

RAPPORT FINAL

# REBIOMA Blanchissement 2024

Cartographie fine de 2 récifs coralliens par photogrammétrie sous-marine après le blanchissement de 2024

Décembre 2024

OFB / PNMM



**OFB**  
OFFICE FRANÇAIS  
DE LA BIODIVERSITÉ





CLIENT : OFB / PNMM

COORDONNÉES	PARC NATUREL MARIN DE MAYOTTE Centre d'affaires de l'aéroport 97615 Pamandzi - MAYOTTE
INTERLOCUTEUR (nom et coordonnées)	Oriane LEPEIGNEUL E-mail : oriane.lepeigneul@ofb.gouv.fr

CREOCEAN OCEAN INDIEN

COORDONNÉES	Le KUB - bat B, 2ieme étage 6 rue Albert Lougnon 97490 Sainte-Clotilde Tél. : 02 63 73 45 52 E-mail : contact@creocean-oi.fr
INTERLOCUTEUR	<b>Mathilde FACON</b> Tél. : 06 93 40 53 21 E-mail : <a href="mailto:facon@creocean-oi.fr">facon@creocean-oi.fr</a>

RAPPORT

TITRE	<b>REBIOMA Blanchissement 2024 : Cartographie fine de 2 récifs coralliens par photogrammétrie sous-marine après le blanchissement de 2024</b>
N° DE COMMANDE	ORD/2024/0041166
NOMBRE DE PAGES TOTAL	57
NOMBRE D'ANNEXES	-

VERSION

DATE	RÉFÉRENCE	VERSION	MOTIF DE REVISION	RÉDACTEUR	CONTROLE QUALITE
31/10/2024	240644	V1		MFA	ASN
09/12/2024	240644	V2	Intégration remarques PNMM	MFA	ASN





## Sommaire

- 1. Contexte et objectifs ..... 6
- 2. Méthodologie ..... 7
  - 2.1. Choix des sites ..... 7
  - 2.2. Relevés par photogrammétrie sous-marine ..... 8
    - 2.2.1. Définition ..... 8
    - 2.2.2. Acquisition de données..... 8
    - 2.2.3. **Traitement des données**.....10
  - 2.3. Analyse des données ..... 13
  - 2.4. **Déroulé des campagnes de terrain** ..... 22
    - 2.4.1. Phase de repérage .....22
    - 2.4.2. Phase d'acquisition.....22
- 3. Résultats ..... 23
  - 3.1. **Site de la Passe en S**..... 23
    - 3.1.1. Descripteurs physiques .....23
    - 3.1.2. Descripteurs biologiques.....27
  - 3.2. **Site d'Hajangoua** ..... 40
    - 3.2.1. Descripteurs physiques .....40
    - 3.2.2. Descripteurs biologiques.....43
  - 3.3. **Evaluation partielle de la résilience** ..... 52
- 4. Perspectives ..... 53
  - 4.1. **Suivi quantitatif de l'état de santé des récifs et outil de sensibilisation ....** 53
  - 4.2. **Evolution des récifs post-blanchissement.....** 55
  - 4.3. **Evaluation de la résilience.....** 56
  - 4.4. **Corrélation avec l'étude des peuplements ichtyologiques.....** 57
- 5. Bibliographie..... 58

# 1. Contexte et objectifs

La photogrammétrie sous-marine permet de créer des modèles tridimensionnels des récifs à différentes échelles spatiales, allant de la colonie corallienne aux paysages récifaux. Ces reconstitutions 3D permettent une évaluation à l'instant « t » mais présentent également l'avantage d'assurer un suivi temporel précis des communautés récifales. Les analyses photogrammétriques permettent ainsi de compléter les relevés historiques, basés sur des descripteurs classiques, en définissant de nouveaux paramètres 3D du récif tel que la complexité structurelle, les volumes des colonies coralliennes, la capacité de refuge, la rugosité, la pente des composantes benthiques et du paysage.

Porté par CREOCEAN OI en 2021 grâce à une subvention du programme LIFE4BEST, le projet REBIOMA a apporté au Parc Naturel Marin de Mayotte (PNMM) de nouveaux descripteurs quantitatifs des récifs coralliens à travers une analyse morpho-biologique des différentes zones récifales de Mayotte. Concrètement, l'application de cette méthode innovante et le calcul de descripteurs 3D a établi un « Point 0 » des caractéristiques morpho-écologiques de 6 sites pilotes du lagon Mahorais.

Le projet REBIOMA a permis de caractériser finement les récifs de ces 6 sites pilotes, en termes de composition des communautés coralliennes mais également de la dynamique de résilience (quantification de la rugosité, de la densité en recrues coralliennes, du recouvrement en macroalgues notamment).

En 2024, le phénomène mondial de blanchissement corallien a impacté les récifs de Mayotte de manière hétérogène. Le suivi de la mortalité a été réalisé par CREOCEAN OI pour le compte du PNMM.

Afin de disposer d'un état « Point 1 - mortalité » immédiatement après le phénomène de blanchissement, il a été proposé de reproduire cette cartographie sur deux sites. Ces informations visent à atteindre les objectifs spécifiques suivants :

- Evaluer finement la mortalité induite par le blanchissement sur chaque site à l'échelle du recouvrement corallien et par genres dominants.
- Evaluer la perte de complexité structurelle liée à la mortalité corallienne sur chaque site.
- Caractériser la reprise corallienne dans le futur en termes de :
  - Vitesse de croissance corallienne,
  - Dynamique de recrutement de jeunes colonies,
  - Succession des communautés coralliennes, avec un éventuel « shift » des communautés,
  - Devenir des coraux morts : bio-érosion par les herbivores, colonisation par des macroalgues ou algues calcaires encroûtantes.

Ces informations permettront ultérieurement au gestionnaire de caractériser la résilience sur ces 2 sites.

## 2. Méthodologie

### 2.1. Choix des sites

En concertation avec le PNMM, deux sites d'étude sont cartographiés lors cette étude en fonction de leurs intérêts écologiques, de leurs états de santé, des mesures de gestion existantes et de l'impact du blanchissement subi en 2024. Ils sont localisés sur la carte ci-dessous :

1. Le **site de la Passe en S** qui a souffert d'un **blanchissement et d'une mortalité associée relativement faible** (20% du recouvrement corallien total). Ce site de récif barrière, qui représente un site de grand intérêt écologique pour le PNMM, dispose déjà d'une cartographie à haute résolution géoréférencée qui servira d'état initial (Figure 1),
2. Le **site de récif frangeant d'îlot au sud de Pengua (îlots Hajangoua)**. Ce site, qui présentait un fort recouvrement corallien (80%), a été très impacté par le blanchissement avec **80% de mortalité**. Il a donc été retenu du fait de (i) la forte mortalité, (ii) une localisation compatible avec les conditions météorologiques de début juillet 2024 et (iii) l'existence de données historiques puisque cette station fait partie du suivi de l'ORC Récifs Frangeants d'îlots (station MSAIL8).

La superficie d'étude est proposée sur base **d'une acquisition de 200m² par site**, en cohérence avec les relevés historiques de REBIOMA (2021).

Tableau 2.1 : Caractéristiques des sites cartographiés

Site	Type de récif	Etat de santé global	Impact anthropique	Mesures de protection / gestion	Remarque
Passe en S	Barrière	Bon	Faible	Réserve de pêche intégrale	Station GCRMN
Hajangoua (MSAIL8)	Frangeant	Moyen	Moyen (influence urbanisation Mamoudzou)	Gestion des îlots déléguée aux Naturalistes de Mayotte	Station ORC Frangeant (MSAIL8)

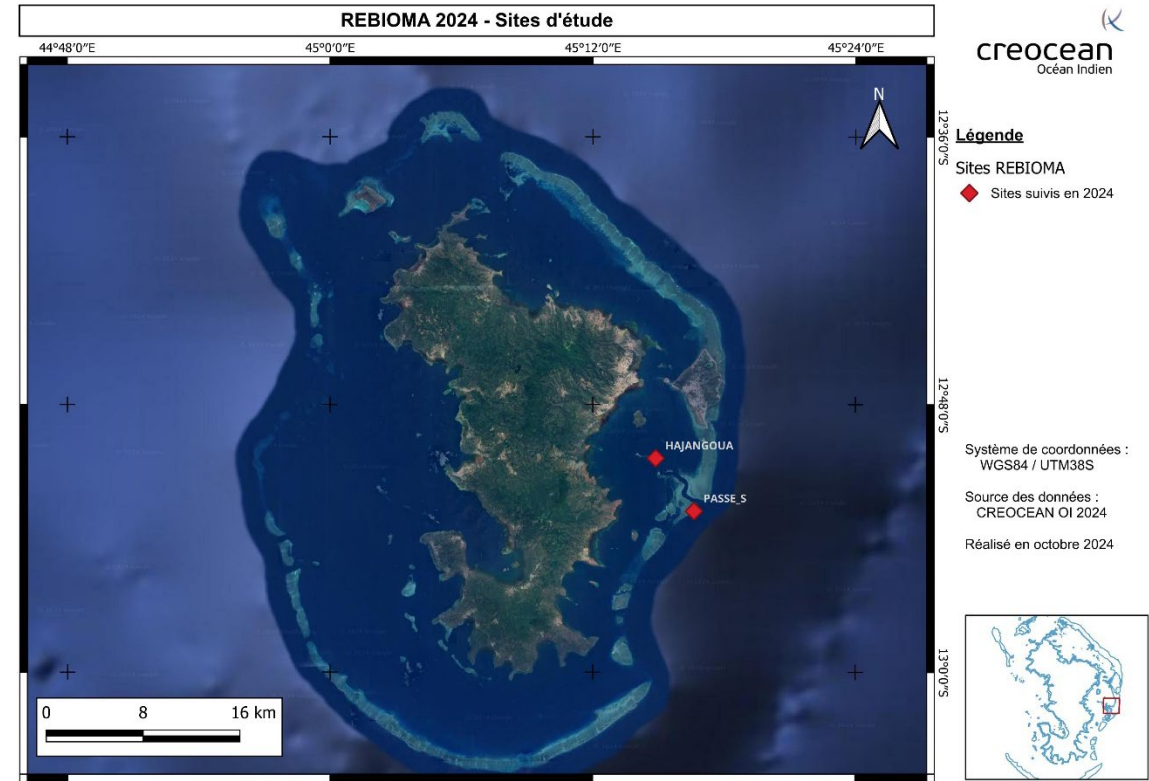
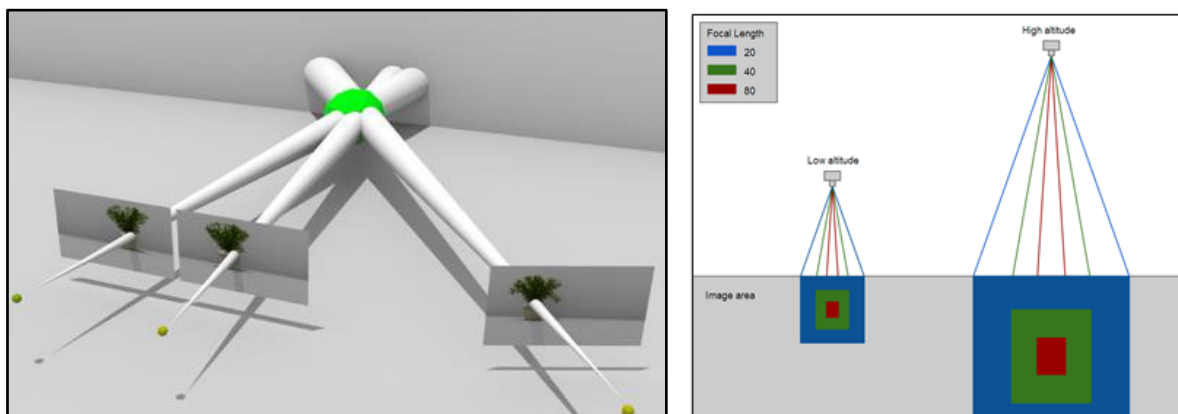


Figure 1: Sites REBIOMA suivis en 2024 post-blanchissement

## 2.2. Relevés par photogrammétrie sous-marine

### 2.2.1. Définition

La photogrammétrie est une technique qui consiste à **reconstituer la réalité en 3 dimensions à partir de photographies réalisées sous différents points de vue**. Le recours à cette technique et aux outils adaptés permet d'obtenir des **supports détaillés et précis, à l'échelle et géoréférencés en 2D ou 3D**, facilement exploitables dans des logiciels tiers de SIG, DAO ou 3D pour visualisations ou analyses ultérieures.



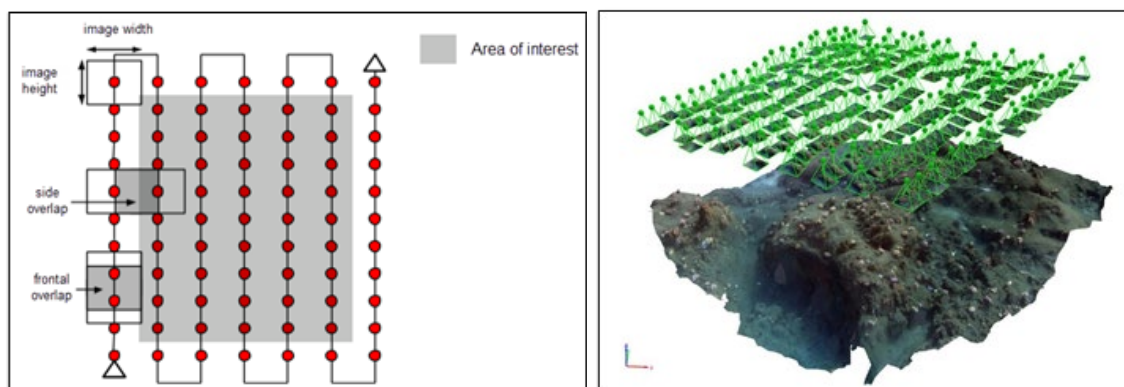
**Figure 2. (gauche) Principe de reconstruction 3D à partir de photographies. (droite) Relation entre distance et focale sur la couverture photographique au sol**

### 2.2.2. Acquisition de données

#### 2.2.2.1. Principe d'acquisition des données

L'acquisition des images nécessaires à la création des reconstructions 3D est réalisée à partir d'un ou plusieurs appareils photographiques dont **la résolution et la distance influent sur la précision, et la focale et la distance sur la couverture photographique**.

**Afin d'obtenir un résultat optimal, un recouvrement entre chaque image consécutive, à une distance constante, est effectué sur le sujet d'étude.** Chaque photographie doit donc **posséder un pourcentage de contenu commun** avec la photographie précédente et suivante, mais aussi avec la photographie adjacente. Le principe d'acquisition ne repose donc pas sur une densité de clichés (au m<sup>2</sup> par exemple), mais plutôt **sur un positionnement optimal des clichés** afin d'en assurer une bonne juxtaposition et donc un bon recouvrement.



**Figure 3. Exemple théorique (gauche) et pratique (droite) de plan d'acquisition**

Puisque le succès de la reconstruction photogrammétrique est une question d'angles et de recouvrement entre les images, les logiciels de traitement recommandent un recouvrement minimum entre les images de 75 à 80% en longitudinal (frontal) et 60% en latéral (côté) dans les cas généraux. **La distance du sujet d'étude affecte la précision, appelée GSD (Ground Sampling Distance) et la couverture de chaque cliché** comme suit :

$$GSD = (SW \cdot D \cdot 100) / (F \cdot PW)$$

- GSD = Distance d'échantillonnage au sol (cm/pixel)
- SW = Largeur du capteur (mm)
- D = Distance du sujet (m)
- F = Longueur focale sous-marine (mm)
- PW = Nombre de pixels de l'image (en largeur)

$$WC = GSD \cdot PW / 100$$

- WC = Couverture de l'image - largeur (m)
- GSD = Distance d'échantillonnage au sol (cm/pixel)
- PW = Nombre de pixels de l'image (en largeur)

Ainsi, pour acquérir un sujet d'étude donné, une distance proche implique un plus grand nombre d'images et une meilleure précision, alors qu'une distance plus éloignée implique un nombre d'images et une précision moindre.

#### 2.2.2.2. Protocole

Lorsqu'un équipement photographique est immergé, l'acquisition de clichés subit des modifications dues à différents paramètres tels que : le hublot (plan ou dôme) du caisson sous-marin, l'interface air/eau et la réfraction de la lumière. Toutes ces altérations modifient la manière dont le capteur va figer chaque photographie.

Des tests de calibration ont été effectués pour quantifier les changements causés par l'eau, théoriquement, avec des calculs sur les formules de Descartes et *in situ*, en (i) utilisant des objets sur un damier et en comparant les mesures de distance, de surface et de volume des reconstructions 2D et 3D par rapport à la réalité puis (ii) en testant différents ensembles de données pour améliorer les paramètres de calibration. Ces paramètres, en particulier les valeurs de distance focale et de distorsions, ont été intégrés à notre protocole d'acquisition photographique et à notre flux de travail de reconstruction.

Sur le terrain, avec un temps de plongée imparti (fonction de la profondeur) et un coût logistique élevé, des contraintes environnementales variables (clarté de l'eau, courant, houle) et peu d'information de positionnement, nous avons développé des protocoles qui assurent un nombre minimum de photos prises à bonne distance du sujet dans un temps limité.

Nos protocoles, inspirés de cinq années d'expérience opérationnelle, permettent de positionner le photographe dans un espace 3D (l'eau) de manière très précise et prendre des photos exactement au bon endroit afin d'assurer une grille de recouvrement longitudinal et latéral de 75%, à une distance constante du fond afin de maintenir la même précision en tout temps.

Deux protocoles d'acquisition photographique ont été ainsi conçus puis optimisés à partir des résultats des tests de reconstruction 2D et 3D :

- Le protocole 1 a été créé pour acquérir des objets de moyenne taille, de différentes morphologies 3D, avec uniquement des prises de vue obliques et sphériques autour du sujet à une distance approximative de 50cm à 2m (capteur pointant avec un angle vers le sujet). Ce protocole cible la reconstruction 3D précise d'objets, et ne s'applique pas aux grandes surfaces.
- Le protocole 2 a été créé pour des paysages, permettant de couvrir des zones de grande échelle avec des structures 3D, basé sur des prises de vue nadirales (capteur pointant verticalement vers le sol) et obliques (capteur pointant avec un angle vers le sujet), en réalisant des transects parallèles entre 2 et 3m de distance du fond. **Ce protocole a été appliqué au présent projet.**

### 2.2.2.3. Matériel utilisé

Le kit photographique déployé pour cette étude se compose d'un Sony Alpha 7 mark 2 (capteur plein format de 24 mega pixels) avec un objectif Sony Zeiss Vario-Tessar FE 16-35mm F4 (SEL1635Z), montés dans un caisson sous-marin Nauticam NAA7II avec un dôme Nauticam 180mm, et 2 phares Big Blue 66000 lumens, en guise d'éclairage artificiel.

Les appareils photo sont réglés en mode manuel M, en ISO auto avec une limitation de 100-1600, une vitesse d'obturation ajustable (par le photographe), mais minimale de 1/160sec pour éviter le flou de mouvement. L'ouverture est ajustée par le photographe afin que l'ensemble du sujet soit net. La mise au point est réglée sur AF-S auto en mode large pour avoir plusieurs points d'autofocus sur le sujet d'étude. Tous les clichés sont pris au format RAW puis étalonnés.

Ces configurations particulières d'appareil photo nous permettent de maximiser la couverture du sujet d'étude avec l'utilisation d'un grand angle, tout en gardant une grande précision (taille réelle d'un pixel) grâce à la résolution du capteur photographique, sans avoir trop de distorsion (3% approximativement pour le Sony en 16mm) et de courbure sur les bords de chaque cliché.

Les objectifs possédant un plus grand angle ou fisheye, avec une distorsion lenticulaire plus importante entraînent généralement des problèmes de projection, d'artéfact ou une reconstruction courbe lors du traitement. De plus, sur les bords de l'image, la netteté est amoindrie puisque la distance est plus grande (hors du champ de netteté) qu'au centre. Les pixels de bordures sont donc moins ou pas utilisables.

## 2.2.3. Traitement des données

### 2.2.3.1. Méthodologie

Pour chaque jeu de données, nous pouvons utiliser au préalable un nuancier de couleurs placé sur le site d'étude afin d'étalonner (ajuster la lumière, le contraste, la netteté, les couleurs) les photos dans Adobe Lightroom et palier aux modifications qu'entraîne la colonne d'eau sur les couleurs en fonction de la profondeur.

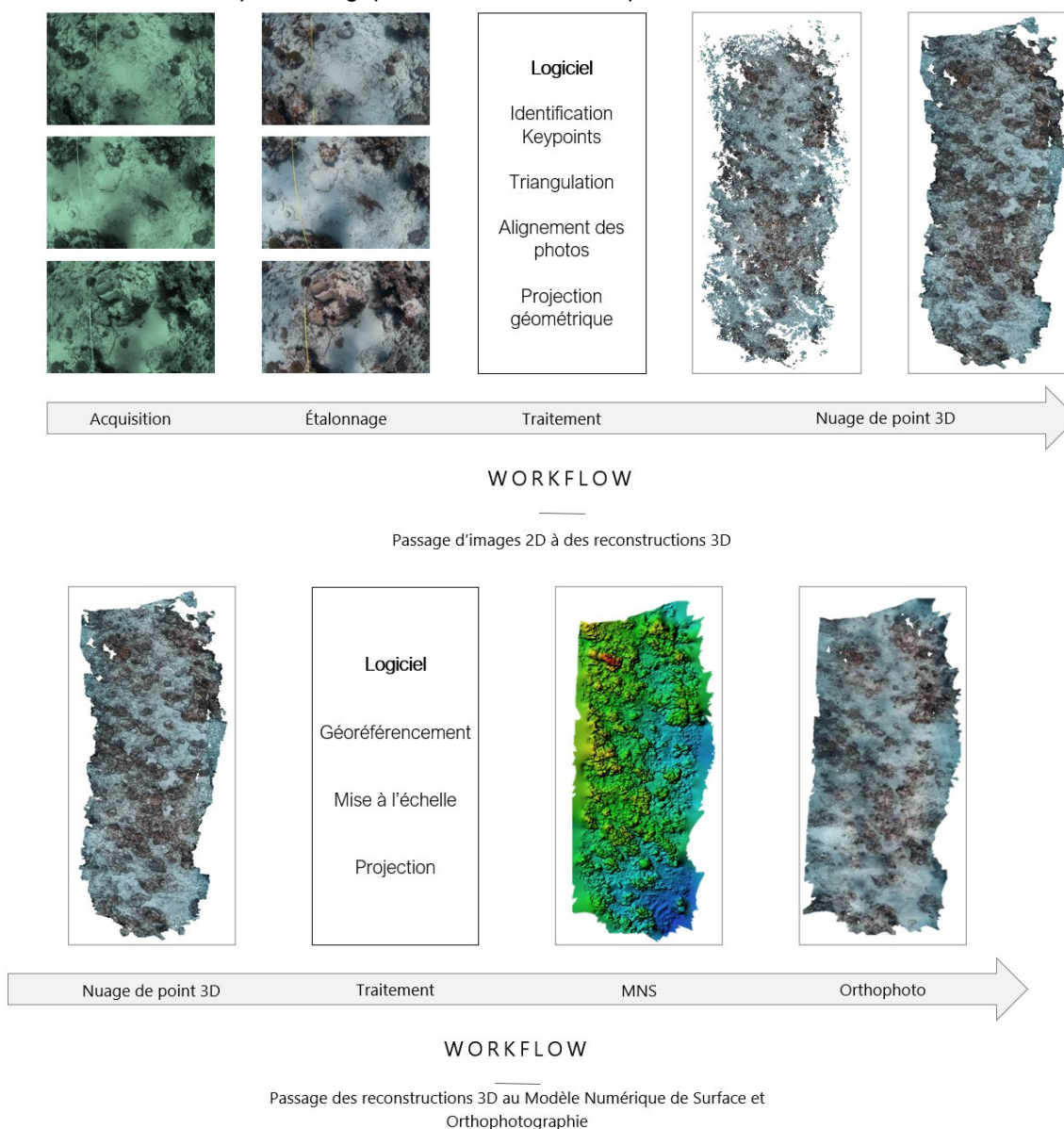
Les supports sont obtenus à l'aide du procédé de photogrammétrie, qui consiste à reconstituer un nuage de points (pixels dans un espace en 3 dimensions) à partir des images. Pour cela, un logiciel de traitement est utilisé. Ce logiciel opère une calibration des photographies pour corriger les déformations, puis, plusieurs milliers de points caractéristiques sont identifiés dans chacune des images et sont corrélés entre photographies adjacentes. Le logiciel calcule, par triangulation de toutes les images et sur base de leur contenu, la position de l'appareil photo au moment de la prise de vue. Il projette ensuite les pixels par géométrie afin de créer un nuage de points 3D. Ce nuage de points est la représentation tridimensionnelle de la zone d'étude depuis laquelle les autres supports peuvent être calculés.



