

UniLaSalle **Beauvais**

Spécialité Sciences de la terre et environnement
19, rue Pierre Waguet – B.P. 30313
60026 BEAUVAIS CEDEX

Atlantique Landes Récifs
3 Rue de la Marie Josée, 40480 Vieux-
Boucau-les-Bains

Détermination d'un indice de complexité des récifs artificiels de l'association Atlantique Landes Récifs au large de Cap Breton (Landes)

BAUD Eloïs
CONTEH Kelly
CORBIC Manon
DELBEY Clément
ROUGE Adrien

Mémoire d'Initiation à la Recherche (MIR)

Année 2025-2026

Membres du jury :

-DUJANY Arnaud

-TOULLEC Renaud

Promotion 087 – Géosciences et Environnement

Résumé

Les récifs artificiels sont des acteurs essentiels dans la restauration des écosystèmes marins ainsi que la protection des côtes et de la biodiversité. Leur efficacité dépend de leur complexité structurelle, c'est un paramètre clé influençant l'installation des espèces, la stabilité des habitats et leur résistance à l'enfouissement. Ce mémoire, réalisé en partenariat avec l'association Atlantique Landes Récifs (ALR), propose la création d'un indice de complexité multidimensionnel applicable aux récifs artificiels immergés au large de la côte landaise depuis 1996.

Notre approche prévoit de combiner des outils tel que la modélisation 3D, la photogrammétrie sous-marine, et des analyses géométriques pour évaluer la complexité des structures avant et après immersion, en prenant en compte la rugosité, le volume, la connectivité et l'hétérogénéité des surfaces. Cette complexité sera ensuite mise en relation avec des analyses d'enfouissement et des indicateurs écologiques observés sur le terrain.

Ce travail s'inscrit dans une démarche innovante mêlant sciences numériques, écologie et géologie, tout cela rendu possible grâce aux ressources du laboratoire APEX (UniLaSalle). Les résultats permettront de mieux comprendre les interactions entre structure, dynamique sédimentaire et biodiversité mais aussi de permettre d'optimiser la conception future de récifs artificiels.

Mots-clés

Récifs artificiels ; Complexité structurelle ; Photogrammétrie sous-marine ; Biodiversité marine ; Enfouissement ; Modélisation 3D ; Écologie fonctionnelle ; APEX UniLaSalle

Abstract

Artificial reefs play an essential role in restoring marine ecosystems and protecting coasts and biodiversity. Their effectiveness depends on their structural complexity, a key parameter influencing species settlement, habitat stability, and resistance to burial. This thesis, carried out in partnership with the Atlantique Landes Récifs (ALR) association, proposes the creation of a multidimensional complexity index applicable to artificial reefs immersed off the Landes coast since 1996.

Our approach involves combining tools such as 3D modeling, underwater photogrammetry, and geometric analysis to assess the complexity of structures before and after immersion, considering surface roughness, volume, connectivity, and heterogeneity. This complexity will then be compared with burial analyses and ecological indicators observed in the field.

This work is part of an innovative approach combining numerical sciences, ecology and geology, made possible thanks to the resources of the APEX laboratory (UniLaSalle). The results will provide a better understanding of the interactions between structure, sediment dynamics and biodiversity, as well as helping to optimize the future design of artificial reefs.

Keywords

Artificial reefs; Structural complexity; Underwater photogrammetry; Burial; 3D modelling; APEX laboratory

Table des matières

Résumé.....	2
Abstract.....	2
Table des figures	7
Table des tableaux.....	8
Liste des abréviations, symboles et unités	8
Glossaire	9
1Introduction.....	10
2 Indice de complexité de la structure pré-immersion.....	11
2.1Méthode et raisons de l'étude	11
2.2Complexity Target Points (CTPs).....	11
2.3Indices de complexité géométrique.....	11
2.4Indices de complexité informationnelle.....	12
2.5Choix des paramètres.....	14
2.6Indice de modification de l'énergie (EM)	15
2.7Indice de modification de la circulation des nutriments (NM).....	16
2.8Programmation des algorithmes de calcul	16
3 Indice de maturité.....	17
4 Indices d'enfouissement.....	19
5 Caractéristiques hydrodynamiques et autres effets physiques des récifs	21
6Indices biologiques	22
6.1Communautés ichtyologiques	22
6.2Biofilm et macrofouling	22
6.3Indicateurs mesurés	23
6.4Indice de végétation par différence normalisée.....	24
7Indices environnementaux.....	26
7.1La température de l'eau : un facteur structurant des récifs artificiels dans l'Atlantique et à Capbreton.....	26
7.2Variabilité de la salinité et conséquences écologiques sur les récifs artificiels dans le Golfe de Gascogne	26
7.3L'oxygène dissous (OD) : un indicateur clé de la santé des récifs artificiels	27
7.4Le pH et l'acidification des océans : impacts sur les récifs artificiels	28

7.5	Les nutriments (nitrates et phosphates) : entre fertilisation et eutrophisation	28
7.6	Caractéristiques du substrat : fondement de la colonisation des récifs artificiels	28
7.7	Contaminants (métaux lourds, hydrocarbures) : menaces persistantes pour les récifs artificiels	31
8	Conception du protocole de suivi environnemental sous-marin	31
8.1	Objectifs et contexte de la démarche	31
8.1	Choix des facteurs environnementaux étudiés et contraintes méthodologiques	31
9	Conception du protocole de photogrammétrie sous-marine.....	33
9.1	Objectifs et contexte de la démarche	33
9.2	Recherche bibliographique et fondements méthodologiques.....	34
9.3	Vers un protocole adapté aux besoins d'une association citoyenne.....	34
10	Conception du protocole de traitement des photographies sous-marines	34
10.1	Objectifs et contexte de la démarche	34
10.2	Fondements méthodologiques et apports de la littérature	35
10.3	Contraintes optiques sous-marines et stratégies de correction	35
10.4	Description synthétique du protocole	35
10.5	Place du protocole dans la démarche de suivi	36
11	Conception du protocole de d'utilisation d'Agisoft Metashape	36
11.1	Objectifs et contexte de la réalisation	36
11.2	Recherches bibliographiques et fondement scientifique.....	36
11.3	Un Protocole adapté aux difficultés de la collecte de données.	37
12	Terrain.....	37
12.1	Déroulement des opérations	37
12.2	Formation et échanges avec les plongeurs	37
12.3	Retours sur les marqueurs.....	38
12.4	Enseignements et perspectives	38
12.5	Conception des marqueurs de référence de distance.....	38
13	Données brutes et premiers retours	40
	Conclusion	40
	Références bibliographiques.....	42
	Annexe A – Document technique : protocole d'acquisition de photogrammétrie sous-marine	45
1.	Introduction	45
2.	Équipement.....	45

3. Paramètres de la caméra	45
4. Mesures et échelles	45
5. Capturer des scénarios.....	46
6. Après la plongée : gestion des données	47
Annexe B - Traitement des données photogrammétriques	47
Introduction.....	47
1. Organisation et sauvegarde des images	47
2. Prétraitement des images.....	48
3. Retouches ponctuelles	48
4. Exportation.....	48
5. Conseils pratiques	48
Annexe C - Protocole d'utilisation d'Agisoft Metashape pour la photogrammétrie	
sous-marine	49
Préparation des photos.....	49
Alignement des photos	50
Traitement du nuage de points clairsemé (TIE Points)	50
Création du nuage de point dense :.....	51
Construction du modèle 3D :.....	52
Exemple d'un calcul effectué par photogrammétrie : le calcul de rugosité.....	53
Annexe D : Logigramme récapitulatif des différents indices et indicateurs pour la	
construction d'un indice de complexité global.....	55
Annexe E : Protocole de suivi environnemental sous-marin.....	56
Introduction.....	56
1. Équipement	56
2. Méthode d'acquisition des données.....	57
2.1 Température.....	57
2.2 Salinité	57
2.3 Oxygène dissous (OD).....	57
2.4 pH.....	58
2.5 Nutriments (nitrates, nitrites, ammonium et phosphates)	58
2.6 Substrat et état du récif.....	58
2.7 Contaminants (métaux lourds, hydrocarbures).....	59
3. Observations biologiques (Jorge, 2022).....	59
3.1 Organisation des palanquées	59
3.2 Méthode de comptage (méthode Charbonnel).....	59
3.3 Techniques de dénombrement des bancs.....	61
3.4 Relevé et identification des espèces	61
4. Enregistrement des données sur le terrain.....	62

5. Sécurité et précautions	62
6. Traitement et analyse des données	63
6.1 Organisation et validation des données.....	63
6.2 Paramètres physico-chimiques.....	63
6.3 Nutriments.....	63
6.4 Contaminants.....	63
6.5 Substrat et état du récif.....	64
6.6 Observations biologiques.....	64
6.7 Analyses statistiques et comparatives.....	64
6.8 Visualisation et cartographie.....	64
6.9 Restitution et archivage	64
6.10 Gestion des échantillons.....	64

Table des figures

Figure 1 : Aperçu des mesures de complexité (RIERA et al., 2024)	13
Figure 2 : Analyse factorielle multiple (RIERA et al., 2024).....	14
Figure 3 : Cadre de modélisation du réseau trophique appliqué au modèle avant et après le déploiement des AR à Capbreton (SALAÜN et al., 2023).....	18
Figure 4 : Définition de la région de sillage et de la longueur du sillage (PAN et al., 2022)	21
Figure 5 : (a) schéma illustrant les cinq étapes de colonisation par le biofilm, (b) exemple d'un paysage naturel de biofilm, (c) topographie 3D d'un biofilm, (d) topographie de surface du même biofilm, (e) exemple de macrofouling sur une surface de bois immergée (RIERA, 2020)	23
Figure 6 : graphique montrant la variation de la concentration des pigments avec le temps sur différents substrats (Cg béton gris, Ds ciment dolomitique, Cw béton blanc) (RIERA, 2020).....	24
Figure 7 : graphique représentant la variation de la biomasse sèche du macrofouling selon les substrats (C: ciment, D: dolomie, R: roche) et les saisons à deux endroits différents (RIERA, 2020)	24
Figure 8 : Absorption de la lumière en fonction de la santé des végétaux. (OZYAVUZ et al., 2015).....	25
Figure 9 : Principaux transits sédimentaires et localisation des principales structures du Golfe de Gascogne (GARLAND, MARCHES, 2011). Le point bleu au niveau du Cap Breton indique la localisation des récifs artificiels de la concession de Cap Breton.	29
Figure 10 : Carte de la nature des fonds, basée sur des cartes publiées de 1970 à 2010 (GARLAND, MARCHES, 2011). Le point bleu au niveau du Cap Breton indique la localisation des récifs artificiels de la concession de Cap Breton.	30
Figure 11 : Carte locale du substrat du lit marin au niveau de la concession de Cap Breton (EMODnet, 2022)	30
Figure 12 - Photo prise lors d'une plongée d'initiation à la biologie locale - Courtoisie de Jean Clestrino	37
Figure 13 - Photo d'une réunion entre étudiants, encadrant et plongeurs bénévoles	37
Figure 14: marqueurs en adhésif industriel.....	39
Figure 15: marqueur sur base plate et ses cotes	39
Figure 16: Prototype sur base carré	39
Figure 17 : ensemble des prototypes.....	40
Figure 18: Exemple de masque appliqué sur une photo.....	49
Figure 19: Tie point avec angle des cameras alignés	50
Figure 20: Nuage de point dense.....	52
Figure 21: Model 3D solide	53
Figure 22 : Mesure de la rugosité par rapport entre la longueur développée et la longueur au sol. (BARTHELEMY, 2016).....	54

Table des tableaux

Tableau 1 : Résultats de l'analyse de complexité informationnelle et géométrique sur les modèles tridimensionnels Babel et Typi.....	17
Tableau 2 : Comparaison des indices d'analyse de réseau pour divers écosystèmes d'estuaires français déploiement de récifs mis en contexte avec d'autres modèles Ecopath (SALAÜN et al., 2023)	19

Liste des abréviations, symboles et unités

AAR : After Artificial Reef, modèle trophique représentant la situation après le déploiement des récifs artificiels

ADCP : Acoustic Doppler Current Profiler, courantomètre acoustique à effet Doppler

BAR : Before Artificial Reef, modèle trophique représentant la situation avant le déploiement des récifs artificiels

CAO : Conception Assistée par Ordinateur

CTPs : Complexity Target Points

ENA : Analyse Réseau Écologique

NDVI : Indice de Végétation par Différence Normalisée

PSU : Practical Salinity Units

STL : Standard Triangle Language ou Standard Tessellation Language

3D : Trois Dimensions

Glossaire

C

Complexity Target Points (CTPs) : valeurs moyennes cibles des six métriques utilisées pour le calcul d'un indice de complexité de la structure d'un récif artificiel pré-immersion

Convex hull : Enveloppe convexe, qualifiant une enveloppe fictive qui serait placée autour du récif étudié pour en quantifier son volume ou sa surface.

F

Fractal dimension : Mesure la manière avec laquelle un objet remplit l'espace, et mesure la complexité de surface du récif. Basé sur les coordonnées 3D des points du nuage de points représentant la surface du récif.

Fractal dimension computation time : Temps de calcul nécessaire au calcul du paramètre *fractal dimension*

X

XFlow : outil de simulation numérique des fluides ; permet de modéliser avec précision le comportement des fluides autour ou à l'intérieur d'objets complexes, sans avoir besoin de maillage traditionnel.

1 Introduction

Les chiffres actuels faisant état de la biodiversité marine dans le monde sont alarmants : plus d'un tiers des récifs coralliens et mammifères marins sont aujourd'hui menacés d'extinction (**UICN, 2019**), tandis que les populations d'espèces marines ont déclinées de 56% depuis les années 70 (**WWF, 2024**). En cela, une des pistes de protection de la biodiversité marine est des moyens de subsistance liés à la pêche est l'installation de récifs artificiels dans des zones initialement peu hospitalières. C'est le rôle que porte l'association Atlantiques Landes Récifs, créée en 1996 à la suite du constat de l'appauvrissement des ressources marines.

Ce mémoire traite plus particulièrement de deux récifs installés sur la concession de Cap Breton, à proximité de la côte Landaise, avec une structure nommée Typi (installée en 2010) et une autre nommée Babel (installée en 2015). Depuis plusieurs années, ces récifs sont suivis par des mesures biologiques, de profondeur, de salinité, de température, etc. Avec la volonté de rendre ces récifs plus efficaces et de comprendre leur capacité à attirer et protéger la biodiversité marine et les communautés ichthyologiques, l'objectif principal de ce mémoire est de développer un indice de complexité multidimensionnel les caractérisant. Cela permettrait ainsi de comprendre et quantifier les interactions entre la structure tridimensionnelle du récif, son enfouissement dans le substrat marin, et le développement d'un écosystème en son sein.

La problématique centrale devient alors :

Comment calculer un indice de complexité multidimensionnel permettant de quantifier la capacité d'un récif artificiel à accueillir de la biodiversité marine, et comment cet indice peut être mis en relation avec des indicateurs biologiques existants caractérisant un écosystème sain ?

Pour répondre à cette problématique, notre travail s'articule en deux phases majeures.

Dans un premier temps, nous avons mené une revue de littérature approfondie afin d'identifier les indices de performance existants. Cette partie théorique explore successivement les indicateurs de structure initiale du récif, les dynamiques d'enfouissement, la maturité biologique, ainsi que l'influence hydrodynamique des structures. Nous y détaillons également les indices biologiques et biophysiques essentiels à la compréhension de l'écosystème.

Dans un second temps, et c'est le cœur opérationnel de ce mémoire, nous présentons le cadre méthodologique et les protocoles développés. Cette partie décrit précisément les étapes d'acquisition de données par photogrammétrie sous-marine, de la prise de vue au traitement sur le logiciel Metashape. Nous y exposons nos protocoles de traitement mathématique des modèles 3D ainsi que les méthodes de récolte de données environnementales choisies. Pour faire comprendre nos méthodes et notre réflexion, tous les protocoles sont accompagnés de commentaires quant à leurs rédactions et aux défis que nous avons dû relever. Nous abordons aussi notre terrain réalisé lors du mois de septembre à Capbreton en compagnie de membre de l'association, et des manières dont nous avons fait face à la réalité du terrain. Ce mémoire se conclut par une réflexion sur la pondération de ces métriques et les perspectives offertes par nos recherches.

