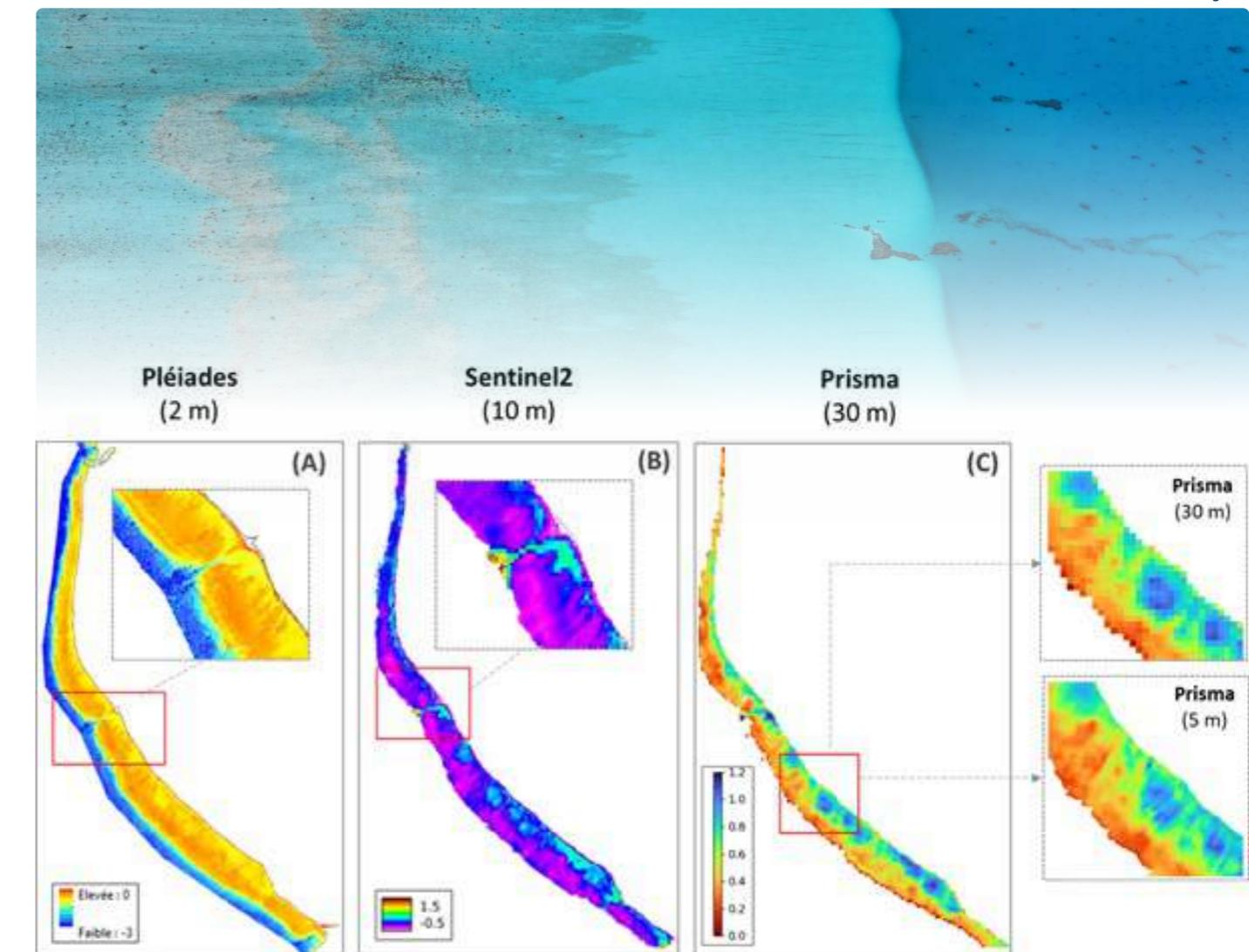


Figure 64. Estimations de la bathymétrie à partir d'une image multispectrale acquise par les satellites Pléiades (A), Sentinel 2 (B) et par le capteur hyperspectral PRISMA

- **Etat des récifs coralliens :** l'exploitation d'un indice spectral de brillance calculé sur l'image satellite Pléiades à 2 m de résolution combinée à des données *in situ* a permis de cartographier la couverture corallienne vivante (entre 0 et 100%) de la plateforme récifale de l'Hermitage (Figure x A), et suivre son évolution temporelle sur une période de 10 années entre 2015 et 2024. Une approche basée sur de la modélisation statistique a également été utilisée pour mettre en relation une variable biologique d'intérêt comme la vitalité corallienne avec des facteurs physiques déterminant sa distribution telle que la bathymétrie. Cet indice permettrait d'appréhender la variabilité spatiale de l'état de santé des récifs coralliens. sur la zone de la plateforme récifale (Figure 64 B)

- **Estimation de la bathymétrie** sur la plateforme récifale et le haut de la pente externe, par deux approches. (i) Une méthode empirique appliquée aux capteurs multispectraux Pléiades et Pléiades NEO à très haute résolution spatiale (2 m et 1,2 m respectivement) (Figure 64 A). (ii) Une méthode d'estimation par inversion de modèle de transfert radiatif appliquée aussi bien à des images satellites multispectrales issues de Sentinel 2 (Figure 64 B) qu'à des images hyperspectrales PRISMA (Figure 64 C), avec des résolutions spatiales de 5 à 30 m.

5.5 | Références



Photo : © Hendrik Sauvignet

Andréfouët, S., Muller-karger, F., Robinson, J. A., Christine, J., Torres-pulliza, D., Spraggins, S. A., & Murch, B., 2006. Global assessment of modern coral reef extent and diversity for regional science and management applications: a view from space. Proceedings of 10th International Coral Reef Symposium, Okinawa, June 2004. Plenary invited paper. (pp. 1732-1745).

Andréfouët, Serge. Fiches d'identification des habitats récifo-lagonaires de Nouvelle-Calédonie. Nouméa : IRD, mars 2014. 12 p. multigr. Sciences de la Mer. Biologie Marine. Notes techniques ; 6

Bajjouk T., Mouquet P., Lavrard A., Minghelli A., Drumetz L., Dalla Mura M., Chami M., Loyer S., Féret J.B., Broudic L., Germain T., Duval M., Devillers R., Bigot L., 2025. Projet SCO-BioEOS, Suivi des variables essentielles de la biodiversité côtière : Mise en œuvre sur le site pilote de La Réunion. Conventions Ifremer-CNES (22/1002917) et Ifremer-Préfecture de La Réunion/SGAR (22/1002992), Réf. DYNECO/LEBCO/202502TB, 60p.

Bajjouk T., Cordier C., Auby I., Liabot P.O., Kerninon F., Le Bouffant N., Trut G. & Oger Jeanneret H., 2019. Cartographie des herbiers de zostères - Guide technique. Convention Ifremer-AQUAREF Thème Formation et outils 2016-2018. Edition IFREMER. REF. DYNECO/LEBCO/19-01/TB. 105 p.

Mouquet P., Ropert M., Bajjouk T., Delacourt C. (2015). HYSCORES : Cartographies hyperspectrales appliquées aux écosystèmes coralliens et à leur état de santé - Rapport intermédiaire de fin de campagne d'acquisition. 40 pages.

Dupont, P., Theuerkauff, D., Poulain, S., Mouquet, P., Révillion, C., et al. (2025). Very-High Resolution Coral Reef Habitat Mapping using Pleiades Satellite Imagery in Mayotte, Indian Ocean. GeoHab 2025, Key West, Florida, United States.

Larousse. (n.d.). Site web de Larousse. [https://www.larousse.fr/dictionnaires/francais/t%C3%A9ction/77051](https://www.larousse.fr/dictionnaires/francais/t%C3%A9tection/77051)

Lecours, V. (Ed.) Proceedings of the 2025 International Symposium on Marine Geological and Biological Habitat Mapping (GeoHab 2025). Key West, FL, USA, May 12-16, 2025. Zenodo, 269 p., doi: 10.5281/zenodo.1524939.

Mouquet, P., Quod, J.-P., 2010. Cartographie des habitats benthiques littoraux et subtidiaux des îles françaises de l'océan Indien à partir de données hyperspectrales Phases 1 & 2 : Acquisition et analyse de la librairie spectrale sous-marine 2/2. Document annexe – Fiches par type , 98 pages

Mouquet, P., Quod, J.-P., 2010. Cartographie des habitats benthiques littoraux et subtidiaux des îles françaises de l'océan Indien à partir de données hyperspectrales Phases 1 & 2 : Acquisition et analyse de la librairie spectrale sous-marine 1/2. Rapport de synthèse , 98 pages

Mouquet, P., Schultz, M., Revillion, C., Cuet, P., & Pennober, G. (2025). Cartographie des coraux par imagerie satellite à très haute résolution: Application aux données SENTINEL-2, SPOT6/7, PLÉIADES et PLÉIADES NEO sur les récifs de la Réunion. Revue Française de Photogrammétrie et de Télédétection, 226(1), 45-61. <https://doi.org/10.52638/rfpt.2024.696>

Ifremer (2024). Plateformes instrumentées pour l'évaluation de l'état de santé des habitats récifaux et de la biodiversité associée (projets PLANCHA et p-PUMPI) (24 pp.). [Présentation PowerPoint non publiée]

Nicet 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, 25 pages, août 2015.

NICET J.B., MOUQUET P., 2023. Carte de la géomorphologie marine peu profondes (0-30m) de Bassas da India. Rapport MAREX/Espace-Dev pour le compte des TAAF, 26 pages.

NICET J.B., MONTGOLFIER B., PINAUT M., SAFI M., WICKEL J., 2024. Carte des habitats marins côtiers (0-40m) de la Martinique. Etat de santé des habitats Rapport MAREX/AQUASEARCH pour le compte du Parc Naturel Marin de Martinique (OFB), 101 pages.

NICET J.B., PENNOBER G., BUCKLEEN M., WICKEL J., BIGOT L., CHABANET P., OBURA D., 2016. Intensité et impact du blanchissement corallien massif de 2016 sur les récifs coralliens français de l'océan Indien. Projet BECOMING 2016. Rapport MAREX, ESPACEDEV, ENTROPIE, UR, IRD, SEAS-OI, CORDIO, AAMP, PNMM, PNMG, TAAF, RNMR, DEAL Réunion, RNB, IFRECOR, UE, 89 pages.

Ropert, P. Mouquet, T. Bajjouk, C. Delacourt (2016). HYSCORES : Cartographies hyperspectrales appliquées aux écosystèmes coralliens et à leur état de santé. RST-DOI/2016-04. 121 p. <http://dx.doi.org/10.13155/46122>

Tamborrino, L & Riera, E. (2025, 13 février). Entretien personnel

Dupont, P. (2025, 14 février). Entretien personnel

Mouquet, P. (2025, 21 février). Entretien personnel

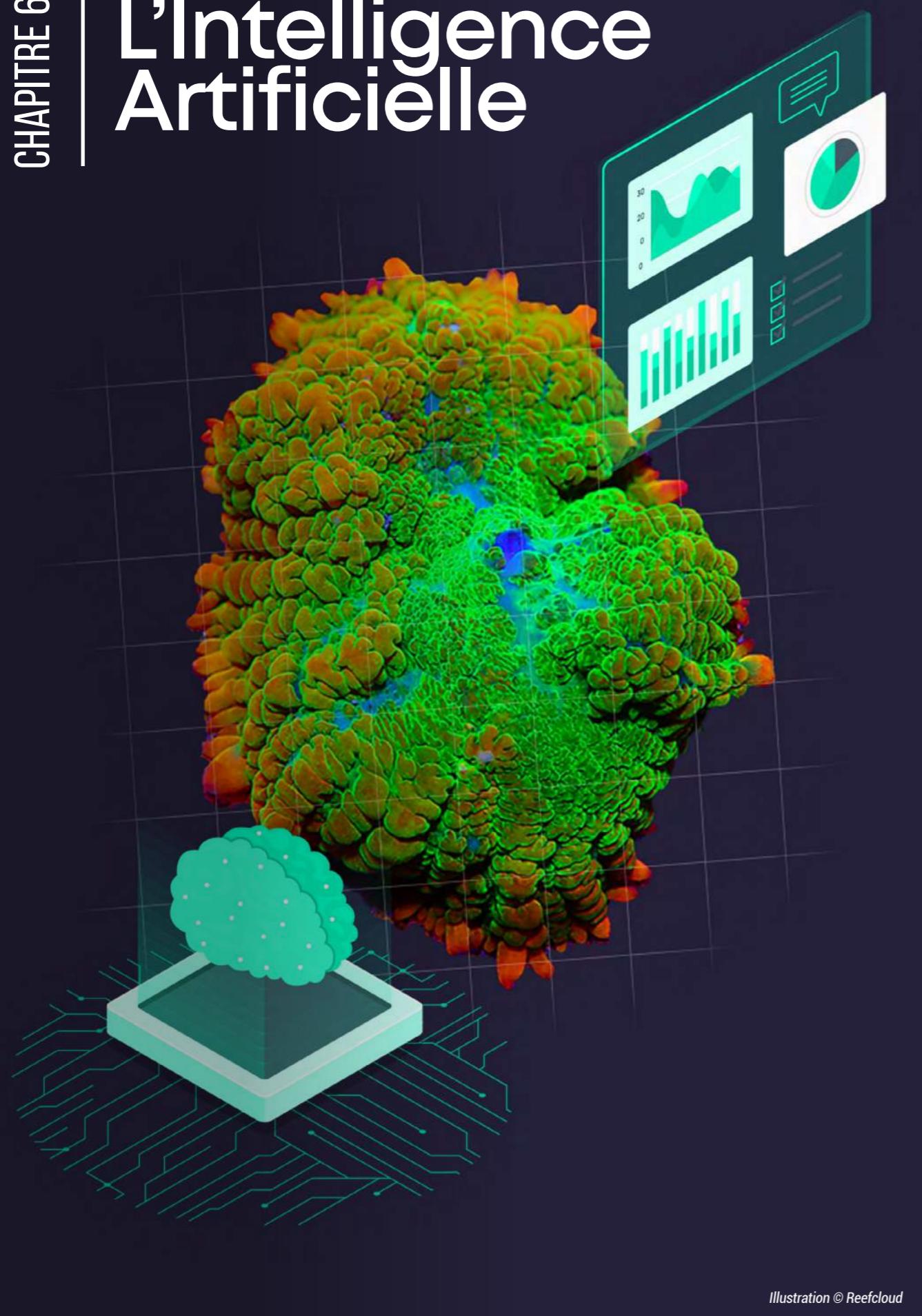
Mathey, J. (2025, 4 mars). Entretien personnel

Andréfouët, S. (2025, 11 mars). Entretien personnel

Bajjouk, T. (2025, 5 mars & 24 juillet). Entretien personnel

Nicet, J-B. (2025, 14 avril). Entretien personnel

L'Intelligence Artificielle



6.1 | Introduction

Ce chapitre est un chapitre complémentaire qui donne des clés de compréhension sur le concept d'Intelligence Artificielle et décrit les avancées actuelles (au moment de la rédaction du guide) dans la reconnaissance automatique et le traitement des données liées aux récifs coralliens.