Les jeux de données sont traités au besoin comme suit : estimation de la qualité des images, alignement des images, optimisation, construction d'un nuage de point clairsemé, mise à l'échelle, géoréférencement, construction d'un nuage dense, construction d'un modèle maillé (mesh), construction de la texture, construction du MNS (Modèle Numérique de Surface), construction de l'orthophotographie, export des supports. Plusieurs outils sont également utilisés régulièrement en fonction du besoin : calcul de l'indice de confiance, fermeture des trous ...

À partir de ces supports (nuage de point 3D, maillage 3D, Modèle Numérique de Surface (MNS) et orthophotographie), il est possible d'extraire plusieurs caractéristiques et de réaliser des comparaisons temporelles, en 2 et 3 dimensions :

- Métriques physiques, comme des distances, des surfaces et volumes
- Métriques morphostructurelles, comme la rugosité, la pente ...
- Métriques biologiques sur des LIT, PIT, quadrats virtuels



Ce processus permet d'obtenir des supports géoréférencés et analysables :

- ▶ Une orthomosaïque,
- ▶ Un modèle numérique d'élévation,
- ▶ Un modèle 3D.



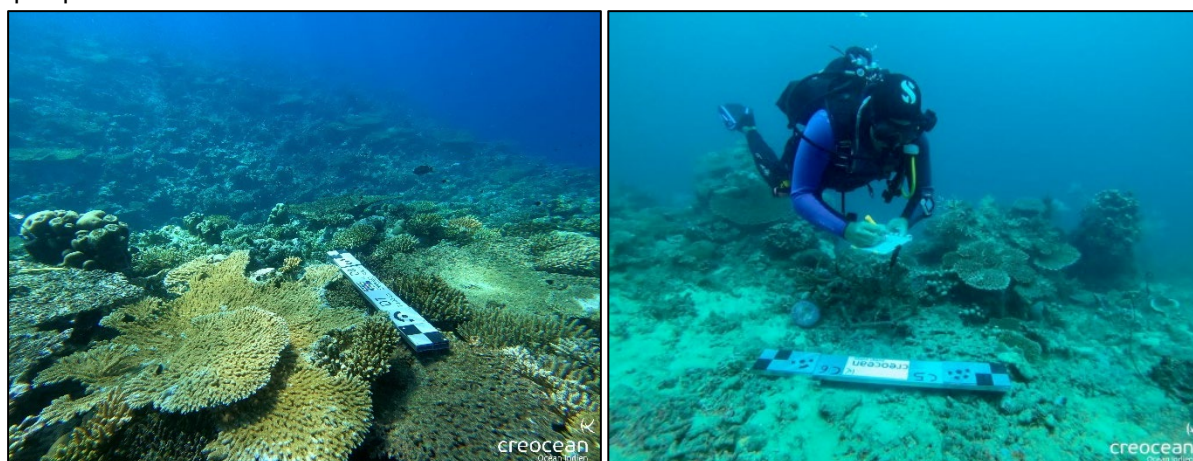
**Figure 4:** Colonies coralliennes - Modèle 3D – Orthophotographie – Modèle Numérique de Surface



**Figure 5:** Paysage corallien - Modèle 3D – Orthophotographie – Modèle Numérique de Surface

#### 2.2.3.2. Mise à l'échelle

Préalablement à l'acquisition photographique, des étalons (trois étalons, au minimum, de dimensions connues) sont positionnés sur le sujet d'étude. Ces étalons, photographiés lors de l'acquisition, sont utilisés après la reconstruction du nuage de point. Leur taille est renseignée dans le logiciel de traitement qui opère une mise à l'échelle.



**Figure 6.** Etalons de mise à l'échelle et géoréférencement



### 2.2.3.3. Géoréférencement

Les étalons positionnés préalablement à l'acquisition possèdent tous des GCP (Ground Control Points). Les coordonnées XY sont prises à partir d'un GPS à l'emplacement de chaque GCP. La coordonnée Z, profondeur, est prise à partir du profondimètre du même ordinateur de plongée, deux fois : une avant et une après l'acquisition photographique pour faire une moyenne, en raison des conditions de mer qui peuvent évoluer. Les données sont renseignées dans le logiciel de traitement, qui positionne le nuage de point dans son système de coordonnées géographiques. La profondeur permet également la bonne orientation de la reconstruction.

Dans le cadre du projet REBIOMA, 6 cibles (GCP) par site avaient été fixées en 2021 de manière permanente en vue d'assurer un suivi pérenne sur ces sites d'étude. En 2021, les cibles ont été intégralement recouvertes par des algues calcaires encroutantes, mais restent visibles sur l'orthophotographie. Cela a permis de positionner l'orthophotographie du site Passe en S exactement au même endroit qu'en 2021.



*Figure 7. Cible fixée de manière permanente sur les sites REBIOMA*

## 2.3. Analyse des données

### 2.3.1. Descripteurs physiques

Les reconstructions numériques sont exploitées afin d'accéder à des indices descripteurs de la complexité de l'habitat.

#### 2.3.1.1. Indices de rugosité

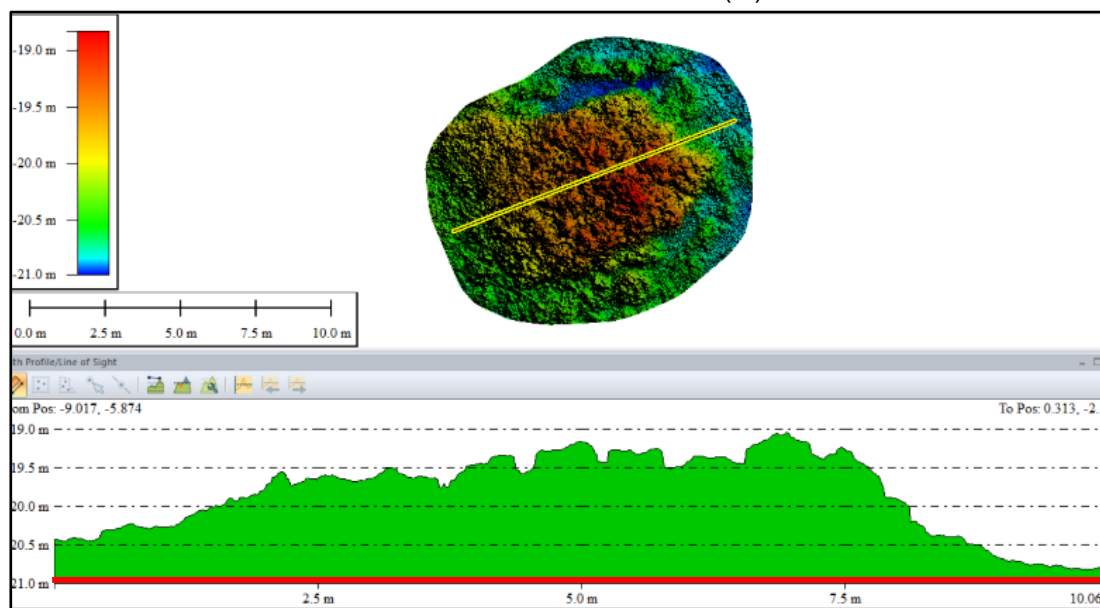
L'indice de rugosité renseigne sur la texture, la macrostructure, la porosité d'un site d'étude, pouvant être déterminant à l'accroche et au développement des espèces, dès les premiers stades de colonisation d'un substrat. Il peut renseigner sur la nature géologique du substrat ou donner des indications sur la capacité de fixation des organismes benthiques. Il est également utilisé pour réaliser des comparaisons inter-sites en y liant la diversité biologique des espèces associées.

Deux indices de rugosité sont calculés :

- **La rugosité linéaire**, qui est le rapport entre la distance 3D (qui épouse le relief) et la distance 2D le long d'un transect (à plat, en rouge sur Figure 8). Cet indice est fortement tributaire de sa position sur le sujet d'étude, **il a donc été calculée le long de 3 transects par site d'étude.**

- Indice de rugosité linéaire :  $RL = D3D/D2D$

Où,     RL = Rugosité linéaire  
           D3D = Distance 3D (m)  
           D2D = Distance 2D (m)

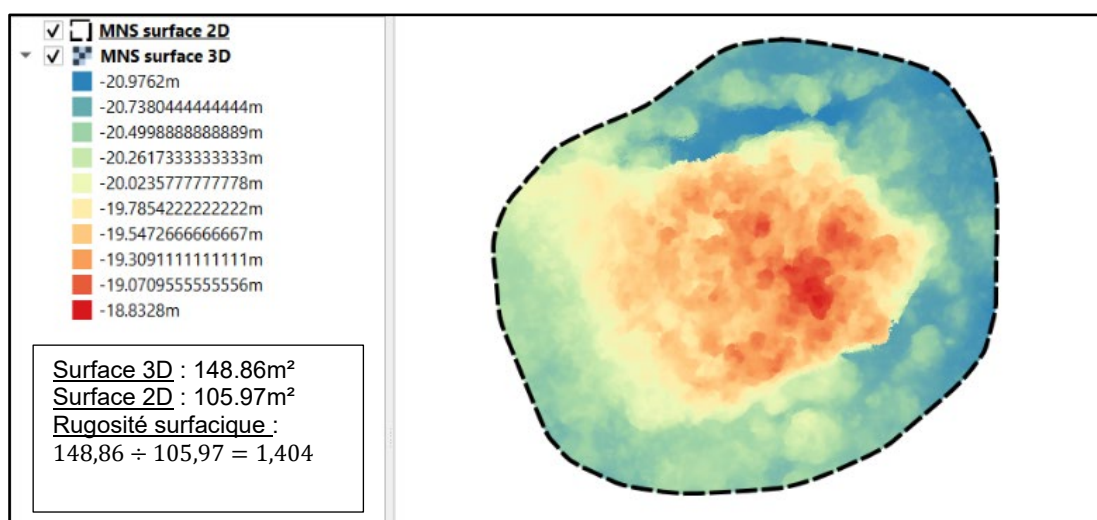


**Figure 8.** Illustration d'analyse de l'indice de rugosité linéaire

**La rugosité surfacique**, qui est réalisée sur toute la surface d'étude. Elle est le rapport entre la surface 3D (qui épouse le relief dans la surface en pointillé) et la surface 2D (à plat, en pointillé sur la Figure 9) du site d'étude. Elle permet de s'abstraire de transects, puisqu'elle prend le site d'étude dans son entièreté.

- Indice de rugosité surfacique :  $RS = S3D/S2D$

Où,     RS = Rugosité surfacique  
           S3D = Surface 3D (m²)  
           S2D = Surface 2D (m²)



**Figure 9.** Illustration du calcul de l'Indice de rugosité surfacique

Ainsi, à partir de chaque reconstruction numérique, les rugosités surfaciques ont été mesurées pour les 3 transects surfaciques et comparées à la rugosité calculée sur l'ensemble du site afin d'estimer la variabilité par transect et par site.

### 2.3.1.2. Pentes

La pente exprime **l'inclinaison d'une surface par rapport à l'horizontale**. Elle est le rapport entre le dénivelé (hauteur) et la distance horizontale (longueur) :

$$P (^{\circ}) = 100 \cdot (H/D)$$

Où, P = Pente (%)  
H = Hauteur (m)  
D = Longueur (m)

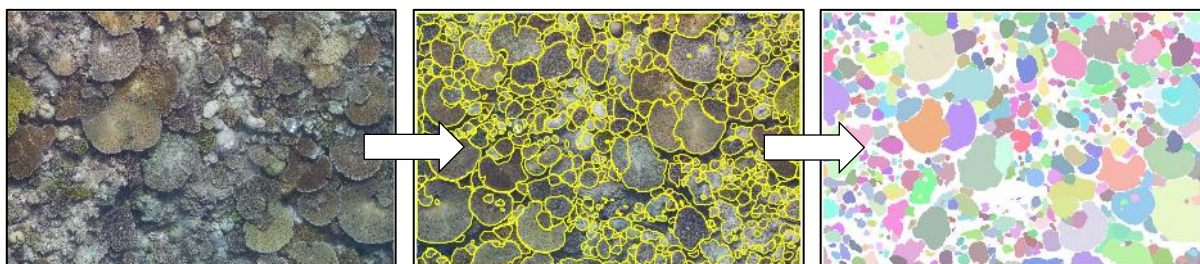
Elle est ici exprimée en degrés. À partir des reconstructions numériques, la **cartographie des pentes** permet **une identification rapide des zones les plus pentues** du sujet d'étude. Cette information (couplée à l'orientation de la paroi par exemple) peut informer indirectement **sur les conditions de luminosité**, d'hydrodynamisme et de sédimentation et par conséquent peut renseigner sur la présence potentielle de certaines espèces (espèces sciaphiles, espèces photophiles, filtreurs actifs et passifs...).

Une comparaison est réalisée en extrayant la valeur de chaque pixel sur les cartes de pente grâce au logiciel QGIS pour :

- ▶ Calculer une **valeur de pente « moyenne »**, représentative à micro-échelle du relief du site.
- ▶ Réaliser une **distribution par classes des valeurs de pente**.

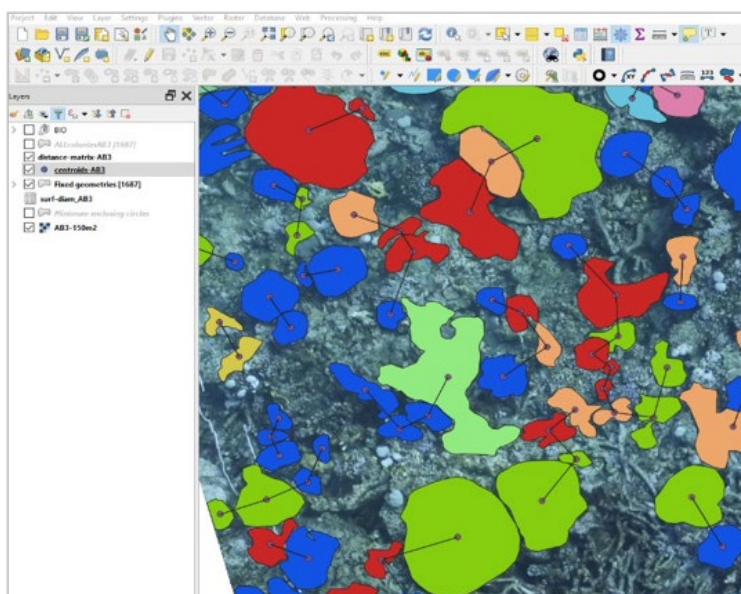
### 2.3.2. Descripteurs biologiques

Dans un premier temps, les colonies coralliennes sont détournées individuellement sur les orthomosaïques grâce à un module interne de détournage basé sur le modèle SegmentAnything de MetalA. Cet outil développé en interne permet de générer rapidement un shapefile de polygones correspondant aux colonies coralliennes identifiées sur l'orthophotographie. Exploitable sur le logiciel QGIS, la qualité du détournage est ensuite vérifiée et validée sur l'ensemble du site par les biologistes de CREOCEAN OI.



**Figure 10:** Illustration des étapes de détournage de l'outil développé en interne pour le traitement des orthophotos

Une fois validés, ces polygones correspondants aux colonies coralliennes individuelles peuvent ensuite être classées manuellement selon différents attributs, adaptables selon l'objectif de l'étude : morphotype, blanchissement / mortalité, présence de maladie,...



**Figure 11:** Étape de classification manuelle des polygones détournés sous QGIS



2.3.2.1. Analyse du peuplement corallien

Pour comparer avec les résultats de REBIOMA 2021, les colonies détournées sont classées sur QGIS selon les morphotypes utilisés pour le LIT (Wilkinson et al. 2004, Tableau 2).

Tableau 2. Catégories LIT et morphotypes 3D

Taxon	Morphotype refuge_Thèse	Code morph_Thèse	Catégorie LIT	Code morph_LIT
Corail constructeur de récif	Branchu	B	Acropore branchu (ACB)	ACB
			Acropore digité (ACD)	ACD
			Corail branchu	CB
	Columnaire	C	Acropore submassif ( <i>Isopora palifera</i> )	ACS
			Corail submassif	CS
	Massif	M	Corail massif	CM
	Tabulaire	T	Acropore tabulaire (ACT)	ACT
	Autre non-modélisé en 3D	E	Corail encroûtant	CE
		F	Corail foliacé	CF
		MIL	Millepore	MIL
		CMR	Corail solitaire	CMR
		REC	Recrue (<10cm)	REC
Alcyonnaire	Alcyonnaire	SC	Corail mou (SC)	SC

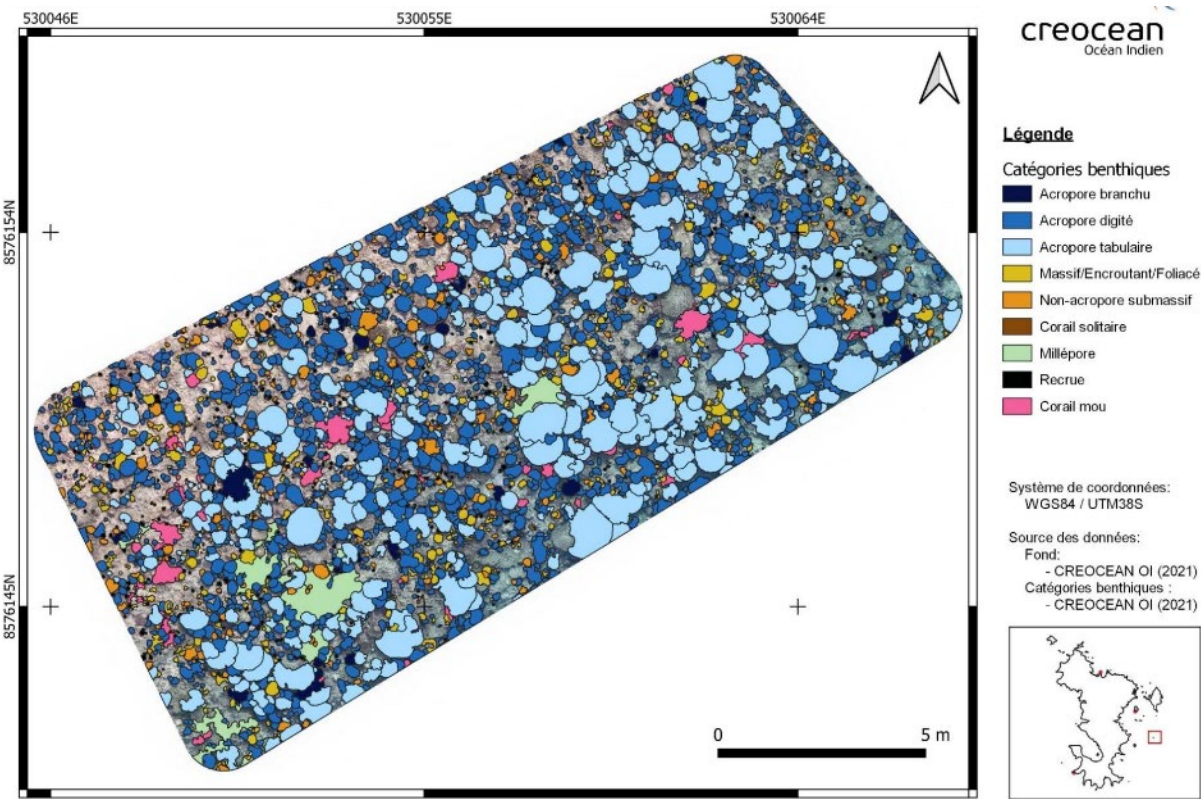


Figure 12: Résultats de la classification des colonies coralliennes par morphotype (Rebioma, 2021 - Créocéan OI)

Ensuite, les descripteurs 2D et 3D ci-dessous sont calculés sur base de coefficients internes issus notamment de la thèse CIFRE de Isabel Urbina (2020).

**Tableau 3. Descripteurs 2D et 3D**

Paramètre	2D	3D
Surface de recouvrement en corail dur, mou et macroalgues	Projection plane sur l'orthomosaïque	-
Surface de recouvrement des principaux morphotypes coralliens – par catégorie LIT	Projection plane sur l'orthomosaïque	Rugosité (surface 3D) offerte par les colonies
Taille moyenne des colonies – par catégorie LIT	Projection plane sur l'orthomosaïque	-
Complexité surfacique – par morphotype 3D	-	Rapport entre la surface 3D et la surface 2D
Refuge – par morphotype 3D	-	Refuge offert par les colonies (en dm <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> car les sites ont des surfaces différentes)
Densité corallienne	Densité en coraux durs Densité en juvéniles (<10cm) sur surface totale et surface disponible (substrat non recouvert par les coraux)	

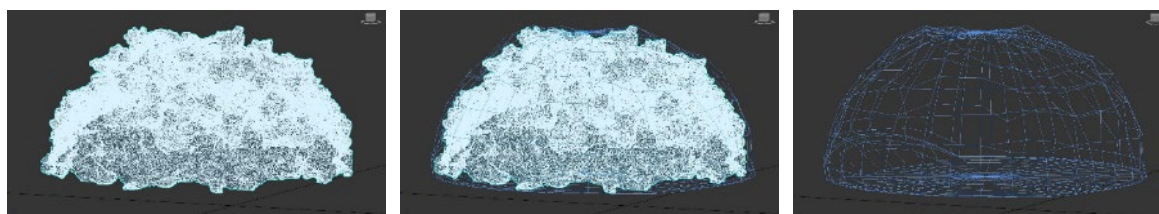
### 2.3.2.2. Valeur refuge

La valeur refuge permet de quantifier le volume d'accueil disponible pour les peuplements ichthyologiques et d'invertébrés mobiles. Ce descripteur correspond à la différence entre le volume strict du sujet d'étude et le volume englobant (volume comprenant toutes les cavités et anfractuosités délimitées par les sommets de l'objet) comme suit :

$$R = V_e - V_s$$

Où R = Refuge (m3)  
Ve = Volume englobant (m3)  
Vs = Volume du sujet (m3)

Ce descripteur offre donc une information sur la complexité du sujet d'étude (importance des cavités, des anfractuosités...), sa capacité à accueillir la vie et la potentielle biodiversité inhérente.