2 Indice de complexité de la structure pré-immersion

2.1 Méthode et raisons de l'étude

Clément Delbey

L'étude repose sur l'évaluation de modèles 3D créés à l'aide de la Conception Assistée par Ordinateur (CAO). Ces modèles sont exportés en format STL et permettent une analyse précise de la structure dans l'espace grâce à des outils de modélisation numérique, via des scripts en Python et R. L'approche étudiée est inspirée de l'écologie fonctionnelle, qui elle étudie comment les caractéristiques des organismes influencent le fonctionnement des écosystèmes. On applique ensuite des indices à différents récifs construits pour la protection de l'habitat, la production de biomasse et des objectifs de biomimétisme. **(RIERA et al., 2024)**

2.2 Complexity Target Points (CTPs)

Manon Corbic, Clément Delbey

À partir des analyses menées, les structures les plus performantes d'un point de vue écologique permettent d'identifier les Complexity Target Points (CTPs) : ce sont des valeurs moyennes cibles de six métriques (packing, convexité, dimension fractale, richesse, diversité et équitabilité des orientations), qui représentent des niveaux de complexité. Autrement dit, ces CTPs ont pour but d'être utilisés comme référentiels pour guider la future création de récifs plus adaptés, efficaces et permettant d'ajuster les propriétés structurelles avant l'immersion, c'est-à-dire directement durant la phase de modélisation. **(RIERA et al., 2024)**

Les CTPs utilisés peuvent bien évidemment être améliorés de deux manières :

- Par le biomimétisme : on compare les scores de complexité des récifs artificiels avec ceux obtenus par reconstructions 3D d'habitat naturels. **(RIERA et al., 2024)**
- Par des études post-immersion, directement sur le lieu d'étude : il est possible d'étudier l'évolution des communautés biologiques sur les récifs une fois déployés, ce qui permet de déterminer en quoi les CTPs sont efficaces et quels points peuvent être affinés ou ajustés selon les espèces d'intérêt ou les contextes environnementaux spécifiques. **(RIERA et al., 2024)**

2.3 Indices de complexité géométrique

Manon Corbic, Clément Delbey

Un organisme nécessite un volume spécifique s'il est mobile ou une surface s'il est sessile (fixé à un support). L'indice de complexité géométrique d'un récif artificiel correspond à la capacité de sa structure géométrique à fournir un espace tridimensionnel diversifié et efficace pour cet organisme **(RIERA et al., 2024)**.

Il existe trois indicateurs principaux :

- La convexité C : c'est le volume accessible et disponible dans l'enveloppe convexe (cf. Figure 1). Une valeur proche de 1 correspond à une structure vide, sans abris face aux prédateurs ; une valeur proche de 0 quant à elle est associée à une structure remplie, sans cavités.
- Le « packing » P : il s'agit du ratio de surface dans l'enveloppe convexe.
- La « fractal dimension » D : elle définit comment un objet remplit l'espace à toute échelle. **(RIERA et al., 2024)**.

Une structure où D et P s'approchent de 1 résulterait en un objet dont les éléments structurels de l'habitat deviendraient trop petits pour être bénéfique aux organismes de toute taille.

2.4 Indices de complexité informationnelle

Manon Corbic, Clément Delbey

Un récif artificiel doit montrer des micro-habitats hétérogènes. En écologie, une haute hétérogénéité d'orientations de surface implique divers points d'ancrage, favorisant l'installation d'espèces sessiles. Cela augmente aussi la probabilité de créer des cavités ou refuges attirant une diversité d'espèces mobiles vers le récif artificiel **(RIERA et al., 2024)**.

Dans le modèle 3D de CAD, les scientifiques utilisent des vecteurs normaux qui servent de paramètre pour représenter l'hétérogénéité de l'orientation de la surface dans l'espace 3D.

Voici les mesures communes appliquées en écologie (concernant ici l'orientation des vecteurs normaux des structures évaluées) :

- R = richesse d'orientation : mesure la quantité d'orientation différentes des normales.
- H = diversité d'orientation : basé sur l'indice de Shannon, il mesure la variété d'orientation des normales. Une valeur haute indique de nombreuses directions différentes, tandis qu'une valeur faible suggère un récif "monotone" où la majorité des surfaces pointent vers la même direction. Cet indice dépend aussi du nombre de faces du modèle (et donc de sa résolution).
- J = régularité : mesure la répartition de l'orientation des normales. S'il est proche de 1, toutes les directions sont en proportion égales, par exemple une sphère parfaite. Une valeur élevée suggère que le récif procure des opportunités d'habitats équivalentes indépendamment de la provenance du courant. Si l'indice est proche de 0, une seule direction est dominante. La valeur est normalisée et ne dépend pas du nombre de faces. **(RIERA et al., 2024)**.

Les structures simples ou complexes peuvent montrer un score élevé. Par exemple un cube, une sphère ou un triangle montrent le score le plus élevé car chaque face est orientée différemment. C'est un paramètre à considérer avec d'autres métriques de complexité **(RIERA et al., 2024)**.

Quelques situations à considérer :

- Si J est haut, mais R et H se situent sous leurs CTPs respectifs, il s'agit d'une structure simple.
- Si J est bas, mais R et H sont hauts, il est alors question de vecteurs normaux différents.

De préférence le CTP de J devrait être élevé, nous aurions alors une structure avec une répartition équitable des différentes orientations de surface **(RIERA et al., 2024)**.


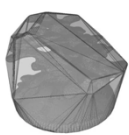
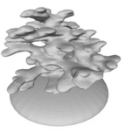

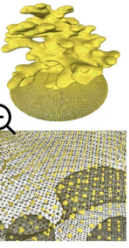
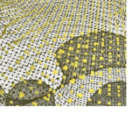
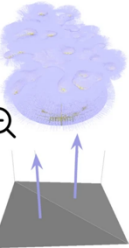

	Metrics & formulas	Parameters	Artificial reef (ar)	Convex Hull (ch)
Geometrical complexity/Complexity	Packing - P: measure of the degree of space between different parts of an object. $P = \frac{A_{ar}}{A_{ch}} \Rightarrow P_t = 1 - \frac{A_{ch}}{A_{ar}}$	Based on the surface area of the artificial reef (A_{ar}) and of its convex hull (A_{ch}) Resolution: 1 cm²		
	Convexity - C: measure of the degree of space available between different parts of an object. $C = \frac{V_{av}}{A_{ch}}$	Based on the volume available (V_{av}) within the volume of convex hull of the artificial reef (V_{ch}) Resolution: 1 cm³		
	Fractal dimension - D: measure the way an object fills the space, at all scales. $D = \lim_{\epsilon \rightarrow 0} \frac{\log N(\epsilon)}{\log \frac{1}{\epsilon}} \Rightarrow D_t = 1 - (3 - D)$	Based on the 3D coordinates of the points in the points cloud that forms the surface of the artificial reef. where $N(\epsilon)$ is a number of boxes of diameter at most ϵ required to cover the object. Resolution: 1/cm²		
Informational complexity/heterogeneity	Orientation richness - R: measure the proportion of the different orientation of the normals. $R = \frac{S}{N}$	Based on the normals to the artificial reef surface. The normals are defined at each points of the surface of the 3D CAD model. with: i : a normal of the 3D CAD model S : total of different normal N: total number of normal p _i : Proportion of one normal i compared to the total number of normal		
	Orientation diversity - H: measure the diversity of the orientation of the normals. $H = - \sum_{i=1}^S p_i \cdot \log(p_i) \Rightarrow H_t = \log(1 + H)$			
	Orientation evenness - J: measure the evenness of the orientation of the normals. $J = \frac{H}{\log(S)}$			

Figure 1 : Aperçu des mesures de complexité (RIERA et al., 2024)

Tous les paramètres ont été extraits avec une résolution de 1cm pour équilibrer entre le temps de calcul et la définition structurelle. Il est important de sélectionner la résolution avec précaution. Une résolution de plus petite échelle serait intéressante pour surveiller l'installation des larves et propagule pendant le début de la colonisation, mais doublerait les « fractal dimension computation time » pour des structures complexes comme les modèles 3D (plus de temps et de mémoire) (RIERA et al., 2024).

Une procédure à mettre en place serait de commencer par déterminer la mesure synthétique avec le « Complexity Index (CI) », soit la somme des six mesures. Ensuite, on réalise une « Multiple Factor Analysis (MFA) » ou Analyse Factorielle Multiple, ce qui s'apparente à des analyses statistiques en regroupant les deux types d'indice dans des groupes de variables séparés. Les résultats permettent d'identifier des modèles 3D qui représentent le mieux une haute complexité pour établir des CTPs (RIERA et al., 2024).

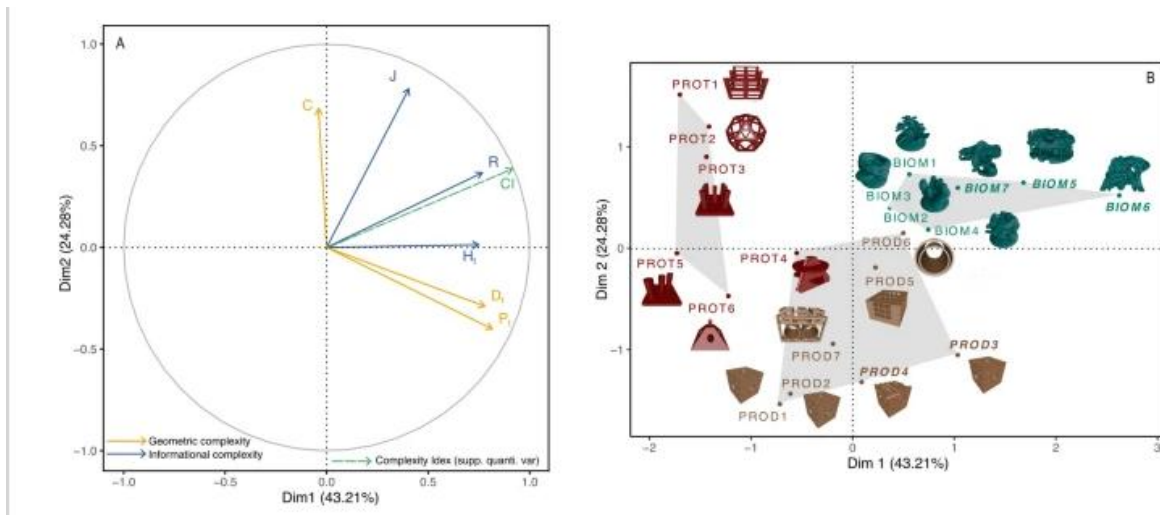


Figure 2 : Analyse factorielle multiple (RIERA et al., 2024)

La première dimension correspond à H, R, P et D. La seconde dimension correspond principalement à J et C. Il y a aussi une troisième dimension qui n'est pas représentée.

La forte corrélation entre la dimension 1 et l'indice de complexité ($R = 0,92$) suggère que les modèles avec un score très positif sur la dimension 1 ont généralement une haute complexité globale. La dimension 2 permet de s'assurer de l'inclusion de modèles qui montrent des caractéristiques significatives de convexité ou de régularité d'orientation, évitant aussi de leur attribuer un rôle écologique trop grand (RIERA et al., 2024).

La distance euclidienne moyenne a été calculée pour les modèles avec un score positif, et cette valeur a été utilisée comme une limite de sélection des modèles complexes. Ensuite, ils ont calculé l'écart type moyen pour chaque variable de complexité pour établir les CTPs. Ces derniers représentent les indices moyens qu'un modèle 3D doit atteindre ou dépassé pour être considéré "complexe".

Liste des CTPs et de leurs valeurs : CTP-C: 0.555 ± 0.232 ; CTP-Pt: 0.607 ± 0.133 ; CTP-Dt: 0.412 ± 0.092 ; CTP-R: 0.483 ± 0.405 ; CTP-Ht: 2.372 ± 0.277 ; J: 0.862 ± 0.187 ; CTP-CI: 5.286 ± 1.123 (RIERA et al., 2024)

2.5 Choix des paramètres

Manon Corbic

Ces paramètres ont été choisis pour être directement liés à des paramètres écologiques. Des indices mathématiques plus avancés pourraient être utilisés, mais pour les auteurs cela ne seraient pas pratique pour des objectifs d'ingénierie ou écologiques. Les indicateurs de base utilisés ici concernent ici la surface et le volume.

Un substrat adapté est aussi essentiel pour les organismes benthiques marins (attache, croissance, mouvement, déploiement de biofilms). Dans la littérature traitant de la complexité de l'habitat, il est courant d'utiliser des métriques de surface, le plus courant est la rugosité. Désormais ce concept est appliqué aux surfaces de rugosité 3D avec le concept de « packing », pour comparer la surface de repliement de la structure corallienne et sa relation au « convex hull » (RIERA et al., 2024). Elle peut être également incluse indirectement dans l'indice de complexité informationnelle.

Le volume disponible dans les structures est un indice important car il permet de quantifier l'espace disponible pour la vie des organismes, il donne aussi un refuge de survie, reproduction, etc. Les métriques de volumes sont toutefois utilisées moins communément dans les études de complexité des habitats, car pas facile à évaluer dans l'environnement naturel. (RIERA et al., 2024).

Un récif artificiel doit aussi donner divers micro-habitats à différentes échelles, pour une communauté variée et abondante. C'est pourquoi ils ont utilisé la « fractal dimension » pour mesurer comment un objet peut

occuper l'espace à différentes échelles. Cet indice a été très utilisé en écologie marine, par exemple pour décrire les relations entre la diversité d'espèce et la structure de différents habitats marins, comme les récifs artificiels, les lits d'herbes marines, et les zones intertidales rocheuses. Cet indice sera calculé avec la modélisation 3D CAD avec la photogrammétrie. Un point de vigilance important est la résolution (ici 1 point/cm³) (RIERA *et al.*, 2024).

Enfin, l'orientation spatiale de la structure est décrite par la distribution des vecteurs normaux. C'est la seule manière permettant une quantification sans se baser sur des observations longues ou subjectives comme compter manuellement les abris ou cavités. Pour des designs complexes, comme les modèles de biomimétismes, il est encore plus difficile d'identifier ou compter les micro-habitats objectivement.

Pour les espèces fixes, l'orientation en surface affecte leur capacité à capturer la lumière, les nutriments, et les proies planctoniques (coraux et éponges), essentielles pour leur survie ou croissance. L'orientation influence aussi leur habilité à résister à des perturbations physiques comme de forts courants marins ou vagues (RIERA *et al.*, 2024).

Pour les espèces mobiles, l'orientation de surface est essentielle dans la capacité des espèces à naviguer, détecter les proies, éviter les prédateurs, et donne un abri.

Pour finir, les facteurs environnementaux comme la profondeur, le courant, la luminosité et connectivité aux habitats adjacents influence aussi la réponse des communautés. Il faut donc aussi considérer l'environnement naturel pour ne pas sous-estimer les réponses écologiques (RIERA *et al.*, 2024).

C'est pour cette raison que l'utilisation d'autres indices témoignant de la capacité du récif à transformer son écosystème peuvent être intéressants dans notre cas d'étude. CARRAL *et al.* (2024) proposent plusieurs indices représentatifs de la capacité des récifs à augmenter ou non la production primaire nette au sein d'un écosystème. Cette dernière dépend de trois facteurs principaux : la disponibilité du substratum, la disponibilité en nutriments et la pénétration de la lumière, malgré une contribution variable de chaque facteur selon l'écosystème.

2.6 Indice de modification de l'énergie (EM)

L'impact sur les flux d'énergie au sein de l'écosystème dépend des producteurs primaires et donc de la surface du récif exposé à la lumière. Les surfaces horizontales du récif orientées vers la surface reçoivent directement la lumière solaire et sont généralement les plus productives pour les producteurs primaires benthiques. Les surfaces horizontales orientées vers le bas sont à l'ombre et donc accueillent potentiellement moins d'organismes phototrophes. Les surfaces verticales reçoivent toujours de la lumière de la surface au cours de la journée et du déplacement du soleil dans le ciel, d'autant plus que la lumière sous-marine est diffuse. Elles peuvent donc également être le support d'une importante diversité spécifique. (CARRAL, L *et al.*, 2024)

Dans l'article, il est assumé que les surfaces verticales sont deux fois moins exposées, et reçoivent donc un facteur d'exposition à la lumière égal à 0,5 tandis que celles horizontales sont pleinement exposées avec un facteur de 1. (CARRAL, L *et al.*, 2024)

Dans notre cas d'étude, il existe également des surfaces avec une certaine pente. Nous pouvons conceptuellement calculer des facteurs d'exposition à la lumière depuis un modèle 3D en attribuant des vecteurs normaux à chaque surface et les classer selon leur angle par rapport à l'axe y (vertical).