La plupart des méthodes présentées dans les chapitres précédents s'appuient sur des techniques de traitement de données basées sur l'intelligence artificielle. Ces approches sont devenues essentielles pour évaluer l'état des récifs coralliens, car elles permettent de traiter rapidement et avec précision de grandes quantités d'informations.

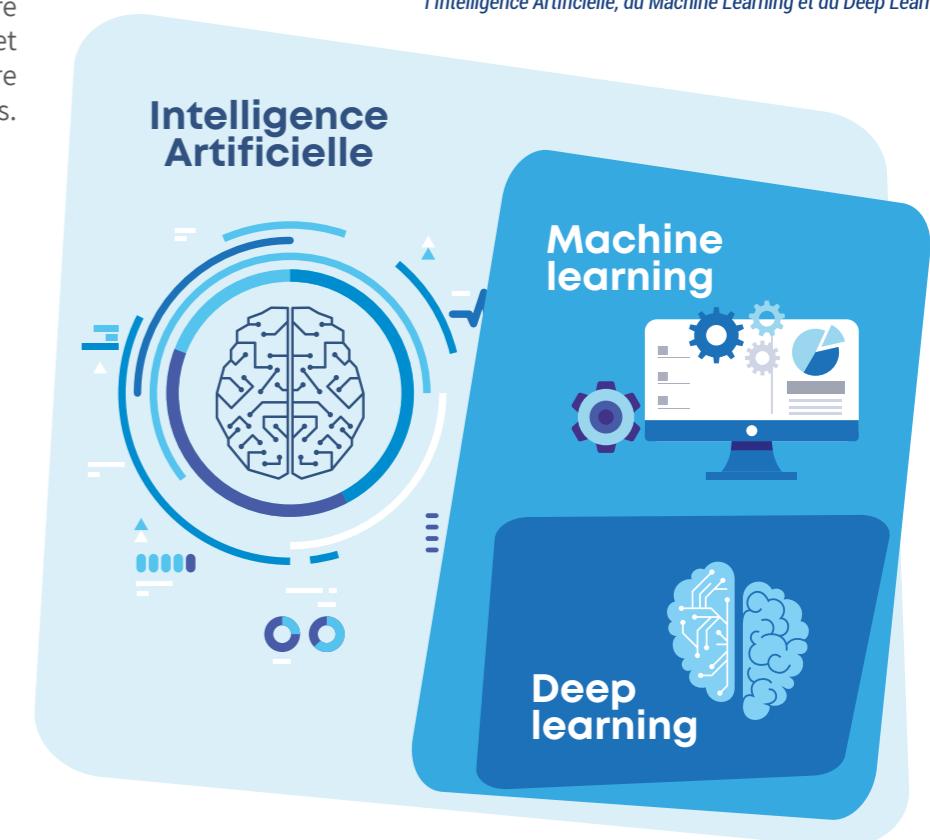
Par exemple, en acoustique passive, certains algorithmes sont entraînés à reconnaître des sons spécifiques et à les relier à des espèces particulières. En photogrammétrie, d'autres algorithmes sont utilisés pour segmenter les photographies et classer les différentes catégories benthiques. En traitement vidéo, des algorithmes permettent de détecter les poissons dans les séquences filmées et de les identifier.

De nombreux laboratoires développent leurs propres modèles, adaptés à leurs protocoles de recherche. Ces outils sont souvent performants mais restent internes et ne sont pas diffusés publiquement. Néanmoins, il existe sur internet quelques algorithmes accessibles à tous, notamment pour le traitement d'images. La première partie de ce chapitre présente ces ressources ouvertes et explique comment elles peuvent être intégrées au traitement des données.

Pour commencer, voici quelques définitions :

- L'Intelligence Artificielle (IA) est l'ensemble des programmes ou algorithmes permettant aux machines d'effectuer des tâches comme l'apprentissage, le raisonnement ou la résolution de problèmes. C'est un concept qui date des années 1950.
- Le Machine Learning ou apprentissage automatique est un sous-ensemble des techniques d'IA apparu dans les années 1980 qui utilise des méthodes d'apprentissage statistique pour "apprendre" à partir de données d'observation et ainsi améliorer le modèle avec l'expérience.
- Le Deep Learning ou apprentissage profond, apparu dans les années 2010, est un sous-ensemble du Machine Learning qui utilise des méthodes d'optimisation mathématique appliquées à des réseaux de neurones artificiels.

Figure 65. Schéma explicatif des ensembles et sous-ensembles de l'Intelligence Artificielle, du Machine Learning et du Deep Learning



CONTOUR DU CHAPITRE

Les applications de l'Intelligence Artificielle sont nombreuses, et ce chapitre ne prétend pas en proposer une vue exhaustive. Dans un premier temps, il illustre certains usages concrets à travers des algorithmes appliqués au traitement d'images (photoquadrats et orthophotographies). La seconde partie vise à fournir aux gestionnaires des repères pour mieux comprendre des notions désormais courantes, telles que l'apprentissage supervisé ou non supervisé. Enfin, il est important de noter que l'IA aurait pu être intégrée à l'ensemble des chapitres, tant son rôle devient central dans le traitement et l'exploitation des volumes massifs de données générés par ces nouvelles approches.



Photo : © Julien Winkel

6.2 | L'IA et le traitement de données pour les récifs coralliens

Dans cette partie, il s'agit d'aborder trois exemples d'algorithmes en libre accès qui permettent d'annoter automatiquement des photoquadrats de récifs coralliens : CoralNet, MERMAID et ReefCloud. Ces algorithmes utilisent le Deep Learning pour des applications dans le domaine de la vision par ordinateur (*cf partie 6.3*). Cette partie présente également un outil de traitement automatique des orthophotographies : RapidBenthos.

ANNOTATION AUTOMATIQUE DE PHOTOQUADRATS



Figure 66. Extrait du traitement d'images sur CoralNet. Un point a été projeté sur l'image et l'algorithme propose des catégories selon un pourcentage de fiabilité. L'utilisateur choisit la catégorie finale. © Priscilla Dupont.

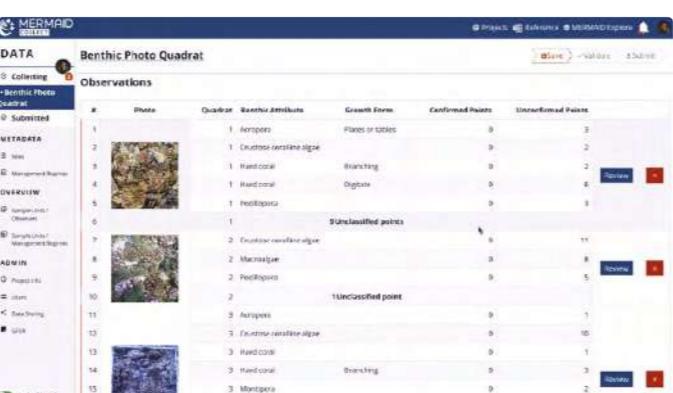


Figure 67. Capture d'écran d'un projet de traitement de photoquadrat sur la plateforme MERMAID © Alexandra Kler Lago.

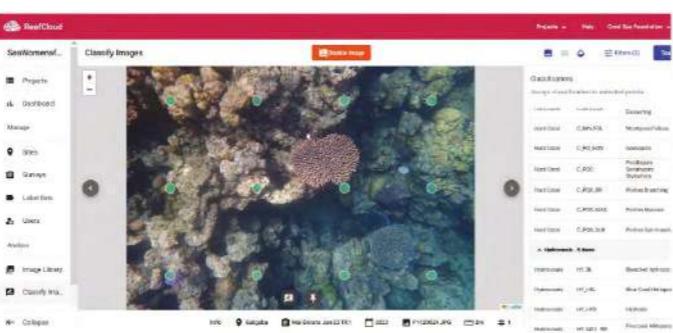


Figure 68. Capture d'écran d'un projet de traitement de photoquadrat sur ReefCloud © Coral Sea Foundation

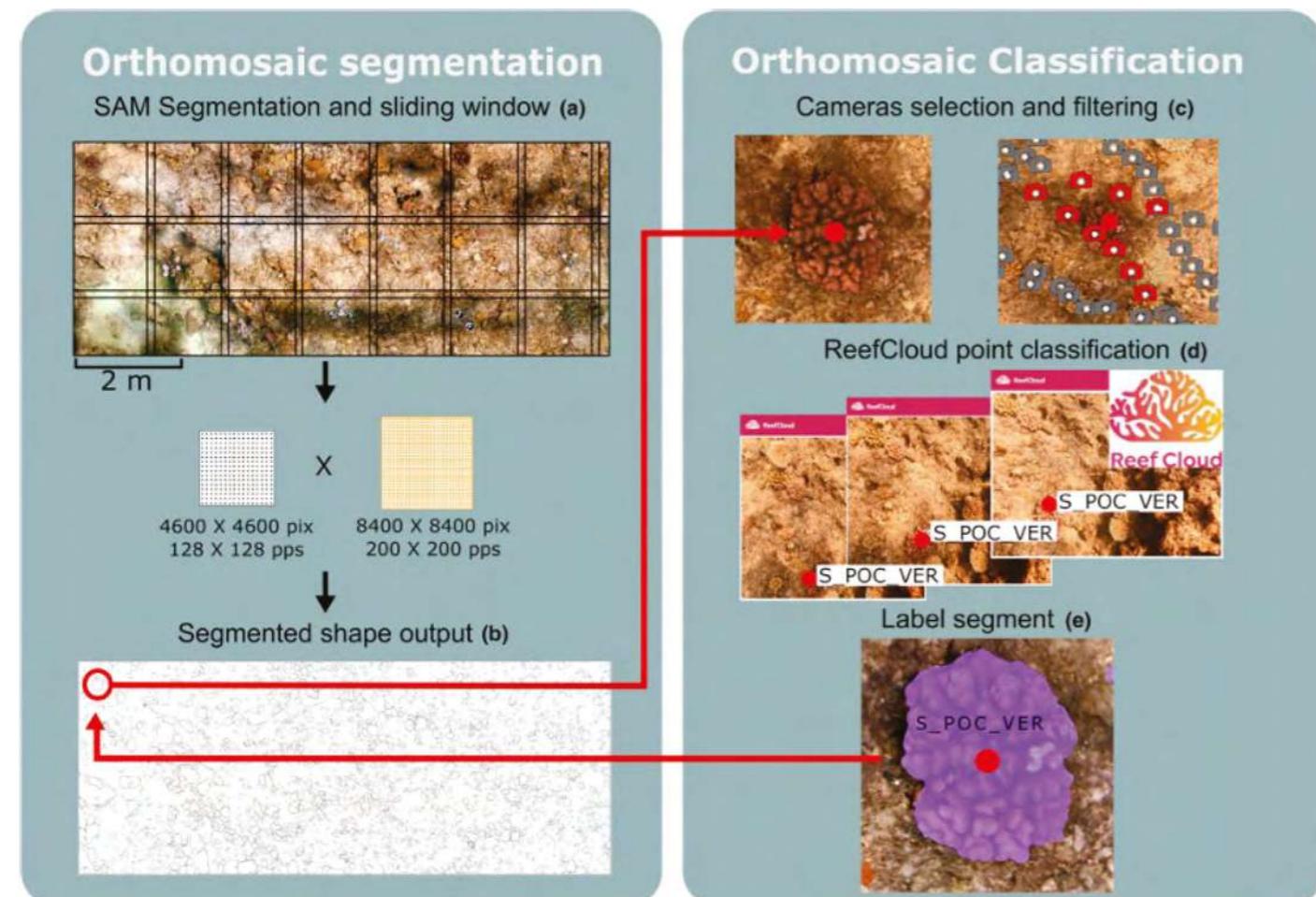
	CoralNet	MERMAID	ReefCloud
Objectif de gestion	Suivi des communautés benthiques		
A quoi ça sert ?	Traitement de photoquadrats pour identifier des taxons (à la famille, au genre, à l'espèce, etc. selon l'entraînement de l'algorithme)		
Rôle principal	Accélérer l'annotation manuelle de photoquadrats, habituellement réalisée via CPCe (Coral Point Count with Excel extensions)		
Comment ça marche ?	<ul style="list-style-type: none"> Une grille de points (nombre de points au choix) est projetée sur le photoquadrat et chaque point est annoté par un algorithme. Il y a pas besoin d'annoter préalablement manuellement 20% des images. L'algorithme se base sur l'annotation manuelle réalisée, et sur la base de données qu'il a déjà acquise. 	<ul style="list-style-type: none"> Une grille de 25 points est projetée sur le photoquadrat et chaque point est annoté par un algorithme. Il y a pas besoin d'annoter préalablement manuellement. MERMAID utilise la même base d'algorithme que CoralNet et toutes les sources publiques disponibles de CoralNet. 	<ul style="list-style-type: none"> Une grille de points (nombre de points au choix) est projetée sur le photoquadrat et chaque point est annoté par un algorithme. Il y a pas besoin d'annoter préalablement manuellement. L'algorithme se base sur l'annotation manuelle réalisée, et sur la base de données qu'il a déjà acquise pour annoter d'autres points.
Autre possibilités		<p>Sur la plateforme, il est possible de comparer son étude avec d'autres études dans la région alentour pour obtenir une vision d'ensemble.</p> <p>La plateforme propose aussi quelques éléments d'analyse (graphique, tableau, etc).</p>	
Comment l'utiliser concrètement ?	Via plateforme web : https://coralnet.ucsd.edu/	Via plateforme web : https://datamermaid.org/	Via plateforme web : https://reefcloud.github.io/resources/
Développement et gestion	Développé par l'Université de Californie mais l'aide principale provient du forum associé : https://coralnet.ucsd.edu/pages/help/	Développé et géré par une équipe dédiée au Wildlife Conservation Society. Contact équipe par mail : contact@datamermaid.org	Développé et géré par une équipe dédiée à AIMS. Contact équipe par mail : suupu@reefcloud.ai
Utilisateur type	Chercheurs, gestionnaires		
Région cible	Dépend du jeu de données d'entraînement de l'IA.		
Exemple de tutoriels	https://www.youtube.com/watch?v=68eZt5L7nA&list=PLG5z9lbwhS5NQNT3B2jrg3hxQgilDeZak9	https://www.youtube.com/@dataMERMAID/featured	https://youtu.be/jMz0VT-vuh0