**Figure 13. Sujet (gauche), volume du sujet délimité en bleu (milieu) et volume englobant (droite)**

Cette valeur est évaluée à partir d'une régression linéaire établie par grandes formes de coraux (massifs, branchus, colonnaires, tabulaires), sur base de mesures effectuées à partir de nombreuses colonies à la Réunion, dans les Iles Éparses et en Nouvelle-Calédonie (Thèse CIFRE de Urbina, 2020). Dans le cadre de cette étude, les coefficients de calcul de la valeur refuge de ces grands groupes de coraux ont été repris. Les valeurs maximales sont rappelées dans le Tableau 4 ci-dessous.

**Tableau 4.** Valeurs maximales calculées pour la valeur refuge (Urbina 2020)

Forme	Surface 2D maximale (m <sup>2</sup> )	Valeur refuge associée (m <sup>3</sup> )
<b>B (Branchu)</b>	0.4	60
C (Columnaire)	0.6	119
<b>T (Tabulaire)</b>	0.45	117
M (Massif)	0.4	24

Cependant, il convient de noter que les calculs effectués concernaient des colonies faisant entre 10 cm et 1 m de diamètre, de sorte que la formule utilisée n'est pas adaptée aux individus de grande taille (Urbina et al., 2020). Sur certains sites, la présence de grandes colonies (Acropores branchus, Acropores tabulaires de plus de 1m, *Acropora abrotanoides*) risque donc d'entraîner un biais dans le calcul. Afin d'éviter une surestimation importante de la valeur refuge, la valeur maximale mesurée dans le cadre des travaux de Urbina (2020) a été attribuée aux colonies donc la taille dépasse la taille maximale étudiée.

Par conséquent, la valeur refuge ainsi calculée est donc une estimation par rapport à la réalité. Cependant, cette méthode évite une surestimation grossière et erronée.

Sur les 2 sites concernés par cette étude, 61 colonies dépassaient la valeur maximale ayant servi à l'établissement des coefficients :

- ▶ 13 colonies sur Passe en S, correspondant à des Acropores tabulaires de grande taille,
- ▶ 48 colonies sur Hajangoua, correspondant à des Acropores branchus et digités de grande taille.

### 2.3.2.3. Évaluation du blanchissement

En l'absence de photogrammétrie au pic du blanchissement, le peuplement corallien immédiatement avant le blanchissement de 2024 est estimé à posteriori à partir des orthophotographies de juillet 2024. Toutes les colonies mortes récemment sont considérées comme impactées par le phénomène, et rentrent dans le calcul du recouvrement avant blanchissement. Ces colonies mortes récemment sont caractérisées par une structure de la colonie encore bien visible, sans bioérosion. Elles sont parfois ennalguées, en particulier sur Hajangoua. Sur ce site, la connaissance du peuplement en octobre 2023 (suivi ORC frangeant réalisé par notre équipe) a permis de confirmer l'adéquation de cette méthode estimative. Il est cependant possible que le peuplement avant blanchissement soit légèrement sous-estimé en cas de disparition physique de certaines colonies blanchies, sous l'effet de la houle ou de la casse.

Impact du blanchissement sur les indicateurs 3D : complexité surfacique, rugosité et la valeur Les résultats ci-dessus seront ensuite analysés pour évaluer la mortalité des colonies à la suite de l'épisode de blanchissement 2024. Cette analyse permettra de déterminer l'impact du blanchissement selon les indicateurs suivant :

- ▶ Mortalité en termes de recouvrement corallien,
- ▶ Mortalité par morphotype et taille de colonies,
- ▶ Impact du blanchissement sur les indicateurs 3D : complexité surfacique, rugosité et la valeur refuge.

#### 2.3.2.4. Analyse temporelle

Sur le site de la Passe en S, les résultats REBIOMA, 2021 seront utilisés comme « état de référence » du site d'étude, en superposant les modèles 3D et orthophoto, à deux instants différents (2021 vs 2024). Cette étape de comparaison permettra d'évaluer précisément la dynamique du récif avec une évaluation précise de la variabilité du recouvrement corallien au regard d'événements externes tel que le blanchissement corallien 2024 mais également d'autres paramètres comme les mesures de gestion, la distance à la côte,...

Sur le site de Hajangoua, qui n'a pas fait l'objet d'un relevé en 2021, « l'état de référence » sera reconstitué d'après l'orthophotographie en considérant que toutes les colonies mortes récemment étaient vivantes avant le phénomène de blanchissement. Cette hypothèse est confirmée par plusieurs observations scientifiques :

- ▶ La quantification du blanchissement en avril 2024 (MAREX 2024) qui a montré que les colonies coralliennes étaient soit vivantes soit blanches, sans mortalité antérieure non imputable au blanchissement,
- ▶ Le suivi MSA Récif Frangeant réalisé dans le cadre de l'ORC en octobre 2023 (CREOCEAN OI 2023),
- ▶ La qualité de l'orthophotographie permet d'identifier la forme initiale des coraux morts suite au blanchissement. En effet, l'acquisition a eu lieu peu après le phénomène de blanchissement, et permet de bien identifier les coraux morts suite à ce phénomène.

Cet état de référence permettra d'évaluer ultérieurement la reprise corallienne après le phénomène de blanchissement.

#### 2.3.2.5. Evaluation partielle de la résilience

Le suivi temporel des paramètres suivants permettra d'évaluer partiellement la résilience d'après le guide des Nations Unies (Maynard et al. 2017) :

- ▶ Recrutement corallien,
- ▶ Complexité structurelle et de l'habitat,
- ▶ Recouvrement en macroalgues (rem : le turf algal n'est quant à lui pas détourné),
- ▶ Maladies coralliennes,
- ▶ Adéquation du substrat pour le recrutement,
- ▶ Distribution des classes de taille des colonies.

**Tableau 5 : Indicateurs de résilience d'après Maynard et al. 2017)**

	Indicateur	Intégration dans l'évaluation partielle
Indicateurs de résilience	Recouvrement en macroalgues	X
	Résistance des espèces au blanchissement	
	Diversité corallienne	
	Recrutement corallien	X
	Biomasse en herbivores (et diversité)	
	Maladies coralliennes	X
	Variabilité des températures	
	Habitat / complexité structurelle	X
	Distribution des classes de taille des colonies	X
	Pression de pêche	
	Colonies matures	



<b>Facteur de stress anthropique</b>	Lumière (stress)	
	Substrat convenable	X
	Enrichissement (pollution)	
	Impact physique humain	X
	Sédimentation	X
	Pression de pêche	

D'autres indicateurs de résilience, tels que la diversité spécifique ou la biomasse des poissons herbivores ne peuvent pas être calculés par photogrammétrie et sont au-delà de l'objectif de la présente étude.

## 2.4. Déroulé des campagnes de terrain

L'acquisition de données de terrain s'est déroulée simultanément avec le suivi de la mortalité effectué dans le cadre de l'ORC, afin de mutualiser la mobilisation de l'équipe de CREOCEAN OI :

- ▶ Le mardi 2 juillet sur le site de Pengua (l'îlots Hajangoua),
- ▶ Le jeudi 4 juillet sur le site de Passe en S.

### 2.4.1. Phase de repérage

Sur chaque site, une phase de repérage a eu lieu avant l'acquisition photographique. Sur Passe en S, la phase de repérage avait pour objectif de retrouver les repères du site afin de cartographier la même surface qu'en 2021.

Sur Hajangoua, la phase de repérage avait pour but de relever les éléments suivants :

- ▶ Portion du récif frangeant relativement linéaire et représentative
- ▶ Point GPS,
- ▶ Éléments d'intérêt notables (piquets, élément paysager, ...),
- ▶ Profondeur minimum et maximum,
- ▶ Schéma d'agencement de la station avec les distances mesurées au décamètre.

### 2.4.2. Phase d'acquisition

La campagne d'acquisition des images nécessaires à la création des reconstructions 3D est réalisée à partir d'un appareil photo sous-marin (Sony Alpha 7S), manipulé par deux plongeurs biologistes de CREOCEAN OI. Pour d'obtenir un résultat optimal, un recouvrement de 75% est nécessaire entre chaque image consécutive.

Pour chaque site, la surface d'acquisition, **entre 150 et 200m<sup>2</sup>**, est couverte grâce au déploiement d'un dispositif éphémère permettant d'assurer une acquisition à une distance constante.

## 3. Résultats

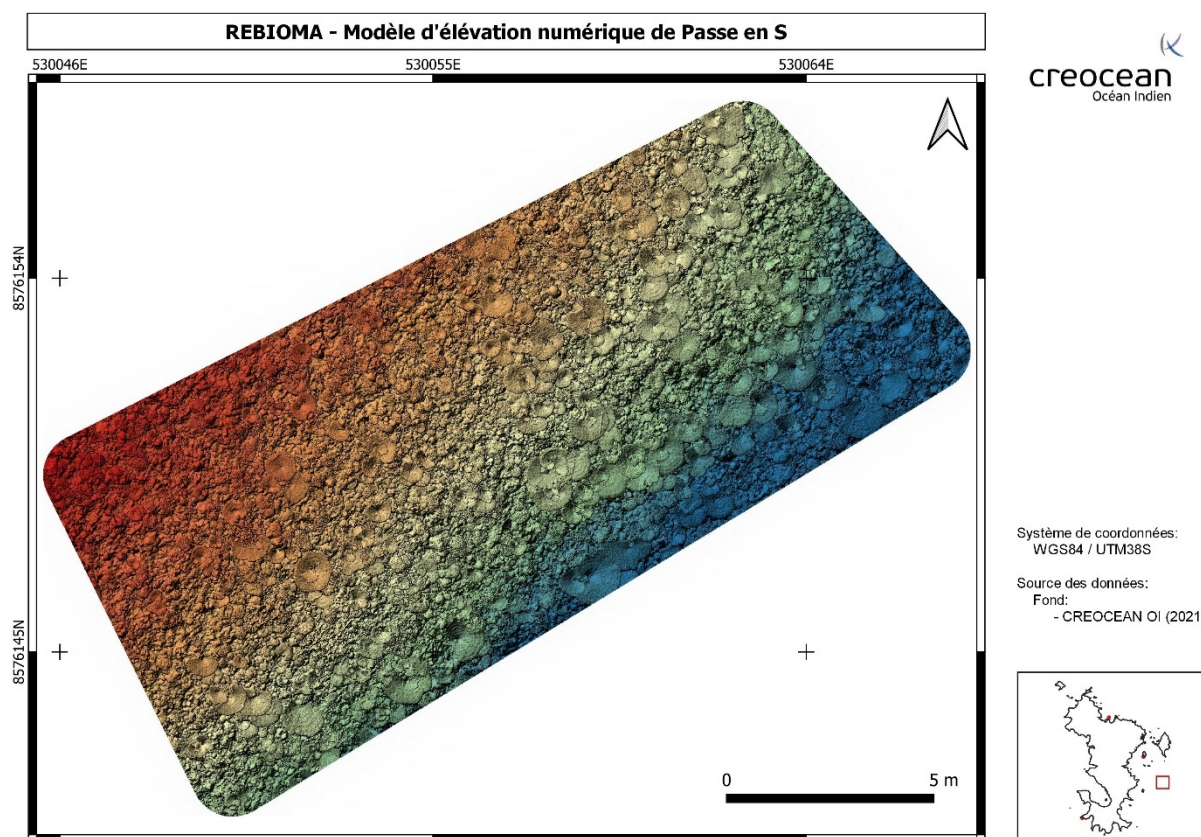
Cette section décrit dans un premier temps les caractéristiques de chaque site. Dans un second temps, une étude comparative permet d'identifier un potentiel impact des activités anthropiques sur les structures récifales.

### 3.1. Site de la Passe en S

#### 3.1.1. Descripteurs physiques

##### 3.1.1.1. Modèle numérique 3D

Le modèle numérique de terrain permet de caractériser avec précision la structure tri-dimensionnelle du site, ainsi que son évolution par rapport à 2021 (Figure 14).



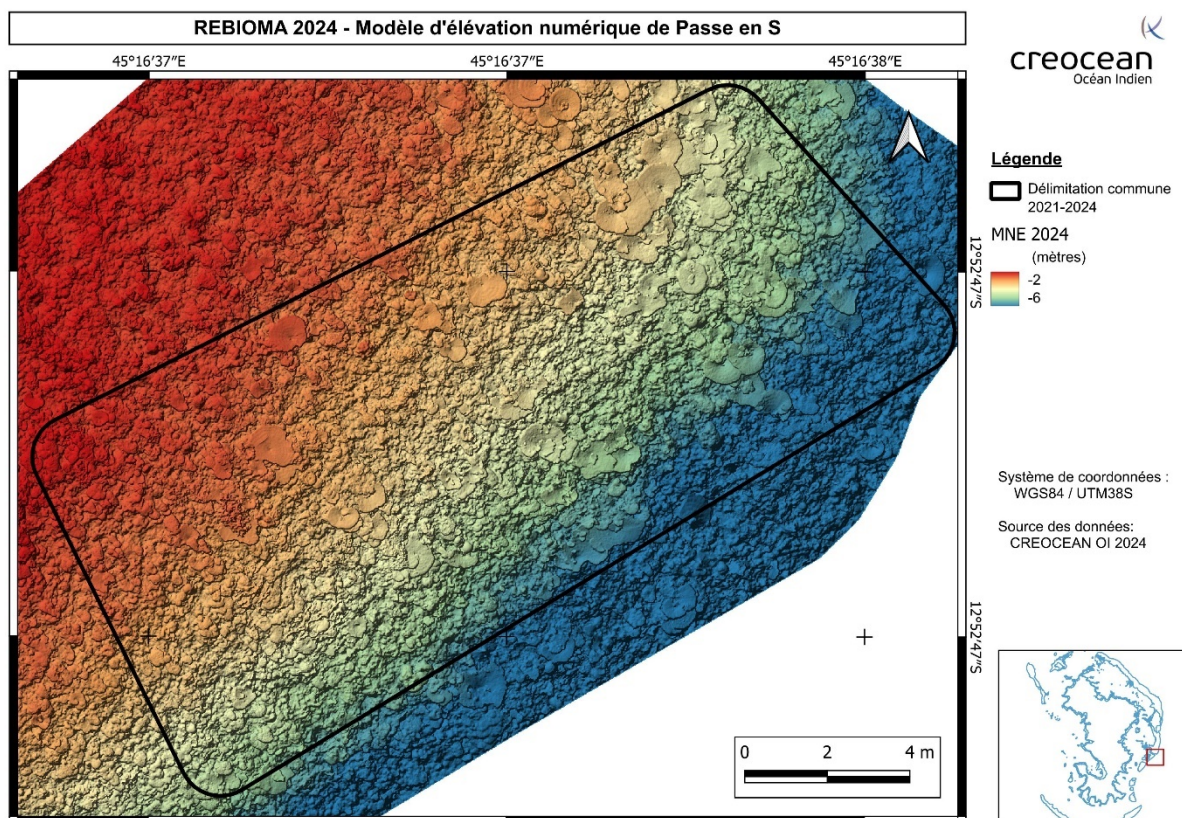


Figure 14. Modèle d'élévation numérique du site GCRMN de La Passe en S en 2021 (haut) et en 2024 (bas)

### 3.1.1.2. Indices de rugosité

L'indice de **rugosité surfacique** renseigne sur la **complexité morphologique** d'un habitat à l'échelle d'une aire (par exemple le site dans sa globalité). Si l'indice est proche de 1 alors le site est plutôt plat (puisque la surface 3D se rapproche de la surface 2D) et inversement, plus l'indice est éloigné de 1 plus le site est complexe en termes d'architecture.

**La complexité surfacique à l'échelle du site est estimée à 1,61** correspondant à une **complexité structurelle moyenne**, en lien avec l'abondance des Acropores digités qui offrent une rugosité limitée. La rugosité a diminué par rapport à 2021, ce qui pourrait s'expliquer par la disparition physique d'Acropores tabulaires, vivants ou morts, en 2024. La complexité strictement liée au corail dur vivant a peu évolué.

Tableau 6. Complexité surfacique à l'échelle du site de Passe en S

PASSE EN S	Site	Corail dur vivant
2021	1,65	1,44
2024 – Avant blanchissement	1,61	1,43
2024 – Post-blanchissement	1,61	1,43

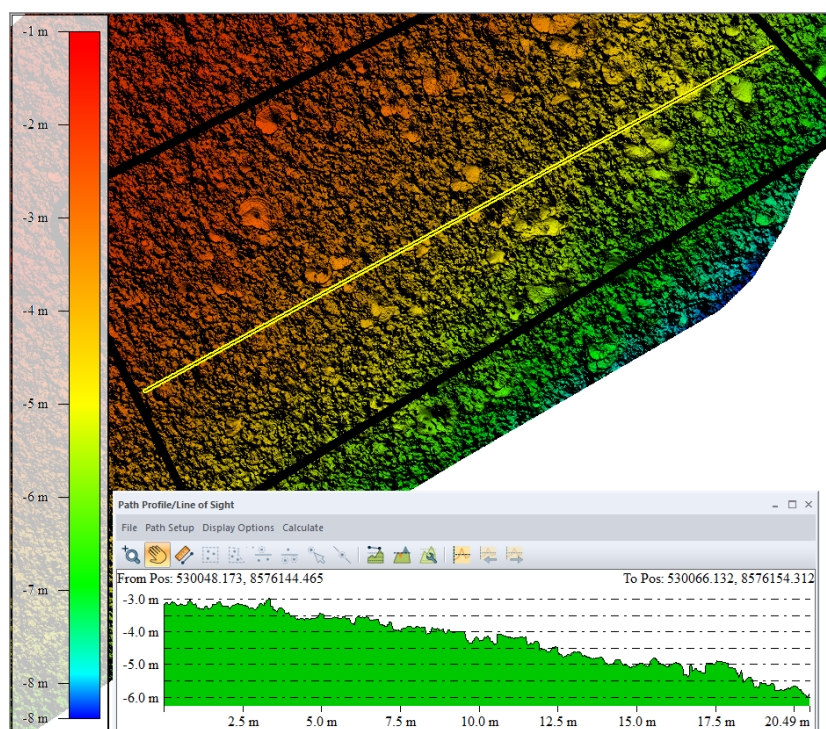
L'indice de **rugosité linéaire** renseigne sur la **complexité morphologique** d'un habitat le long d'une ligne/transect. La rugosité linéaire a été mesurée sur 3 transects parallèles, dans la longueur du site.

La rugosité est relativement hétérogène sur le site, en particulier sur la zone plus profonde (transect R3) et varie entre 1,28 et 1,34 sur les 3 transects modélisés. On remarque que les valeurs de rugosité linéaire sont inférieures à la rugosité surfacique (1,3 vs 1,6).



**Tableau 7.** Complexité linéaire le long de 3 transects en 2024 – Passe en S

PASSE EN S 2024	Complexité linéaire 3D/ 2D
R1	1,3231
R2	1,3402
R3	1,2864



**Figure 15.** Illustrations des rugosités linéaires

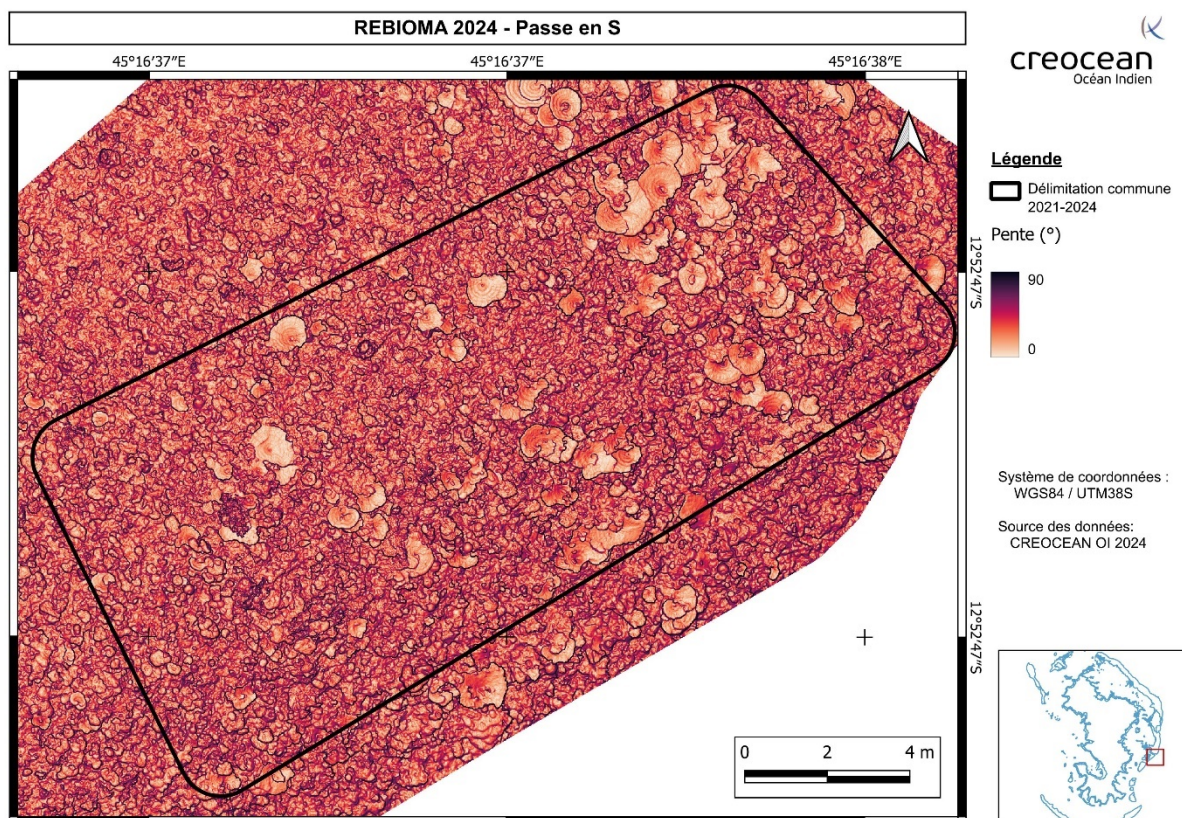
Les résultats indiquent que les transects linéaires sous-estiment la rugosité surfacique du site d'étude. **Dans la mesure du possible, il apparaît donc préférable d'analyser ce paramètre physique au niveau surfacique.**

Dans tous les cas, ces résultats de rugosité linéaire et de rugosité surfacique incitent à poursuivre l'analyse en lien avec les descripteurs biologiques (peuplements, poissons).