Angle de 0 – 30° (vecteur normal vertical, surface horizontale)	$fe = 1$
Angle de 30 – 60°	$fe = 0,75$
Angle de 60 – 120° (vecteur normal horizontal, surface verticale)	$fe = 0,5$
Angle de 120 – 180°	$fe = 0,2$

Nous pouvons souligner que des mesures de terrain de la luminosité pourraient compléter la pertinence de cet indice et des facteurs d'exposition.

Cette métrique a été développée pour être comparative et adimensionnelle. Plus la valeur est haute, plus le récif aura un impact positif sur l'écosystème.

2.7 Indice de modification de la circulation des nutriments (NM)

En effet, le récif introduit des effets dans le courant qui impactent le transfert de nutriments entre les différents organismes de l'écosystème : on parle des effets d'*upwelling* ou de *back eddy*, tous deux corrélés. En effet le premier est à l'origine de la formation du second à l'arrière du récif. (CARRAL, L et al., 2024)

L'*upwelling* est une remontée d'eau profonde, courant vertical ascendant remontant des profondeurs de l'océan. Ce phénomène permet la remontée des eaux plus froides et la mobilité des nutriments. (Géococonfluences, 2024)

La surface totale en cm² du récif qui contribue à l'*upwelling* et les effets de *back eddy*, est égale à l'ensemble des surfaces verticales auxquelles on soustrait la surface des cavités latérales. Ces cavités communiquant entre l'intérieur du récif et l'extérieur génèrent une perméabilité réduisant l'effet d'*upwelling*. En conséquent :

$$Supwelling = Sv \cdot frv - \sum_{i=1}^n Sh, i \cdot fr, i$$

Dans cette équation, on utilise un facteur de rugosité *frv* pour les surfaces verticales, car elles sont toutes constituées du même matériel. En effet, la rugosité de surface amplifie l'accumulation des nutriments à fine échelle et leur temps de résidence. *n* est le nombre total de canaux latéraux. Sachant que chacun d'entre eux peuvent avoir des dimensions différentes, on utilise *Sh, i* pour quantifier la surface en cm² de chaque canal « i » avec *fr, i* correspondant au facteur de rugosité. (CARRAL, L et al., 2024)

Cependant, cette équation est valable uniquement pour des récifs aux surfaces verticales ou horizontales. Dans notre cas, avec des surfaces en pente, l'équation doit être modifiée. Plus une surface donnée est proche de la verticalité, plus sa contribution à l'*upwelling* et aux effets *back eddy* est importante. On peut donc également leur attribuer un facteur correspondant à leur orientation par rapport à l'axe vertical.

Dans notre cas d'étude, nous pouvons donc utiliser la formule suivante :

$$Supwelling = \sum_{i=1}^n Sv, i \cdot fr, i + \sum_{i=1}^n Sp, i \cdot fr, i - \sum_{i=1}^n Sh, i \cdot fr, i$$

En effet, le modèle de photogrammétrie utilisé peut avoir un facteur de rugosité variable en chaque point du modèle, et donc varie selon chaque surface considérée : verticale (*Sv, i*), horizontale (*Sh, i*), ou pentue (*Sp, i*).

Cette métrique a été développée pour être comparative et adimensionnelle. Plus la valeur est haute, plus le récif aura un impact positif sur l'écosystème.

2.8 Programmation des algorithmes de calcul

Une fois les modèles tridimensionnels obtenus par photogrammétrie ou modélisation, un algorithme python a été développé à partir de l'article de RIERA, E., et al. (2024). Les fichiers sont importés sous format stl.

Dans un premier temps, les paramètres initiaux des modèles (mesh) sont extraits.

- Le ConvexHull, plus petite forme convexe enveloppant le modèle. Son aire et son volume sont calculés et stockés par le programme.

- Les nuages de points du modèle et leurs vecteurs normaux. Ces derniers seront utiles pour l'ensemble des indices de complexité informationnelle et géométrique. Il est possible de définir la densité du nuage de point (nombre de points par cm²).

Une fois ces paramètres initiaux obtenus, le programme calcule également le nombre de vecteurs normaux total et le nombre d'orientation uniques de ces vecteurs normaux.

Ensuite, nous avons calculé la dimension fractale D, un nombre permettant de résumer la complexité générale (rugosité, remplissage de l'espace par une surface, irrégularité) d'une forme 3D, mesurée à plusieurs échelles spatiales.

Nous avons utilisé la méthode Minkowski-Bouligand décrite par J. Reichert et al., définie comme "l'une des plus précises pour calculer la dimension fractale" et également "très sensible aux petits changements dans les modèles". Tout d'abord, la surface 3D de l'objet est dilatée en sphères de rayon r. Ensuite, on calcule l'influence du volume V(r) à partir d'un rayon r donné. Cela permet d'évaluer comment l'objet dilaté "occupe" l'espace. Ensuite, une courbe du logarithme de V(r) en fonction du logarithme du rayon est tracée, à partir de laquelle on peut faire une régression linéaire pour obtenir une pente. La dimension fractale en trois dimensions est obtenue avec la formule $D=3\text{-pente}$ (REICHERT, J., et al., 2017)

Les résultats obtenus dépendent de plusieurs facteurs : la résolution des modèles 3D (maillage fin ou grossier), les algorithmes de dilatation, les échelles de rayon analysées. Par exemple, si la résolution est insuffisante, cela peut engendrer des biais et certains détails ne seront pas capturés. De même, avec un lissage trop important du modèle, des détails vont se perdre et donc la dimension obtenue sera plus faible. (REICHERT, J., et al., 2017)

Nous avons utilisé un programme développé par le professeur André Backes, inclus dans notre bibliographie. (BACKES, A.R.)

Notre algorithme python permet d'obtenir les indices recherchés, et les sauvegarde dans un *dataframe*. Nous avons commencé par l'appliquer aux modèles tridimensionnels initiaux des récifs Typi et Babel et obtenu les résultats figurants dans la table ci-dessous.

Tableau 1 : Résultats de l'analyse de complexité informationnelle et géométrique sur les modèles tridimensionnels Babel et Typi

	R	Ht	J	Pt	C
Récif Typi	0	1,733	0,875	0,166	0,769
Récif Babel	0	1,404	0,614	0,312	0,737
CTPs	0,483	2,372	0,862	0,607	0,555

Nous observons que pour le récif Typi, J (orientation evenness) a une valeur élevée, mais R (orientation richness) et Ht (orientation diversity) sont sous leurs CTPs respectifs : la structure est "simple". J est moins important pour Babel mais on peut supposer la même chose (CTP J = 0.862 ± 0.187)

Pour finir, nous avons ajouté le calcul de l'indice de modification de l'énergie et de l'indice de modification de la circulation des nutriments (CARRAL, L et al., 2024) dans le programme. Pour le second, nous avons estimé la rugosité locale à partir des différences d'angle entre chaque face, individuellement, et ses voisines. Plus ses voisines ont des surfaces inclinées différemment, plus la surface se trouve dans une zone rugueuse.

3 Indice de maturité

Clément Delbey

L'étude de l'écologie des récifs artificiels exige d'aller au-delà des simples constatations de diversité ou de biomasse, afin d'examiner en détail les interactions fonctionnelles entre les divers éléments biologiques.

Tableau 2 : Comparaison des indices d'analyse de réseau pour divers écosystèmes d'estuaires français déployement de récifs mis en contexte avec d'autres modèles Ecopath (SALAÜN et al., 2023)

Ecosystem	BAR Landes Coast	AAR Landes Coast	Seine estuary (France)	St Michel bay (France)	Loire estuary (France)	Gironde estuary (France)	Galicia coast (Spain)	Lithuanian coast
Reference	This study	This study	Selleslagh <i>et al.</i> , 2012	Selleslagh <i>et al.</i> , 2012	Selleslagh <i>et al.</i> , 2012	Selleslagh <i>et al.</i> , 2012	Paradell <i>et al.</i> , 2020	Tomczak <i>et al.</i> , 2009
N	23	23	15	19	19	18	23	12
T..	379	413	3603.22	376.00	635.35	744.30	/	900
A	401	465	3944.3	451.6	647.0	939.5	1239	1084
SOI	0.36	0.302	0.11	0.06	0.12	0.12	0.205	0.059
FCI	13	13	16.10	0.64	0.19	3.99	19.4	2.55
Bt	5	6.33	22.30	7.20	4.14	2.12	/	20.98
PPt/R	1.5	1,2	1.37	6.10	139.59	1.05	1.758	3.397
B/T..	0.013	0.015	0.01	0.02	0.01	0.003	0.017	0.023
PPt/B	17.01	13.35	38.26	24.60	76.26	21.52	18.34	18.351

D'autres indicateurs complètent cette tendance : le rapport production primaire totale / respiration (PPt/R) a légèrement diminué (de 1,5 à 1,2), suggérant que le système tend vers un état d'équilibre énergétique caractéristique des systèmes matures. De même, le rapport production primaire / biomasse (PPt/B) a baissé (de 17,01 à 13,35), traduisant une accumulation de biomasse stable dans le système. (SALAÜN *et al.*, 2023)

Ces résultats montrent que les récifs artificiels ont permis de faire évoluer l'écosystème vers un état plus stable, et une structure plus complexe. L'indice « B/T.. » est donc efficace pour évaluer la performance écologique de ces récifs, ainsi que leur durabilité. Il est tout de même utile d'ajouter d'autres éléments à l'analyse, tels que des facteurs environnementaux : la composition du substrat, l'approvisionnement larvaire, ou encore la proximité avec d'autres récifs qu'ils soient naturels ou artificiels. (SALAÜN *et al.*, 2023)

4 Indices d'enfouissement

Manon Corbic

L'introduction d'un objet dans les fonds marins génère un changement dans la circulation des courants autour, y compris lors de l'introduction d'un récif artificiel. Cela entraîne notamment la formation de bassins au pied des récifs, et l'enfouissement progressif de ces derniers (Quinn., 2006).

L'association Atlantiques Landes Récifs utilise déjà un indice d'enfouissement, calculé à partir de la mesure de trois paramètres (JORGE, BESSON, 2023) :

- (1) La profondeur maximale (en mètres) : mesurée au point le plus profond, à proximité du récif, généralement au fond de la cuvette formée au pied de ce dernier
- (2) La profondeur minimale (en mètres) : mesurée au point le moins profond, observée à une vingtaine de mètres de distance, où la profondeur du substrat est peu affectée par les perturbations de courant induites par le récif
- (3) La hauteur du module (en mètres) : comparée à la hauteur initiale, le récif Typi mesurant 2m60 et le récif Babel mesurant 2m50.

L'indice d'enfouissement, indiquant le degré d'enfouissement du module, est donc calculé selon la formule suivante (JORGE, BESSON, 2023) :

$$IE = h - (\text{profondeur max} - \text{profondeur min}) \times 100$$

Pour bien comprendre le phénomène d'enfouissement d'un récif, il faut notamment analyser l'impact des courants marins et l'interaction de ces derniers avec la structure. L'interaction entre les courants marins, la structure récifale ainsi que l'enfouissement du récif ont été étudiés dans divers articles, notamment dans les travaux de Baptiste Oudon et al. (2022) au Géolab d'UniLaSalle Beauvais, à l'aide d'une modélisation sur XFlow. L'objectif de cette étude était de comprendre et modéliser les processus de transport sédimentaires en relation notamment avec l'intensité de l'énergie cinétique des turbulences. En effet, les turbulences sont une des origines de l'action d'affouillement marin (**Oudon et al., 2022**). Ce phénomène correspond à l'érosion liée aux perturbations des courants marins interagissant avec la structure récifale (**Le Robert, 2025**), créant des bassins au pied des récifs.

Il est également intéressant de comprendre ce qui contrôle l'étendue spatiale de l'affouillement. L'article de Quinn (2006), nomme comme facteurs clés l'orientation, la forme et la taille de l'objet, ainsi que la géologie du fond marin, la profondeur de l'eau, la dynamique hydrologique et sédimentaire dominante. La description géomorphologique est détaillée dans la partie 8 concernant les caractéristiques du substrat.

Pour comprendre la formation des cuvettes, il sera donc pertinent de considérer l'orientation du récif par rapport aux courants dominants de la zone étudiée, qui aura un impact sur l'intensité et la direction des turbulences générées. L'utilisation de courantomètres permettrait la mesure de la vitesse moyenne et la turbulence des courants, pour mieux comprendre le contexte hydrodynamique autour du récif ainsi que l'orientation des courants. En effet, l'affouillement est fortement dépendant de l'influence des vagues ou des marées, parfois d'un mélange complexe des deux (**Quinn., 2006**). En conséquence, des mesures de vitesse moyenne pourraient être effectuées autour du récif et également à bonne distance de ce dernier, avec des mesures circulaires régulièrement espacées (à 10m, à 20m, à 30m).

Un exemple de courantomètre couramment utilisé est le courantomètre acoustique à effet Doppler (ADCP), qui transmet un signal acoustique dans l'eau, rétrodiffusé ensuite par les particules ou microorganismes transportés par le courant. Un capteur reçoit les signaux acoustiques rétrodiffusés et les traite, permettant de déduire la vitesse des particules et donc du courant marin qui les transporte (**IFREMER, 2024**). Les ADCP peuvent être fixés sur le fond dans des structures adaptées, ou bien sur la coque d'un bateau en mouvement. Ils permettent d'obtenir l'intensité et la direction des courants marins, mais également les fluctuations d'énergie turbulentes dans la colonne d'eau (**Subtop, 2024**), deux paramètres pertinents à mesurer et à inclure dans un indice pour comprendre l'influence hydrodynamique des récifs artificiels.

Concernant les processus liés au courant de marée, nommé "courant stationnaire", plusieurs observations ont été faites : "les éléments d'affouillement les plus courts et étroits ont été associés à des épaves alignées sur leur axe le long du courant, présentant des formes profilées à l'écoulement", ainsi que "les marques d'épave sur un fond de sable sont caractérisées par des auges larges, peu profondes et longitudinalement étendues, tandis que celles sur les sols de gravier sont relativement plus étroites, plus profondes et moins étendues." Sur ce dernier point, des mesures granulométriques pourraient aussi apporter une compréhension du système récif - fonds marins plus fine. Des prélèvements pourraient être effectués au niveau de l'affouillement et en amont. Lorsque les courants de marée sont décrits comme rotatifs, l'objet interagissant avec le courant agit comme un noyau stationnaire, favorisant le creusement d'un bassin autour et sous l'objet, provoquant son enfouissement progressif dans le substrat.

Pour les processus d'affouillement liés à l'effet de la houle, nommé "courant oscillatoire", l'impact sur le récif artificiel est principalement lié à la profondeur d'immersion du récif.

L'introduction d'un objet au fond marin entraîne globalement une augmentation de la vitesse d'écoulement autour de la structure et de l'intensité de turbulence (lié à la génération de vortex). Plus spécifiquement, la littérature décrit qu'un vortex en fer à cheval se forme devant la structure, ainsi que des tourbillons de sillage derrière la structure, des vagues de réflexion et diffraction, et également de la turbulence (**Quinn., 2006**).

Les travaux de Oudon ont permis de comprendre que l'interaction entre le courant marin et la structure du récif augmentent l'énergie cinétique turbulente et réduction de la vitesse moyenne au-dessus de la

structure ($<0,05\text{m/s}$). En conséquence, les sédiments sont transportés plus lentement, progressivement éloignés de la base du récif, entraînant l'expansion des bassins et donc l'enfouissement des récifs (Oudon et al., 2022). Les extrémités de la structure jouent également un rôle dominant dans le modèle d'écoulement et modifient la structure des tourbillons. Pour les épaves par exemple, la proue et la poupe modifient le modèle d'écoulement. (Quinn., 2006).

Enfin, pour comprendre le processus d'affouillement, il est souvent plus approprié d'examiner ces processus sur la base de l'accrétion (gain net de sédiments) et de l'érosion (perte nette de sédiments), par rapport à une référence choisie arbitrairement. (Quinn., 2006). En cela, l'indice d'enfouissement apporte déjà une mesure quantitative du déplacement des sédiments autour du récif dans le temps.