OUTIL DE TRAITEMENT AUTOMATISÉ DES ORTHOPHOTOGRAPHIES

RapidBenthos est un outil de traitement automatisé conçu pour extraire des données écologiques à partir de grandes orthophotographies sous-marines (réefs coralliens, herbiers, fonds rocheux). L'outil a été développé et est géré par une équipe dédiée, à l'AIMS, que l'on peut facilement contacter par mail.

RapidBenthos se présente sous la forme d'un pipeline spécialisé disponible en Python : <https://github.com/tyremmers/RapidBenthos>. Il utilise deux algorithmes :

- un algorithme de segmentation, "Segment Anything Model" (SAM) de meta, est utilisé pour détecter et délimiter tous les organismes ou objets présents dans l'orthophotographie. Il découpe l'orthophotographie en différentes entités de type corail dur, corail mou, macroalgues, etc.
- un algorithme de classification utilisant un modèle préalablement entraîné avec ReefCloud afin d'identifier les différentes catégories benthiques à partir des photos collectées sur le terrain, puis d'attribuer ces catégories aux organismes délimités directement sur l'orthophotographie. Il faut avoir préalablement entraîné ReefCloud.



L'article associé à RapidBenthos est le suivant : Remmers, T., Boutros, N., Wyatt, M., Gordon, S., Toor, M., Roelfsema, C., Fabricius, K., Grech, A., Lechene, M., & Ferrari, R. (2025). RapidBenthos: Automated segmentation and multi-view classification of coral reef communities from photogrammetric reconstruction. *Methods in Ecology and Evolution*, 16, 427–441. <https://doi.org/10.1111/2041-210X.14477>

Contacts liés à la méthode de RapidBenthos :

- Renata Ferrari Legorreta, chercheuse à AIMS : r.ferrari@aims.gov.au (comprend le français)
- Tiny Remmers, chercheuse à AIMS : t.remmers@aims.gov.au (parle français)

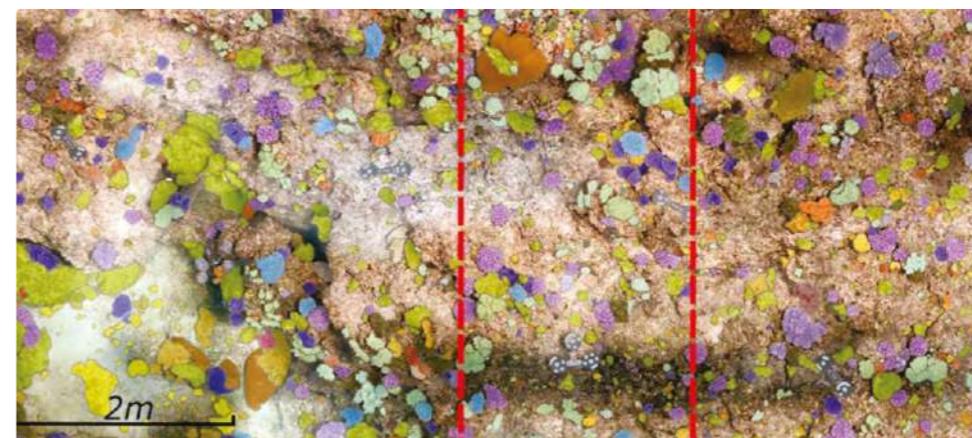


Figure 70. Rendu de RapidBenthos : orthomosaïque segmentée. Chaque corail est associé à une catégorie : massif, foliacé, branchu, corail mou, plus algue, invertébré mobile (Photo extraite de Remmers et al., 2024)

ACO_MIL	G_MON
ACX	G_ECH
ACT	ENC
AC_Bran_OTH	F_FUN_CM
ACD	SCP
ACO_OTH	SCB
ACS	SCM
G_SER	SP_OTH
G_STY	SPE
S_POC_EYD	SPC
S_POC_DAM	AS
S_POC_VER	AAC
G_POC_OTH	TA
CB_OTH_C	CA
CB_OTH_F	S
G_GOS	RL
G_POR	RC
G_LEP	MOB_FS
G_PLA	MOB_SF
G_DIP	MOB_SC
G_AST	MOB_OTH
G_LOB	MST
MAS_FL	MDB
MAS_OTH	Un_ID

6.3 | Synthèse des avantages-inconvénients de ces outils d'annotation de photoquadrats utilisant l'IA

À QUOI ÇA SERT ?

L'intelligence artificielle appliquée à des outils comme Coralnet, MERMAID et ReefCloud sert à accélérer l'annotation de photoquadrats. C'est une version automatisée de CPCe (logiciel de bureau qui permet d'annoter manuellement des points aléatoires sur photoquadrats).

CoralNet et ReefCloud requièrent une phase d'annotations manuelles avant utilisation, tandis que MERMAID se base sur des photos déjà annotées de sources anonymes. ReefCloud et MERMAID offrent la possibilité d'obtenir des éléments d'analyse (tableau, graphique, etc).

A partir d'orthophotographies, RapidBenthos est un pipeline automatisé, implémenté en Python, qui facilite le traitement d'orthophotographies. Il segmente l'orthophotographie en plusieurs entités (corail, macroalgues, etc) et les classe grâce à l'algorithme de ReefCloud.

QUELLES SONT LES LIMITES ET LES CONTRAINTES ?

Malgré leurs avancées, ces outils présentent plusieurs limites et contraintes. Tout d'abord, la qualité des résultats dépend fortement de la qualité et de la diversité des données d'entraînement utilisées pour entraîner les algorithmes, ce qui peut poser des problèmes dans des zones peu étudiées ou très diverses. Les modèles peuvent également présenter des biais si certaines classes d'espèces ou conditions environnementales sont sous-représentées dans les données. De plus, la reconnaissance automatique peut parfois être erronée, notamment face à des espèces peu représentées ou des images de mauvaise qualité (exposition, visibilité réduite). Un expert doit valider le résultat.

L'utilisation de l'IA, en particulier pour la segmentation avec RapidBenthos, nécessite des ressources informatiques spécifiques, surtout lors de la phase d'entraînement des modèles : cartes graphiques puissantes, grande quantité de mémoire vive, espace de stockage conséquent, etc.

6.4 | Principes de l'Intelligence Artificielle

LE MACHINE LEARNING OU « APPRENTISSAGE AUTOMATIQUE »

Le Machine Learning est un sous-domaine de l'intelligence artificielle (IA) qui permet à des systèmes informatiques d'apprendre à partir de données, c'est-à-dire d'améliorer leurs performances sans avoir à indiquer précisément comment effectuer chaque tâche.

Plutôt que de suivre un ensemble de règles strictes, ces systèmes traitent de grandes quantités de données, et cherchent des schémas type, des corrélations et des règles cachées, pour les aider à prendre des décisions ou faire des prédictions sur de nouvelles données.

On distingue principalement deux types de Machine Learning pertinents pour l'étude des récifs coralliens :

- **Apprentissage Supervisé (Figure 72)** : c'est le type le plus couramment utilisé pour la classification ou la prédiction d'états écologiques. Il repose sur l'utilisation de données annotées/étiquetées (la qualité des prédictions dépend de la qualité de ces données) : chaque exemple d'apprentissage est associé à une étiquette définie par un expert (par exemple, une

image de corail classée comme «sain», «mort», «algue», etc.). L'algorithme apprend à faire correspondre des caractéristiques visuelles (signatures spectrales, texture, profondeur, etc.) avec les étiquettes fournies, puis il peut généraliser ce qu'il a appris pour prédire l'étiquette de nouvelles données non vues.