### 3.1.1.3. Pente

La cartographie des pentes sur le site d'étude permet une identification rapide des zones les plus pentues/escarpées, mais aussi des zones de « plateaux ». Cette information (couplée à d'autres sources) peut informer indirectement sur les conditions de luminosité, d'hydrodynamisme et de sédimentation et par conséquent renseigner sur la présence potentielle de certaines espèces. Sur l'exemple ci-dessous (Figure 16), on remarque :

- ▶ Les zones les plus claires correspondant aux parties les plus planes : Acropores tabulaires vivants ou morts encore sur pied ;
- ▶ Les zones les plus foncées aux parties les plus pentues : bordures d'Acropores tabulaires ou branchus, Millépore mort encore sur pied.



**Figure 16.** Illustration du calcul de la pente à partir du MNE en 2024 – Passe en S

L'analyse des pentes met en évidence les résultats suivants :

- ▶ La pente varie entre 0 et 89° avec une valeur moyenne de 37°.
- ▶ La pente est globalement modérée sur le site, avec une médiane de 34,08°.

**Tableau 8.** Valeurs moyennes de pente (°)

Site	Pente moyenne	1 <sup>er</sup> quartile	Médiane	3 <sup>ème</sup> quartile
Passe en S_2024	37,02	21,65	34,08	50,18

3.1.2. Descripteurs biologiques

3.1.2.1. Peuplement corallien

Le traitement de l’orthophotographie par détourage et classification des colonies coralliennes vivantes est illustré sur les Figure 20 à Figure 22. Les caractéristiques du peuplement sont comparées à 2021. Pour rappel, l’état du peuplement corallien immédiatement avant le blanchissement est reconstitué d’après l’orthophotographie en considérant que toutes les colonies mortes récemment étaient vivantes avant le phénomène de blanchissement. Les orthophotographies ayant été modélisées au pic de mortalité (juillet 2024), cette méthode est cohérente avec la réalité.

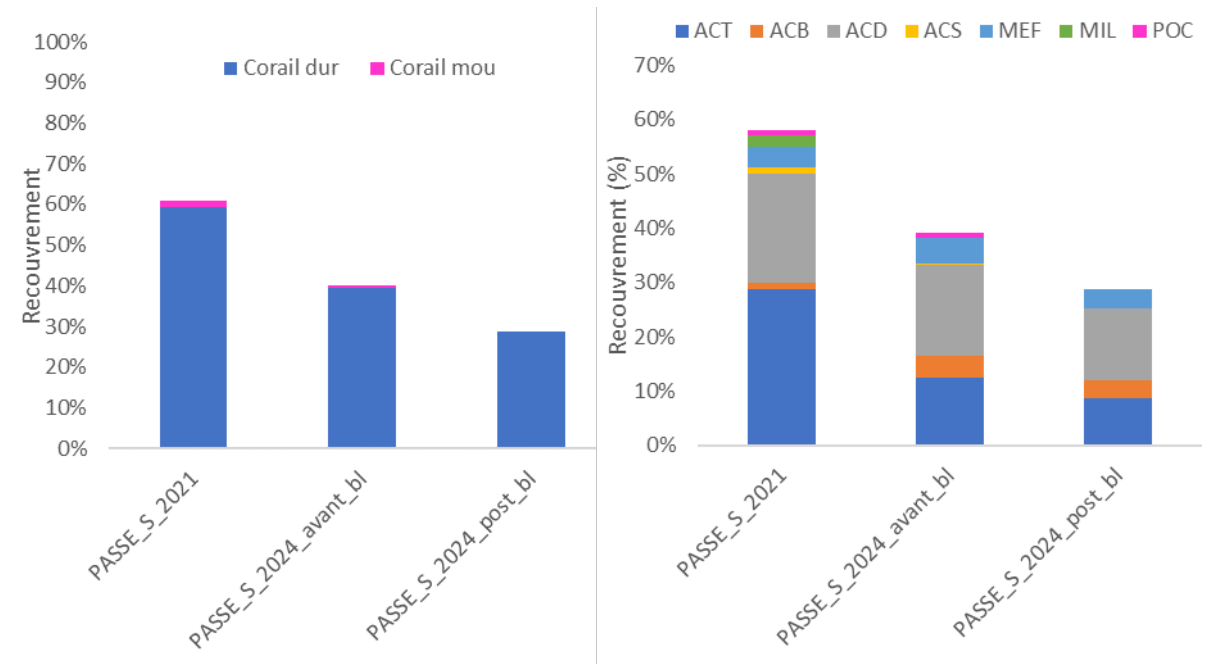
► Recouvrement corallien et morphotypes (2D)

**Le recouvrement corallien est faible en juillet 2024 (29%), en nette diminution par rapport à 2021 (59%).** Il reste nettement dominé par les Acropores, mais les **Acropores digités prennent le dessus** au détriment des Acropores tabulaires. La proportion d’Acropores branchus augmente également en 2024.

Immédiatement avant le phénomène de blanchissement, le recouvrement corallien pouvait être estimé à 40%, ce qui représente déjà une forte diminution par rapport à 2021. Cette chute s’explique par la mortalité et la disparition de nombreux Acropores tabulaires, et ne s’explique pas par le phénomène de blanchissement. Les grandes colonies de Millépore sont également mortes, à priori de manière ancienne. **Une dégradation importante a donc eu lieu entre 2021 et 2024, avant même le phénomène de blanchissement.**

**Tableau 9.** Recouvrement 2D en coraux – HC : corail dur, ACT : Acropore tabulaire, ACD : Acropore digité, ACB : Acropore branchu, ACS : Acropore submassif, MEF : Massif/Encroutant/Foliacé, MIL : Millepore, POC : Pocillopore, CMR : corail solitaire (champignon).

PASSE EN S	Corail dur	Corail mou	ACT	ACB	ACD	ACS	MEF	MIL	POC	CMR
2021	59%	2%	29%	1%	20%	1%	4%	2%	1%	0%
2024 – Avant blanchissement	40%	0,5%	12%	4%	17%	0%	5%	0%	1%	0%
2024 – Après blanchissement	29%	0%	9%	3%	13%	0%	4%	0%	0%	0%

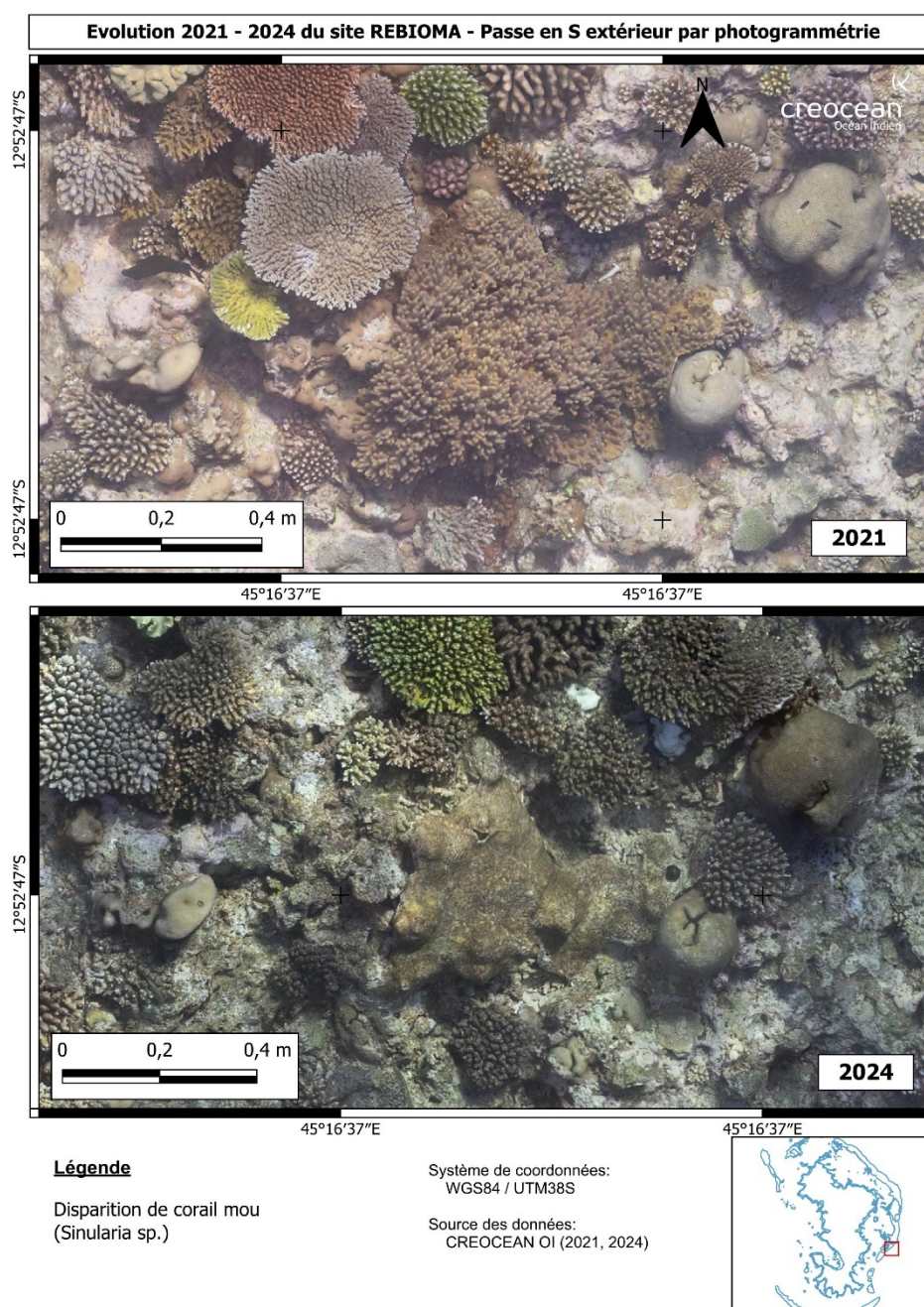




**Figure 17.** Recouvrement en corail dur et mou (gauche) et proportion des morphotypes coralliens (droite) en 2021 et 2024

Il est intéressant de noter que **le recouvrement en coraux mous a également diminué** entre 2021 (2%) et 2024 (0,5%), avec la disparition de grandes colonies de *Sinularia sp.* Il est probable que cette diminution soit liée au phénomène de blanchissement.

En juillet 2024, toutes les colonies de corail mou présentent des traces de blanchissement et sont donc considérées comme mortes. Cette méthodologie est celle appliquée pour l'évaluation de la mortalité liée au blanchissement. Il est cependant important de noter que les retours d'expérience sur la sensibilité des coraux mous au blanchissement sont plus restreints que ceux sur les coraux durs, et qu'il est possible que les coraux encore blanchis durant le pic de mortalité survivent malgré tout.



**Figure 18 :** Disparition d'une colonie de corail mou *Sinularia sp.* entre 2021 et 2024



► Taille des colonies (2D)

Les colonies coralliennes sont de taille moyenne en 2024 ( $22 \pm 17$ ), comme en 2021 ( $23 \pm 17$ ). L'écart-type indique une forte hétérogénéité de taille, avec une forte proportion de coraux de grande taille (quelques Acropores tabulaires d'un mètre de diamètre), mais également une quantité non négligeable de juvéniles coralliens ( $<10\text{cm}$ ). Ceux-ci font diminuer la taille moyenne des colonies, mais indiquent une bonne vitalité du site.

En revanche la taille moyenne par morphotype a évolué :

- La taille moyenne des Acropores tabulaires a augmenté, passant de  $41 \pm 25$  cm en 2021 à  $63 \pm 36$  cm en 2024. Cela s'explique par la mortalité de nombreuses colonies de 2021, tandis que celles ayant survécu ont vu leur taille s'accroître.
- La taille moyenne des Acropores branchus a diminué, passant de  $37 \pm 19$  cm en 2021 à  $24 \pm 13$  cm en 2024.
- La taille moyenne des Acropores digités, des Acropores submassifs (*Isopora pallifera*) et des coraux massifs et encroûtants est restée stable.

Tableau 10 : Taille moyenne des colonies (en cm) sur le site de la Passe en S

PASSE EN S	Corail dur	ACT	ACB	ACD	ACS	MEF	MIL
2021	$23 \pm 17$	$41 \pm 25$	$37 \pm 19$	$23 \pm 11$	$31 \pm 14$	$19 \pm 9$	$53 \pm 50$
2024 – Avant blanchissement	$23 \pm 17$	$64 \pm 34$	$24 \pm 11$	$22 \pm 13$	$31 \pm 18$	$19 \pm 9$	$0 \pm 0$
2024 – Après blanchissement	$22 \pm 17$	$63 \pm 36$	$22 \pm 11$	$24 \pm 13$	$31 \pm 18$	$19 \pm 8$	$0 \pm 0$

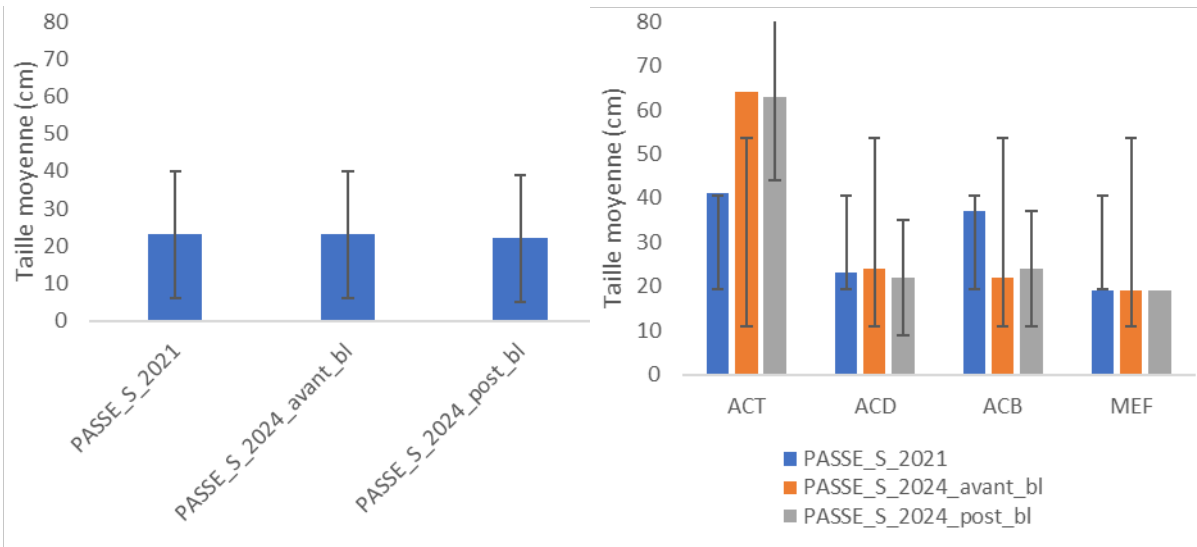


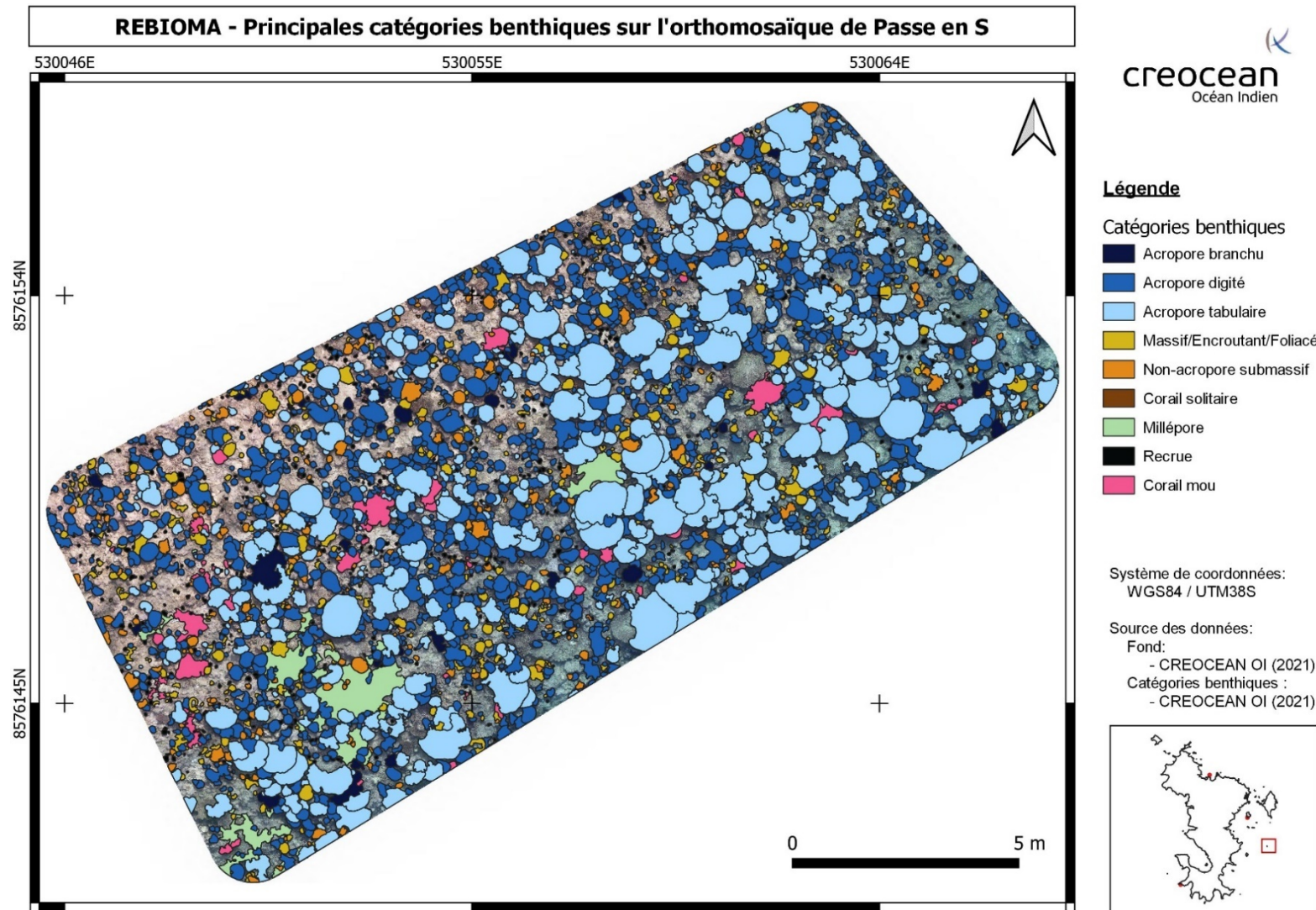
Figure 19. Taille moyenne des colonies coralliennes par principaux morphotypes sur Passe en S

► Caractéristiques du substrat

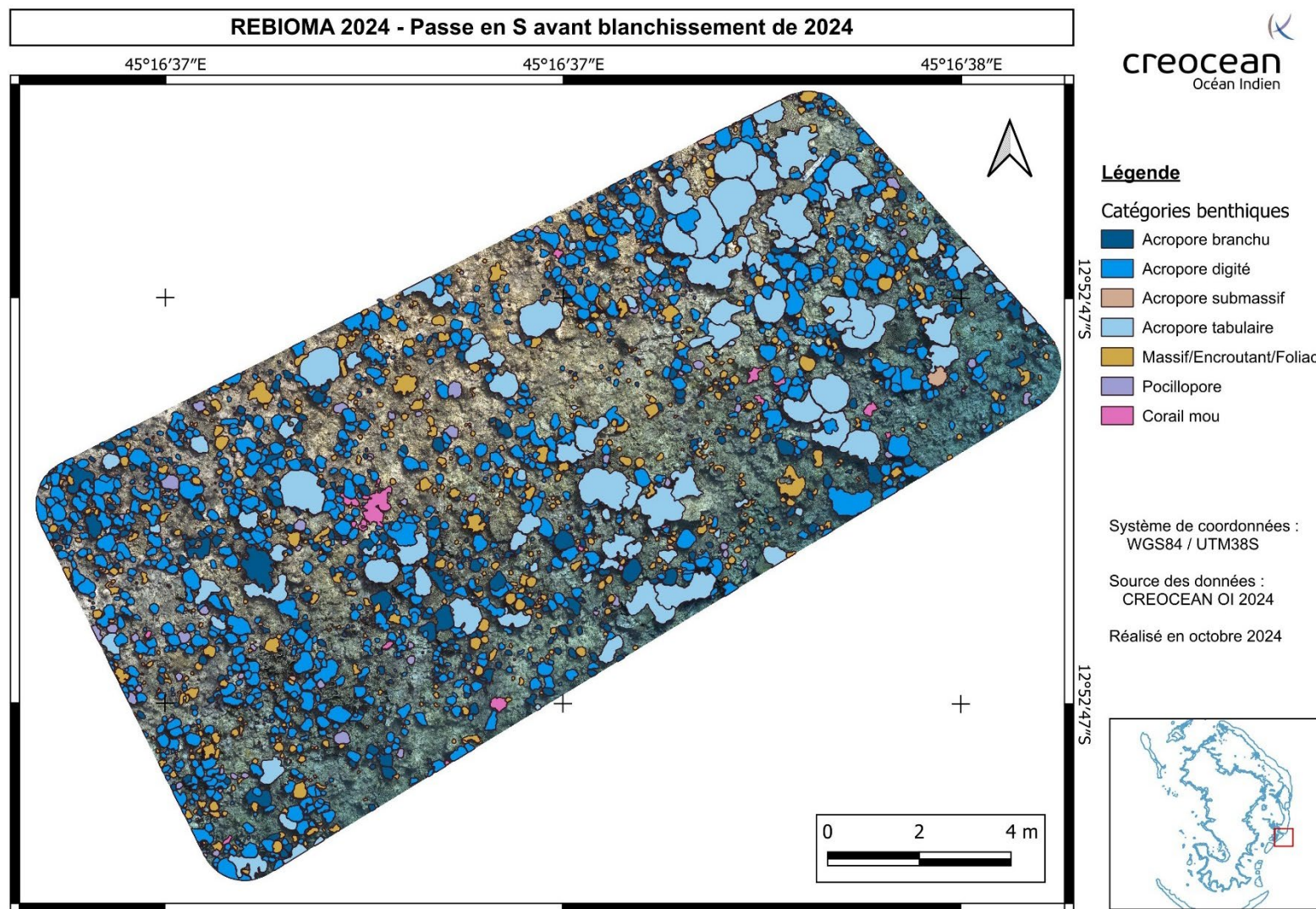
Aucun envasement n'est observé sur le site, comme en 2021.

En 2024, les coraux morts récemment du blanchissement sont recouverts de turf algal, premier colonisateur du substrat dur disponible. Il sera intéressant de surveiller si les algues calcaires encroûtantes, indicatrices d'une bonne qualité de l'eau, prennent ensuite le relai ou non.

En 2021, la majorité du substrat dur était recouverte par des algues calcaires encroûtantes.