5 Caractéristiques hydrodynamiques et autres effets physiques des récifs

Manon Corbic

“En général, l'effet sur le champ d'écoulement et la stabilité des récifs artificiels sont les facteurs représentatifs reflétant leur performance.” (PAN et al., 2022)

L'interaction des vagues avec le récif a un effet notable sur la vie marine qui s'y développe. La littérature décrit par exemple le *Flow Field Effect*. Ce phénomène correspond à un upwelling local, provoqué par cette l'interaction vagues - récif, permettant d'amener les sédiments du sol, les sels inorganiques dissous et nutriments dans les couches supérieures de la colonne d'eau. Il permet également l'échange d'eau à différentes profondeurs. L'ensemble de ces facteurs est un facteur d'attraction pour les poissons. Pour le mesurer, on considère que l'amplitude de l'upwelling est équivalent à l'écoulement horizontal, il correspond à 120% de la vélocité du courant arrivant sur le récif. Plus large est cette zone d'upwelling, meilleur est l'effet du courant et l'attraction des poissons (PAN et al., 2022).

Par ailleurs, le courant arrivant sur le récif est modifié par ce dernier, comme il a été mentionné dans la partie précédente. Cela exerce une influence sur l'enfouissement du récif, mais également sur la biodiversité marine qui s'y développe. Tout d'abord, le flux des vagues derrière le récif artificiel est caractérisé par un vortex avec des vélocités plus lentes (*wake region*), donnant un habitat, abri, et des zones de reproduction pour les poissons. La *wake region* est définie comme la région occupée par le vecteur de courant dans la direction opposée du courant arrivant. Il est intéressant d'étudier la taille de cette *wake region*, la métrique la plus représentative étant le volume 3D. Les récifs artificiels exercent aussi des influences significatives sur la position, taille et direction du vortex dans la région du vortex (PAN et al., 2022).

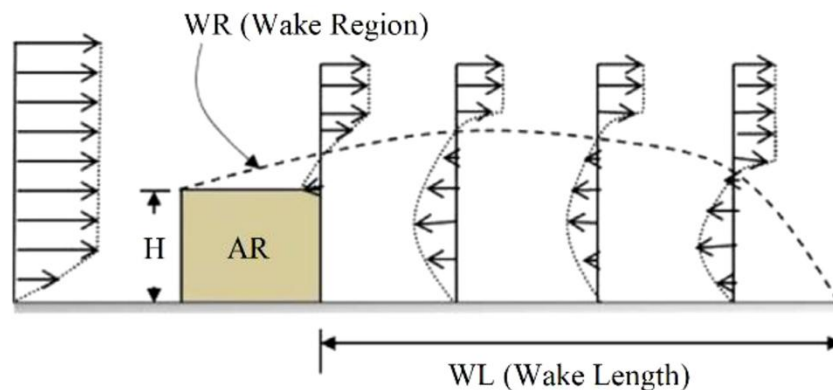


Figure 4 : Définition de la région de sillage et de la longueur du sillage (PAN et al., 2022)

Ensuite, les fluctuations de turbulence ont lieu autour de la *wake region*, avec une faible région de turbulence dans le récif, intéressante pour l'absorption et rétention des organismes marins. La forte région de turbulence sur les deux côtés du récif donne aussi de l'espace aux poissons pour nager, avec des tendances variant selon le type d'organisme. La littérature ne considère toutefois pas que la vitesse du courant affecte la zone de turbulence, ce sont davantage les régions en amont (**PAN et al., 2022**).

6 Indices biologiques

6.1 Communautés ichthyologiques

Manon Corbic

Le suivi biologique effectué par Atlantiques Landes Récifs permet d'étudier l'impact des récifs artificiels sur les communautés ichthyologiques. Les comptages de poisson effectués par Atlantiques Landes Récifs permettent de déterminer plusieurs indicateurs : la richesse spécifique, l'abondance de chaque espèce, et l'abondance des juvéniles. Pour cela, les plongeurs comptent les espèces présentes sur le récif lors de plongées méthodiquement prévues, en commençant par les espèces craintives et en terminant par les espèces benthiques et enfin les espèces pélagiques grégaires nageant en permanence dans la colonne d'eau. Dans son rapport, l'association présente également sa volonté d'utiliser la photo-identification pour prolonger le suivi scientifique des espèces choisies en 2022, à savoir : *Seriola dumerili* (Risso, 1810), *Zeus faber* (Linnaeus, 1758) et *Conger conger* (Linnaeus, 1758). (**JORGE, BESSON, 2024**)

6.2 Biofilm et macrofouling

Clément Delbey

Le biofilm est un amas structuré de cellules bactériennes accroché à une surface, ici le récif artificiel. Le biofilm protège en fait les bactéries. C'est la première interface vivante entre le récif et le milieu marin, il joue donc un rôle essentiel pour aider les prochaines communautés à s'installer sur ce récif (**TREMBLAY et al., 2014**).

Le macrofouling, ou macro-encrassement, est le processus suivant l'installation du biofilm, et désigne tout organisme multicellulaire de grande taille colonisant les surfaces immergées ; on peut citer par exemple les algues, les éponges ou encore les moules. C'est un processus intéressant dans le cadre des récifs artificiels car il peut être utilisé comme indicateur de l'efficacité écologique du récif (**CHANG et al., 2024**).

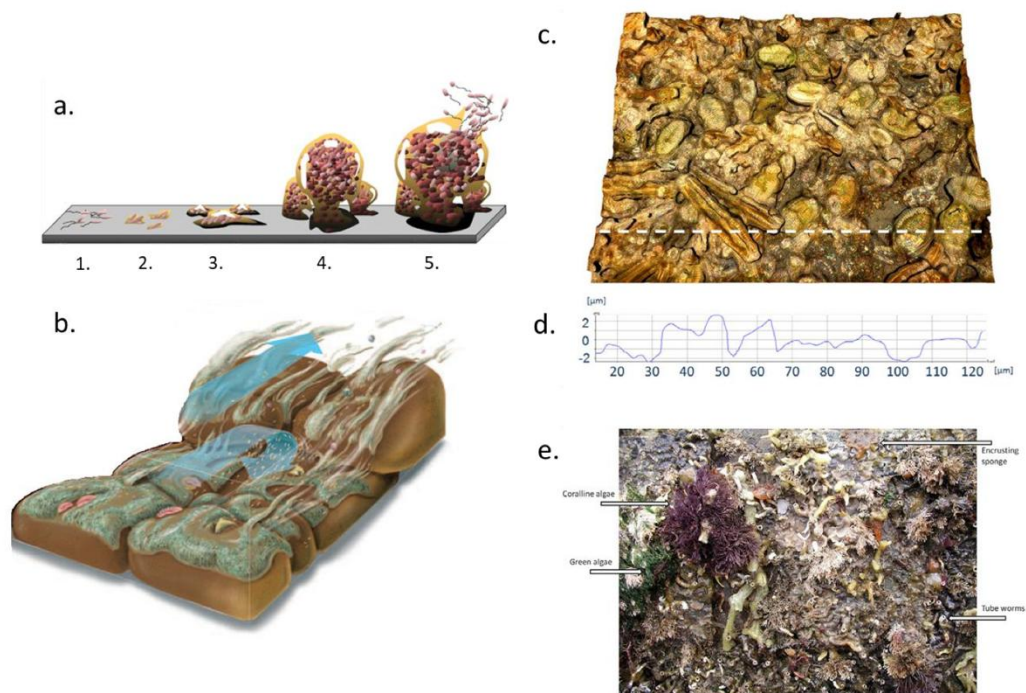


Figure 5 : (a) schéma illustrant les cinq étapes de colonisation par le biofilm, (b) exemple d'un paysage naturel de biofilm, (c) topographie 3D d'un biofilm, (d) topographie de surface du même biofilm, (e) exemple de macrofouling sur une surface de bois immergée (RIERA, 2020).

On peut associer le suivi du biofilm et du macrofouling avec l'analyse de leur contenu en métaux lourds : cela permet de mettre en évidence la qualité de certains substrats utilisés pour la construction de certains récifs artificiels. Le suivi de biofilm est assez simple à mettre en place pour valider l'utilisation de tel ou tel substrat (RIERA, 2020).

6.3 Indicateurs mesurés

Clément Delbey

Il va être intéressant d'analyser plusieurs éléments afin de déterminer l'efficacité biologique des récifs artificiels :

- Au niveau du biofilm, les pigments photosynthétiques, comme la chlorophylle ou les caroténoïdes, afin de caractériser l'activité des microalgues. (RIERA, 2020), on peut observer un exemple sur la Figure 6 ci-dessous.
- Les substances polymériques extracellulaires (« *extracellular polymeric substances* »), autrement dit les sucres, protéines et acides aminés, pouvant être quantifiées pour que l'on puisse récupérer des informations sur la maturité et la structure de ce biofilm (RIERA, 2020),
- La diversité des espèces colonisatrices (RIERA *et al.*, 2018),
- La biomasse du macrofouling (RIERA *et al.*, 2018), cf. Figure 7 ci-dessous.

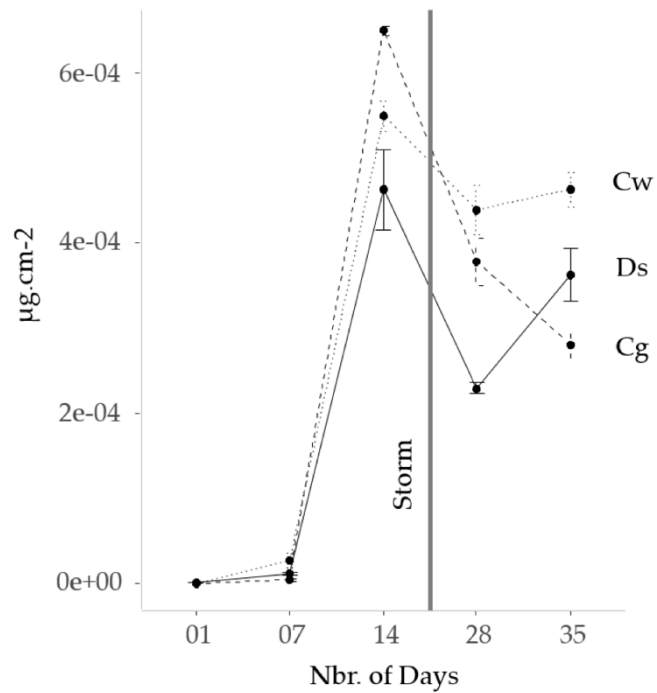


Figure 6 : graphique montrant la variation de la concentration des pigments avec le temps sur différents substrats (Cg béton gris, Ds ciment dolomitique, Cw béton blanc) (RIERA, 2020)

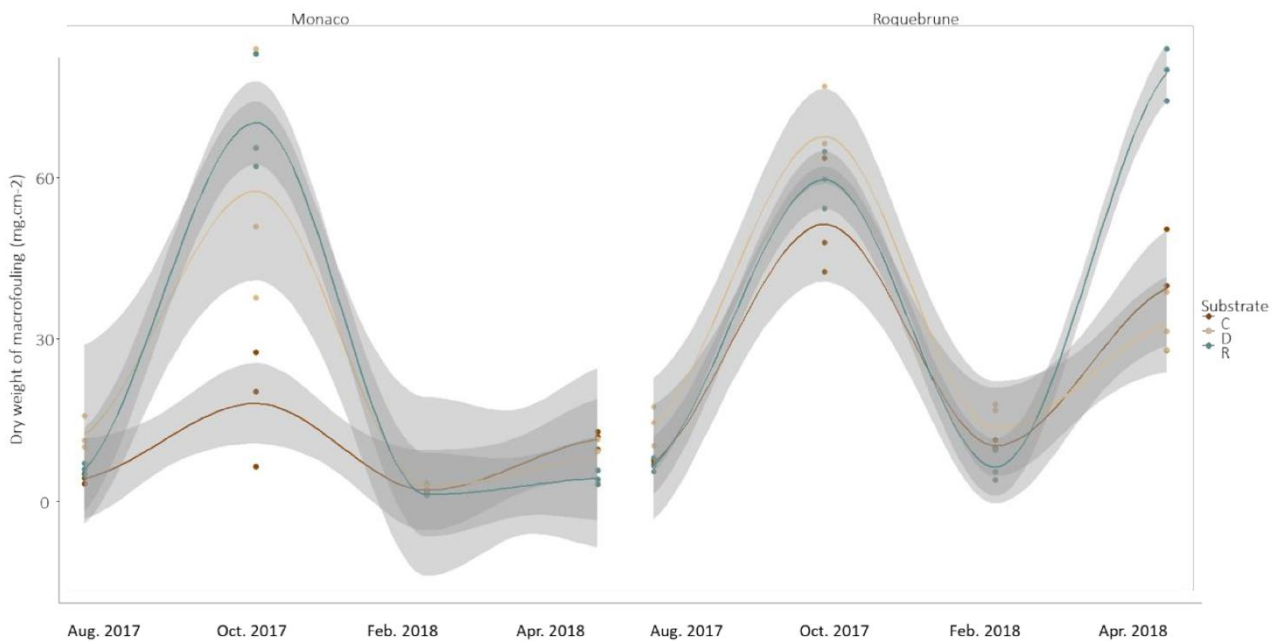


Figure 7 : graphique représentant la variation de la biomasse sèche du macrofouling selon les substrats (C: ciment, D: dolomie, R: roche) et les saisons à deux endroits différents (RIERA, 2020)

6.4 Indice de végétation par différence normalisée

Adrien Rouge

Un indice intéressant à étudier s'appelle le NDVI (Indice de végétation par différence normalisée). Cet indice permet de calculer et de comparer entre deux périodes la végétation de deux modèles faits par photogrammétrie. Cette méthode nécessite l'utilisation de caméra multispectrale, la rendant donc plus difficile à mettre en place. **(AGISOFT, 2019)**

Le calcul du NDVI se fait grâce à l'étude du proche infrarouge, c'est la raison pour laquelle une caméra multispectrale est nécessaire. La longueur d'onde du rouge est également étudiée. **(OZYAVUZ et al., 2015)**

La *Figure 8* présentée ci-dessous permet d'illustrer le phénomène à l'origine du calcul du NDVI.

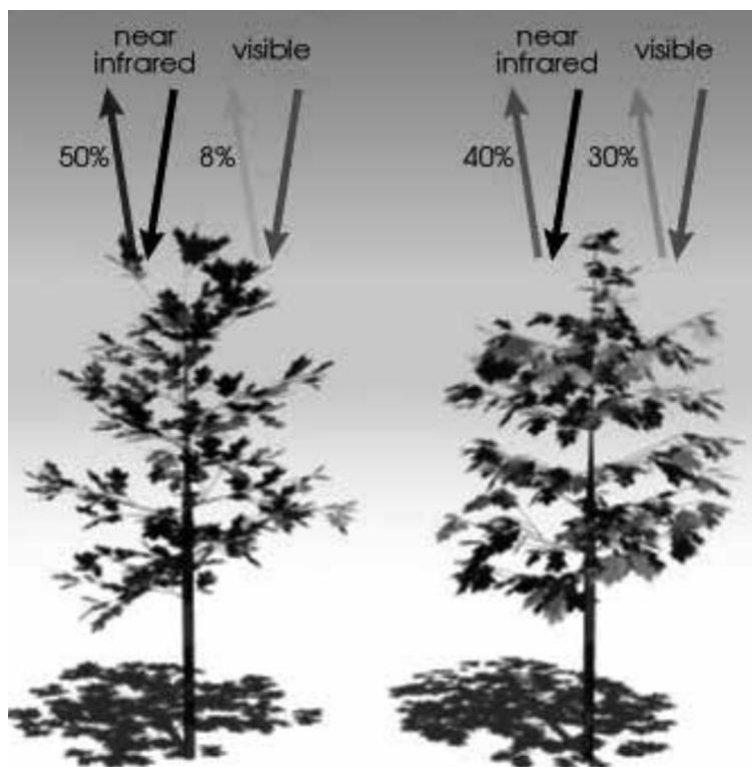


Figure 8 : Absorption de la lumière en fonction de la santé des végétaux. **(OZYAVUZ et al., 2015)**

Les végétaux en bonne santé absorbent beaucoup de lumière et reflète une grande partie des infrarouges proches, les végétaux en mauvaise santé reflète une plus grande partie de la lumière et absorbent plus d'infrarouge **(OZYAVUZ et al., 2015)**

Cet indice pourrait contribuer à mieux comprendre le lien entre la structure du récif, sa complexité, et la présence des végétaux à la surface du récif.