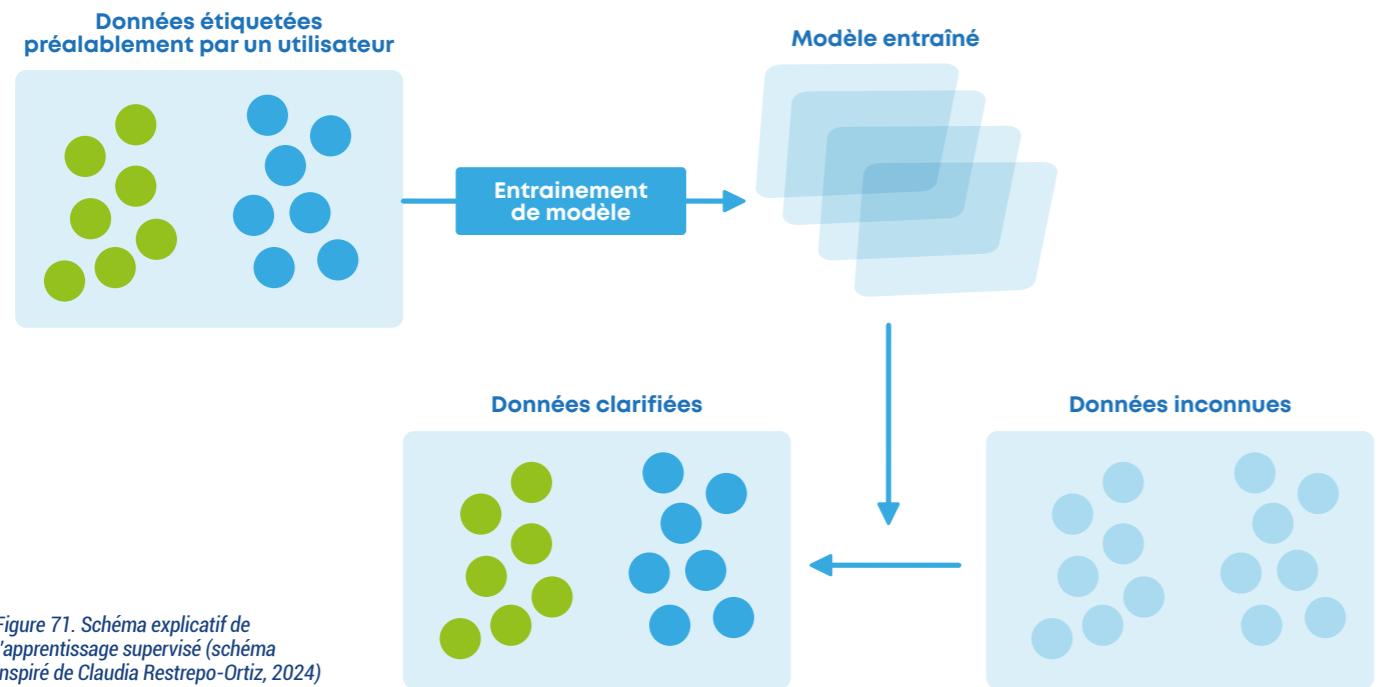


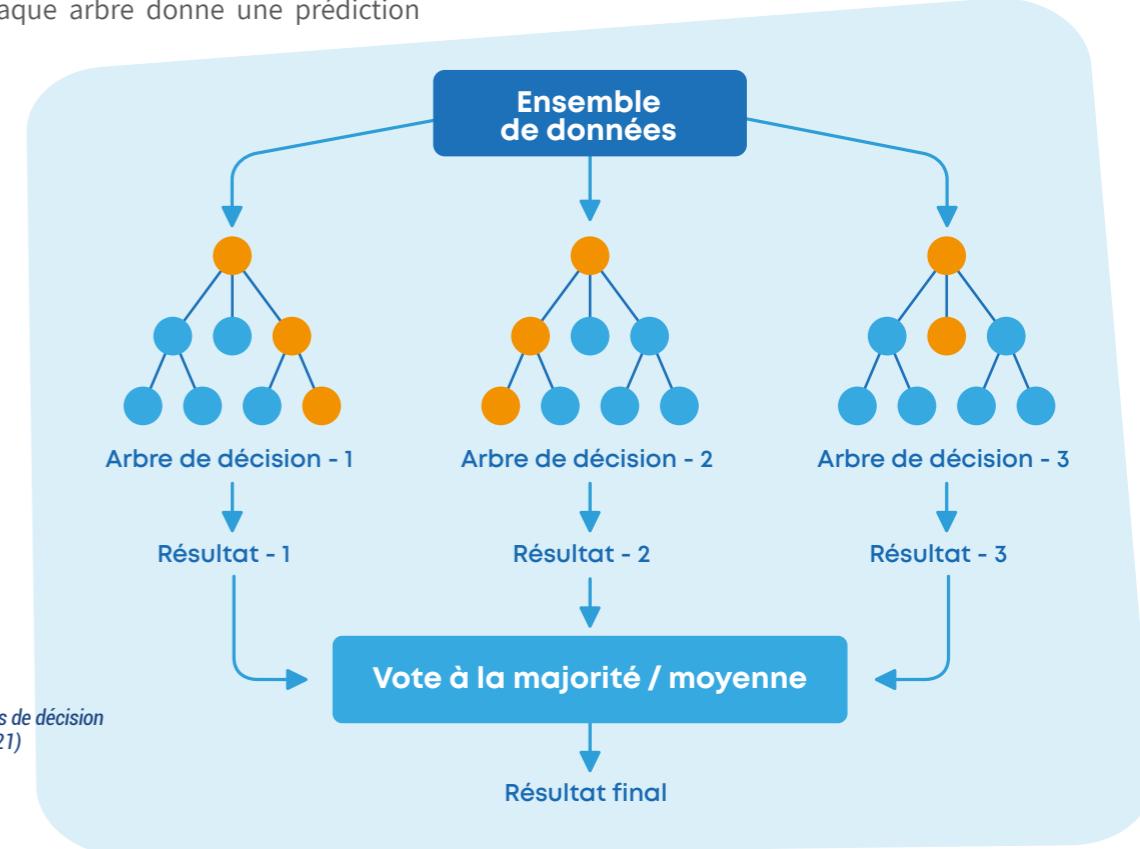
Figure 71. Schéma explicatif de l'apprentissage supervisé (schéma inspiré de Claudia Restrepo-Ortiz, 2024)

Exemple de méthode d'apprentissage supervisé : Random Forest (Figure 72)

Random Forest est une méthode d'apprentissage supervisé utilisée pour résoudre des problèmes de classification (prédire une catégorie) ou de régression (prédire une valeur continue). Elle repose sur l'agrégation de plusieurs arbres de décision entraînés sur des sous-ensembles aléatoires des données (d'où le mot «random») pour obtenir une prédiction plus robuste, stable et précise. Le principe de fonctionnement est le suivant :

1. **Création de plusieurs arbres de décision**
 - Chaque arbre est entraîné sur un échantillon aléatoire des données d'entraînement.
 - À chaque nœud de l'arbre, un sous-ensemble aléatoire de variables est testé pour décider la meilleure séparation.
2. **Prédiction sur des jeux de données nouveaux**
 - En classification : chaque arbre vote pour une classe, la classe majoritaire est retenue.
 - En régression : chaque arbre donne une prédiction

Figure 72. Illustration des arbres de décision Random Forest (Khan et al., 2021)



numérique, la moyenne des valeurs est la prédiction finale.

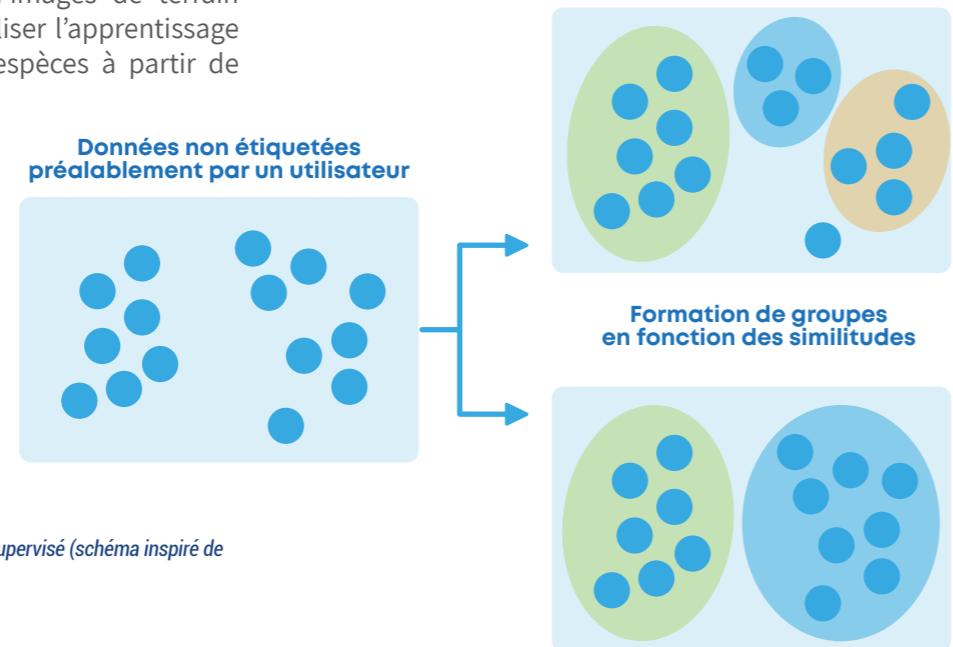
Cette méthode est appréciée pour sa robustesse, sa capacité à intégrer différentes variables explicatives (ex. : bathymétrie, couleurs, indices spectro-radiométriques), et son efficacité sur des jeux de données écologiques déséquilibrés. Ainsi, à partir d'informations sur la texture, la bathymétrie, l'hydrodynamisme, la méthode Random Forest pourra classer les types d'habitat par exemple. C'est un type d'algorithme utilisé en cartographie pour extrapoler les données de vérité terrain à une carte large échelle.

- **Apprentissage Non Supervisé (Figure 73)** : Ce type d'apprentissage travaille avec des données non étiquetées. L'apprentissage non supervisé a pour but de révéler des structures, des regroupements ou des motifs cachés, permettant ainsi de découvrir de nouvelles informations sans avoir besoin d'une supervision humaine préalable.

préexistantes pour apprendre à identifier les séquences.

- En acoustique passive, l'apprentissage peut être non supervisé lorsqu'il s'agit de détecter ou de regrouper des sons inconnus. Les sons sont alors traités et classés selon leurs caractéristiques communes, sans étiquette préalable.

- De même, pour le traitement d'images de terrain (voir paragraphe 6.2), on peut utiliser l'apprentissage supervisé pour reconnaître des espèces à partir de photos étiquetées dans une base de référence, tandis que l'apprentissage non supervisé peut servir à regrouper des images d'organismes inconnus selon leurs motifs ou formes similaires, afin de détecter de nouvelles catégories ou comportements.

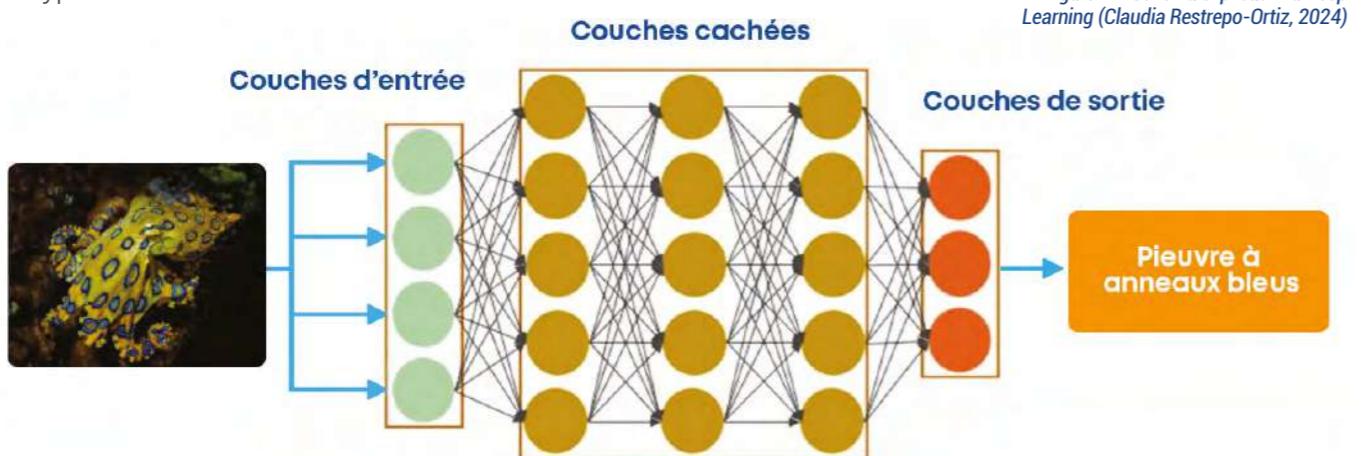


LA VISION PAR ORDINATEUR (COMPUTER VISION) PAR DEEP LEARNING

La vision par ordinateur est une discipline de l'IA qui utilise, entre autres, des techniques de Deep Learning pour permettre aux ordinateurs de «voir» et d'interpréter le monde visuel. Ses techniques sont très souvent utilisées pour le traitement d'images et de vidéos sous-marines (données plus complexes que des tableaux de données par exemple). Elle utilise des réseaux de neurones très puissants et nécessite de bons ordinateurs. Dans la vision par ordinateur, certaines tâches peuvent utiliser de l'apprentissage supervisé (s'il y a des étiquettes sur certaines images) ou non supervisé (l'ordinateur doit alors faire des groupes d'images sans connaître leurs classes à l'avance). La plupart du temps, c'est l'apprentissage supervisé qui est utilisé.

En lien avec le suivi des récifs coralliens les techniques de vision par ordinateur permettent aux systèmes de :

- Déetecter des objets :** Localiser des éléments spécifiques (coraux, poissons, étoiles de mer) dans une image ou une vidéo, sans nécessairement identifier leur type ou état.



En savoir plus : comment évaluer la précision d'un algorithme ?

Une fois qu'un algorithme d'IA est entraîné, il est crucial d'évaluer sa performance pour s'assurer qu'il est fiable et précis. Pour cela, on utilise diverses métriques :

- La «précision» évalue la fiabilité des détections positives de l'algorithme. Si l'algorithme signale «corail blanchi», la précision indique dans quelle mesure cette alerte est réellement un corail blanchi. Une haute précision signifie peu de «fausses alarmes» (l'algorithme ne se trompe pas souvent quand il dit qu'il y a un problème).
- Le «rappel» mesure la capacité de l'algorithme à trouver tous les cas positifs réels. Si de nombreux coraux sont blanchis, le rappel indique quelle proportion de ces coraux blanchis l'algorithme a effectivement détectée. Un haut rappel signifie que l'algorithme «n'oublie» pas beaucoup de cas de blanchissement.
- La précision et le rappel sont des métriques complémentaires. Un algorithme peut être très précis, en ayant eu juste quand il dit qu'un corail pâle est effectivement blanchi. Mais il peut avoir un rappel faible car il a manqué des coraux blanchis sur la totalité de l'image.
- La «perte» (Loss) : C'est une mesure de l'erreur de l'algorithme pendant la phase d'apprentissage. Plus

la valeur de la perte est faible, plus le modèle s'ajuste bien aux données d'entraînement (cela ne garantit pas une bonne généralisation sur de nouvelles images). On cherche à minimiser cette «perte» durant l'entraînement.

- L'«exactitude» (Accuracy) : C'est la proportion d'échantillons correctement classés. C'est une métrique simple mais qui peut être trompeuse dans des cas où certaines catégories sont beaucoup plus représentées que d'autres.

A noter :

- La performance du modèle dépend toujours de la qualité et de la représentativité des données d'entraînement.
- Un ancien jeu de données (photos ou vidéos par exemple) peut être ré-analysé par un algorithme qui est devenu plus performant au cours du temps.
- Ces métriques sont sensibles au déséquilibre des classes : lorsqu'il y a par exemple beaucoup de coraux sains et peu de coraux blanchis.

6.5 | Références

Collin, F.-D., Durif, G., & Restrepo-Ortiz, C. (2023). Machine Learning – An Overview.