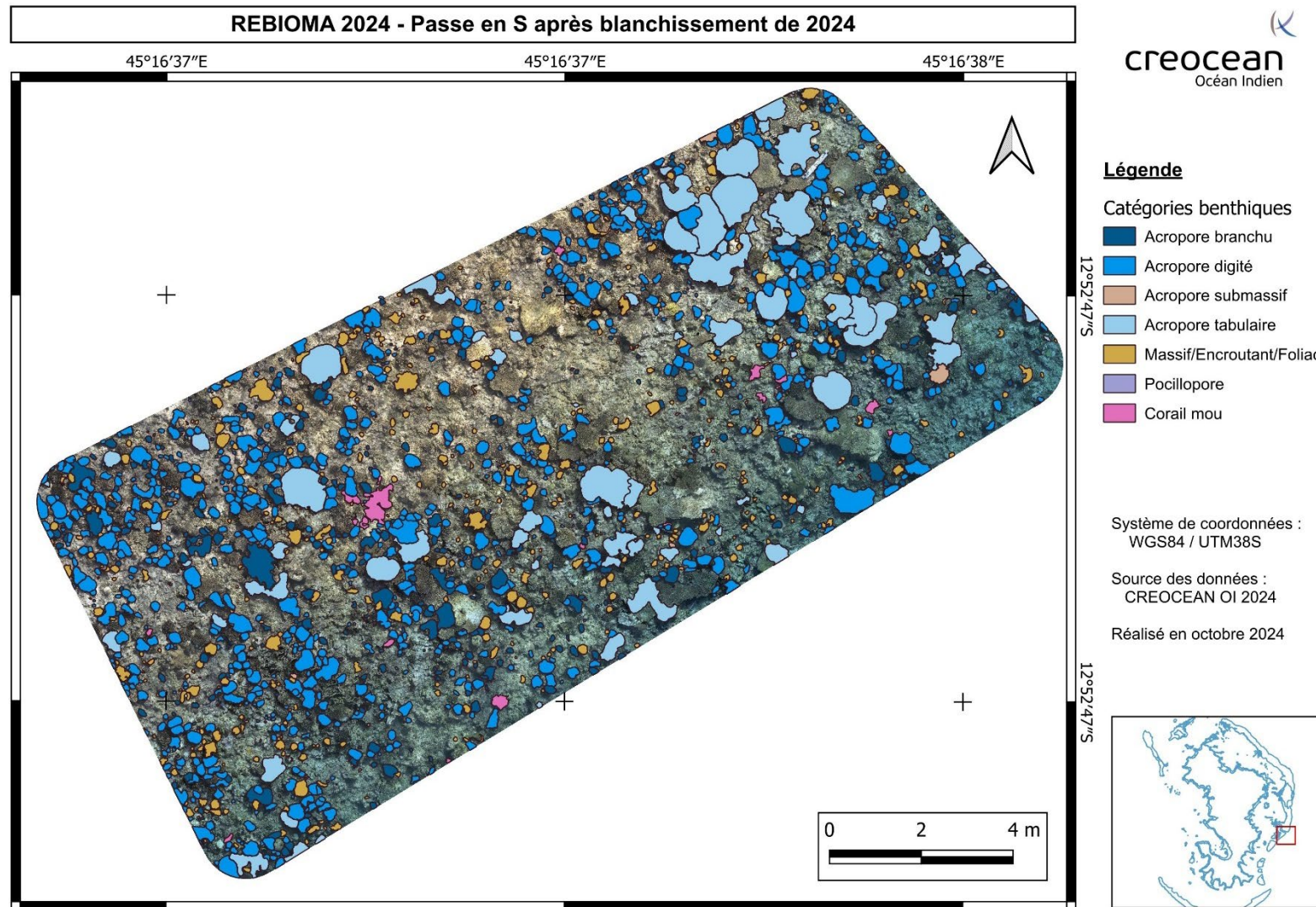


**Figure 20.** Analyse de l'orthomosaïque sur le site de la Passe en S en 2021



**Figure 21.** Analyse de l'orthomosaïque sur le site de la Passe en S en 2024 – Avant blanchissement





**Figure 22.** Analyse de l'orthomosaïque sur le site de la Passe en S en 2024 – Après blanchissement

### ► Densité corallienne et juvéniles

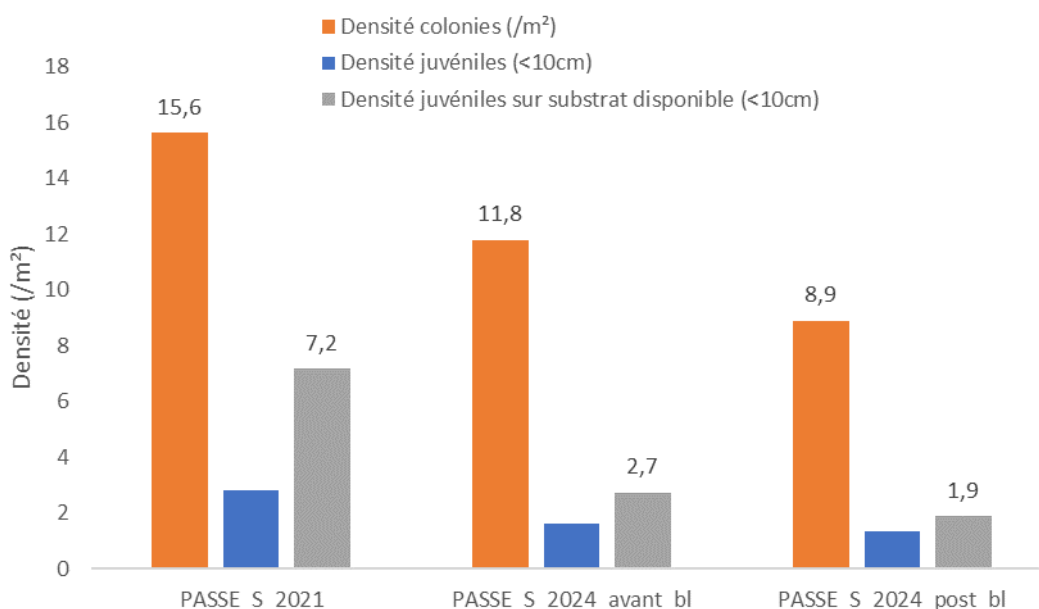
Le détournage des orthomosaïques permet d'évaluer la densité en colonies coralliennes vivantes à différentes périodes.

**Du fait de la petite taille des juvéniles (<10cm), il n'est pas possible d'identifier sur les orthomosaïques des juvéniles morts récemment suite au phénomène de blanchissement.** Les juvéniles de coraux massifs encore blancs sont visibles, mais les juvéniles morts et enalgués ne sont pas repérables. En revanche, l'étude future du recrutement et du nombre de juvéniles permettra de fournir des données intéressantes sur (i) le taux de croissance des juvéniles non impactés par le blanchissement et (ii) la résilience à l'échelle du site.

A noter que les résultats de l'étude pilote de REBIOMA avaient montré que la densité en coraux durs n'était pas nécessairement corrélée au recouvrement corallien (CREOCEAN OI 2021).

Sur le site de Passe en S, une comparaison est donc réalisée entre le nombre de juvéniles en 2021 et le nombre de juvéniles en 2024, après le phénomène de blanchissement. Ces résultats montrent :

- De manière cohérente avec la diminution du recouvrement corallien, la densité corallienne a diminué entre 2021, 2024 avant blanchissement et 2024 après blanchissement. En 3 ans et après l'épisode de blanchissement, le nombre total de colonies a quasiment chuté de moitié.
- Une diminution importante du nombre de juvéniles par surface de substrat dur disponible entre 2021 et 2024 post-blanchissement, passant de respectivement 7,2 juv./m<sup>2</sup> disponible à 1,9 juv./m<sup>2</sup> disponible. Cela suggère une mortalité des juvéniles liée au blanchissement, et possiblement un manque de résilience en lien avec la dégradation globale du site entre 2021 et 2023.



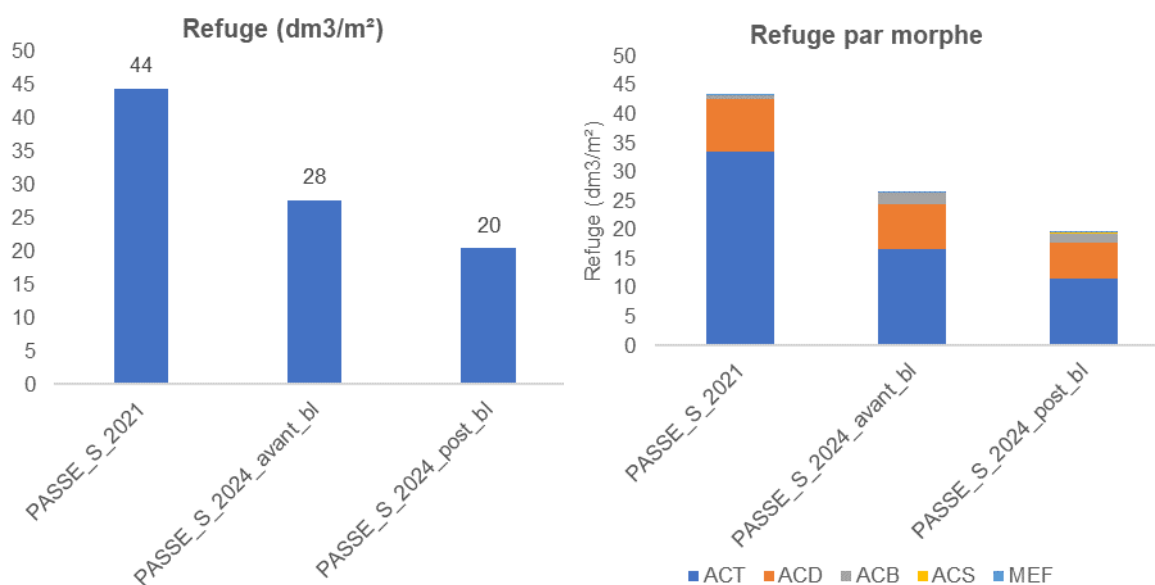
**Figure 23.** Densités en colonies et juvéniles coralliens sur Passe en S



### 3.1.2.2. Valeur refuge (3D)

La valeur refuge, qui correspond à l'abri offert par les coraux pour la faune mobile, est un des descripteurs physiques novateurs calculables grâce à la photogrammétrie. Le refuge offert par les coraux durs vivants est présenté ci-dessous, ainsi que la contribution de chaque morphotype corallien.

De manière cohérente avec la diminution du recouvrement corallien et du nombre de colonies, la valeur refuge du site de Passe en S a chuté de manière graduelle entre 2021 (44 dm<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>), 2024 avant blanchissement (28 dm<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>) et 2024 post-blanchissement (20 dm<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>). La valeur refuge de juillet 2024 reste supérieure à des récifs frangeants dégradés, mais est nettement inférieure à celle d'un récif barrière en bonne santé (CREOCEAN 2021). Cette diminution s'explique principalement par la disparition de nombreux Acropores tabulaires et la diminution de la taille des Acropores branchus, qui sont les morphes offrant le plus d'abris et qui contribuent grandement à la complexité structurale de la station.



**Figure 24. (Gauche)** Evolution de la valeur refuge sur Passe en S. **(Droite)** Contribution des principaux morphotypes - ACT : Acropore tabulaire, ACD : Acropore digité, ACB : Acropore branchu, ACS : Acropore submassif, MEF : Massif/Encroutant/Foliacé.

### 3.1.2.3. Synthèse de l'impact du blanchissement de 2024

Les analyses menées sur les différents descripteurs montrent un impact modéré du blanchissement de 2024, avec :

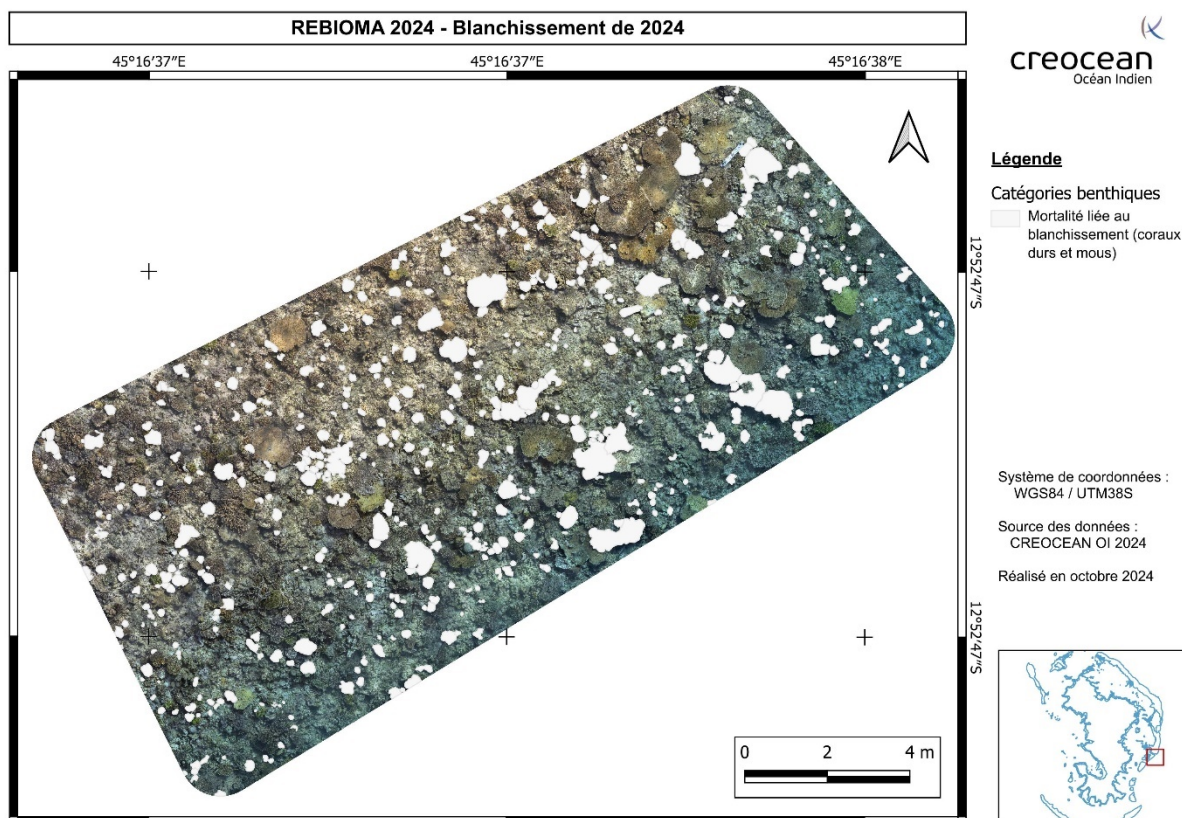
- ▶ Une mortalité relative de 27% des coraux durs en termes de surface, et 25% en termes de prévalence. La mortalité est hétérogène au sein des genres et morphes, et le blanchissement a impacté :
  - **La totalité des Pocillopores.** Ce genre est systématiquement l'un des plus touchés par ces épisodes, comme en 2016 (BECOMING 2016, MAREX/CREOCEAN 2024). L'impact répété des phénomènes de blanchissement pourrait expliquer la faible proportion de ce morphotype, qui ne présentait que 1% de recouvrement en 2021 et 2024 avant blanchissement.
  - **31% des Acropores tabulaires en termes de recouvrement**, qui correspond à un quart des colonies (25% de prévalence). La différence entre le recouvrement et la prévalence s'explique par la mortalité de grandes colonies d'ACT. Ce morphe est l'un des plus touchés par les phénomènes de blanchissement. Il est possible que des ACT

- morts du blanchissement aient été évacués physiquement par les houles d'alizés de juin 2024. Le cas échéant, ces coraux ne sont pas intégrés au recouvrement avant blanchissement, et il est possible que la mortalité soit légèrement sous-estimée.
- **27% des coraux massifs** en termes de recouvrement et de prévalence. Il s'agit principalement de *Porites*, *Faviidae* et *Goniastrea*. Il est à noter que certains des *Porites* présentent des traces de mortalité plus ancienne, probablement entre 2021 et 2023.
  - **22% des Acropores digités**, que ce soit en termes de recouvrement ou de prévalence.
  - **15% des Acropores branchus en termes de recouvrement**, ce qui correspond à 10% des colonies présentes.
  - **0% des Acropores submassifs (*Isopora palifera*)**. La résistance de cette espèce est encourageante, car elle a subi près de 100% de mortalité sur la majorité des récifs frangeants de Grande Terre et des îlots étudiés (cf site Hajangoua).
- Des signes persistants de blanchissement de la totalité des colonies de coraux mous encore présentes. Les connaissances scientifiques sur ce taxon ne permettent pas d'estimer la capacité de résilience de ces colonies partiellement blanchies.

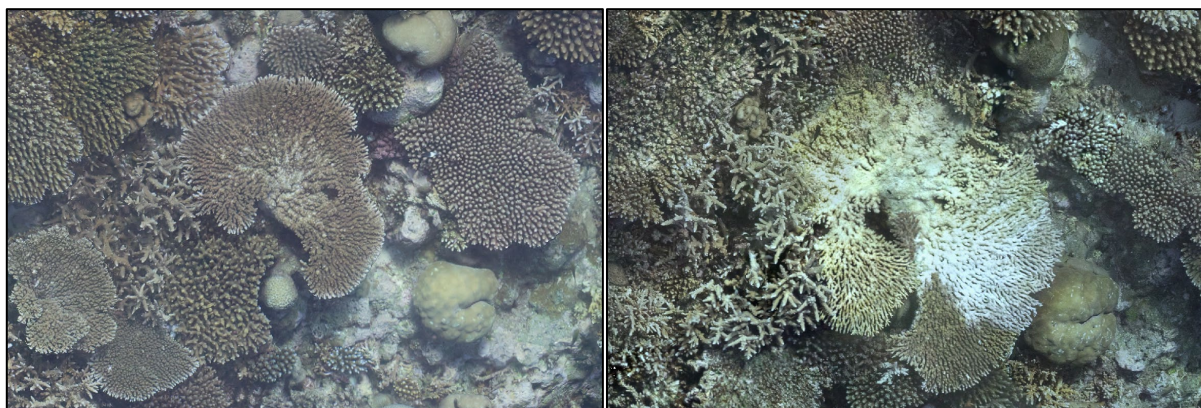
Tableau 11 : Mortalité des morphotypes coralliens suite au blanchissement de 2024

	Corail dur	Corail mou	ACT	ACB	ACD	ACS	MEF	MIL	POC
Recouvrement (%)	27%	100%	31%	15%	22%	0%	27%	NA	100%
Prévalence (%)	25%	100%	25%	10%	22%	0%	27%	NA	100%

Cette diminution du recouvrement corallien a engendré **une perte de 26% de la valeur refuge pour les poissons et macro-invertébrés mobiles**, principalement liée à la mortalité des Acropores tabulaires et branchus.



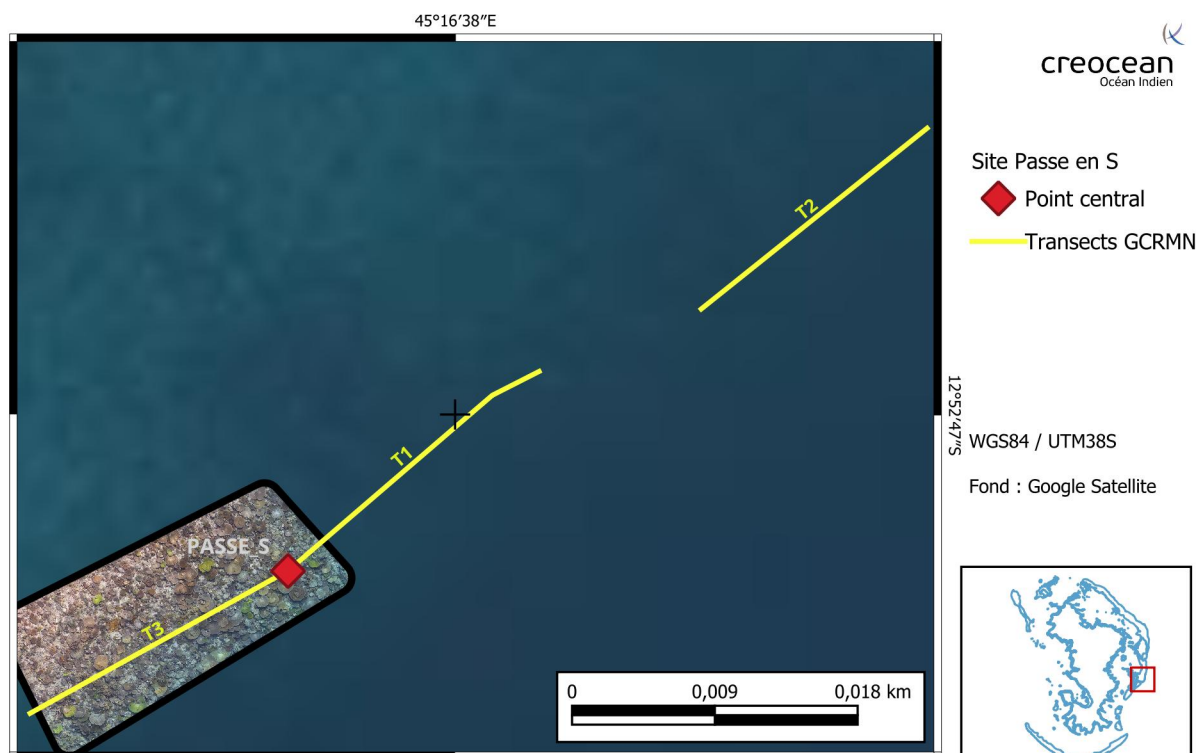
**Figure 25 : Colonies impactées par le phénomène de blanchissement de 2024**



**Figure 26 : Mortalité liée au blanchissement d'un ACT entre 2021 (gauche) et juillet 2024 (droite)**

#### 3.1.2.4. Hypothèses sur l'évolution constatée du récif

La comparaison des résultats obtenus en 2021 et 2024 ont mis en évidence une dégradation importante des récifs coralliens du site étudié. L'analyse fine des résultats du suivi GCRMN à l'échelle de T3, qui recoupe la zone d'étude (données MAREX pour le PNMM), permet d'apporter des hypothèses sur la temporalité de la mortalité et ses causes.



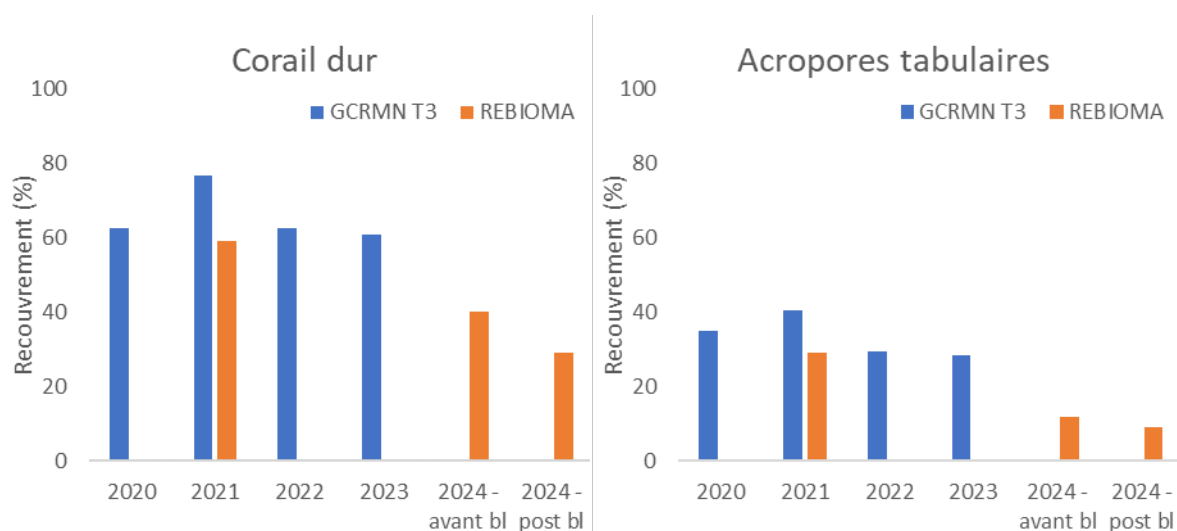
**Figure 27 : Recouvrement de l'orthophotographie et des transects de la station GCRMN**

Les résultats bruts du pourcentage de recouvrement des coraux durs et des Acropores tabulaires, obtenus par chaque protocole, sont présentés ci-dessous.