7 Indices environnementaux

7.1 La température de l'eau : un facteur structurant des récifs artificiels dans l'Atlantique et à Capbreton

Kelly Conteh

Dans l'océan Atlantique Nord-Est, la température de l'eau constitue un facteur environnemental prépondérant pour les écosystèmes côtiers. Impactant le métabolisme des organismes marins, leurs cycles de reproduction, la composition des communautés benthiques et pélagiques, l'évolution de ce paramètre en lien avec le réchauffement climatique a des conséquences notables sur les habitats artificiels immergés à des fins écologiques ou halieutiques (HOEGH-GULDBERG, PETER, *et al.*, 2007).

En France, le littoral Atlantique présente une variabilité saisonnière importante avec des températures moyennes comprises entre 11 °C en hiver et 22 °C en été (Climate-Data.org, 2025). Cette amplitude opère comme un filtre écologique sur les espèces colonisatrices des récifs artificiels. En effet, une augmentation des températures pourrait par exemple favoriser certaines espèces eurythermes (capables de résister à une large variation de températures) au détriment d'espèces plus sensibles.

Située dans les Landes, la zone de Capbreton offre bien sûr une échelle locale, mais c'est tout autant une illustration de ces dynamiques. Ainsi, depuis 1999, l'association Atlantique Landes Récifs (ALR) a immergé des récifs artificiels à différentes profondeurs, à proximité de la plage des Océanides, dans un but de restauration de la biodiversité marine et de réhabilitation des habitats côtiers. Au niveau scientifique, les récifs artificiels font l'objet d'un suivi strict, assorti de récoltes de données, où la température est mesurée in situ grâce à des ordinateurs de plongée (JORGE, BESSON, 2024).

Les relevés opérés dans le cadre du suivi en 2022 ont montré combien la température joue un rôle clef dans la structuration des assemblages piscicoles. En particulier, certaines espèces comme la dorade royale (*Sparus aurata*), le bar européen (*Dicentrarchus labrax*), ou le tacaud commun (*Trisopterus luscus*) ont montré des fréquences d'observation corrélées aux mois les plus chauds, à l'opposé des périodes plus froides dans lesquelles l'activité puis la présence de ces espèces sur les structures étaient réduites (JORGE, BESSON, 2024).

Le protocole de suivi préconise de mesurer la température en milieu de plongée en vue de sécuriser une stabilisation des instruments, avant d'être mise en relation avec les observations biologiques afin de mieux quantifier l'impact des variations thermiques sur la colonisation, la distribution spatiale et le comportement des espèces (JORGE, BESSON, 2024).

En définitive, la température revêt un rôle cardinal dans les interdépendances écologiques qui régissent les récifs artificiels adriatiques, et le cas de Capbreton montre l'intérêt d'un suivi combiné mesure environnementale-observation biologique pour essayer de mieux cerner les dynamiques d'adaptation des espèces face aux changements climatiques et aux modifications anthropiques croissantes du milieu marin.

7.2 Variabilité de la salinité et conséquences écologiques sur les récifs artificiels dans le Golfe de Gascogne

Kelly Conteh

Après avoir souligné l'importance de la température dans la structuration des communautés biologiques des récifs artificiels mise en avant, il reste à appréhender un autre paramètre physico-chimique tout aussi déterminant, à savoir la salinité. En effet, dans l'océan Atlantique Nord-Est, la salinité de surface varie entre 35 et 36 PSU (Practical Salinity Units), fluctuant au gré des apports en eau douce des fleuves, des précipitations et de l'évaporation. Ces variations de salinité influencent la densité de l'eau et se répercutent

sur la stratification et la circulation océanique, elles-mêmes déterminantes pour la répartition de la distribution des nutriments puis de la biodiversité marine. **(CARRACEDO et al., 2023)**

Les récifs artificiels déployés dans le but de restaurer ou consolider l'habitat marins ne sont pas à l'abri de ces variations de salinité. Des études ont mis en évidence que des variations brutales de salinité peuvent affecter le métabolisme des organismes marins conduisant à stress voire à mortalité. Certaines espèces benthiques et pélagiques affichent par exemple des tolérances données en matière de salinité limitant leur reproduction, croissance et répartition sous l'effet d'écart importants. **(RENAULT, 2022)**

Dans la commune de Capbreton, située dans les Landes, l'association Atlantique Landes Récifs (ALR) a immergé, depuis 1999, plusieurs récifs artificiels à diverses profondeurs pour optimiser la biodiversité marine et restaurer les habitats côtiers. Pour le suivi scientifique de ces récifs artificiels, la salinité, mesurée sur place à l'aide de capteurs appropriés, est à l'étude pour examiner son influence sur la colonisation biologique.

Les relevés ont montré que la salinité contribue à façonner la composition des communautés benthiques ainsi que l'occurrence de certaines espèces de poissons. C'est le cas, par exemple, de la dorade royale (*Sparus aurata*) et du bar européen (*Dicentrarchus labrax*) qui semblent avoir des préférences salines pour leur présence sur les récifs artificiels. En effet, des changements de salinité, même modiques, peuvent faire varier leur apparition sur les différents récifs.

La présence du Gouf de Capbreton, canyon sous-marin très profond, influe aussi bien sur les hydrodynamiques locaux que sur la circulation des eaux et la distribution de la salinité. Cette particularité géographique crée des micro-habitats uniques, mais également des contraintes de gestion des récifs artificiels. **(AUGRIS et MEAR, 1985)**

Ainsi, la salinité, comme la température, participe à la structuration des écosystèmes marins artificiels. Une surveillance et une compréhension de ses variations sont nécessaires pour optimiser la conception, l'implantation et le suivi des récifs artificiels à Capbreton et, plus largement, le long de la côte atlantique.

7.3 L'oxygène dissous (OD) : un indicateur clé de la santé des récifs artificiels

Kelly Conteh

L'oxygène dissous (OD) est un indicateur clé de l'état de santé des écosystèmes marins, y compris les récifs artificiels. Ce paramètre est vital pour la respiration des organismes aquatiques et conditionne donc directement la biodiversité et la productivité des habitats marins.

Selon l'Agence européenne pour l'environnement, des valeurs d'OD inférieures à 6 mg/L peuvent causer un stress débilant à la faune marine, impacter le développement, la reproduction et la survie des espèces. Les zones côtières, comme celle de Capbreton, sont particulièrement touchées par ces variations en raison des effets conjugués des apports anthropiques et des évolutions climatiques. **(L'AGENCE EUROPEENNE POUR L'ENVIRONNEMENT, 2025)**.

Le réchauffement des eaux réduit la capacité de l'eau à dissoudre l'oxygène dissous, ce qui accentue les risques d'hypoxie. L'eutrophisation causée par une surabondance de nutriments peut également entraîner des proliférations algales suivies de la décomposition de la biomasse algale qui appauvrit les réserves en OD et génère des zones mortes. **(COMMISSION OCEANOGRAPHIQUE INTERGOUVERNEMENTALE DE L'UNESCO, 2025)**.

À Capbreton, le suivi des récifs artificiels mené par l'association Atlantique Landes Récifs (ALR) inclut la mesure de l'OD pour évaluer l'état de l'habitat et l'approvisionnement en oxygène des espèces longilignes. Des valeurs adéquates d'OD sont donc historiques pour la pérennité de la diversité et la résilience des récifs face aux pressions environnementales. **(GROS, 2011)**.

7.4 Le pH et l'acidification des océans : impacts sur les récifs artificiels

Kelly Conteh

Pouvons-nous qualifier le pH de l'eau de mer comme un indicateur de l'acidité des milieux aquatiques, donc du devenir des métaux et des nutriments, mais aussi de la santé des différentes formes de vie qui l'habitent ? Les experts estiment qu'en moyenne dans les océans, le pH a baissé d'environ 0,1 point depuis l'ère préindustrielle, ce qui correspond à une augmentation de la concentration en ions hydrogène de 30 %. **(MA et al., 2024).**

Cette acidification affecte prioritairement les organismes calcifiants tels que les mollusques et les crustacés, qui sont de moins en moins capables de former coquilles et squelettes. Les chutes de pH peuvent également bouleverser les comportements de nombreuses espèces de poissons alors que leur physiologie peut être affectée en termes de croissance, de reproduction et de survie. Par voie de conséquence, s'agit-il d'un simple impact de l'activité humaine sur le biotope ou d'un bouleversement de certaines des fonctions de l'écosystème marin susceptible d'entraîner des effets à l'échelle des populations ?

Pour les récifs artificiels de Capbreton, quel impact pourrait avoir l'acidification sur le processus de colonisation et la structuration des communautés benthiques à long terme ? Le suivi régulier du pH enregistrant des valeurs qui permettent d'anticiper l'évolution de ces écosystèmes artificiels pourrait offrir quelques réponses.

7.5 Les nutriments (nitrates et phosphates) : entre fertilisation et eutrophisation

Kelly Conteh

Les nutriments, et particulièrement les nitrates et les phosphates, sont nécessaires à la croissance des organismes photosynthétiques ; mais dans l'environnement aquatique, leur excès peut entraîner l'eutrophisation, qui à son tour favorise des proliférations algales nuisibles et des situations accroissant le risque d'hypoxie dans le milieu (parmi d'autres effets possibles). Si les apports en nitrates en France proviennent essentiellement de l'agriculture, les phosphates quant à eux proviennent majoritairement des eaux usées urbaines.

En 2019, environ 461 000 t d'azote sous forme de nitrates et 11 900 t de phosphore total ont été rejetés à la mer par les cours d'eau métropolitains. Ces apports peuvent impacter les conditions liées à la qualité de l'eau autour des récifs artificiels et donc la composition des communautés biologiques qui y sont associées. Leur suivi s'avère d'autant plus essentiel pour prévenir toute dérive et maintenir le bon fonctionnement des récifs. **(VASQUEZ et al., 2023).**

7.6 Caractéristiques du substrat : fondement de la colonisation des récifs artificiels

Kelly Conteh, Manon Corbic

Le substrat fait référence à la base physique sur laquelle les organismes marins s'installent. Sa nature (granulométrie, composition, stabilité) régule la diversité et l'abondance de la colonisation par les espèces.

Les données fournies par le réseau EMODnet montrent que sur le plateau continental français les substrats sableux et vaseux dominant, donc ils constituent des habitats variés pour la faune benthique. **(MISHRA et al., 2023)**

À Capbreton, l'élaboration de récifs artificiels va justement dans le sens de la diversification des habitats disponibles et de la colonisation par une gamme plus large, dans un environnement initialement peu accueillant.

Connaître les caractéristiques du substrat est donc indispensable pour connaître les mécanismes de colonisation et pour optimiser la conception de récifs artificiels en fonction des objectifs écologiques visés. (MENG CHUAN *et al.*, 2021)

Les récifs artificiels de la concession de Cap Breton ont été positionnés dans une zone sableuse, avec une granulométrie qui permet de “limiter l’enfouissement des modules des récifs” (JORGE, BESSON, 2023). Le choix de leur emplacement a été déterminé par la proximité avec le port de Cap Breton, avec le Gouf de Cap Breton, mais également par “la présence d’une arrivée d’eau douce par le biais du canal d’Hossegor et du lac d’Hossegor, permettant l’apport de matière organique” (JORGE, BESSON, 2023). En effet, la tête du Canyon est située à moins de 500 m de la ligne de rivage.

Afin de mieux comprendre le contexte géologique de la concession et des récifs artificiels, plusieurs cartes géologiques et géomorphologiques sont présentées ci-dessous.

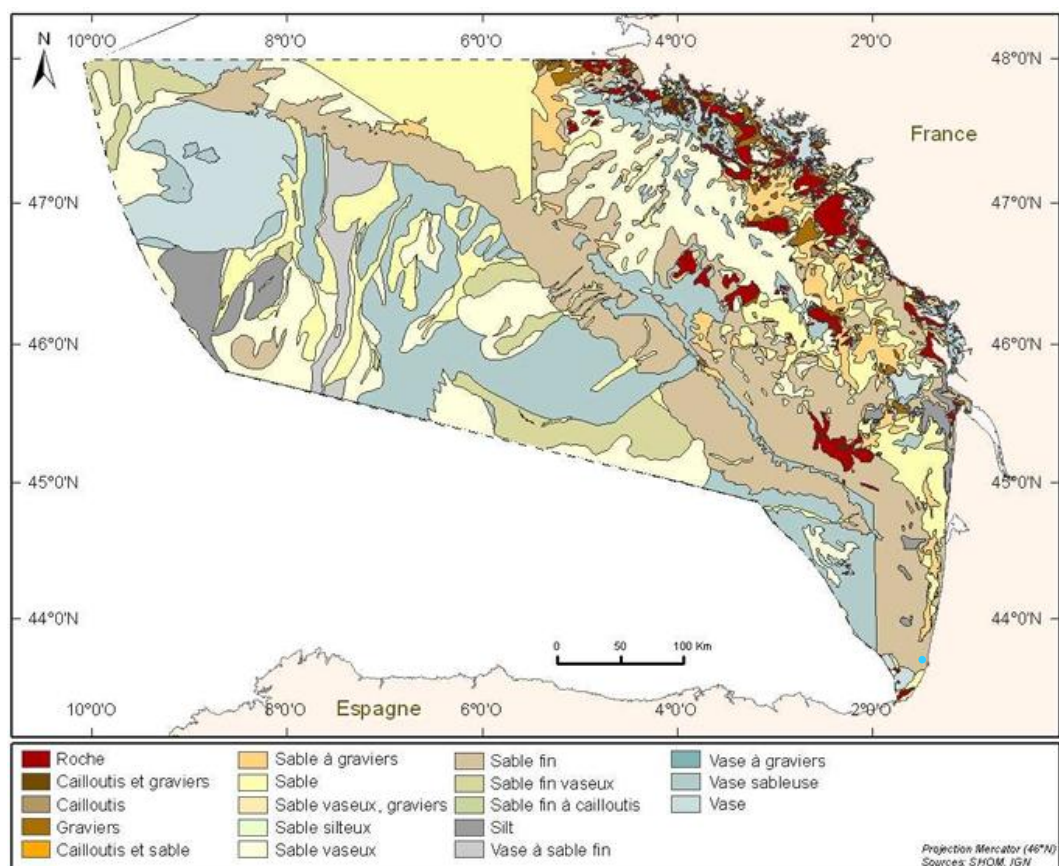


Figure 9 : Principaux transits sédimentaires et localisation des principales structures du Golfe de Gascogne (GARLAND, MARCHES, 2011). Le point bleu au niveau du Cap Breton indique la localisation des récifs artificiels de la concession de Cap Breton.

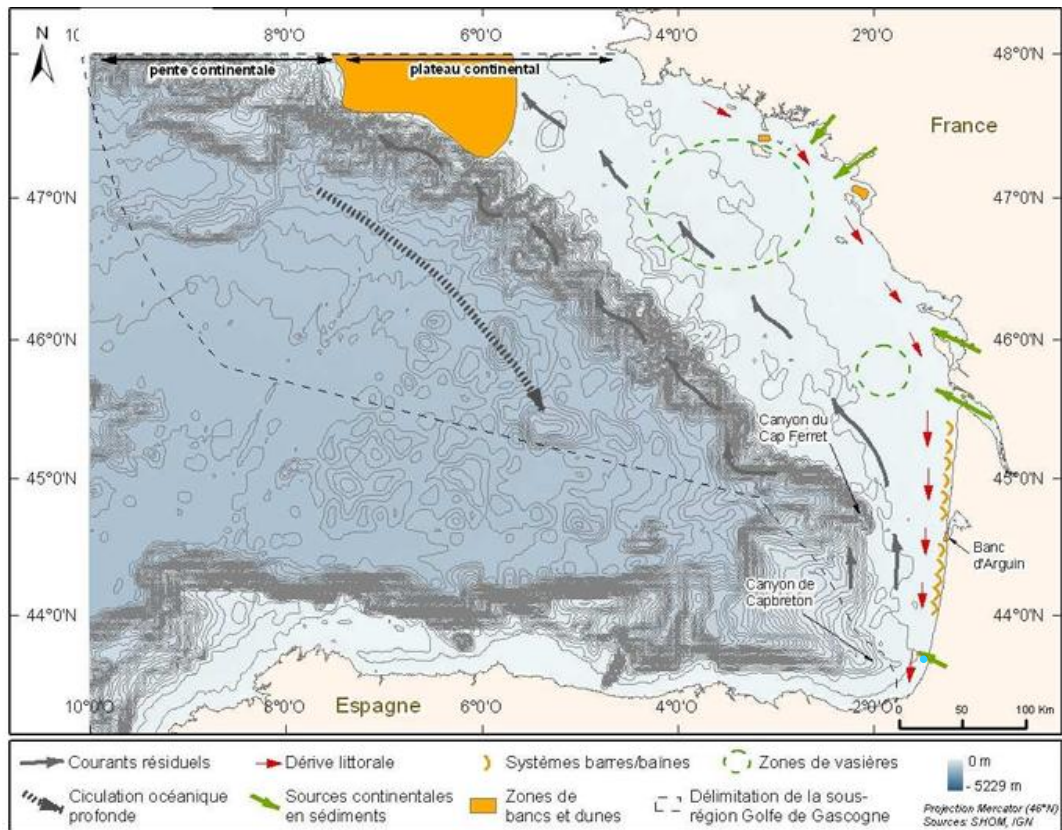


Figure 10 : Carte de la nature des fonds, basée sur des cartes publiées de 1970 à 2010 (GARLAND, MARCHES, 2011). Le point bleu au niveau du Cap Breton indique la localisation des récifs artificiels de la concession de Cap Breton.