CoralNet. (2025). Site web de CoralNet. <https://coralnet.ucsd.edu/>. Consulté le 05/08/2025

Khan, M. Y., Qayoom, A., Nizami, M., Siddiqui, M. S., Wasi, S., & Syed, K.-U.-R. R. (2021). Automated Prediction of Good Dictionary Examples (GDEX): A Comprehensive Experiment with Distant Supervision, Machine Learning, and Word Embedding-Based Deep Learning Techniques. Complexity. <https://doi.org/10.1155/2021/2553199>

Lozada-Misa P., B. D. Schumacher, and B. Vargas-Ángel. 2017. Analysis of benthic survey images via CoralNet: a summary of standard operating procedures and guidelines. Pacific Islands Fish. Sci. Cent., Natl. Mar. Fish. Serv., NOAA, Honolulu, HI 96818-5007. Pacific Islands Fish. Sci. Cent. Admin. Rep. H-17-02, 175 p. <https://doi.org/10.7289/V5/AR-PIFSC-H-17-02>

ReefCloud. (2025). Site web de ReefCloud. <https://reefcloud.ai/>. Consulté le 05/08/2025

Remmers, T., Boutros, N., Wyatt, M., Gordon, S., Toor, M., Roelfsema, C., Fabricius, K., Grech, A., Lechene, M., & Ferrari, R. (2025). RapidBenthos: Automated segmentation and multi-view classification of coral reef communities from photogrammetric reconstruction. Methods in Ecology and Evolution, 16, 427–441. <https://doi.org/10.1111/2041-210X.14477>

Restrepo-Ortiz, C. (2024). L'intelligence artificielle au service de l'océan [Présentation PowerPoint non publiée].

Compléments sur d'autres méthodes



Photo : © Julien Wicel

7.1 | Introduction



Photo : © Julien Wicel

Ce chapitre est un descriptif de méthodes complémentaires qui renseignent indirectement sur l'état des récifs coralliens. Trois grandes parties sont abordées :

- la télédétection acoustique, qui renseigne sur la bathymétrie, la géomorphologie, la texture des fonds.
- la télédétection optique active qui permet de mesurer la topographie dans de très petits fonds.
- les méthodes d'échantillonnage *in situ* basées sur le prélèvement de la biodiversité pour l'inventaire de la faune et de la flore discrètes ou difficiles à voir lors des suivis traditionnels.

La télédétection acoustique active et la télédétection optique active sont souvent utilisées en complément des méthodes abordées dans le chapitre 5 sur la télédétection.

7.2 | Télédétection acoustique

La télédétection acoustique sous-marine est une méthode d'observation indirecte basée sur la propagation des ondes acoustiques (ultrasons) dans l'eau, utilisée pour recueillir des informations sur l'environnement subaquatique, telles que la topographie des fonds marins, la présence d'objets, la composition des sédiments ou encore les caractéristiques biologiques ou physiques de la colonne d'eau. Les méthodes de télédétection acoustique sujettes de cette fiche sont le sondeur multifaisceau, le sondeur monofaisceau, le sonar latéral.

Elles ne sont pas utiles directement pour évaluer l'état des récifs coralliens, car ces techniques fournissent principalement des informations topographiques ou texturelles (relief, structure, rugosité, dureté du substrat), sans permettre d'identifier la couverture vivante du corail, de distinguer les espèces, ni de détecter des signes biologiques de stress comme le blanchissement, la nécrose ou la prolifération d'algues. Autrement dit, elles renseignent sur la structure physique du récif, mais pas sur sa vitalité ni sur la composition biologique qui détermine réellement son état. Néanmoins, ces outils sont complémentaires des méthodes évoquées dans le [chapitre 5](#) (Télédétection).

A | SONDEUR MONOFAISCEAU

Le sondeur monofaisceau est un instrument acoustique utilisé pour mesurer la profondeur de l'eau en envoyant une onde acoustique verticale depuis une embarcation vers le fond marin. Lorsque cette onde touche le fond, elle est réfléchie vers le capteur, ce qui permet de calculer la distance grâce au temps de retour de l'écho. Simple, robuste et peu coûteux, le sondeur monofaisceau fournit une donnée ponctuelle verticale à chaque mesure, ce qui le rend particulièrement utile pour des relevés bathymétriques de base.

Dans le cadre du suivi des milieux marins, il permet de caractériser la morphologie des fonds, de détecter des changements de profondeur, ou encore d'identifier certains types d'habitats (fonds meubles, durs, pente abrupte...).

La résolution verticale est généralement bonne, avec une précision de l'ordre de quelques centimètres, ce qui permet de détecter des variations fines de relief. En revanche, la résolution horizontale dépend de la vitesse de déplacement du navire et de la fréquence d'acquisition : les données sont ponctuelles et alignées selon la trajectoire de l'embarcation, ce qui limite la couverture spatiale.

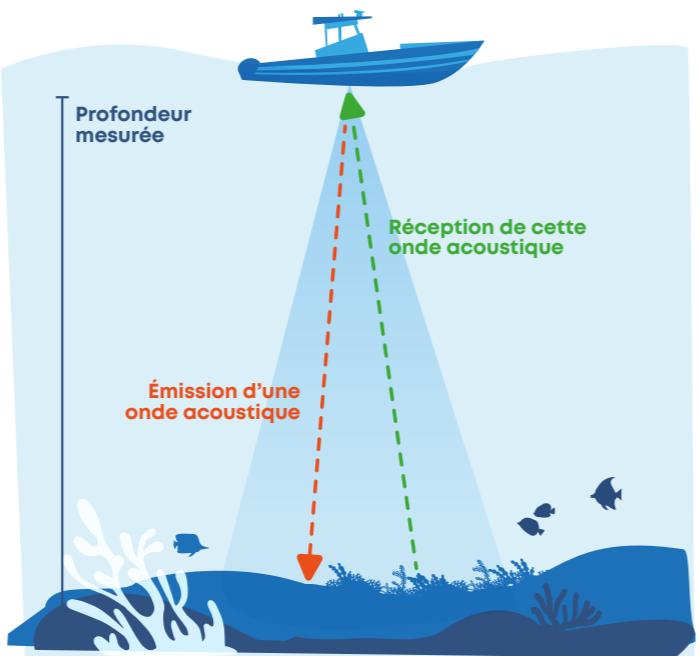


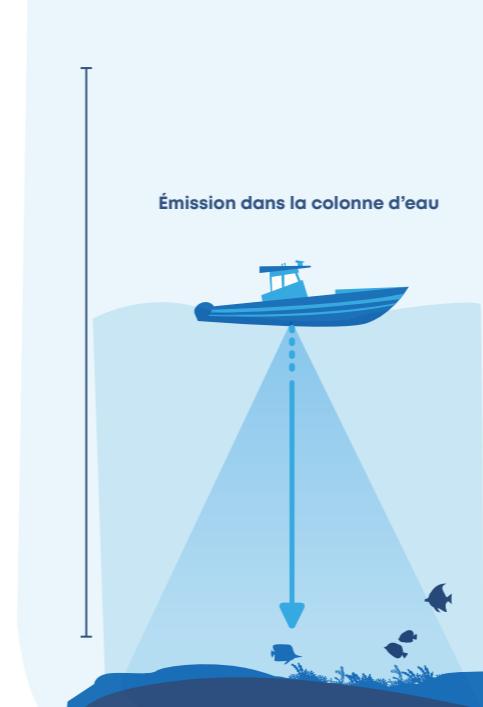
Figure 75. Schéma explicatif du fonctionnement du sondeur monofaisceau (site web : <https://www.cadden.fr/>)

À noter :

Contrairement au sonar à balayage latéral, qui fournit une image acoustique 2D très précise mais sans information directe de profondeur, le sondeur multifaisceau fournit une modélisation 3D complète avec des mesures de

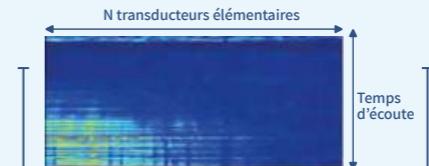
profondeur réelles pour chaque point. Il est donc particulièrement utile pour l'analyse morphologique des fonds marins, la détection de structures géologiques (dorsales, failles, canyons, glissements de terrain).

1 | Émission



Émission dans la colonne d'eau

2 | Réception



Réception pour chaque transducteur élémentaire : échantillonage des signaux retour

3 | Formation des voies



X faisceaux formés dans X directions

Formation des voies : analyse des échos dans les X directions choisies

Figure 76. Schéma explicatif du fonctionnement du sondeur multifaisceau (Cloarec, 2020)

B | SONDEUR MULTIFASCEAUX

Le sondeur multifaisceau est un instrument acoustique généralement monté sous la coque d'un navire, permettant de mesurer la profondeur de l'eau en plusieurs points simultanément, de bâbord à tribord, à chaque émission sonore. Contrairement au sondeur monofaisceau, qui envoie un seul faisceau vertical, le multifaisceau émet un éventail de faisceaux couvrant une large bande du fond marin. À mesure que le navire avance, l'appareil "balaye" le fond, ce qui permet de cartographier une zone continue, avec une largeur de couverture pouvant atteindre 20 km pour 5000 m de profondeur.

Le principe repose sur l'émission d'une onde acoustique qui se propage dans l'eau, est réfléchie par le fond marin, puis revient vers les capteurs situés sous le navire. En mesurant le temps de parcours aller-retour et en connaissant la vitesse du son dans l'eau de mer, le système calcule la distance, et donc la profondeur en chaque point touché par un faisceau.

Le sondeur multifaisceau fournit aussi une mesure de la réflectivité (ou intensité du signal réfléchi), un indicateur de la nature du fond. Un fond meuble (boue, vase) renvoie peu d'énergie, donc une faible réflectivité, tandis qu'un fond dur (roche, sable compact, cailloux) envoie un écho plus fort.

La résolution verticale (précision de la mesure de profondeur) est généralement très élevée, de l'ordre de quelques centimètres à décimètres, selon la profondeur, la fréquence utilisée et les conditions de navigation.

La résolution horizontale (distance entre deux points mesurés sur le fond) dépend de plusieurs facteurs : la profondeur d'eau, l'ouverture du faisceau, la densité d'émission, et la vitesse du navire. En très faibles fonds, elle peut atteindre environ un point tous les 10 mètres, voire mieux dans certains cas. Cette densité diminue avec la profondeur, mais reste suffisante pour générer une modélisation 3D détaillée du relief sous-marin.

C | SONAR À BALAYAGE LATÉRAL

Le sonar à balayage latéral (ou side-scan sonar) est un système acoustique utilisé pour produire des images détaillées du fond marin. Il est généralement monté sur un « poisson » – un module allongé remorqué derrière un navire ou intégré à un véhicule sous-marin autonome ou téléguidé (AUV ou ROV). Ce poisson est équipé d'émetteurs-récepteurs acoustiques qui émettent des faisceaux sonores latéraux, orientés vers le fond de part et d'autre de l'appareil.

Ces faisceaux acoustiques balaiant de larges bandes du fond marin, appelées fauchées, dont la largeur varie généralement entre 25 et 500 mètres de chaque côté, selon la profondeur et la fréquence utilisée. Le système n'enregistre pas la profondeur, mais l'intensité des échos réfléchis (la rétro-diffusion acoustique) en chaque point touché par le faisceau.

Le résultat est une image acoustique en niveaux de gris représentant la texture, la rugosité et la nature du fond. Les zones sombres correspondent aux fonds

mous ou peu réfléchissants (boue, vase), tandis que les zones claires indiquent des fonds durs ou des objets très réfléchissants (rochers, structures métalliques, épaves...).

L'image produite par le sonar latéral est en deux dimensions : elle représente l'intensité du signal réfléchi, mais ne fournit pas directement de mesure de profondeur. L'interprétation du relief repose donc sur l'ombre acoustique projetée par les objets (plus l'objet est haut, plus l'ombre est grande), ce qui nécessite une certaine expertise. Le sonar latéral est idéal pour caractériser la texture du fond, détecter des objets anthropiques ou naturels, localiser des épaves, ou encore suivre des structures géomorphologiques fines. Il est souvent utilisé en complément d'un sondeur multifaisceau, qui, lui, fournit une cartographie 3D avec des données de profondeur.

Selon la fréquence utilisée (généralement entre 100 kHz et 1 MHz), la résolution horizontale peut atteindre

quelques millimètres, typiquement entre 2 mm et 6 mm. Cela permet de détecter de très petits objets, de l'ordre de quelques centimètres, comme des câbles, des débris ou des traces biologiques.

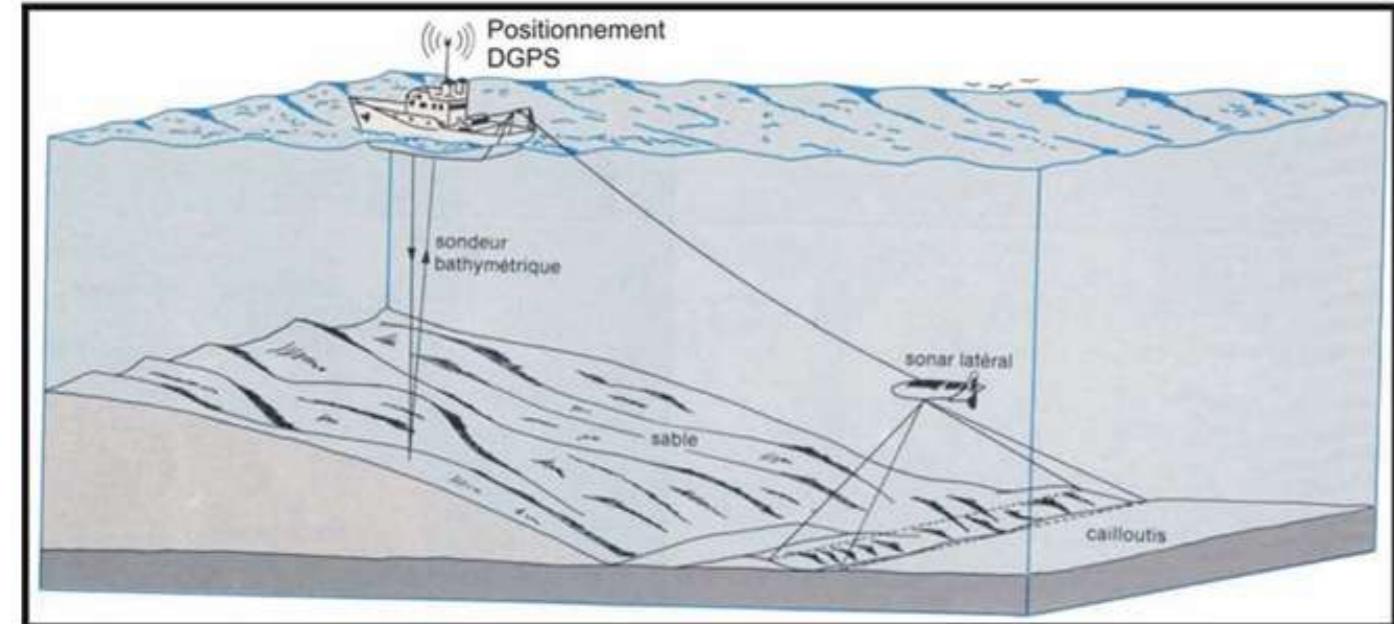


Figure 77. Sonar latéral tracté en position de balayage au-dessus du fond (Erhold et al., 2003)

7.3 | Télédétection optique active

La télédétection optique active utilise la lumière (sous forme de laser) pour émettre un signal et mesurer l'écho réfléchi par la surface évaluée.