**Tableau 12 : Evolution du recouvrement corallien sur T3**

	Corail dur (%)		ACT (%)	
	GCRMN T3	REBIOMA	GCRMN T3	REBIOMA
<b>2020</b>	62,5	-	35	-
<b>2021</b>	76,75	59	40,5	29
<b>2022</b>	62,5	-	29,5	-
<b>2023 (ou 2024 avant blanchissement)</b>	61	40	28,5	12
<b>2024 - post blanchissement</b>	-	29	-	9
<b>Perte absolue entre 2021 et 2024 (avant blanchissement) :</b>	<b>21%</b>	<b>32%</b>	<b>27%</b>	<b>59%</b>





**Figure 28 : Evolution du recouvrement en coraux durs et ACT depuis 2020**

**Le suivi GCRMN sur T3 montre une diminution de 21%** du recouvrement en corail dur entre 2021 et 2023. Elle s'explique par une dégradation importante des Acropores tabulaires, qui voient leur recouvrement diminuer de 27% en valeur absolue.

**Le suivi REBIOMA montre une diminution de 32%** du recouvrement en corail dur entre 2021 et 2024, avant blanchissement. Elle s'explique également par la dégradation des **Acropores tabulaires, dont le recouvrement diminue de 59%** en valeur absolue et qui ont pour la majorité **totalement disparus** du site. Cela suggère une dégradation physique, qui a pu intervenir sur des coraux sains ou des coraux déjà morts et fragilisés.

Bien que les tendances évolutives du suivi GCRMN et REBIOMA soient identiques, la diminution du recouvrement corallien est nettement plus marquée pour le suivi REBIOMA. L'absence d'orthophoto fin 2023, à la même période que le GCRMN, ne permet pas d'expliquer finement cette mortalité corallienne plus élevée, mais plusieurs hypothèses peuvent être avancées :

- ▶ **Un biais lié au protocole.** Des analyses réalisées in situ ont en effet montré que les suivis classiques par LIT avaient tendance à surestimer le recouvrement corallien par rapport au calcul de surfaces via une orthophoto. Cela est notamment lié au transect qui « épouse » parfois la forme des colonies, entraînant une sur-représentation des coraux dans le LIT (CREOCEAN OI 2023, Urbina et al. 2020).
- ▶ Une mortalité supplémentaire intervenue entre décembre 2023 (date du suivi GCRMN) et juillet 2024 (hors blanchissement). Un **épisode de forte houle** (3,1m enregistrés sur windguru) de sud-est a eu lieu le 22 mai 2024 et pourrait avoir impacté le récif barrière de la Passe en S. L'observation sur le site de quelques fragments d'Acropores tabulaires, encore vivant, laisse en effet supposer une dégradation physique récente. Une dégradation d'origine anthropique par le piétinement est peu probable au vu de la profondeur (entre -4 et -6m à marée basse).

Ces deux hypothèses peuvent également se cumuler.



**Figure 29 :** *Morceaux d'Acropore tabulaire récemment arrachés (image de juillet 2024)*

## 3.2. Site d'Hajangoua

### 3.2.1. Descripteurs physiques

#### 3.2.1.1. Modèle numérique 3D

Le modèle numérique de terrain permet de caractériser avec précision la structure tri-dimensionnelle du site.

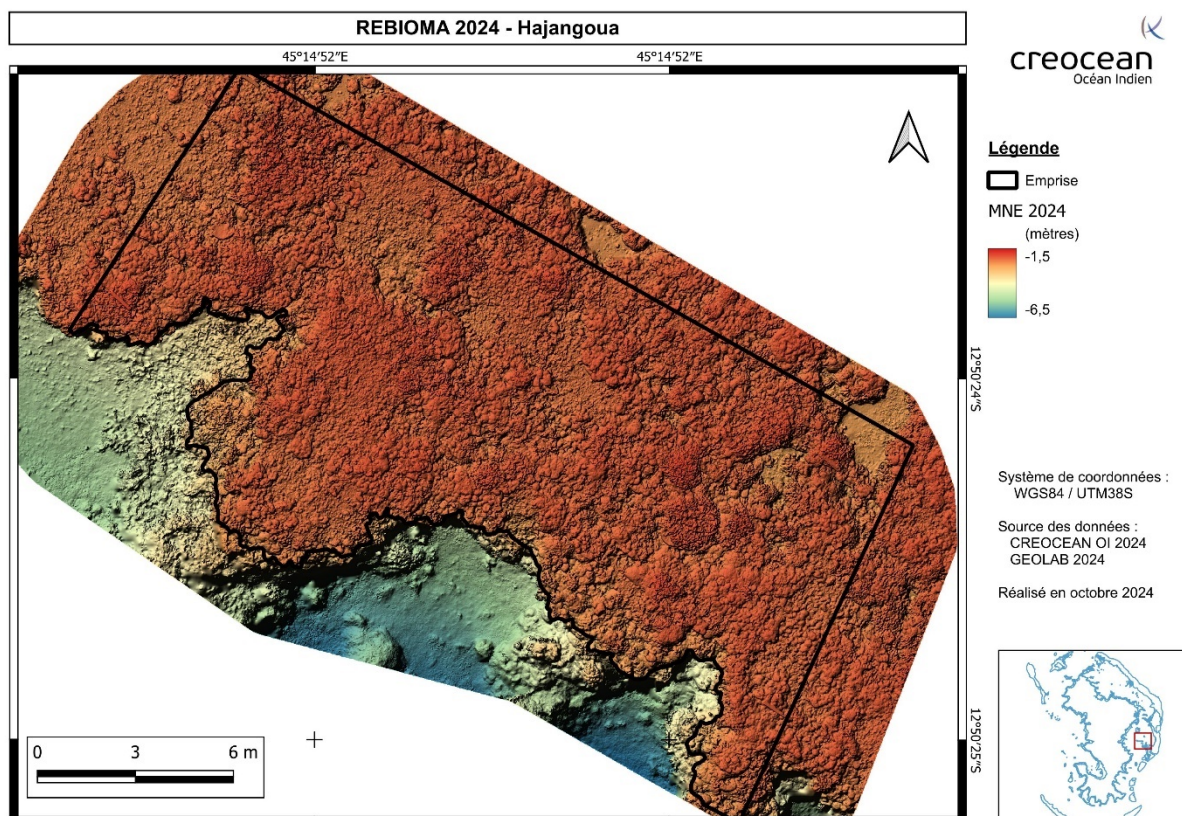


Figure 30. Modèle d'élévation numérique du site GCRMN de Hajangoua

#### 3.2.1.2. Indices de rugosité

La complexité surfacique à l'échelle du site est de 1,57, ce qui indique une **complexité structurelle faible à moyenne**, en lien avec la dominance des Acropores digités qui offrent une rugosité limitée. La complexité liée aux coraux durs vivants diminue fortement après le blanchissement, en lien avec la mortalité de la majorité des morphotypes offrant le plus de complexité structurelle (*Isopora palifera* et Acropores branchus notamment).

Tableau 13. Complexité surfacique à l'échelle du site de Hajangoua

HAJANGOUA	Site	Corail dur vivant
2024 – Avant blanchissement	1,57	1,51
2024 – Post-blanchissement	1,57	1,36

A l'échelle de transects, la rugosité linéaire est relativement hétérogène, avec un gradient décroissant du platier vers le platier externe (front récifal). Cela s'explique probablement par la présence de zones

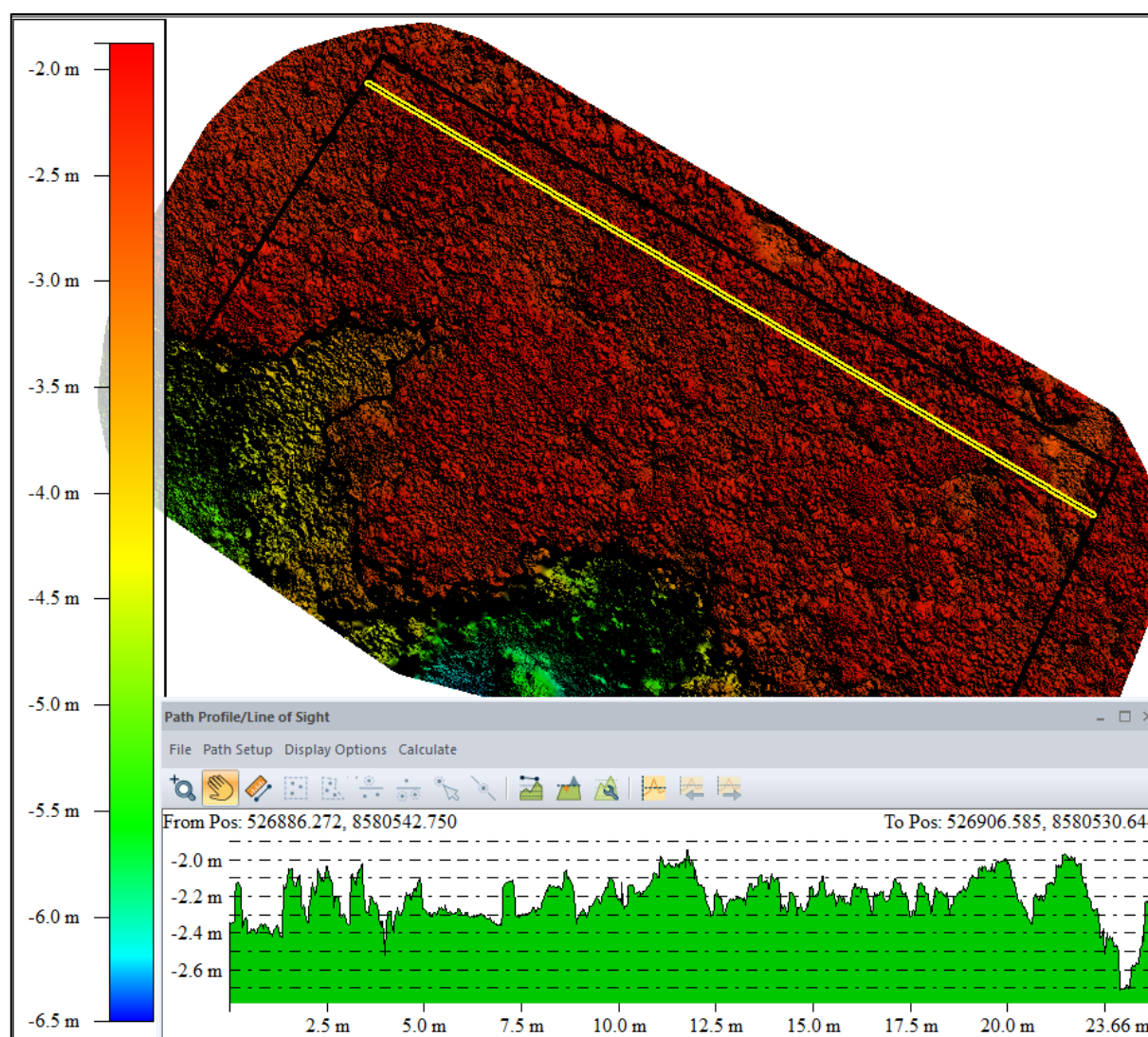


de sables sur le platier (transect R1), qui créent un « creux » dans le récif et donc un relief plus important.

Là encore, les valeurs de rugosité linéaire sont inférieures à la rugosité surfacique (1,3 vs 1,5).

**Tableau 14.** Complexité linéaire le long de 3 transects en 2024 – Passe en S

HAJANGOUA 2024	Complexité linéaire 3D/ 2D
R1	1,3574
R2	1,3030
R3	1,2090



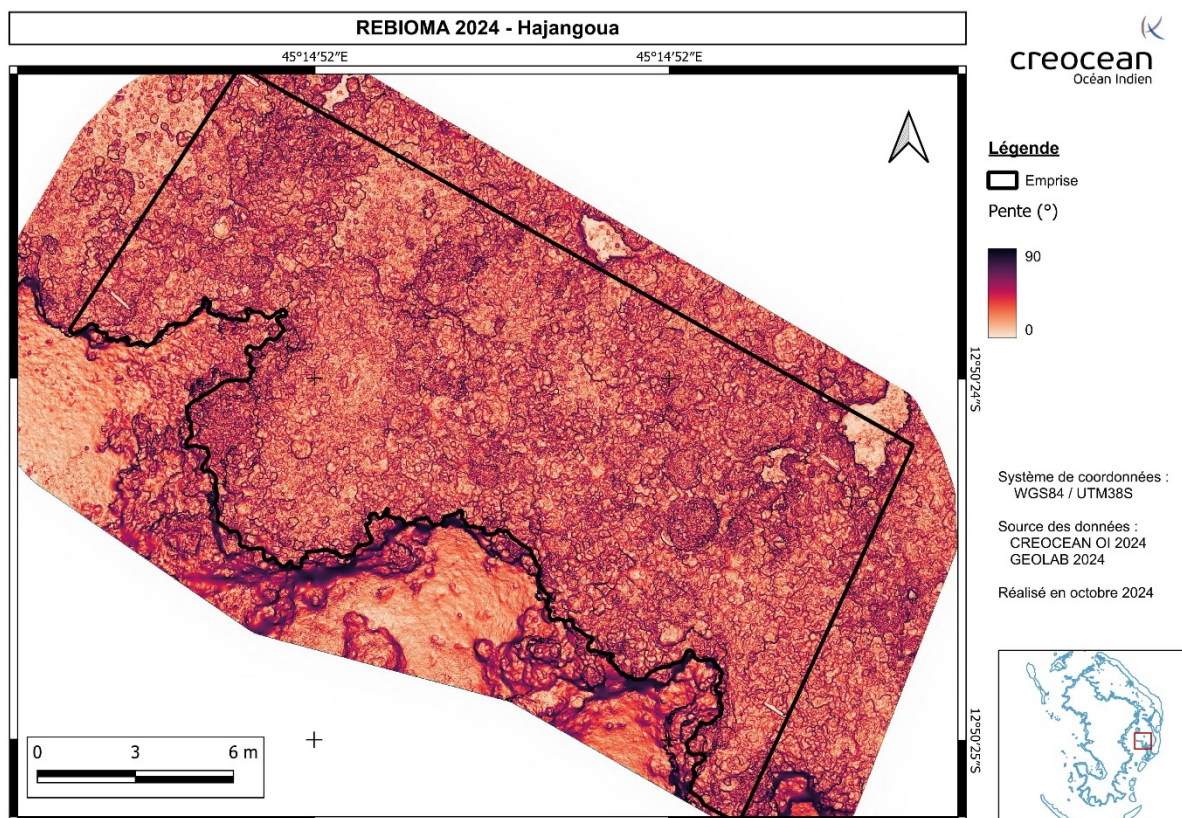
**Figure 31.** Illustrations des rugosités linéaires sur Hajangoua

### 3.2.1.3. Pente

Sur l'exemple ci-dessous (Figure 31), on remarque que :

- ▶ Le tombant du platier externe est la zone la plus pentue du site. Cette information indique la présence de possibles surplombs, et de conditions de luminosité très réduites dans ce tombant.
- ▶ Les zones de sable sur le platier sont, de manière logique, les plus planes.





**Figure 32.** Illustration du calcul de la pente à partir du MNE en 2024 - Hajangoua

L'analyse des pentes met en évidence les résultats suivants :

- ▶ La pente varie entre 0 et 89° avec une valeur moyenne de 37°.
- ▶ La pente est globalement modérée sur le site, avec une médiane de 34,57°.

**Tableau 15.** Valeurs moyennes de pente par transect

Site	Pente moyenne	1 <sup>er</sup> quartile	Médiane	3 <sup>ème</sup> quartile
Hajangoua	37,08	22,37	34,57	49,84

3.2.2. Descripteurs biologiques

3.2.2.1. Peuplement corallien

Le traitement de l’orthophotographie par détourage et classification des colonies coralliennes vivantes est illustré sur les figures ci-dessous. Les caractéristiques du peuplement sont comparées avant et après blanchissement.

► Recouvrement corallien et morphotypes

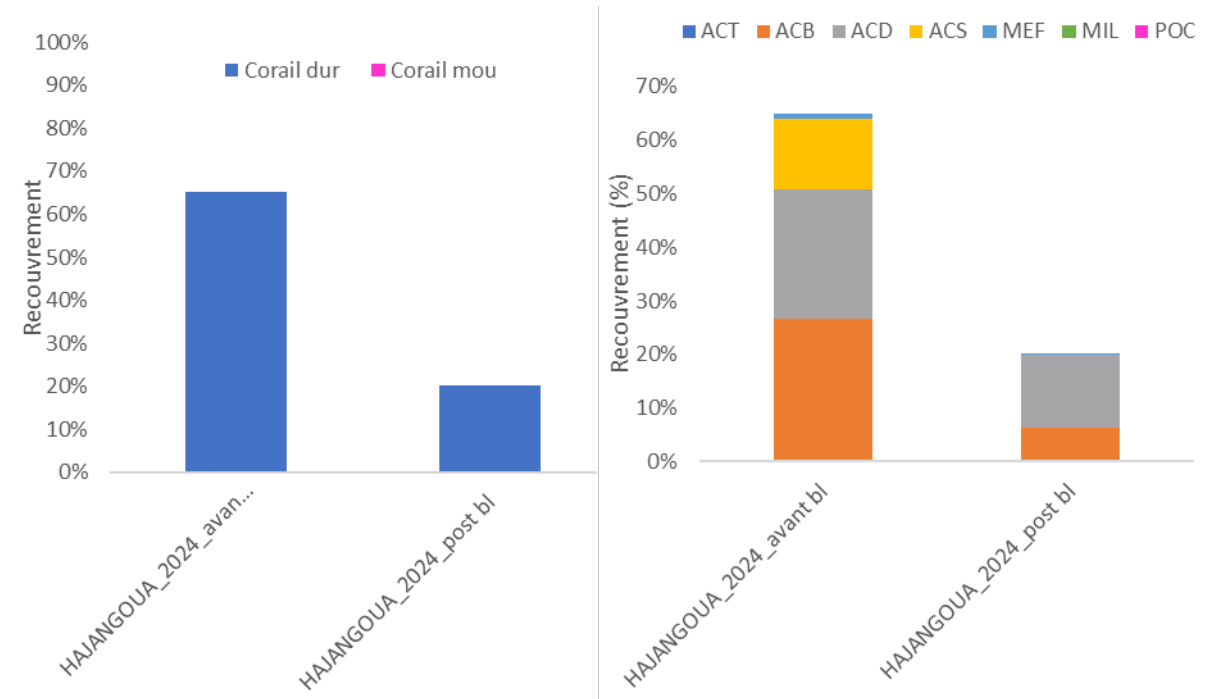
**Avant le phénomène de blanchissement, le recouvrement corallien était élevé (65%),** dominé par les Acropores branchus, digités et submassifs (*Isopora palifera*). A noter que les Acropores branchus sont principalement des *Acropora microphthalma* de faible hauteur, et non de grands buissons comme il est parfois observé sur d’autres récifs frangeants.

Suite à la forte mortalité engendrée par le blanchissement, **le recouvrement est de 20% en juillet 2024** et dominé par les Acropores digités (14% de recouvrement absolu). **Tous les *Isopora palifera* et la majorité des Acropores branchus sont morts.**

Les autres morphotypes (massifs, foliacés, coraux solitaires) ont un faible recouvrement et ont également été très impactés par le blanchissement.

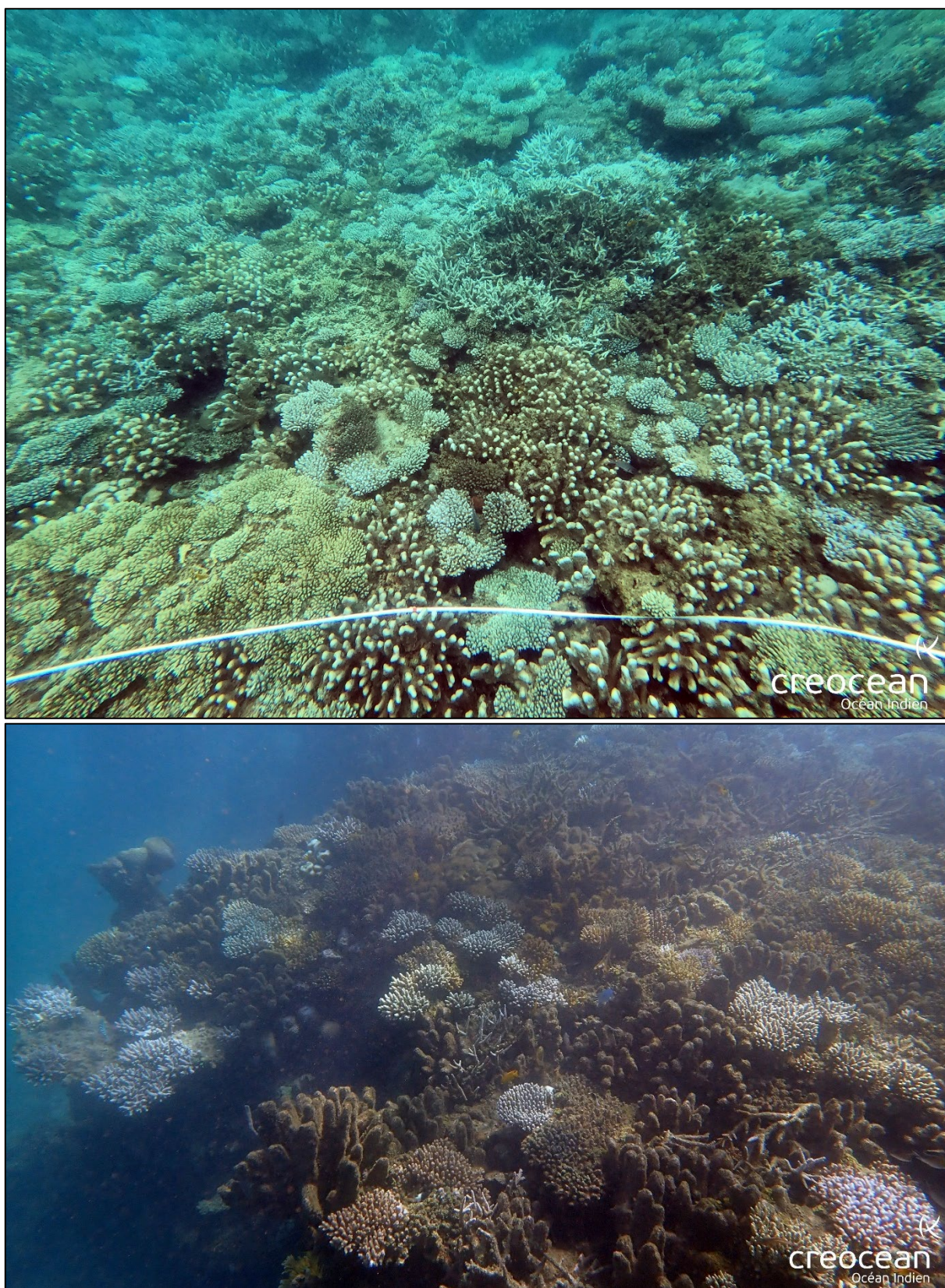
**Tableau 16.** Recouvrement 2D en coraux – HC : corail dur, ACT : Acropore tabulaire, ACD : Acropore digité, ACB : Acropore branchu, ACS : Acropore submassif, MEF : Massif/Encroutant/Foliacé, MIL : Millepore, POC : Pocillopore, CMR : corail solitaire (champignon).