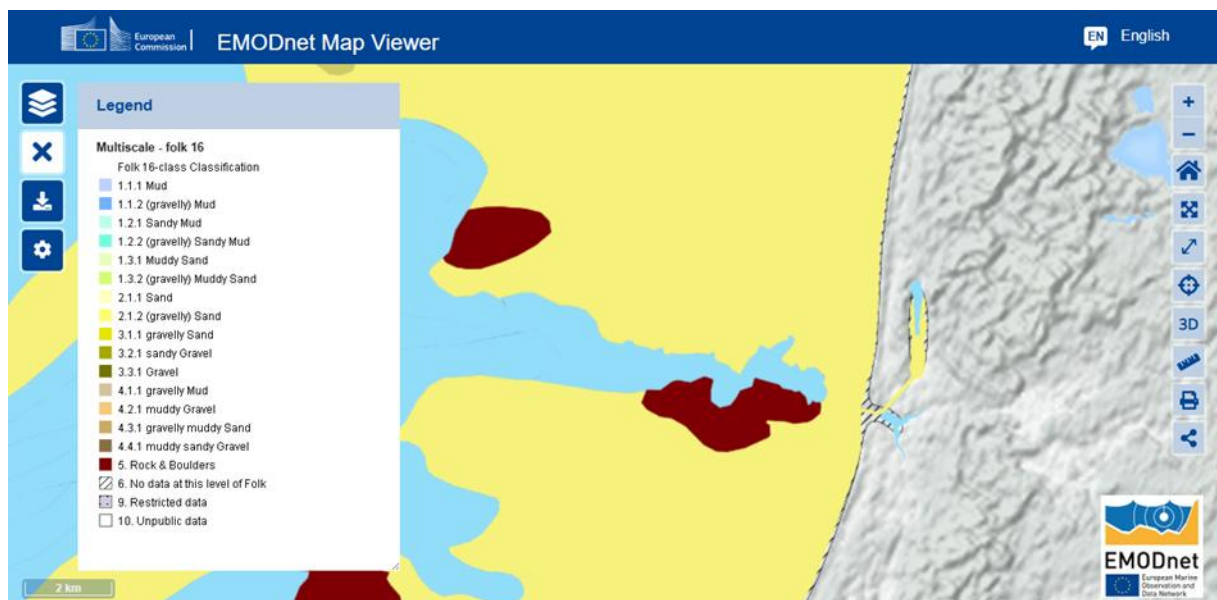


Figure 11 : Carte locale du substrat du lit marin au niveau de la concession de Cap Breton (EMODnet, 2022)

7.7 Contaminants (métaux lourds, hydrocarbures) : menaces persistantes pour les récifs artificiels

Kelly Conteh

Les polluants tels que les métaux lourds (plomb, mercure, cadmium) et les hydrocarbures constituent un danger majeur pour les écosystèmes marins, qui peuvent s'y accumuler, notamment dans les sédiments et les organismes, entraînant des effets toxiques, mutagènes ou cancérigènes... **(MISHRA *et al.*, 2023)**

Ces polluants proviennent des rejets industriels, des activités portuaires, mais aussi d'accidents pétroliers. Au sein du golfe de Gascogne, différentes études ont permis d'étudier la contamination des sédiments sur différentes stations, révélant des taux de contamination variable selon les zones... **(ONG *et al.*, 2020)**

Au niveau de Capbreton, la proximité du port et des activités humaines accroît les risques de contamination des récifs artificiels, soulignant la nécessité d'un suivi régulier des niveaux de contaminants pour évaluer les risques éco toxicologiques et adapter les mesures de gestion appropriées.

8 Conception du protocole de suivi environnemental sous-marin

Kelly Conteh, Clément Delbey

8.1 Objectifs et contexte de la démarche

Pour donner suite à la phase de recherches bibliographiques de ce mémoire ainsi que de la mise en relation avec l'association ALR avec qui nous travaillons, il nous a semblé important d'axer une partie de notre travail sur l'influence des paramètres physico-chimiques et biologiques autour des récifs artificiels. En effet, comme détaillé précédemment, de nombreux facteurs peuvent influencer l'évolution d'un récif artificiel et de la biodiversité lui étant associée (température de l'eau, salinité, oxygène dissous, pH, nutriments...). C'est pour cela que nous avons réalisé un protocole de suivi environnemental sous-marin (voir Annexe) que nous aurions voulu partager aux membres de l'association afin qu'ils puissent, durant leurs plongées, récolter ces données en parallèle de celles nécessaires à la photogrammétrie. Cependant, la mise en place de ce protocole environnemental s'est avérée difficile en raison d'un problème mécanique affectant le bateau de l'association. Notre priorité étant la prise de photographies nécessaires à l'élaboration de notre modèle tridimensionnel. Cependant, nous pensons qu'il serait intéressant de combiner ce protocole au protocole de photogrammétrie afin de créer un indice de complexité à plusieurs facteurs.

Comme mentionné en annexe, ce protocole a été conçu pour :

- Standardiser les relevés réalisés par les plongeurs de l'ALR,
- Assurer la comparabilité des données d'une année sur l'autre,
- Identifier précocement les risques liés à la pollution ou aux déséquilibres écologiques.
- Récolter des données afin de créer un indice environnemental afin de le comparer à l'indice mathématique de complexité et ainsi déterminer l'impact du récif artificiel sur la faune et la flore locale.

8.1 Choix des facteurs environnementaux étudiés et contraintes méthodologiques

- Justification du choix des facteurs environnementaux

L'ensemble des facteurs environnementaux étudiés dans le cadre du suivi des récifs artificiels par l'association « Atlantique Landes Récifs » (ALR) repose à la fois sur leur pertinence pour l'écosystème étudié, leur capacité à servir d'indicateurs de l'état du milieu marin, ainsi que sur les contraintes opérationnelles dans le cadre associatif.

Les paramètres pris en compte température, salinité, pH, oxygène dissous et nutriments sont des facteurs clés du fonctionnement des écosystèmes marins. La température, par exemple, est un facteur clé qui a un impact direct sur tous les organismes, soit directement, soit en modulant des facteurs tels que le pH, la salinité ou la concentration en oxygène, affectant ainsi la vie, la distribution, la croissance ou la reproduction, ainsi que les populations benthiques ou piscicoles » (DIAZ et ROSENBERG, 2008).

En effet, ces paramètres sont connus pour être de très bons indicateurs de la qualité de l'eau. Ils sont largement utilisés dans diverses études liées aux enquêtes environnementales, ce qui permet de comparer les données obtenues avec la bibliographie (ORR *et al.*, 2005)

Les nutriments tel que l'azote et le phosphore ont été pris en compte car ils facilitent la reconnaissance des phénomènes d'eutrophisation, généralement associés à l'activité humaine près des côtes. Ces composants sont essentiels pour améliorer les connaissances sur les cycles de la chaîne alimentaire et les dangers associés aux proliférations d'algues susceptibles de perturber l'équilibre écologique des récifs artificiels (« Redfield, A.C. (1958) The Biological Control of Chemical Factors in the Environment. American Scientist, 46, 205-221. - References - Scientific Research Publishing »,).

Les observations et les conditions biologiques ont été davantage prises en considération que l'analyse du substrat, car elles constituent une réponse holistique du système biologique à ses conditions environnementales. En effet, les communautés biologiques ne sont pas soumises à des valeurs ponctuelles instantanées comme les évaluations physico-chimiques, comme le mentionnent (BORJA *et al.*, 2000).

- Contraintes financières, temporelles et humaines

Le protocole suivi a également été conditionné par le budget et les effectifs limités de l'association ALR. En tant qu'institution à but non lucratif, l'ALR n'a pas les moyens d'investir dans l'utilisation d'équipements lourds ou coûteux tels que des capteurs automatisés permanents, des stations fixes instrumentées et des analyses à haute fréquence pour les contaminants émergents.

Outre les contraintes financières, il existe des contraintes de temps liées au travail de plongée. En effet, le temps disponible pour les travaux sous-marins est limité par des contraintes de sécurité, la profondeur, les paramètres de plongée (approvisionnement en air, décompression, conditions météorologiques, entre autres) et la disponibilité des bénévoles. Il n'est donc pas possible d'effectuer plusieurs mesures ou des opérations complexes.

Dans ce contexte, le protocole a été conçu pour optimiser le rapport entre la qualité scientifique des données et la faisabilité sur le terrain, en privilégiant des méthodes simples, reproductibles et peu chronophages (DANIELSEN *et al.*, 2009).

- Importance centrale de la photographie et de la photogrammétrie

La photographie sous-marine est un élément clé et indispensable du protocole de surveillance environnementale suivi par l'association Atlantique Landes Récifs (ALR). En effet, les photographies prises lors des plongées ne servent pas uniquement à des fins d'observation, mais constituent également la base de la création d'un modèle tridimensionnel des récifs artificiels par photogrammétrie.

La photogrammétrie sous-marine permet de créer un modèle 3D haute résolution à partir d'une série de photos prises selon un parcours et des angles traçables (Burns et al., 2015). Le modèle donne une représentation précise de la structure, de la complexité et des changements du récif au fil du temps. La complexité de la structure est considérée comme un attribut important qui détermine la biodiversité ainsi que la quantité de faune marine, y compris les organismes benthiques et les poissons, au sein du système récifal (FRIEDMAN et al., 2012).

Dans un contexte associatif marqué par des contraintes financières et humaines importantes, la photogrammétrie représente un compromis optimal entre richesse de l'information et faisabilité opérationnelle. Elle permet de maximiser la quantité de données collectées durant un temps de plongée limité, sans recourir à des équipements lourds ou à des dispositifs instrumentaux coûteux. Une fois les images acquises, les traitements et analyses peuvent être réalisés a posteriori, indépendamment des contraintes de terrain (REMMERS et al., 2023).

La priorité accordée à la photographie s'explique également par le caractère non destructif de la méthode, sa reproductibilité, et sa capacité à générer des indicateurs quantitatifs tels que le volume du récif, la rugosité, la surface développée ou des indices de complexité structurelle. Ces indicateurs peuvent ensuite être mis en relation avec les paramètres environnementaux mesurés et les observations biologiques afin d'évaluer l'impact écologique des récifs artificiels.

Enfin, la photogrammétrie ouvre des perspectives d'analyse à long terme. La comparaison de modèles 3D issus de différentes campagnes permet de suivre l'enfouissement, l'érosion, la colonisation biologique et les modifications structurelles des récifs au fil des années. Cette approche constitue ainsi un outil central de suivi environnemental pour ALR, particulièrement adapté aux contraintes opérationnelles d'une petite association tout en répondant à des exigences scientifiques robustes.

- Pourquoi certains facteurs n'ont pas été intégrés

Certains facteurs environnementaux, bien que pertinents scientifiquement (courants à fine échelle, bruit sous-marin, contaminants émergents, paramètres microbiologiques avancés), n'ont pas été intégrés au protocole. Leur acquisition nécessite soit des équipements spécifiques coûteux, soit des temps d'intervention prolongés incompatibles avec les contraintes de plongée associative.

De plus, certains paramètres présentent une variabilité spatiale ou temporelle trop fine pour être correctement appréhendée par des mesures ponctuelles réalisées lors de plongées occasionnelles. Leur intégration aurait donc pu introduire davantage d'incertitudes que d'informations exploitables.

9 Conception du protocole de photogrammétrie sous-marine

Eloïs Baud

9.1 Objectifs et contexte de la démarche

À la suite des recherches menées sur les indices de complexité et leur importance écologique dans la conception des récifs artificiels, il a paru nécessaire de réaliser un modèle 3D des récifs via la photogrammétrie. C'est dans cette perspective qu'un protocole de photogrammétrie sous-marine a été conçu,

en vue d'une utilisation par les membres de l'association Atlantique Landes Récifs. L'enjeu était double : proposer un cadre rigoureux, basé sur les standards scientifiques récents, et tenir compte de la réalité opérationnelle d'une association composée principalement de plongeurs bénévoles, souvent non spécialistes en sciences marines.

Ainsi, le protocole devait répondre à plusieurs contraintes :

- Être simple à mettre en œuvre, même sans expertise avancée,
- Produire des modèles 3D fiables et exploitables,
- S'appuyer sur les meilleures pratiques issues de la littérature scientifique,
- Et préparer le terrain pour des analyses post-immersion à partir du semestre 7.

9.2 Recherche bibliographique et fondements méthodologiques

La conception du protocole s'est appuyée sur une revue approfondie de la littérature scientifique récente. En particulier, les travaux de Marre (2020) et d'Urbina-Barreto (2020), ils ont posé les bases d'un cadre méthodologique solide pour la photogrammétrie sous-marine appliquée à l'étude des habitats récifaux. Ces recherches soulignent l'importance de la rigueur dans la standardisation des prises de vue et de l'intégration d'indicateurs écologiques quantifiables (Marre, 2020 ; Urbina-Barreto, 2020).

De même, les publications de Mahamadaly et al. (2021) ainsi que Burns et al. (2015) ont mis en évidence le potentiel de la photogrammétrie pour quantifier la rugosité, la complexité et la morphologie tridimensionnelle des récifs, y compris dans des environnements artificiels. Ces approches intègrent des techniques de Structure-from-Motion (SfM) et l'utilisation de logiciels tel que MetaShape pour la reconstruction 3D à partir de photographies sous différents angles (Westoby et al., 2012).

9.3 Vers un protocole adapté aux besoins d'une association citoyenne

Conformément à ces travaux, le protocole a été développé pour permettre à des bénévoles de collecter des données standardisées, tout en respectant les principes fondamentaux de la photogrammétrie sous-marine. Le document technique associé en Annexe (BAUD, 2025) présente les choix de matériel, les paramètres de prise de vue, les conditions de placement des échelles et les modes de trajectoires recommandés pour l'acquisition des images.

Ce protocole s'inscrit comme une première étape expérimentale en amont de l'étude terrain prévue au semestre 7. Il a également pour objectif d'acculturer les membres de l'association aux pratiques de suivi scientifique, en les impliquant activement dans la production de données utiles pour l'évaluation écologique des récifs artificiels.

10 Conception du protocole de traitement des photographies sous-marines

Baud Eloïs

10.1 Objectifs et contexte de la démarche

Le protocole de traitement des images sous-marines a été conçu comme le prolongement du protocole de d'acquisition de photogrammétrie sous-marine (BAUD 2025), afin de garantir une chaîne de production cohérente depuis l'acquisition jusqu'à l'analyse écologique des récifs artificiels (Abadie et al., 2022 ; Marre, 2020). Son objectif est de standardiser les étapes de post-traitement dans Adobe Lightroom Classic et outils

associés, de manière que chercheurs étudiants comme plongeurs bénévoles puissent appliquer des corrections comparables d'une mission à l'autre, sans expertise avancée en traitement d'image (Guide complet Lightroom, s.d. ; Photographie sous-marine – Adobe, s.d.).