LIDAR

Le LiDAR (Light Detection and Ranging) est une technologie de télédétection optique active qui utilise un faisceau laser pour mesurer les distances. Monté sur un avion ou un drone, le système émet des impulsions lumineuses vers la surface terrestre ou marine, et mesure le temps de retour de chaque signal réfléchi. En combinant ces mesures avec la position et l'orientation du capteur, il est possible de reconstruire un modèle 3D détaillé du relief, même sous une végétation dense ou dans des zones peu accessibles. Le SHOM a mené plusieurs campagnes LiDAR sur les territoires français. Ces campagnes sont plus ou moins récentes : <https://diffusion.shom.fr/donnees/altimetrie-littorale.html>

En milieu côtier et marin peu profond, on utilise un LiDAR bathymétrique, qui associe généralement :

- un laser infrarouge (non pénétrant) pour cartographier les surfaces émergées,
- un laser vert (≈ 532 nm), capable de pénétrer dans l'eau claire jusqu'à environ 30 à 50 mètres de profondeur, selon la turbidité.

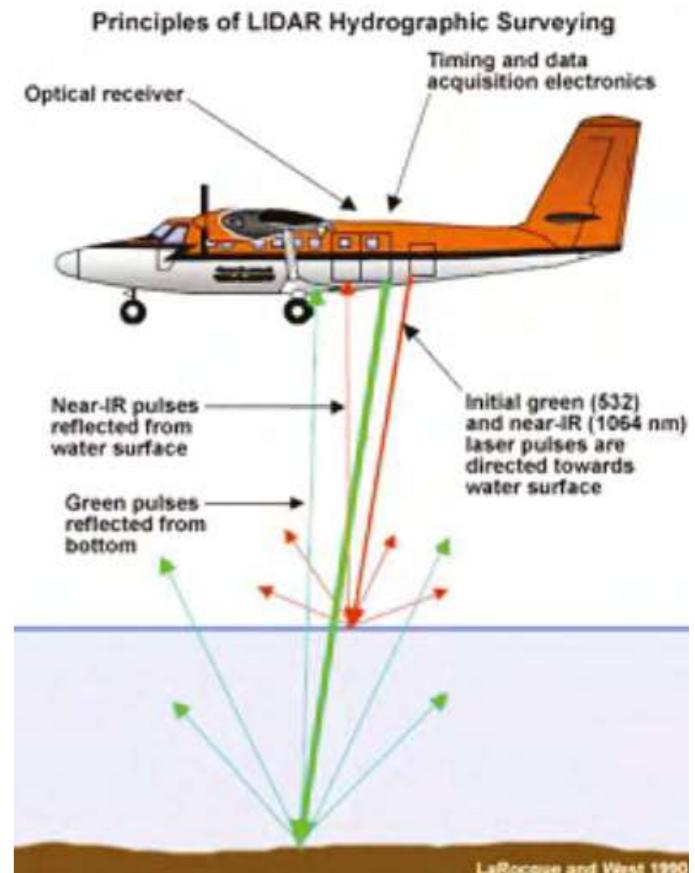
Ce double faisceau permet de produire un modèle numérique de terrain continu terre-mer, couvrant à la fois les zones intertidales et les fonds peu profonds. La résolution horizontale dépend de l'altitude de vol et de la densité de points, mais elle peut atteindre quelques dizaines de centimètres, tandis que la précision verticale est généralement de l'ordre de 10 à 20 cm, voire mieux dans de bonnes conditions.

Cependant, il faut noter que la résolution dépend fortement du compromis entre portée et finesse : une haute fréquence permet une image plus fine, mais sur une portée plus réduite, tandis qu'une basse fréquence couvre une zone plus large au détriment des détails.

Dans ce cadre, le programme Litto3D®, développé conjointement par l'IGN (Institut national de l'information géographique et forestière) et le SHOM (Service hydrographique et océanographique de la Marine), vise à produire une cartographie haute résolution du littoral français. En combinant données LiDAR topographiques et bathymétriques, il fournit une représentation homogène, précise et continue du relief côtier, essentielle pour :

- la gestion des risques littoraux (érosion, submersion marine),
- l'aménagement durable du territoire,
- le suivi des milieux naturels et la préservation des écosystèmes côtiers.

Figure 78. Principe de fonctionnement du LiDAR (La Rocque and West, 1990)



7.4 | Références

Cadden. (2025). Site web : <https://www.cadden.fr/>. Consulté le 5 août 2025.

Cloarec, M. (2018). Estimation de la bathymétrie par observation de la terre pour les énergies marines renouvelables [Thèse de doctorat, Université Paris Sciences et Lettres]. HAL. <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-02623951>

Collier, J. S., & Humber, S. R. (2007). Time-lapse side-scan sonar imaging of bleached coral reefs: A case study from the Seychelles. *Remote Sensing of Environment*, 108, 339–356. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2006.11.029>

Ehrhold, A. (s.d.). L'application du sonar à balayage latéral (SBL) pour la cartographie des habitats marins en domaine subtidal.

Geocean. (2025). Le sondeur multifaisceau. <https://www.geo-ocean.fr/Science-pour-tous/Nos-outils/Les-sondeurs/Le-sondeur-multifaisceau>. Consulté le 5 août 2025.

Macaigne, V. (2025, 21 mars). Entretien personnel

Photo : © Hendrik Sauvignet





Photo : © Ifremer

7.5 | Méthodes d'échantillonnage *in situ*

Cette partie se focalise sur les méthodes qui permettent d'échantillonner la faune (vertébrés ou invertébrés) afin de réaliser un inventaire des espèces présentes et d'en supposer la densité. Ces méthodes sont destructives : le système est immergé puis les animaux piégés sont ressortis, identifiés, mesurés.

Il existe de nombreuses méthodes d'échantillonnage de la faune : cette partie ne vise pas l'exhaustivité et présente quelques méthodes utilisées par des gestionnaires et experts interviewés.

A | ARMS : AUTONOMOUS REEF MONITORING STRUCTURES)

Chaque unité ARMS (Autonomous Reef Monitoring Structure) est conçue pour imiter la complexité physique d'un récif corallien, afin d'attirer et de favoriser la colonisation par une large diversité d'invertébrés benthiques. Ces structures sont constituées de plaques en PVC gris (type 1) de 23 x 23 cm, empilées selon une séquence de quatre couches ouvertes alternant avec quatre couches obstruées, créant ainsi une variété de microhabitats. L'ensemble est monté sur une plaque de base de 35 x 45 cm, ancrée au substrat par des plongeurs. Les unités restent immergées pendant une période standard de trois ans, permettant à une communauté stable de se développer.

Une fois remontées, les ARMS font l'objet de plusieurs types d'analyses :

- Photographies standardisées des plaques pour documenter visuellement la colonisation,
- Observations et identifications visuelles des espèces présentes (macrofaune notamment),
- Traitement d'image avec des outils comme ImageJ, CPCE ou PhotoQuad, pour quantifier la couverture, la diversité morphologique et les densités.



Figure 79. ARMS déployé en Indonésie et fixé à l'aide de quatre piquets en acier inoxydable © Chris Meyer

B | SMURF : STANDARD MONITORING UNITS OF RECRUITMENTS OF FISH



Figure 80. Photographie d'un SMURF (Amman, 2004)

Le SMURF (Standard Monitoring Unit for the Recruitment of Fishes) est un dispositif développé pour quantifier le recrutement des poissons récifaux, notamment dans les zones coralliennes, à différentes échelles spatiales

et temporelles. Sa conception permet aux plongeurs de collecter rapidement et efficacement les poissons juvéniles, y compris les espèces discrètes, cryptiques ou de très petite taille, sans avoir à extraire l'unité de l'eau.

Le dispositif est constitué :

- d'une épaisse matrice de débris, simulant un habitat refuge, contenue dans un panier métallique logé à l'intérieur d'un cylindre en plastique,
- d'un sac collecteur ouvert et amovible, qui récupère les poissons piégés à l'intérieur de la structure,
- et d'un dôme protecteur en filet nylon (maillage carré de 9,5 mm), tendu sur un cadre métallique circulaire. Ce filet amovible a pour rôle de réduire la prédation en limitant l'accès aux prédateurs tout en laissant passer les recrues ciblées.

C | FARMS : FISH-SPECIFIC AUTONOMOUS REEF MONITORING STRUCTURES

Les FARMS (Fish-Specific Autonomous Reef Monitoring Structures) sont des structures développées pour l'échantillonnage standardisé des poissons cryptobenthiques, souvent difficiles à observer par des méthodes classiques en raison de leur petite taille, de leur comportement discret et de la complexité de leur habitat. Conçus à partir de matériaux simples, accessibles et peu coûteux, ces dispositifs permettent une large application en milieux tropicaux, tempérés ou profonds.

Chaque unité FARMS se compose de :

- trois couches empilées de tubes en PVC, de trois diamètres différents, créant une diversité de micro-refuges adaptés à différentes espèces,
- un niveau supérieur et un niveau inférieur contenant des fragments de tubes en PVC, eux-mêmes placés dans un panier en filet, ce qui augmente la complexité structurale de l'ensemble.

Les FARMS ont démontré leur capacité à attirer des communautés spécifiques

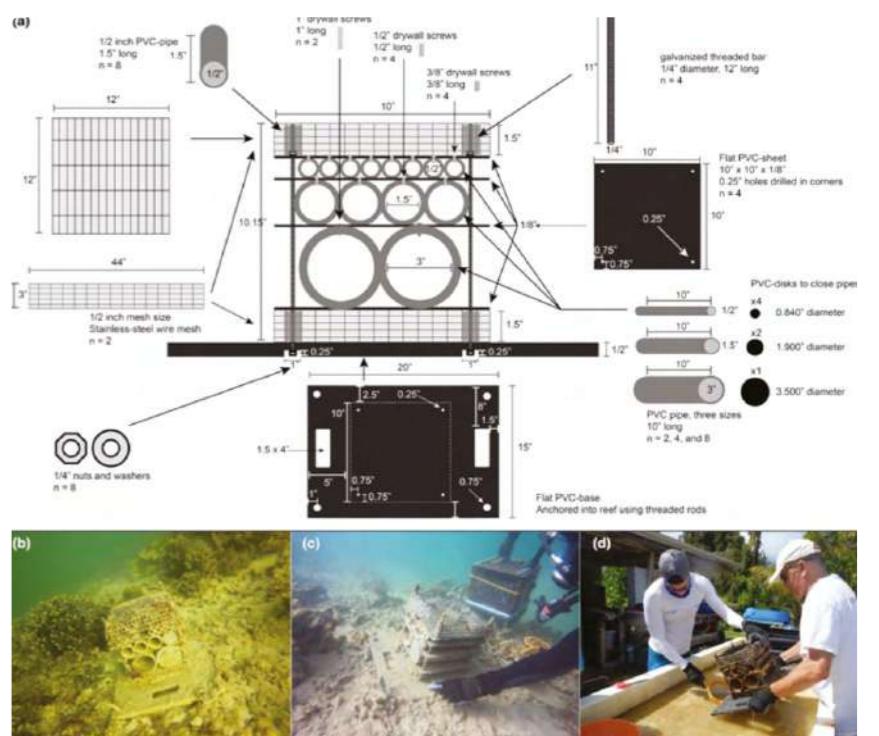


Figure 81. Illustration des FARMS (Brandl et al., 2023)

Les Biohut® sont des structures en acier contenant des huîtres, fixées à des structures artificielles (quais, pontons, etc.). Elles ont été développées et brevetées par Ecocean pour participer à la restauration des petits fonds côtiers, notamment dans les ports et les marinas en apportant de la complexité. La structure principale reste immobile et sa fonction est de restaurer les habitats, mais des structures amovibles peuvent être ajoutées, de la même forme mais plus petites pour être enlevées et refixées facilement par un plongeur.

Une fois le module retiré, toute la faune vagile est identifiée et mesurée. C'est une méthode destructive mais très exhaustive pour faire un inventaire régulier de la faune de la zone.

E | PCC : POST-LARVAE CAPTURE AND CULTURE



Cette technique sert à évaluer le recrutement de post-larves au niveau des côtes. Un filet muni d'une bouée, d'un collecteur et d'une lumière est disposé à la tombée de la nuit, autour d'une phase de nouvelle lune. Les post-larves sont attirées par la lumière et tombent dans le collecteur. Le filet est récupéré le lendemain matin et la faune récupérée est identifiée et mesurée.