HAJANGOUA	Corail dur	Corail mou	ACT	ACB	ACD	ACS	MEF	MIL	POC	CMR
2024 – Avant blanchissement	65%	0%	0,2%	26%	24%	13%	1,0%	0,0%	0,0%	0,3%
2024 – Après blanchissement	20%	0%	0%	6%	14%	0%	0,2%	0,0%	0,0%	0,1%



**Figure 33.** Recouvrement en corail dur et mou (gauche) et proportion des morphotypes coralliens (droite) avant et après blanchissement sur Hajangoua





**Figure 34.** Recouvrement élevé à *Acropores digités* et *Isopora palifera* sur Hajangoua en octobre 2023 (haut) et *Isopora palifera* morts début juillet 2024 (bas)



► Taille des colonies

Les colonies coralliennes ont des tailles extrêmement hétérogènes ( $28 \pm 36$  cm avant blanchissement et  $22 \pm 32$  cm après), en lien avec la présence de grandes colonies d'Acropores branchus continues. Il est d'ailleurs impossible de différencier les colonies qui semblent former un seul et unique massif. Par ailleurs, après blanchissement, de petits patchs sont vivants au sein de grandes colonies mortes. Ces patchs sont comptabilisés comme des colonies différentes de petite taille, mais il s'agit possiblement d'un même individu en termes de génétique. Pour ces raisons, l'analyse de la taille n'est pas adaptée aux grandes colonies d'Acropores branchus.

Tableau 17 : Taille moyenne des colonies (en cm) sur le site de Hajangoua

HAJANGOUA	Corail dur	ACT	ACB	ACD	ACS	MEF	MIL
2024 – Avant blanchissement	$28 \pm 36$	$64 \pm 7$	$20 \pm 14$	$56 \pm 82$	$52 \pm 31$	$20 \pm 12$	$0 \pm 0$
2024 – Après blanchissement	$22 \pm 32$	$0 \pm 0$	$43 \pm 13$	$19 \pm 77$	$0 \pm 0$	$18 \pm 10$	$0 \pm 0$

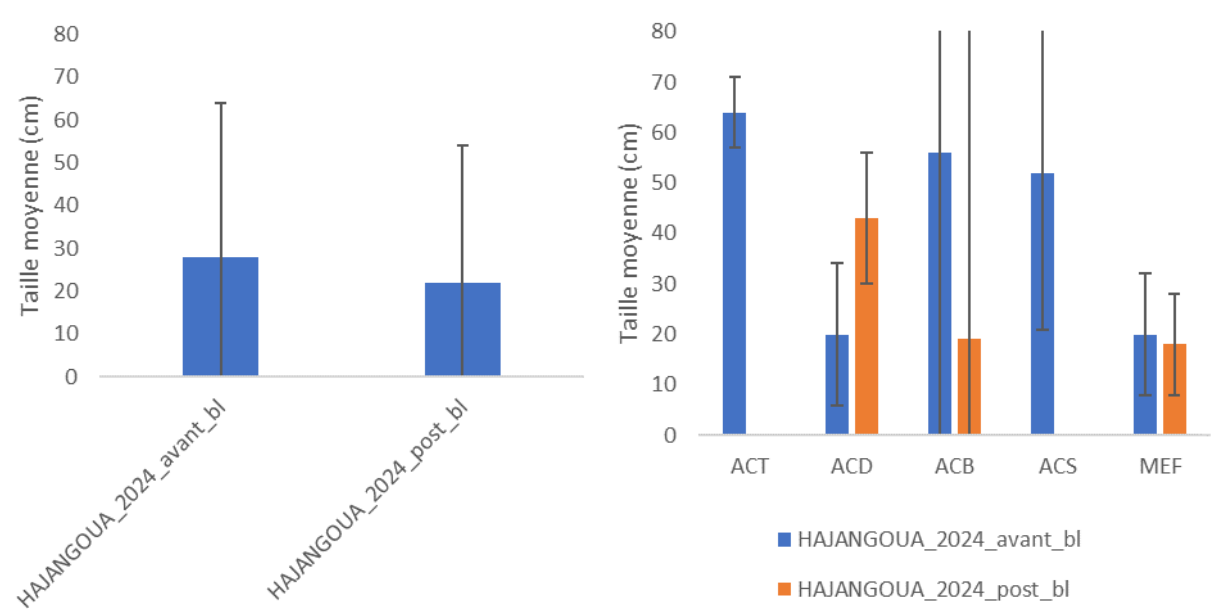


Figure 35. Taille moyenne des colonies coralliennes par principaux morphotypes sur Hajangoua

► Caractéristiques du substrat

Un envasement marqué est observé en 2024. Après le blanchissement, tous les coraux morts sont recouverts par des macroalgues ou un turf algal épais et en partie envasé. Les macroalgues sont représentées par des assemblages d'algues brunes, et des *Turbinaria*.

L'absence d'algues calcaires encroûtantes sur les coraux morts est signe d'une dégradation de la qualité de l'eau. Il sera important de surveiller dans le temps si le turf algal et les macroalgues, qui ont colonisé rapidement le substrat disponible, sont éliminés par les poissons herbivores. Ce phénomène est en effet indispensable à l'établissement de recrues coralliennes et la recolonisation du site.





**Figure 36** : *Isopora palifera* morts recouverts de turf algal et de macroalgues (*Turbinaria* sp.)

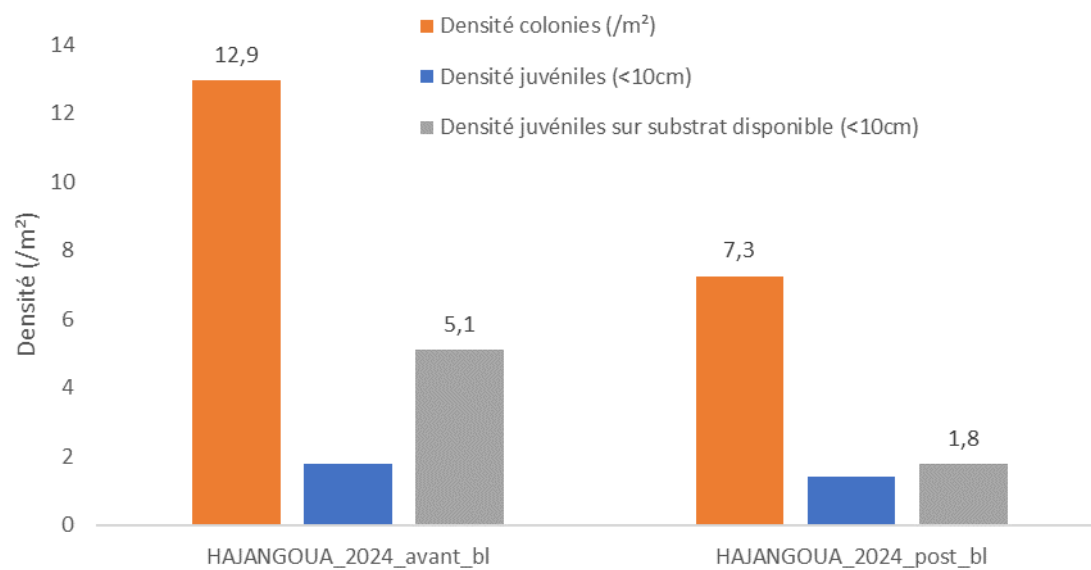
#### ► Densité corallienne et juvéniles

Le détournage des orthomosaïques permet d'évaluer la densité en colonies coralliennes vivantes à différentes périodes.

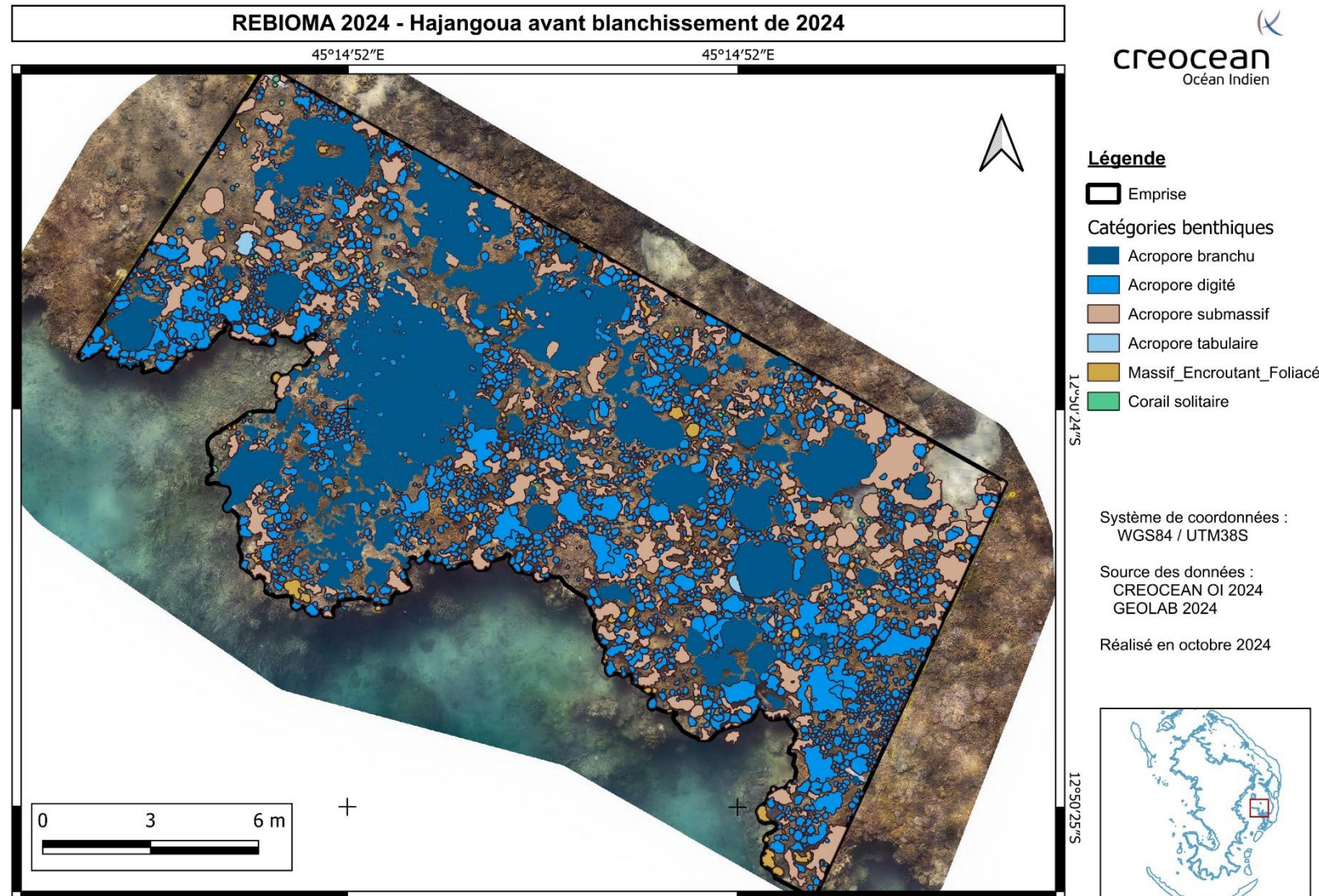
**Du fait de la petite taille des juvéniles (<10cm), il n'est pas possible d'identifier sur les orthomosaïques des juvéniles morts récemment suite au phénomène de blanchissement.** En revanche, l'étude future du recrutement et du nombre de juvéniles permettra de fournir des données intéressantes sur (i) le taux de croissance des juvéniles non impactés par le blanchissement et (ii) la résilience à l'échelle du site. A noter que les petits patchs d'Acropores branchus ayant résisté au blanchissement au sein de grandes colonies font souvent moins de 10cm et rentrent donc dans le nombre de juvéniles, bien qu'il s'agisse en réalité de fragments de colonie adulte.

Sur le site de Hajangoua, les résultats montrent :

- Avant blanchissement, un taux de juvéniles sur le substrat disponible de 5,1 ind./m<sup>2</sup>. Le recrutement sur ce site est donc moyen, inférieur à celui de la Passe en S en 2021 (7,2 ind./m<sup>2</sup>) mais supérieur à celui de Passe en S en 2024 avant le blanchissement (2,7 ind./m<sup>2</sup>).
- Une **diminution importante de la densité corallienne et du nombre de juvéniles suite au blanchissement**. Ce résultat est cohérent avec la mortalité importante enregistrée suite au phénomène.

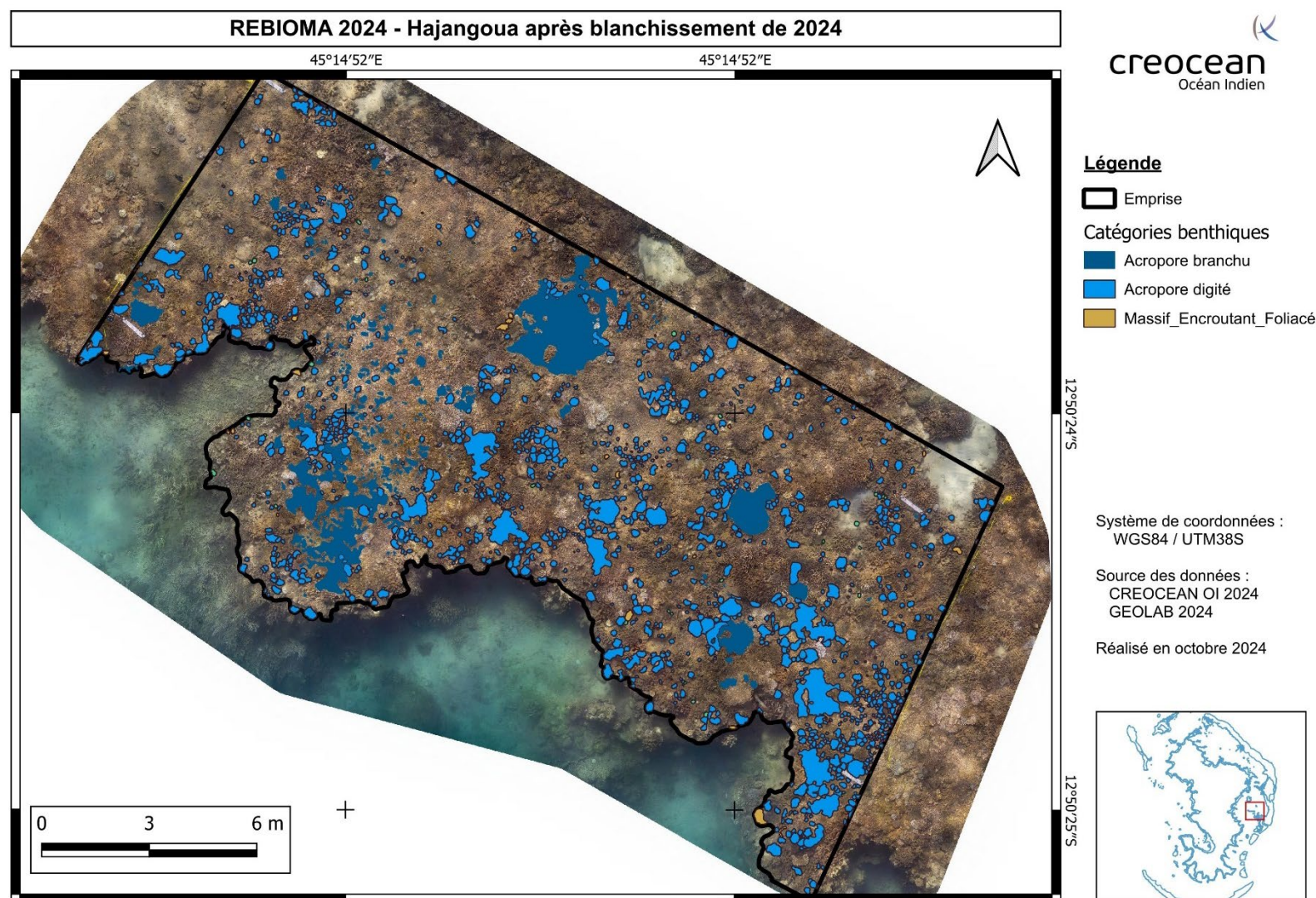


**Figure 37.** Densités en colonies et recrues coralliennes sur Hajangoua



**Figure 38. Analyse de l'orthomosaïque sur Hajangoua en 2024 – Avant blanchissement**





**Figure 39. Analyse de l'orthomosaïque sur Hajangoua en 2024 – Après blanchissement**

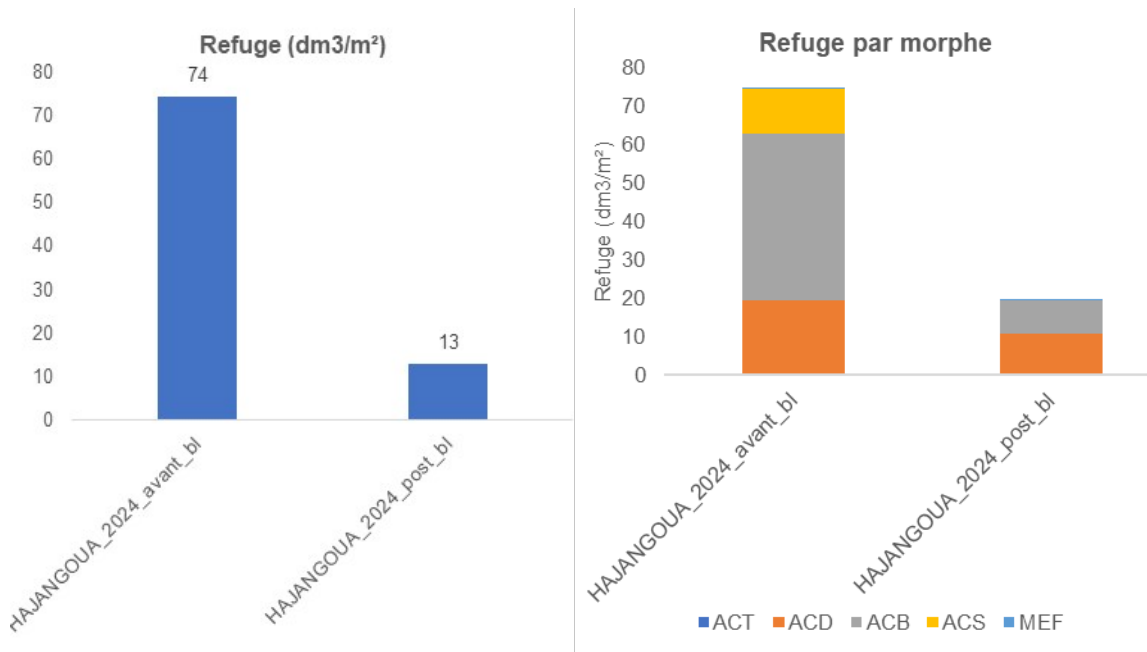


### 3.2.2.2. Valeur refuge (3D)

La valeur refuge, qui correspond à l'abri offert par les coraux pour la faune mobile, est un des descripteurs physiques novateurs calculables grâce à la photogrammétrie. Le refuge offert par les coraux durs vivants est présenté ci-dessous, ainsi que la contribution de chaque morphotype corallien.

De manière cohérente avec la diminution du recouvrement corallien et du nombre de colonies, **la valeur refuge du site de Hajangoua a fortement chuté** entre avant blanchissement (74  $\text{dm}^3/\text{m}^2$ ) et après blanchissement (13  $\text{dm}^3/\text{m}^2$ ). Cette diminution s'explique principalement par la disparition de la majorité des Acropores branchus et de la totalité des Acropores submassifs (*Isopora palifera*), qui sont les morphes offrant le plus d'abris.

La valeur refuge avant blanchissement était exceptionnelle du fait de l'abondance des Acropores branchus. Cependant, il convient d'avoir à l'esprit que le calcul est basé sur un modèle prenant en compte des valeurs moyennes de colonies branchues. Les *Acropora microphthalmia* du site sont de très faible hauteur, en rien comparables à d'autres Acropores branchus des récifs frangeants de Mayotte qui font jusqu'à 60cm de hauteur. La valeur refuge est donc probablement surestimée.



**Figure 40.** Valeur refuge et contribution des différents morphotypes - ACT : Acropore tabulaire, ACD : Acropore digité, ACB : Acropore branchu, ACS : Acropore submassif, MEF : Massif/Encroutant/Foliacé.

### 3.2.2.3. Synthèse de l'impact du blanchissement de 2024

Les analyses menées sur les différents descripteurs montrent un impact fort du blanchissement de 2024, avec :

- ▶ Une mortalité relative de 69% des coraux durs en termes de surface, et 44% en termes de prévalence. La différence entre les deux indicateurs est liée aux très grandes colonies d'Acropores branchues concernées, qui représentent une surface importante mais un faible nombre de colonies touchées.
- ▶ Une grande hétérogénéité entre les genres et morphotypes coralliens impactés.
- ▶ La **mortalité de 100% des Acropores tabulaires et des *Isopora palifera*** (Acropores submassifs).

Tableau 18 : Mortalité des morphotypes coralliens suite au blanchissement de 2024 sur Hajangoua

	Corail dur	Corail mou	ACT	ACB	ACD	ACS	MEF	MIL	POC	CMR
Recouvrement (%)	69%	NA	100%	76%	43%	100%	82%	NA	NA	68%
Prévalence (%)	44%	NA	100%	36%	39%	100%	68%	NA	NA	54%

Cette diminution du recouvrement corallien a engendré une **perte de 82% de la valeur refuge** pour les poissons et macro-invertébrés mobiles, principalement liée à la mortalité des Acropores branchus et *Isopora palifera*.