10.2 Fondements méthodologiques et apports de la littérature

La conception de ce protocole s'inscrit dans la continuité des travaux méthodologiques sur la photogrammétrie sous-marine appliquée au suivi des habitats benthiques. Les travaux de Marre (2020) sur le développement de la photogrammétrie et des analyses d'images pour l'étude et le suivi d'habitats marins insistent sur la nécessité de standardiser les procédures, tant sur le plan de la prise de vue que du traitement, afin de limiter les biais liés à l'opérateur et aux conditions de terrain (Marre, 2020). Ces références ont servi de cadre général pour adapter un flux de traitement spécifique aux images produites par l'association, en tenant compte de leur utilisation finale pour la reconstruction 3D et la quantification de structures récifales (Mapping coral reef..., 2025).

10.3 Contraintes optiques sous-marines et stratégies de correction

Sur le plan de l'imagerie sous-marine, le protocole s'appuie sur des ressources récentes qui décrivent les contraintes optiques propres au milieu aquatique et les stratégies de correction associées. La littérature rappelle que l'eau absorbe différemment les longueurs d'onde, entraînant une perte rapide des rouges et une dominance bleu-vert, ainsi qu'un voile dû à la diffusion qui réduit le contraste et la netteté perçue des scènes (Diving Deep, s.d. ; Improving underwater visuals..., 2025). Les guides pratiques de photographie sous-marine, y compris ceux proposés par Adobe, recommandent des traitements structurés autour de quelques étapes clés : correction de la balance des blancs sur une zone supposée neutre ou légèrement chaude, ajustement de l'exposition globale et du contraste, affinage de la couleur via des réglages ciblés sur les canaux, puis nettoyage du bruit et du backscatter (Diving Deep, s.d. ; Photographie sous-marine – Adobe, s.d.). Ces recommandations ont été reprises et simplifiées pour être compatibles avec les outils disponibles.

Parallèlement, des travaux récents en traitement d'images sous-marines, mobilisant des approches avancées comme la fusion de méthodes Deep-Retinex et de réseaux antagonistes génératifs (GAN), mettent en évidence l'importance de restaurer les couleurs et le contraste avant toute exploitation quantitative des images (Improving underwater visuals..., 2025). Même si ces méthodes ne sont pas directement implémentées dans le cadre associatif, elles confortent l'idée qu'une correction systématique du déséquilibre colorimétrique et du voile est une étape incontournable pour fiabiliser les analyses ultérieures (Improving underwater visuals..., 2025). Le protocole proposé s'inspire de ces principes généraux tout en restant volontairement pragmatique, limité à des réglages reproductibles dans Lightroom plutôt qu'à des algorithmes de recherche de pointe, afin de rester accessible à un public non spécialiste.

10.4 Description synthétique du protocole

Le protocole se décompose en plusieurs étapes successives dans le module Develop de Lightroom. Après l'importation et le tri des images, une première phase consiste à appliquer des réglages de base homogènes : choix du profil de couleur adapté, correction de la balance des blancs via les curseurs de température et de teinte ou l'outil pipette, puis ajustement de l'exposition, des hautes lumières, des ombres, des blancs et des noirs selon les préconisations des guides Lightroom (Guide complet Lightroom, s.d.). Cette étape permet de ramener l'image dans une plage de luminosité et de contraste cohérente.

Dans un second temps, le protocole propose d'utiliser les outils de gestion de la couleur pour rééquilibrer la saturation et la luminance des principaux canaux, en particulier les rouges et oranges souvent sous-représentés en milieu sous-marin, tout en évitant les sur-saturations irréalistes (Diving Deep, Photographie sous-marine – Adobe, s.d.). Enfin, des corrections locales plus fines peuvent être appliquées de manière parcimonieuse, de façon à rester compatible avec le temps disponible (Guide complet Lightroom, Diving Deep).

10.5 Place du protocole dans la démarche de suivi

Dans l'esprit des protocoles développés pour le suivi d'habitats marins, ce document de traitement constitue une brique méthodologique complémentaire au protocole de prise de vue et à la chaîne de photogrammétrie (Abadie et al., 2022 ; Marre, 2020). Il a été rédigé pour être utilisé comme support de formation et d'appropriation progressive des bonnes pratiques de traitement d'images au sein de l'association, en s'appuyant sur des références issues à la fois de la recherche et de la pratique professionnelle (Abadie et al., 2022 ; Marre, 2020 ; Diving Deep, s.d.). En formalisant chaque étape, depuis l'import jusqu'à l'export des images prêtes pour la reconstruction 3D ou l'analyse écologique, ce protocole contribue à renforcer la qualité et la comparabilité des données produites, tout en maintenant un niveau de complexité compatible avec l'engagement de plongeurs bénévoles (Abadie et al., 2022 ; Mapping coral reef, 2025 ; Photographie sous-marine Adobe, s.d.)

11 Conception du protocole de d'utilisation d'Agisoft Metashape

Adrien Rouge

11.1 Objectifs et contexte de la réalisation

La transmission de notre protocole de plongée sous-marine a été transmise à l'association Atlantique Landes Récifs, pour obtenir les données nécessaires à la réalisation de nos modèles 3D. C'est avec l'objectif d'expliquer nos réflexions et de présenter nos choix techniques que nous avons écrit ce protocole d'utilisation du logiciel Metashape. Nous avons choisi ce logiciel pour la rigueur scientifique qu'il permet d'avoir, ces qualités en photogrammétrie d'objet et pour utiliser au maximum les ressources que nous offre l'Apex. Les vocations de ce protocole sont : une précision certaine, en cohérence avec les connaissances scientifiques actuelles et en tenant compte de la qualité de nos données recueillies par des plongeurs bénévoles non spécialistes de la récupération de données photogrammétriques.

Le protocole doit faire face à un certain nombre d'exigences :

- Être compréhensible pour un lecteur sans expertise avancée
- Être à jour avec les méthodes de photogrammétrie actuelles
- Produire des modèles 3D fiables et exploitables
- Permettre l'utilisation des modèles pour la suite des traitements

11.2 Recherches bibliographiques et fondement scientifique

Le protocole s'est appuyé sur une recherche scientifique préalable importante de la littérature scientifique contemporaine. Les travaux de **Mohrmann (2025)** et de **Million, W., Kenkel, C (2020)** nous ont particulièrement aidés. Ces travaux mettent l'accent sur les aspects techniques et détaillent les outils utilisés pour la construction de modèles précis. Ils travaillent aussi à compenser l'effet de l'eau et de sa distorsion sur les photos et donc sur le modèle final **Million, W., Kenkel, C (2020)**.

En addition le travail de **Heon J. (2025)** mais l'emphase sur l'analyse des conditions d'acquisition et donc de la qualité des images. Il utilise aussi des outils qui permettent de prendre en compte ces conditions. Nous nous sommes inspirés de ces travaux dans notre protocole pour fournir les réponses les plus adaptés, comme pour atténuer l'effet des particules en suspension.

11.3 Un Protocole adapté aux difficultés de la collecte de données.

La prise en compte de la qualité des photos fournies par les plongeurs bénévoles et faisant partie d'une association citoyenne a été un des défis de la réalisation de ce protocole. Des facteurs limitants comme le nombre de photos et les difficultés de la photogrammétrie sous-marine avec des plongeurs devant se déplacer tout autour de la structure ont dû être pris en compte tout en respectant les limites du logiciel et les principes de base de la photogrammétrie.

Le document en annexe (Rouge, 2025), présente tous les choix d'outils utilisés pour obtenir un résultat le plus précis possible pour les traitements futurs à effectuer sur les modèles au semestre 8.

12 Terrain

BAUD Eloïs , Rouge Adrien

La campagne de terrain s'est déroulée du 6 au 14 Septembre 2025 et avait pour objectif principal le déploiement et le test des marqueurs de référence conçus pour la photogrammétrie des récifs artificiels mais aussi de confronter les protocoles théoriques aux réalités opérationnelles du terrain, en impliquant directement les plongeurs bénévoles de l'association Atlantique Landes Récifs.

12.1 Déroulement des opérations

Durant cette semaine, les actions suivantes ont été réalisées :

- Formation des plongeurs bénévoles aux principes de photogrammétrie et à l'utilisation des marqueurs, en expliquant le rôle de ces derniers dans la précision des mesures tridimensionnelles.
- Collecte des retours d'expérience et discussions constructives avec les plongeurs sur le terrain, permettant d'évaluer la facilité de manipulation, le transport et la mise en place des marqueurs. Formation sur les mesures biologiques déjà réalisées par l'association, ainsi que sur leurs actions en cours, leurs projets futurs et leurs objectifs.

12.2 Formation et échanges avec les plongeurs

L'une des dimensions clés de cette campagne a été la formation pratique des plongeurs bénévoles. Ces sessions ont permis d'expliquer les méthodes et objectifs scientifiques derrière les marqueurs et la photogrammétrie, de recueillir leurs impressions et suggestions pour améliorer le protocole et de créer un dialogue constructif permettant d'adapter les solutions aux contraintes réelles de plongée.



Figure 13 - Photo d'une réunion entre étudiants, encadrant et plongeurs bénévoles



Figure 12 - Photo prise lors d'une plongée d'initiation à la biologie locale - Courtoisie de Jean Clestrino

Les échanges avec les bénévoles ont été particulièrement précieux pour identifier les adaptations nécessaires aux protocoles et aux outils. Cette co-construction a favorisé la compréhension des enjeux scientifiques tout en tenant compte de la sécurité et du confort des plongeurs.

12.3 Retours sur les marqueurs

Les plongeurs ont testé plusieurs types de marqueurs :

- **Marqueurs légers en aluminium** : faciles à transporter et à manipuler grâce à leur poids réduit et leur format ergonomique, ces marqueurs se fixent simplement au stabilisateur de plongée via un mousqueton. Cependant, ils ont montré des limites dans les zones exposées au courant, en particulier sur le haut des récifs où ils ont tendance à se déplacer.
- **Marqueurs plus lourds en acier galvanisé** : plus stables dans les courants et sur les surfaces hautes des récifs, ces marqueurs garantissent une position fixe indispensable pour la précision des mesures photogrammétriques, mais sont moins ergonomiques à manipuler et transportent un poids supplémentaire.

Ces retours ont permis de définir des recommandations pratiques : utiliser préférentiellement les marqueurs légers pour les zones protégées ou peu courantes, et les marqueurs lourds pour les zones exposées au courant ou en hauteur.

12.4 Enseignements et perspectives

Cette semaine de terrain a permis de valider la praticité des marqueurs conçus, ajuster les protocoles de déploiement en conditions réelles, renforcer l'implication des plongeurs bénévoles et leur appropriation des protocoles scientifiques.

12.5 Conception des marqueurs de référence de distance

Nos marqueurs devaient répondre à plusieurs critères afin d'être efficaces et pratiques d'utilisation dans un environnement sous-marin. Nous nous sommes inspirés des travaux **d'Urbina-Barre** et (HEON, 2025) (2020) et de **Marre** (2020) pour leurs travaux de photogrammétrie sous-marine. Nos marqueurs doivent répondre à des critères de visibilité et de stabilité pour assurer une bonne qualité de traitement. Pour la qualité d'utilisation des marqueurs le poids est essentiel pour l'adaptabilité à la plongée.

Le principe de nos marqueurs est que leur longueur est de 1,00m précisément afin d'avoir une distance constante entre nos marqueurs. Cela permet de toujours connaître leur espacement et de ne pas avoir à faire de mesure de distance lors de leur mise en place durant la plongée.

Les marqueurs ont été réalisés sur les différents supports sélectionnés à l'aide d'adhésif de chantier de deux couleurs différentes. Nous avons mesuré précisément la taille des carrés utilisés (2cm de côté), pour connaître exactement l'espacement entre les deux centres de nos marqueurs, à savoir de 96 cm.

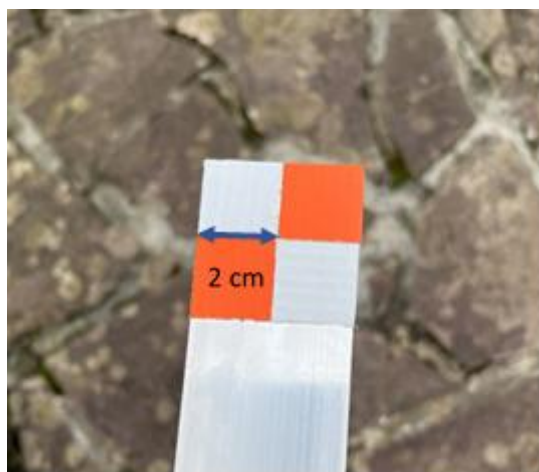


Figure 14: marqueurs en adhésif industriel



Figure 15: marqueur sur base plate et ses cotes

Nous avons essayé plusieurs matériaux et formes pour le support de nos marqueurs. Afin de trouver le meilleur compromis possible. En sachant que nous ne prenons pas que des photos depuis le point de vue du dessus, nous avons développé deux prototypes, l'un sur des barres carrées et l'autre sur des barres plates. L'utilisation de la barre carrée facilite le repérage sur plus de photos lorsque les photos sont prises de côté pour ne pas être couvertes par l'encroutement du récif. Les barres plates sont plus légères et donc intrinsèquement plus ergonomiques.



Figure 16: Prototype sur base carré

La stabilité lorsqu'il y a du courant est importante c'est pourquoi des barres plus lourdes peuvent être intéressantes. C'est pourquoi nous avons utilisé deux types de matériaux, l'un plus rigide de l'acier galvanisé, mais plus lourd, et l'autre plus léger mais moins rigide de l'aluminium.

In situ, les plongeurs ont opté naturellement pour les ensembles de marqueurs sur les barres plates car le poids de celles carrées est une contrainte majeure.



Figure 17 : ensemble des prototypes

13 Données brutes et premiers retours

Baud Eloïs

Entre juillet et octobre 2025, nous avons reçu cinq jeux de photos correspondant à autant de plongées réalisées sur les récifs Typi et Babel, sur le site de Cap Breton.

Au total, près de 1 500 photographies ont été récoltées, dans des conditions très variables : luminosité, courant, visibilité, heures de plongée et météo ont fluctué d'une sortie à l'autre. La participation de trois plongeurs-photographes distincts a également apporté une diversité de cadrages et de paramètres, révélant les limites et les points forts de notre protocole de photogrammétrie.

L'un des principaux défis rencontrés a été l'alignement des photos. Les enchaînements n'étaient pas toujours continus et certains sauts d'images ont imposé de traiter chaque portion de récif séparément, en créant plusieurs « étages » avant de les fusionner pour obtenir un modèle global. En moyenne, nous avons utilisé deux étages pour Babel et deux à trois pour Typi. Cette étape laborieuse a mis en évidence l'importance cruciale du traitement post-plongée et de la standardisation des images avant reconstruction 3D.

Les nombreux tests effectués sur Metashape, en jouant sur différents paramètres de reconstruction, ont permis d'identifier les limites techniques du logiciel et de la photogrammétrie sous-marine dans des conditions réelles, tout en précisant ce qui fonctionne le mieux selon la densité et la qualité des images.

Ces observations ouvrent la voie à la suite de notre étude : la construction de modèles 3D solides et fiables pour les deux récifs, et le lancement des simulations nécessaires au calcul de l'indice de complexité. Cependant, le manque de photos parfaitement alignées et certaines contraintes techniques imposent encore le développement de solutions adaptées, que nous continuons à expérimenter afin d'optimiser la précision et la reproductibilité de nos modèles.

Conclusion

A la suite de nos recherches bibliographiques, nous avons pu constater que la mise en place d'un indice de complexité composite nécessite de considérer de nombreux facteurs favorables à l'accueil et au développement de la biodiversité marine.

La structure pré-immersion mais également post immersion peuvent être étudiées quantitativement par l'utilisation de la photogrammétrie, tandis que d'autres paramètres comme les nutriments et contaminants présents, la salinité, température, quantité d'oxygène dissous, composition du substrat, ou encore les observations biologiques, nécessitent la mise en œuvre de divers protocoles de mesure. Dans une phase de traitement et d'analyse de l'ensemble de ces indicateurs, mais également de recherches à venir, il sera essentiel de les pondérer et de déterminer lesquels sont susceptibles d'avoir le plus d'importance dans la formulation d'un indice de complexité global. En cela, l'utilisation de la méthode du *multiple factor analysis*, détaillée dans la partie indice de complexité concernant la structure pré-immersion du récif artificiel, constitue une piste d'analyse particulièrement intéressante.