Si l'espèce est vivante et identifiée, elle est relâchée. Sinon, elle est mise dans un bac de grossissement en attendant de voir apparaître les critères d'identification de l'espèce. Cette technique permet d'améliorer les connaissances sur les post-larves colonisant les côtes.

Figure 83. Mise en place du piège lumineux au coucher de soleil dans le cadre de la PCC (Post-Larvae Capture and Culture) © AGRNM



7.6 | Références

- Ammann, A. J. (2004). SMURFs: Standard monitoring units for the recruitment of temperate reef fishes. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 299, 135-154. <https://doi.org/10.1016/j.jembe.2003.08.014>
- Brandl, S. J., Weigt, L. A., Pitassy, D. E., Coker, D. J., Patrick, C. J., Luchese, M. H., ... & Parenti, L. R. (2023). Using standardized fish-specific autonomous reef monitoring structures (FARMS) to quantify cryptobenthic fish communities. *Methods in Ecology and Evolution*, 14, 1217-1229. <https://doi.org/10.1111/2041-210X.14085>
- Brainard, R. E., et al. (2009). Autonomous Reef Monitoring Structures (ARMS): A Tool for Monitoring Indices of Biodiversity in the Pacific Islands. NOAA.
- Couëdel, M. (2024). Settlement patterns and temporal successions of coral reef cryptic communities affect diversity assessment using ARMS.
- Couëdel, M. (2025, 10 mars). Entretien personnel.
- David, R., et al. (2019). Lessons from photo analyses of Autonomous Reef Monitoring Structures, as tools to detect (bio-)geographical, spatial, and environmental effects.
- Ecocean. (2025). Site web : <https://www.ecocean.fr/>. Consulté le 6 août 2025.
- González Goñi, S. (2017). Comparación de herramientas de análisis de imagen: eficiencia y uso en ecología bentónica de sustrato duro.
- National Coral Reef Monitoring Program. (2017). Assessing and monitoring cryptic reef diversity of colonizing marine invertebrates using ARMS deployed at coral reef sites across Wake Atoll in the Pacific Remote Island Areas from 2014-03-16 to 2017-04-23 (NCEI Accession 0176227). NOAA.
- Ransom, C. (2017). The importance of standardization for biodiversity comparisons: A case study using autonomous reef monitoring structures (ARMS) and metabarcoding to measure cryptic diversity on Mo'orea coral reefs, French Polynesia.
- Smithsonian National Museum of Natural History. (s.d.). Global ARMS Program – Protocols. <https://www.naturalhistory.si.edu/research/global-arms-program/protocols>. Consulté le 5 août 2025.
- Vallès, H., Kramer, D. L., & Hunte, W. (2006). A standard unit for monitoring recruitment of fishes to coral reef rubble. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 336, 171-183. <https://doi.org/10.1016/j.jembe.2006.05.005>
- Vallès, H., Kramer, D. L., & Hunte, W. (2008). Temporal and spatial patterns in the recruitment of coral-reef fishes in Barbados. *Marine Ecology Progress Series*, 363, 257-272. <https://doi.org/10.3354/meps07432>

Photo : © Ifremer

ANNEXES

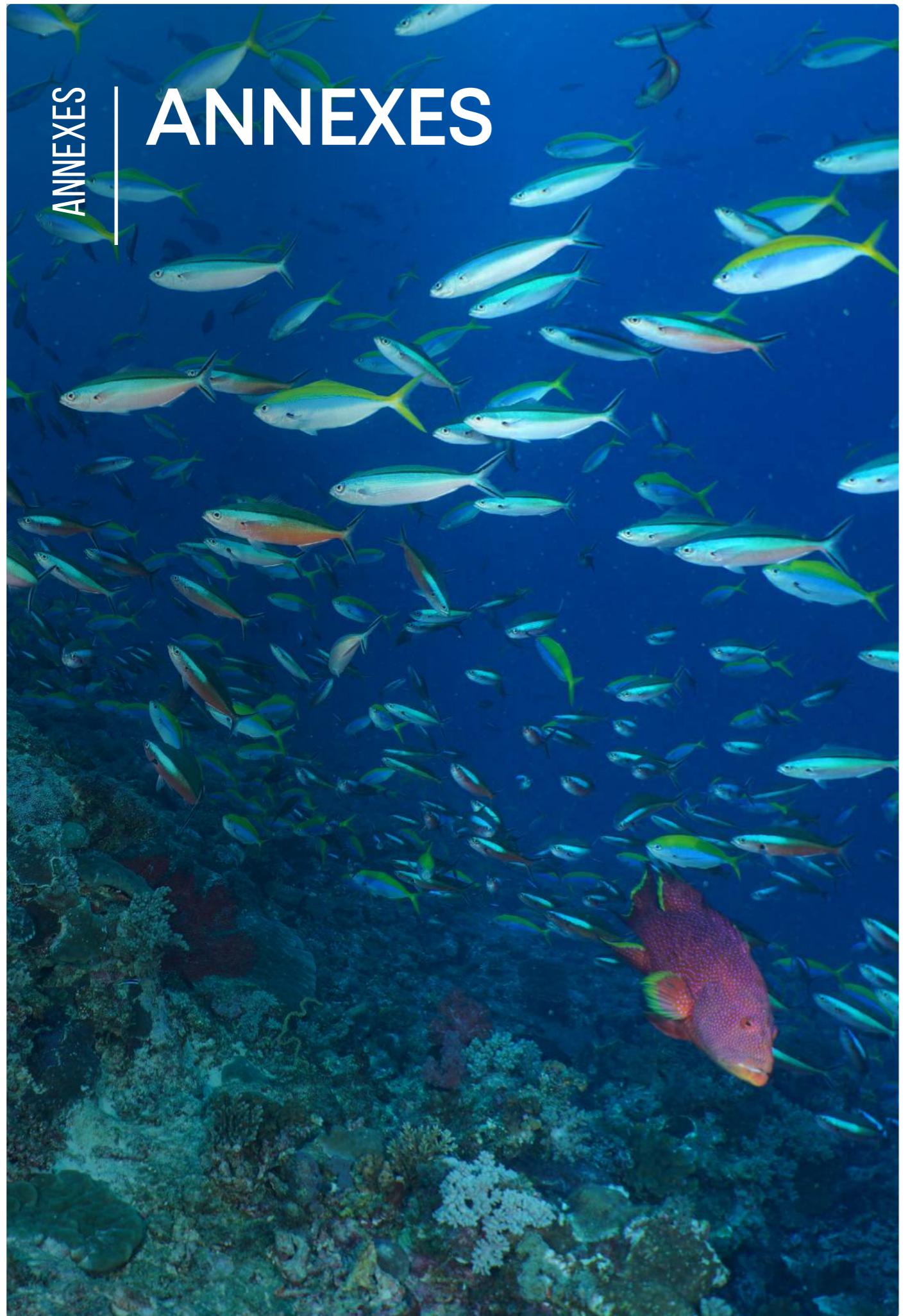


Photo : © Hendrik Sauvignet

Glossaire

- **2,5D (ou «pseudo-3D»)** : représentation visuelle affichée sur une surface en deux dimensions donnant une impression de profondeur ou de volume. Contrairement à une véritable image 3D, elle ne permet pas de manipuler ou mesurer les dimensions verticales (profondeur réelle ou hauteur). Et contrairement à une image purement 2D, elle suggère une perspective ou un relief, souvent grâce à l'ombre, la perspective, ou la texture. Ainsi, la 2,5D se situe entre la 2D et la 3D : ce n'est pas une reconstruction tridimensionnelle complète, mais une 2D enrichie pour imiter visuellement la 3D.
- **ADN (acide désoxyribonucléique)** : molécule biologique contenue dans les cellules porteuse de l'information génétique (ou génome) des êtres vivants.
- **ADNe (ADN environnemental)** : est défini comme l'ADN extrait à partir d'échantillons environnementaux (par exemple eau, sol, air, etc.) sans avoir besoin d'isoler les organismes au préalable. Il se compose d'ADN extracellulaire, libre ou adsorbé sur des particules organiques et inorganiques, ainsi que d'ADN intracellulaire provenant de diverses sources. Ces sources incluent des microorganismes unicellulaires (bactéries, virus ou protistes), des organismes pluricellulaires de petite taille et entiers (zooplancton ou méiofaune), ainsi que de traces et de résidus (p.ex., peau, fèces, gamètes, mucus, salive, etc.) d'organismes plus grands (p.ex., vertébrés, invertébrés, plantes, etc.)
- **Amplification (ADNe)** : étape de laboratoire (principe général de la PCR ou Polymerase Chain Reaction) qui permet de copier en grande quantité un fragment spécifique d'ADN afin de le rendre détectable et analysable.
- **Approche spécifique (par opposition à l'approche multispécifique en ADNe)** : elle vise à mettre en évidence la présence d'une espèce particulière en détectant une séquence d'ADN qui lui est propre. Cette séquence, appelée marqueur génétique, peut être reconnue par des amorces, c'est-à-dire de courtes séquences d'ADN synthétiques, qui permettent ensuite son amplification grâce à la PCR.
- **Approche multispécifique (par opposition à l'approche spécifique en ADNe)** : offre la possibilité d'identifier simultanément plusieurs espèces d'un même groupe taxonomique, sans cibler une espèce en particulier. L'ADN extrait est d'abord amplifié par PCR à l'aide d'amorces universelles. Les fragments amplifiés sont ensuite séquencés, et les données obtenues sont traitées par bio-informatique. Enfin, les séquences sont comparées à des bases de données de référence afin de leur attribuer une identité taxonomique.
- **ARN (Acide RiboNucléique)** : proche chimiquement de l'ADN, il est synthétisé dans les cellules à partir d'un segment d'ADN matrice dont il est une copie.
- **ASV (Autonomous Surface Vehicle)** : robot flottant qui se déplace à la surface de l'eau et qui peut accomplir des missions seul, sans pilote à bord ni télécommande, grâce à ses capteurs et à ses programmes de navigation.
- **Belt transect** : transect en bande utilisé pour estimer la distribution des organismes au sein d'une zone donnée.
- **Caméra d'action** : caméra numérique utilisée pour filmer tout en étant immergé dans l'action. Les caméras d'action sont habituellement compactes, robustes et résistantes à l'eau, voire totalement étanches. Elles sont le plus souvent dotées d'un objectif de type grand angle permettant de capturer un maximum de l'action en cours.
- **Capsule de filtration** : élément contenant un filtre (généralement en membrane) utilisé pour retenir l'ADN présent dans l'eau lors du prélèvement sur le terrain. L'eau passe à travers la capsule, laissant l'ADN sur le filtre.
- **Carte d'habitats** : carte qui identifie, localise et décrit les zones écologiques homogènes du fond marin, appelées «habitats», en fonction de la géomorphologie, du substrat et du peuplement.
- **Carte géomorphologique** : carte représentant la morphologie des fonds marins, en identifiant les formes de relief, leur origine, leur évolution, ainsi que les dynamiques en jeu (sédimentation, érosion, tectonique, etc.).
- **Cible au sol ou GCP (Ground Control Point) en photogrammétrie** : point visible sur les images dont les coordonnées ont été mesurées par diverses méthodes sur le terrain (ex : GPS depuis la surface ou repérage d'éléments sur bathymétrie). Il est utilisé pour géoréférencer et ajuster la précision d'un modèle photogrammétrique.