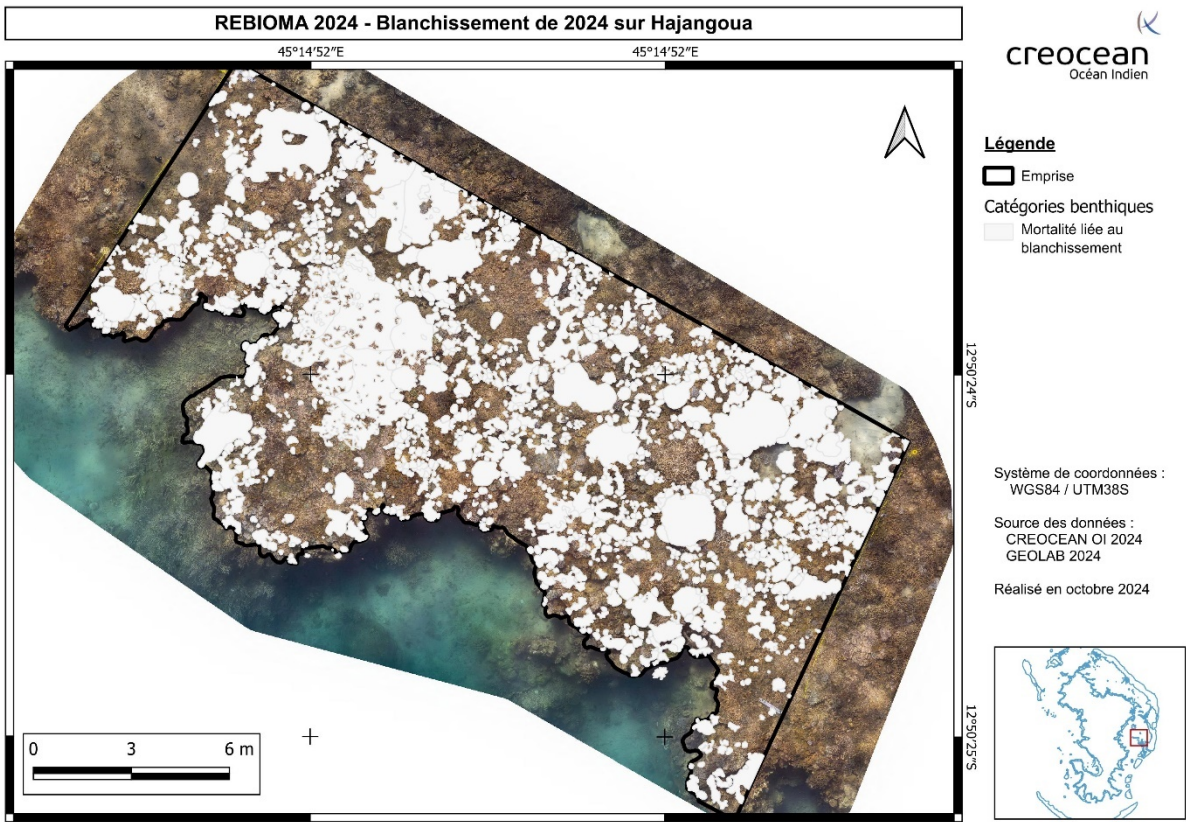


Figure 41 : Colonies impactées par le phénomène de blanchissement de 2024

### 3.3. Evaluation partielle de la résilience

Une évaluation comparative de la résilience des sites d'étude est proposée d'après les indicateurs disponibles selon la méthode de Maynard *et al.* (2017).

*Rem : le guide préconise l'intégration d'indicateurs supplémentaires pour réaliser une évaluation complète, de sorte que cet exercice doit être considéré comme une évaluation partielle à titre d'exemple pour comparer les sites entre eux. Une évaluation complète de la résilience nécessiterait le calcul de tous les indicateurs, et la standardisation des résultats par rapport à d'autres sites ou à un état de référence.*

La standardisation des résultats est effectuée par rapport aux données existantes disponibles sur Mayotte, à savoir les sites de REBIOMA en 2021 et la présente étude.

Cette estimation montre les indications suivantes :

- ▶ Une faible résilience en 2021 des sites d'Iloni et M'Bouzi (2021). Ces zones ont été très impactées par le blanchissement de 2024 (MAREX/CREOCEAN OI 2024), il est donc attendu une dégradation durable de leur état de santé.
- ▶ Une résilience moyenne sur Hajangoua avant blanchissement, et faible post-blanchissement. Ces résultats, ainsi que la forte mortalité liée au phénomène, laissent supposer une reprise corallienne lente.
- ▶ Une bonne résilience en 2021 des sites de N'Gouja et Longoni. Le premier a été peu impacté par le blanchissement, en revanche Longoni a subi une mortalité de 50 à 75% des coraux vivants. La résilience sur ce site devrait être meilleure qu'ailleurs, et sera intéressante à suivre.
- ▶ Une diminution de la résilience sur Passe en S entre 2021 et 2024, qui chute encore après le blanchissement du fait de la mortalité de certains juvénile.
- ▶ Une résilience intermédiaire sur le site de Rani en 2021. Cette zone a peu été impactée par le blanchissement de 2024.

**Tableau 19:** Indicateurs ciblés pour l'évaluation de la résilience (indice rapporté entre 0 et 1). La proportion de macroalgues sur Hajangoua avant blanchissement est issue du suivi MSA Frangeant d'octobre 2023.

SITE	Juvéniles (/m <sup>2</sup> disponible)	Taille moyenne (cm)	Substrat disponible sans macroalgues (%)	Complexité structurale
ILONI_2021	0,36	0,65	1,00	0,85
LONGONI_2021	1,00	0,65	1,00	0,94
NGOUJA_2021	0,91	0,97	0,95	1,00
RANI_2021	0,59	0,83	1,00	0,87
BOUZI_2021	0,57	0,54	1,00	0,78
PASSE_S_2021	0,91	0,83	1,00	0,85
PASSE_S_2024_avant_bl	0,36	0,82	ND	0,83
PASSE_S_2024_post_bl	0,25	0,81	1,00	0,83
HAJANGOUA_2024_avant bl	0,67	1,00	0,70	0,81
HAJANGOUA_2024_post bl	0,24	0,79	0,70	0,81

## 4. Perspectives

Les résultats de cette étude ont démontré l'intérêt de la photogrammétrie pour l'étude et le suivi des récifs coralliens. Cette méthodologie est particulièrement applicable après une mortalité liée à un événement particulier (ici le blanchissement de 2024) mais également pour un suivi régulier au vu des résultats obtenus sur le site de Passe en S. Plusieurs perspectives peuvent être envisagées afin de capitaliser sur les résultats obtenus.

### 4.1. Suivi quantitatif de l'état de santé des récifs et outil de sensibilisation

**Un des atouts majeurs du suivi par photogrammétrie est l'obtention de données géoréférencées sur une surface définie, permettant d'évaluer finement l'évolution de l'état de santé** des sites. La comparaison d'orthophotographies géoréférencées sur le site de la Passe en S est une première à Mayotte et dans l'océan Indien.

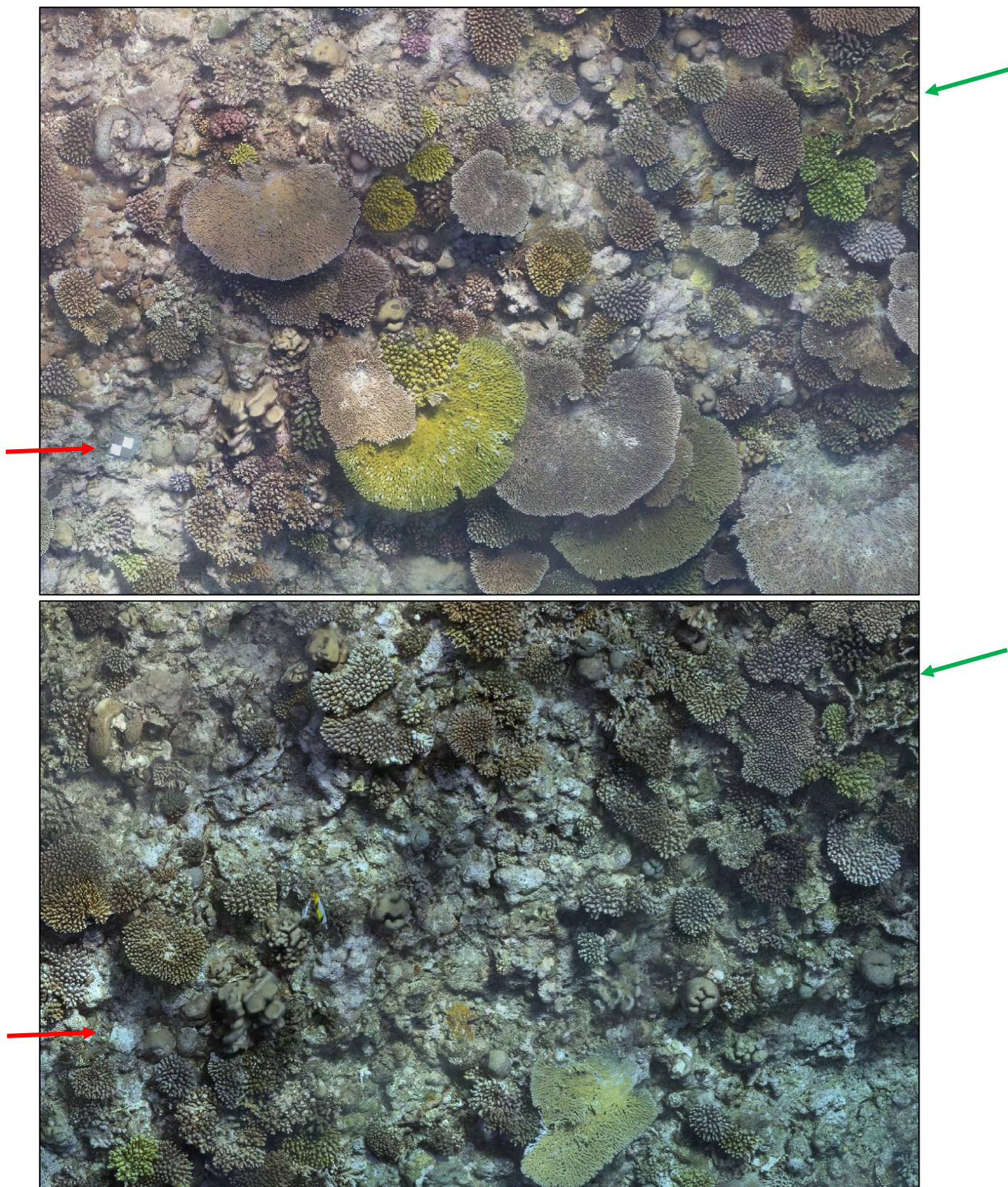
Les résultats extrêmement visuels ont permis d'alerter et de sensibiliser divers publics sur une dégradation importante entre 2021 et 2024. Cette tendance est également visible sur les résultats du suivi GCRMN historique, mais l'absence de rendu visuel géoréférencé ne permet pas de visualiser et de prendre totalement conscience de l'ampleur de la mortalité corallienne.

Il serait donc intéressant de **reproduire cette analyse** sur :

- ▶ Les **5 autres sites du projet REBIOMA en 2021**, afin de quantifier l'évolution du recouvrement corallien de la même manière que sur le site de Passe en S. Ces 5 sites concernent le récif interne de Rani et les récifs frangeants de NGouja, MBouzi, Iloni et Longoni.
- ▶ Les autres **stations GCRMN de l'ORC**. L'analyse de l'évolution par photogrammétrie fournirait des informations quantitatives et visuelles complémentaires de celles obtenues par le suivi historique classique. Les orthophotographies fourniraient également un excellent schéma sous-marin, complémentaire au balisage, afin de **repérer la station et pérenniser les suivis en cas de changement d'opérateur**.

Le retour d'expérience sur le site de la Passe en S a montré que des changements extrêmement importants pouvaient survenir en 3 ans. Ce pas de temps pourrait donc être conservé, et serait cohérent avec le pas de temps des suivis à grande échelle déployés dans le cadre de l'ORC (MSA récifs barrières, internes et frangeants).





**Figure 42 :** Capture d'écran de la même zone cartographiée en 2021 (haut) et en 2024 (bas). La cible (flèche rouge) et le millépore (flèche verte) permettent de vérifier le géoréférencement des deux images



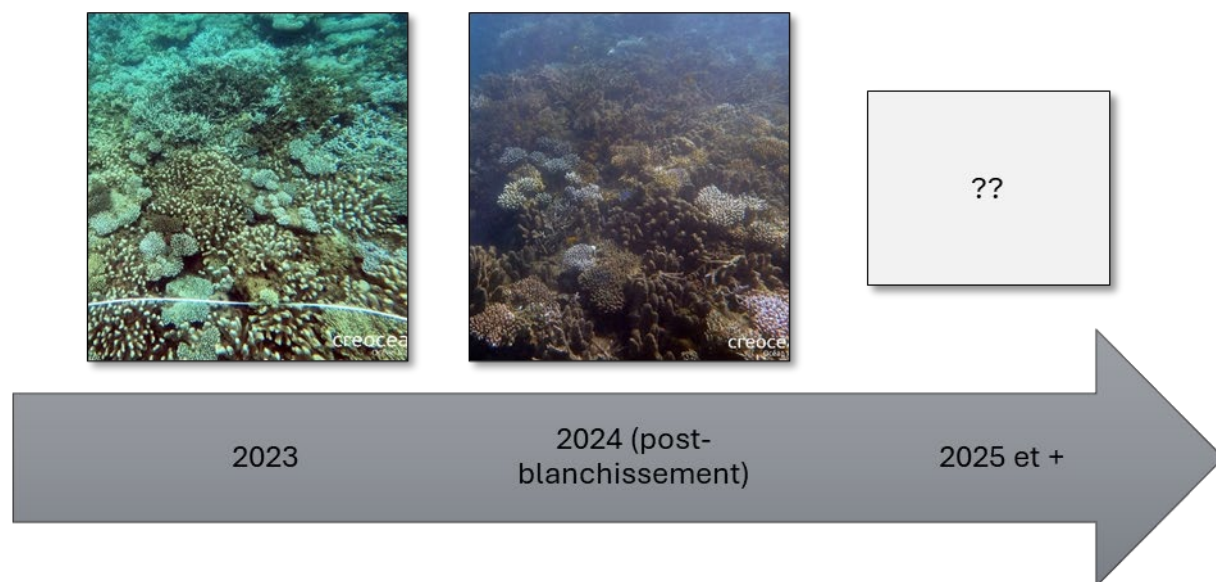
## 4.2. Evolution des récifs post-blanchissement

Comme vu précédemment, les livrables obtenus dans le cadre de cette étude pourront être superposés de manière précise aux mêmes types de données obtenues ultérieurement afin de quantifier la résilience après le blanchissement, en caractérisant notamment :

- ▶ D'éventuelles phases de transition des communautés coralliennes,
- ▶ La croissance et le recrutement des différentes communautés coralliennes,
- ▶ L'évolution du relief et de la complexité structurale après la perte liée au blanchissement,
- ▶ L'évolution du recouvrement en macroalgues,
- ▶ Un envasement potentiel lié à un accroissement de la sédimentation terrigène.

Un suivi ultérieur de ces sites permettrait de quantifier, pour la première fois dans l'océan Indien, l'augmentation ou la diminution en surface et en volume des coraux durs.

Pour ce faire, **une nouvelle acquisition pourrait être effectuée de manière annuelle dans les 3 premières années après le phénomène de mortalité, et à une fréquence plus réduite ensuite.**



**Figure 43 :** Trajectoire évolutive d'un récif fortement impacté par le blanchissement de 2024

## 4.3. Evaluation de la résilience

La photogrammétrie sous-marine permet également de mesurer la majorité des indicateurs ciblés pour évaluer à priori la résilience des récifs. Les 6 indicateurs indispensables et les autres indicateurs possibles, définis par le guide des Nations Unies, sont indiqués ci-dessous (UN, 2017).

**Tableau 20** : Indicateurs de résilience les plus pertinents (en gras) et indicateurs optionnels. Les étoiles indiquent les indicateurs déjà disponibles sur la majorité des récifs de Mayotte

	Indicateur	Méthode d'obtention envisageable	
Indicateurs de résilience	<b>Recouvrement en macroalgues</b>	<b>Photogrammétrie</b> (détourage)	
	<b>Résistance des espèces au blanchissement</b>	<b>Photogrammétrie</b> (identification des espèces)	
	<b>Diversité corallienne</b>	<b>Photogrammétrie</b> (identification des espèces)	★
	<b>Recrutement corallien</b>	<b>Photogrammétrie</b> (détourage ou comptage)	
	<b>Biomasse en herbivores (et diversité)</b>	Suivi ciblé type MSA (réalisable en même temps que l'acquisition photographique)	★
	<b>Maladies coralliennes</b>	<b>Photogrammétrie</b> (détourage ou comptage)	
	Variabilité des températures	Suivi sondes HF	★
	Habitat / complexité structurelle	<b>Photogrammétrie</b> (calcul 3D)	
	Distribution des classes de taille des colonies	<b>Photogrammétrie</b> (détourage)	
	Pression de pêche	Suivi halieutique	
	Colonies matures	<b>Photogrammétrie</b> (identification)	
	Lumière (stress)	Suivi dédié	
Facteur de stress anthropique	Substrat convenable	<b>Photogrammétrie</b>	
	Enrichissement (pollution)	Suivi qualité de l'eau ou proxy via le renouvellement de l'eau (issu de COURANTOLAG) et la distance aux zones urbaines	★
	Impact physique humain	<b>Photogrammétrie</b> (destruction, déchets)	
	Sédimentation	Proxy via la modélisation de l'érosion de LESELAM et informations de ENVALAG	★
	Pression de pêche	Suivi halieutique du PNMM	★

La quantification de 5 des principaux indicateurs via la photogrammétrie évite ainsi la multiplication des méthodes (quadrats pour le recrutement, transects pour les maladies, parcours aléatoires pour la diversité, ...), les biais d'observations et offre un gain de temps sous l'eau.

Afin d'étudier rapidement un grand nombre de site, un protocole simplifié faisant intervenir un binôme pourrait être imaginé :

- ▶ Un biologiste réalisant un relevé photogrammétrique sur une surface donnée, par exemple un Belt transect de 5m de large,
- ▶ Un biologiste réalisant le suivi des herbivores (densité, diversité et biomasse).

Le calcul des indicateurs peut ainsi être effectué ultérieurement, à partir des livrables obtenus.

Une évaluation à grande échelle de la résilience des récifs de Mayotte permettrait ainsi d'obtenir un **atlas de la résilience des récifs**, afin de :

- ▶ Identifier les zones les plus sensibles et les zones avec une bonne résilience,
- ▶ Identifier les facteurs expliquant la différence de résilience entre les sites,
- ▶ Evaluer la proportion de récifs à forte ou faible résilience dans les différents statuts de protection,
- ▶ Identifier les zones à protéger, par exemple dans le cadre de futures mesures de compensation de projets d'aménagements,
- ▶ Prioriser les actions de gestion qui permettront de réduire le stress sur un nombre maximal de site,
- ▶ Suivre l'évolution de la résilience dans le temps.

Enfin, le détail des impacts anthropiques par site pourra être mieux appréhendé après un second suivi en analysant l'augmentation ou la diminution de la complexité structurale. Cependant, certaines mesures spécifiques à chaque site peuvent être envisagées

## 4.4. Corrélation avec l'étude des peuplements ichtyologiques

Les résultats obtenus constituent un état initial (à l'instant T) sur un site pilote. Les descripteurs de complexité et de densité, associés aux descripteurs surfaciques habituels, ont permis d'affiner la compréhension de l'état de santé du site.

**Il serait intéressant d'interpréter les suivis ichtyologiques au regard de la valeur refuge notamment**, des relations ayant été démontrées entre (i) la biomasse et la diversité de certains groupes trophiques et (ii) les indicateurs de complexité structurale comme la valeur refuge, la diversité de morphes ou la rugosité de certains morphes (Urbina *et al.*, 2022).

Quelques exemples de relations entre les descripteurs d'habitat et les traits fonctionnels de groupes ichtyologiques sont présentés dans le tableau ci-dessous. Par exemple, l'observation de **densités et biomasses de prédateurs inférieure aux calculs basés sur la complexité structurale d'un site, indique potentiellement une surpêche**.

*Tableau 21. Lien entre les indices 3D et l'abondance de certains groupes fonctionnels ichtyologiques*

Groupes fonctionnels de poissons	Corrélation avec un indicateur de complexité structurale
Biomasse des grands prédateurs	Positive avec la valeur refuge
Diversité des herbivores brouteurs et racleurs de grande taille (perroquets, ...)	Positive avec la rugosité du site
Diversité des petits poissons vivants en petits groupes (demoiselles, ...)	Positive avec la diversité des types d'abris par morphe
Biomasse des espèces sédentaires démersales (girelles, ...)	Positive avec le recouvrement en corail dur
Biomasse des espèces commerciales très vulnérables	Positive avec la valeur refuge
Diversité des espèces commerciales très vulnérables	Positive avec la rugosité du site



## 5. Bibliographie

**CREOCEAN, 2024.** ORC Mayotte. Suivi 2023 des récifs frangeants de Grande Terre et des îlots. Pour le compte du PNMM.

**CREOCEAN, 2021.** REBIOMA-3D. Structure 3D des récifs, étude pilote pour l'amélioration de la gestion de la biodiversité de Mayotte. Projet LIFE4BEST en partenariat avec le PNMM.

**CREOCEAN, 2023.** Evaluation de l'état de santé des récifs coralliens de la Réunion par photogrammétrie sous-marine. Site GCRMN La Corne Pente externe. Pour le compte de la RNMR.

**MAREX/CREOCEAN, 2024.** Evaluation de la mortalité corallienne liée au phénomène de blanchissement 2024 sur les récifs coralliens de Mayotte. Pour le compte du PNMM.

**MAYNARD JA, MCKAGAN S., RAYMUNDO L., JOHNSON S., AHMADIA GN., JOHNSTON L., HOUK P., WILLIAMS GJ., KENDALL M., HERON SF., VAN HOOIDONK R., MCLEOD E., TRACEY D., PLANES S., 2015.** Assessing relative resilience potential of coral reefs to inform management. Biological Conservation Volume 192, Pages 109-119, ISSN 0006-3207.

**MAYNARD J., MARSHALL P., PARKER B., MCLEOD E., AHMADIA G., VAN HOOIDONK R., PLANES S., WILLIAMS G., RAYMUNDO L., BEEDEN R., TAMELANDER J., 2017.** A Guide to Assessing Coral Reef Resilience for decision support. United Nations.

**URBINA I., 2020.** Nouveaux indices quantitatifs pour le suivi des récifs coralliens issus de la modélisation 3D par photogrammétrie. Thèse pour l'obtention du grade de docteur de l'Université de La Réunion.

**URBINA I., CHIROLEU F., PINEL R., FRECHON L., MAHAMADALY V., ELISE S., KULBICKI M., QUOD JP., DUTRIEUX E., GARNIER R., BRUGGEMANN H., PENON L., ADJEROUD M., 2020.** Quantifying the shelter capacity of coral reefs using photogrammetric 3D modeling: From colonies to reefscapes.

**URBINA-BARRETO I., ELISE S., GUILLHAUMON F., BRUGGEMAN H., PINEL R., KULBICKI M., VIGLIOLA L., MAHAMADALY V., FACON M., BUREAU S., PEIGNON C., DUTRIEUX E., GARNIER R., PENIN L., ADJEROUD M., 2022.** Underwater photogrammetry reveals new links between coral reefscape traits and fishes that ensure key functions.