- **Complexité acoustique (indice de) (ou Acoustic Complexity Index - ACI)** : mesure la complexité d'un enregistrement en combinant l'analyse de la variabilité du volume sonore à la fois entre bandes de fréquences et dans le temps.
- **Crépine** : dispositif placé à l'extrémité d'un tuyau de pompage qui permet de filtrer les gros débris.
- **Séquençage** : processus de lecture de la composition exacte des bases (A, T, C, G) d'un fragment d'ADN afin d'en déterminer la séquence génétique.
- **Deep Learning ou apprentissage profond** : apparu dans les années 2010, c'est un sous-ensemble du Machine Learning qui utilise des méthodes d'optimisation mathématique appliquées à des réseaux de neurones artificiels.
- **dPCR (Digital PCR)** : technique permettant de diviser l'échantillon en de très nombreuses petites réactions indépendantes, permettant de compter avec précision le nombre de copies d'ADN et d'améliorer la sensibilité de détection.
- **ddPCR (Droplet Digital PCR)** : variante de dPCR où l'échantillon est partitionné en milliers de micro-gouttelettes, chacune agissant comme une réaction PCR indépendante, ce qui permet une quantification extrêmement précise de l'ADN.
- **Dimension fractale** : grandeur qui a vocation à traduire la façon qu'à un ensemble fractal de remplir l'espace, à toutes les échelles.
- **Entropie spectrale (indice de) (Hs)** : elle mesure si l'occupation du paysage sonore est très homogène entre différentes bandes de fréquences ou si au contraire une bande de fréquence est beaucoup plus utilisée que les autres.
- **FabLab** : espace collaboratif qui met à disposition des outils de fabrication numérique pour permettre aux utilisateurs de donner vie à leurs idées et leurs prototypes
- **Fréquence (en acoustique passive)** : nombre de cycles ou d'oscillations que les ondes sonores effectuent par seconde. Elle est mesurée en Hertz (Hz). Plus une fréquence est élevée (beaucoup de cycles par seconde), plus le son est aigu. Plus une fréquence est basse (peu de cycle par seconde), plus le son est grave.
- **Intelligence Artificielle (IA)** : ensemble des programmes ou algorithmes permettant aux machines d'effectuer des tâches comme l'apprentissage, le raisonnement ou la résolution de problèmes.
- **Levé bathymétrique** : mesure de hauteur d'eau et de distance réalisée avec un capteur (sondeur monofaisceau ou multifaisceaux, sonde, sonar...) associée à un système GNSS (Global Navigation Satellit System) professionnel et précis afin de déterminer le positionnement géographique.
- **LIT (Line Intercept Transect)** : mesure des longueurs de substrats interceptés par un transect afin d'en déterminer les proportions.
- **Machine Learning ou apprentissage automatique** : sous-ensemble des techniques d'IA qui utilise des méthodes d'apprentissage statistique pour "apprendre" à partir de données d'observation et ainsi améliorer le modèle avec l'expérience.
- **Macrofaune** : désigne les animaux pouvant être facilement visibles à l'œil nu (par opposition à microfaune, non visible à l'œil nu).
- **Méthode du quadrat** : pose d'un cadre au sol pour estimer la composition et la couverture des éléments présents dans son périmètre.
- **MSA (Medium-Scale Approach)** : ensemble de méthodes semi-quantitatives permettant de décrire l'habitat à une échelle intermédiaire.
- **Orthophotographie** : image, généralement composée d'un ensemble de photographies, qui a été géométriquement corrigée (orthorectifiée) et projetée (orthoprojection) sur un plan de projection choisi (par exemple une projection cartographique). Toutes les déformations dues à la perspective de la prise de vue (l'inclinaison de l'appareil, le relief du terrain, la distorsion de l'objectif de l'appareil photo, etc.) ont été corrigées lors du traitement photogrammétrique.
- **PCR (Polymerase Chain Reaction)** : technique permettant d'amplifier rapidement un fragment spécifique d'ADN afin d'en obtenir de grandes quantités à partir d'un échantillon minime.
- **PIT (Point Intercept Transect)** : relevé du type de substrat situé sous des points fixes disposés le long d'un transect.
- **Pipeline (français : chaîne ou flux de traitement)** : suite d'étapes organisées de manière séquentielle (ou parfois parallèle) pour automatiser un processus.
- **Proxy ou indicateur de substitution** : variable indirecte ou mesure de remplacement utilisée pour estimer ou reconstruire une variable environnementale.
- **qPCR (Quantitative PCR ou PCR en temps réel)** : variante de la PCR qui permet de suivre l'amplification de l'ADN en temps réel grâce à des marqueurs fluorescents, ce qui permet de quantifier la quantité initiale d'ADN.
- **Résolution horizontale (sondeur mono/multifaisceau)** : distance entre deux points consécutifs mesurés sur le fond, donc liée à la fréquence d'acquisition et à la vitesse du bateau – c'est la densité des points le long de la trajectoire.
- **Résolution spatiale** : la résolution des images numériques est définie par le nombre de pixels par unité de surface (millimètres). En télédétection, on exprime la résolution des images par la taille de la zone couverte par un pixel. Chaque pixel de l'image correspond à une partie de la surface de la Terre. On parle alors de « résolution spatiale au sol ».
- **Résolution spectrale** : la résolution spectrale est la capacité du capteur à distinguer des rayonnements électromagnétiques de fréquences différentes. Plus le capteur est sensible à des différences spectrales fines, plus la résolution spectrale du capteur est élevée et permet de distinguer les objets entre eux. La résolution spectrale d'un capteur dépend du dispositif de filtrage optique qui décompose l'énergie captée en bandes spectrales plus ou moins larges.
- **Résolution verticale (sondeur mono/multifaisceau)** : précision dans la mesure de la profondeur (axe Z) – souvent de l'ordre du centimètre à quelques décimètres selon le matériel et les conditions.
- **Rugosité (indice de)** : cet indice quantifie la "richesse" de la surface d'un récif. Un récif très rugueux présente de nombreuses anfractuosités, crevasses, cavités et variations de hauteur, tandis qu'un récif peu rugueux est plus plat et moins structuré. Il est possible de calculer la rugosité linéaire (rapport entre la distance 3D qui épouse le relief et la distance 2D le long d'un transect à plat) et la rugosité surfacique (rapport entre la surface 3D et la surface 2D). Si l'indice est proche de 1, alors le site est plutôt plat.
- **Segmentation (algorithme de)** : outil qui utilise le Deep Learning pour découper une image en régions distinctes selon des caractéristiques définies (par exemple détourage de morphotypes de coraux).
- **SIG** : Système d'Information Géographique. C'est un système d'information conçu pour recueillir, stocker, traiter, analyser tous les types de données spatiales et géographiques.
- **Structure from motion** : la photogrammétrie par Structure from Motion (SfM) est une branche de la photogrammétrie. C'est une méthode automatisée qui permet de reconstruire des objets en 3D à partir d'une série d'images 2D sans connaître à l'avance la position de la caméra ni les points de contrôle. Elle utilise des algorithmes pour estimer automatiquement la géométrie de la scène. À l'inverse, la photogrammétrie traditionnelle repose sur des images prises depuis des positions connues des caméras et des points de contrôle au sol pour reconstruire les modèles 3D
- **Vagile** : qualifie un organisme apte à se mouvoir librement dans son milieu (par opposition à sessile).
- **Valeur refuge** : métrique 3D qui permet de quantifier le volume de refuge/habitat procuré par une morphologie corallienne.
- **Zenodo** : entrepôt de données et d'archives ouvertes, hébergé par le CERN (Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire), qui permet de déposer et partager divers produits de recherche (données, publications, logiciels). Accessible via ce lien : <https://zenodo.org/communities/umr-entropie/records?q=&l=list&p=1&s=10&sort=newest>

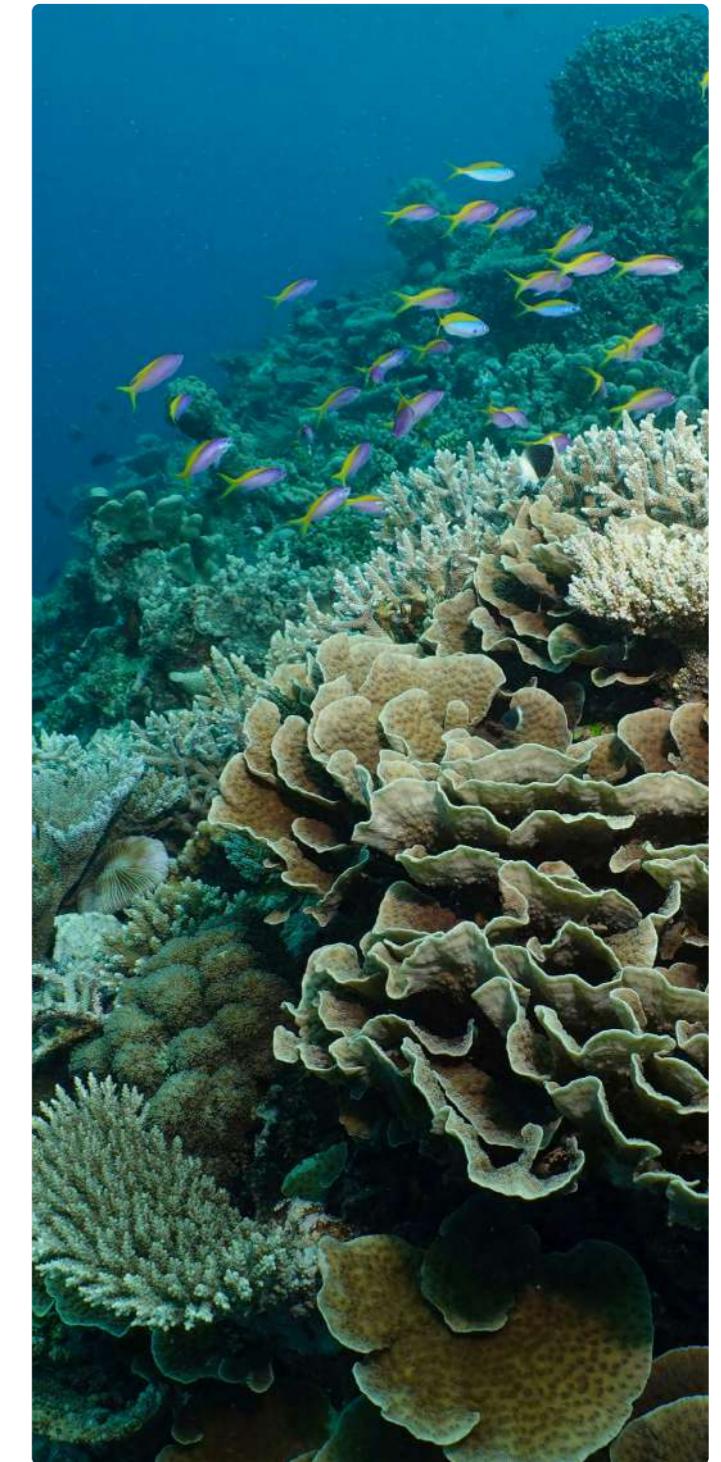


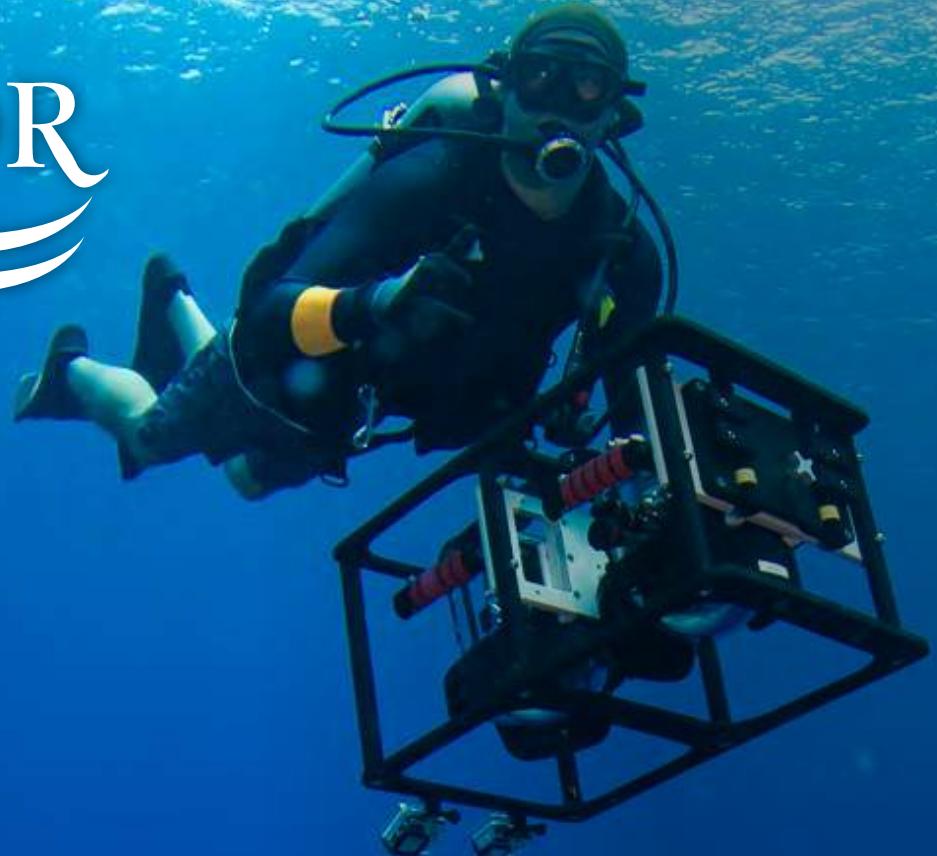
Photo : © Julien Winkel

Acronymes

AIMS : Australian Institute of Marine Science
AMP : Aire marine protégée
ANCB : Agence Néo-Calédonienne de la Biodiversité
ARMS : Autonomous Reef Monitoring Structures
ASV : Autonomous Surface Vessel
AUV : Autonomous Underwater Vehicle
BRUV : Baited-Remote Underwater Video
CNRS : Centre national de la recherche scientifique
DOI : Digital Object Identifier
EPFL : École polytechnique fédérale de Lausanne
GIE : Groupe d'Intérêt Economique
GPC : Ground Control Point
ICRI : International Coral Reef Initiative
IFRECOR : Initiative FRançaise pour les REcifs CORalliens
IRD : Institut de recherche pour le développement
KOSMOS : Kit d'Observation Sous-Marine en Open Source
MICADO : Module d'Imagerie Côtier, Autonome pour le Développement de l'Observation sous-marine
MNHN : Muséum National d'Histoire Naturelle
MOM : Ministère des Outre-Mers
MTEFBMP : Ministère de la Transition Ecologique, de la Forêt, de la Biodiversité, de la Mer et de la Pêche
NA : Non Applicable
OFB : Office français de la biodiversité
PCC : Post-larvae Capture and Culture
PCR : Polymerase Chain Reaction
ROV : Remote Operated Vehicle
SIG : Système d'Information Géographique
STAVIRO : STAtion de Vidéo ROtative
SMURF : Standard Monitoring Units of Recruitments of Fish
TAAF : Terres Australes et Antarctiques Françaises
UCLA : University of California, Los Angeles
UVC : Underwater Visual Census



INITIATIVE FRANÇAISE
POUR LES RÉCIFS CORALLIENS



Apports des méthodes innovantes POUR L'ÉVALUATION DE L'ÉTAT DES RÉCIFS CORALLIENS ÉTAT DES LIEUX 2025