Dans un optique de comparaison, Atlantiques Landes Récifs recherche une zone naturelle présentant des paramètres environnementaux similaires à ceux des récifs artificiels. Cela correspondrait à une vingtaine de mètres de profondeur, un substrat combinant roche et sable, et à proximité d'une concession, probablement se trouvant aux alentours de la concession de Capbreton. Cette zone naturelle pourrait aussi faire l'objet d'un traitement photogrammétrique et donc d'une comparaison avec l'indice de complexité des récifs artificiels. L'étude des paramètres environnementaux sera aussi essentielle pour permettre une comparaison pertinente et ajustée.

La quantification des différents indices de complexités proposés serait effectuée sur les deux types de récifs de la concession de Cap Breton, à intervalles de temps réguliers, mais également sur la zone naturelle utilisée dans un optique de comparaison. Elle a pu aussi être déjà mise en place sur les modèles tridimensionnels originaux des récifs. Ensuite, il sera possible de comparer les métriques des structures artificielles biomimétiques avec celles obtenues en reconstruction 3D des récifs naturels obtenus par photogrammétrie, ou avec les modèles originaux pré-immersion, et donc d'adapter les CTPs pour les structures artificielles.

Il est essentiel de considérer que la limite de données post immersion pour les indices concernant la structure même du récif ne permet pas de valider les CTPs, des études surveillant la biodiversité et la distribution des communautés en corrélation avec les CTPs pourraient permettre de les rendre plus spécifiques à certaines espèces d'intérêt. C'est dans ce cadre que l'utilisation des données biologiques relevées régulièrement par Atlantiques Landes Récifs sera particulièrement pertinente.

Enfin, la mise en place de la photogrammétrie représente également un défi technique lié aux nombreux traitements pour obtenir un modèle ajusté aux conditions sous-marine. À cela, les protocoles proposés combinent une méthodologie rigoureuse avec simplicité de mise en œuvre et précision pour des utilisateurs non experts.

Références bibliographiques

Abadie, A., Christophe, V., Marre, G., Boissery, P., 2022. La photogrammétrie sous-marine - Applications au suivi des herbiers de posidonie.

AGISOFT, 2019. Manuel de l'utilisateur Metashape. Date de consultation : 29/05/2025. Disponible sur : <https://www.agisoft.com/pdf/manuals_other/metashape_pro_fr_1_5.pdf>.

AUGRIS, C., MEAR, Y., 1985. Étude géologique pour l'implantation de récifs artificiels en Languedoc-Roussillon. [En ligne] Date de consultation : 22/05/2025. Disponible sur : <<https://archimer.ifremer.fr/doc/00110/22151/>>.

BACKES, A.R., Prof. André Backes [En ligne]. Date de consultation : 11/01/2026. Disponible sur : <<https://www.facom.ufu.br/~backes/mink3d.php>>

BARTHELEMY, J., 2016. Méthode d'évaluation quantitative de la complexité structurale des récifs artificiels. Disponible sur : <file:///C:/Users/adrie/Downloads/2016-Barthlmy-Master-1.pdf>.

BORJA, A., FRANCO, J., PÉREZ, V., 2000. A Marine Biotic Index to Establish the Ecological Quality of Soft-Bottom Benthos Within European Estuarine and Coastal Environments. Marine Pollution Bulletin, volume 40, n° 12. p. 1100-1114. DOI : 10.1016/S0025-326X(00)00061-8

CARRACEDO, L., DESBRUYERES, D., LHERMINIER, P., 2023. Comment évolue la circulation océanique ? | Ifremer [En ligne]. Date de consultation : 22/05/2025. Disponible sur : <<https://www.ifremer.fr/fr/comment-evolue-la-circulation-oceanique>>.

CARRAL, L., LAMAS, M.I., CARTELLE BARROS, J.J., LOPEZ, I., CARBALLO, R., 2024. Proposed Conceptual Framework to Design Artificial Reefs Based on Particular Ecosystem Ecology Traits. Biology. DOI : 10.3390/biology11050680

Climat Capbreton, Température de l'eau à, Température moyenne Capbreton, Pluviométrie, diagramme ombrothermique pour Capbreton [En ligne]. Date de consultation : 21/05/2025. Disponible sur : <<https://fr.climate-data.org/europe/france/aquitaine/capbreton-724364/#climate-table>>.

Mohrmann, J., Frey, T., Diller, N., Greinert, J., 2025. Practical Guide for Underwater Photogrammetric Reconstruction. Technical Report, GEOMAR Helmholtz Centre for Ocean Research Kiel, n° DSMR0001. DOI : 10.3289/DSMR-0001

Million, W., Kenkel, C., 2020. Image capture and pre-filtering for 3D photogrammetry of coral colonies v1. Preprint, University of Southern California & Australian Institute of Marine Science. DOI : 10.17504/protocols.io.bgdcjs2w

Marre, G., 2020. Développement de la photogrammétrie et d'analyses d'images pour l'étude et le suivi d'habitats marins.

CHANG, Y.S., MUNRO, C.J., FORTUNATO, L., ALALI, A., MARCIULESCU, C., HARVEY, S.L., VROUWENVELDER, J., ARAFAT, H., DUMEE, L.F., 2024. Macrofouling remediation strategies for water intakes of desalination and other industrial plants – A review. Desalination, volume 590, p. 117987. DOI : 10.1016/j.desal.2024.117987

DANIELSEN, F., BURGESS, N.D., BALMFORD, A., DONALD, P.F., FUNDER, M., JONES, J.P.G., ALVIOLA, P., BALETE, D.S., BLOMLEY, T., BRASHARES, J., CHILD, B., ENGHOFF, M., FJELDSA, J., HOLT, S., HÜBERTZ, H., JENSEN, A.E., JENSEN, P.M., MASSAO, J., MENDOZA, M.M., NGAGA, Y., POULSEN, M.K., RUEDA, R., SAM, M., SKIELBOE, T., STUART-HILL, G., TOPP-JØRGENSEN, E., YONTEN, D., 2009. Local participation in natural resource monitoring: a characterization of approaches. Conservation Biology: The Journal of the Society for Conservation Biology, volume 23, n° 1. p. 31-42. DOI : 10.1111/j.1523-1739.2008.01063.x

DIAZ, R.J., ROSENBERG, R., 2008. Spreading Dead Zones and Consequences for Marine Ecosystems. Science, volume 321, n° 5891. p. 926-929. DOI : 10.1126/science.1156401

FRIEDMAN, A., PIZARRO, O., WILLIAMS, S.B., JOHNSON-ROBERSON, M., 2012. Multi-scale measures of rugosity, slope and aspect from benthic stereo image reconstructions. *PloS One*, volume 7, n° 12. p. e50440. DOI : 10.1371/journal.pone.0050440

Guide Complet Lightroom | PDF | Balance des blancs | Modèle de couleur en RVB [En ligne]. Date de consultation : 09/01/2026. Disponible sur : <<https://fr.scribd.com/document/909019232/Guide-Complet-Lightroom>>.

HEON, J., 2025. Application and Challenges of Photogrammetry in Underwater Excavations: Case Studies from the Jeju Sinchang-ri and Gunsan Seonyudo Sites, Korea. *The International Archives of the Photogrammetry Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, volume XLVIII-M-9-2025, p. 573-578. DOI : 10.5194/isprs-archives-XLVIII-M-9-2025-573-2025

JORGE, M., 2022. Protocole de suivi scientifique 2022 des récifs artificiels. Atlantiques Landes Récifs. Date de consultation : 11/01/2026. Disponible sur : <https://cloudlasalle.sharepoint.com/:w:/r/sites/AtlantiqueLandesRcifs/_layouts/15/Doc2.aspx?action=edit&source=docx&id=7B235cc8a8-8604-47fa-a211-d718b7f5d7dd%7D&wdOrigin=TEAMS-MAGLEV.teamsSdk_ns.rwc&wdExp=TEAMS-TREATMENT&wdhostclicktime=1768145769378&web=1>.

ORR, J.C., FABRY, V.J., AUMONT, O., BOPP, L., DONEY, S.C., FEELY, R.A., GNANADESIKAN, A., GRUBER, N., ISHIDA, A., JOOS, F., KEY, R.M., LINDSAY, K., MAIER-REIMER, E., MATEAR, R., MONFRAY, P., MOUCHET, A., NAJJAR, R.G., PLATTNER, G.-K., RODGERS, K.B., SABINE, C.L., SARMIENTO, J.L., SCHLITZER, R., SLATER, R.D., TOTTERDELL, I.J., WEIRIG, M.-F., YAMANAKA, Y., YOOL, A., 2005. Anthropogenic ocean acidification over the twenty-first century and its impact on calcifying organisms. *Nature*, volume 437, n° 7059. p. 681-686. DOI : 10.1038/nature04095

PAN, Y., TONG, H., WEI, D., XIAO, W., XUE, D., 2022. Review of Structure Types and New Development Prospects of Artificial Reefs in China. *Frontiers in Marine Science*, [En ligne] volume 9, Date de consultation : 21/05/2025. Disponible sur : <<https://www.frontiersin.org/journals/marine-science/articles/10.3389/fmars.2022.853452/full>>. DOI : 10.3389/fmars.2022.853452

REDFIELD, A.C. (1958) The Biological Control of Chemical Factors in the Environment. *American Scientist*, 46, 205-221. - References - Scientific Research Publishing [En ligne]. Date de consultation : 09/01/2026. Disponible sur : <<https://www.scirp.org/reference/referencespapers?referenceid=1405382>>.

REMMERS, T., GRECH, A., ROELFSEMA, C., GORDON, S., LECHENE, M., FERRARI LEGORRETA, R., 2023. Close-range underwater photogrammetry for coral reef ecology: a systematic literature review. *Coral Reefs*, volume 43, p. 1-18. DOI : 10.1007/s00338-023-02445-w

RIERA, E., 2020. Towards a purposeful construction of a new generation of artificial reefs : Comparative analyses of the intrinsic factors favouring their colonization from micro to macro-scale. phdthesis : Université Côte d'Azur.

RIERA, E., LAMY, D., GOULARD, C., FRANCOUR, P., HUBAS, C., 2018. Biofilm monitoring as a tool to assess the efficiency of artificial reefs as substrates: Toward 3D printed reefs. *Ecological Engineering*, volume 120, p. 230-237. DOI : 10.1016/j.ecoleng.2018.06.005

RIERA, E., MAUROY, B., FRANCOUR, P., HUBAS, C., 2024. Establishing complexity targets to enhance artificial reef designs. *Scientific Reports*, volume 14, n° 1. p. 22060. DOI : 10.1038/s41598-024-72227-z

SALAÜN, J., RAOUX, A., PEZY, J.-P., DAUVIN, J.-C., PIOCH, S., 2023. Structural and functional changes in Artificial Reefs ecosystem stressed by trophic modelling approach: Case study in the Bay of Biscay. *Regional Studies in Marine Science*, volume 65, p. 103100. DOI : 10.1016/j.rsma.2023.103100

TREMBLAY, Y.D.N., HATHROUBI, S., JACQUES, M., 2014. Les biofilms bactériens : leur importance en santé animale et en santé publique. *Canadian Journal of Veterinary Research*, volume 78, n° 2. p. 110-116.

(PDF) Improving underwater visuals by fusion of Deep-Retinex and GAN for enhanced image quality in subaquatic environments Poprawa jakości obrazów podwodnych poprzez połączenie metody Deep-Retinex i sieci GAN, 2025. ResearchGate, [En ligne] Date de consultation : 09/01/2026. Disponible sur : <https://www.researchgate.net/publication/398913076_Improving_underwater_visuals_by_fusion_of_Deep-Retinex_and_GAN_for_enhanced_image_quality_in_subaquatic_environments>

[Retinex and GAN for enhanced image quality in subaquatic environments](#)[Poprawa jakości obrazów podwodnych poprzez połączenie metody Deep-Retinex i sieci GA](#)>.DOI : [10.35784/iaggos.7197](#)

(PDF) Mapping coral reef using photogrammetry technique: A preliminary study at Pulau Udar Besar, Sabah, Malaysia., 2025. ResearchGate, [En ligne]Date de consultation : 09/01/2026. Disponible sur : <https://www.researchgate.net/publication/357906834_Mapping_coral_reef_using_photogrammetry_technique_A_preliminary_study_at_Pulau_Udar_Besar_Sabah_Malaysia>.DOI : [10.51200/bjomsa.v5i2.2604](#)

Annexe A – Document technique : protocole d’acquisition de photogrammétrie sous-marine

Application aux récifs artificiels de l’association Atlantique Landes Récifs, BAUD Eloïs – 2025

1. Introduction

La photogrammétrie est une technique qui permet de reconstruire un objet ou une scène en trois dimensions à partir de simples photographies. En croisant plusieurs images prises sous différents angles, des logiciels spécialisés peuvent générer des modèles 3D très précis, mesurables et visualisables sur ordinateur.

Ce protocole a été conçu pour être utilisé par les plongeurs de l’Association Atlantique Landes Récifs lors de leurs sorties sur le terrain. Il vise à standardiser la prise d’images, afin de garantir des résultats fiables et exploitables scientifiquement, tout en restant accessible et compatible avec les contraintes de la plongée.

Pour le moment, l’objectif principal est avant tout de permettre aux plongeurs de se familiariser avec la photogrammétrie et les techniques de capture, en adoptant une approche expérimentale et progressive.

2. Équipement

- Utilisez un appareil photo numérique avec une résolution raisonnablement élevée (5 MPix ou plus).
- Évitez les optiques ultra grand-angles et fish-eye. Le meilleur choix est de 50 mm de focale (35 mm équivalent film). Il est recommandé d'utiliser une distance focale comprise entre 20 et 80 mm (équivalent 35 mm).
- Les focales fixes sont préférables. Si des objectifs zoom sont utilisés, conservez la même focale pendant toute la séance pour garantir l'homogénéité des images.
- Prévoyez un caisson étanche adapté à la profondeur prévue.
- Emportez une lampe vidéo ou flash sous-marin (si la luminosité est insuffisante).
- Vérifiez l’autonomie de la batterie et l’espace de stockage avant de plonger.

3. Paramètres de la caméra

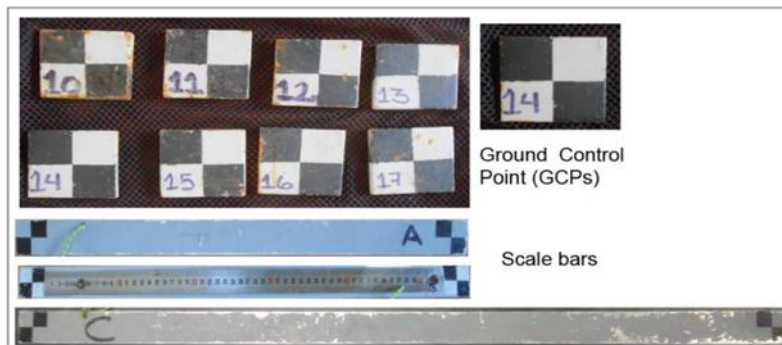
- Formez en RAW, puis convertissez en TIFF sans perte.
- Utilisez la résolution maximale.
- Réglez l’ISO sur la valeur la plus basse possible.
- Utilisez une ouverture élevée ($f/8$ ou plus si possible) pour garantir une bonne profondeur de champ.
- Choisissez une vitesse d’obturation rapide ($> 1/125s$) pour éviter le flou de mouvement.
- Réglez manuellement la balance des blancs si nécessaire, selon les conditions (prof. et éclairage).

4. Mesures et échelles

- Placez au moins trois marqueurs de référence avec une distance connue entre eux dans le champ de la caméra (idéalement sur le même plan que la structure).

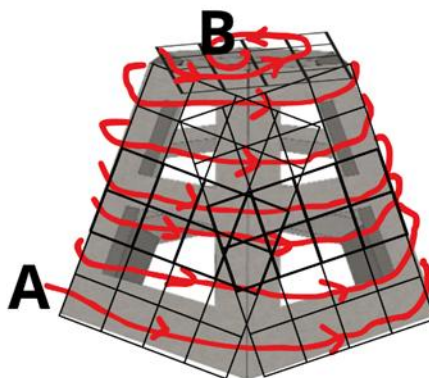
- Les marqueurs peuvent être : une règle graduée (fixée ou posée), deux galets peints ou objets identifiables à distance connue
- Ne déplacez pas les marqueurs pendant la séance de prise de vues.

Prenez au moins 3 photos claires où les marqueurs sont visibles.

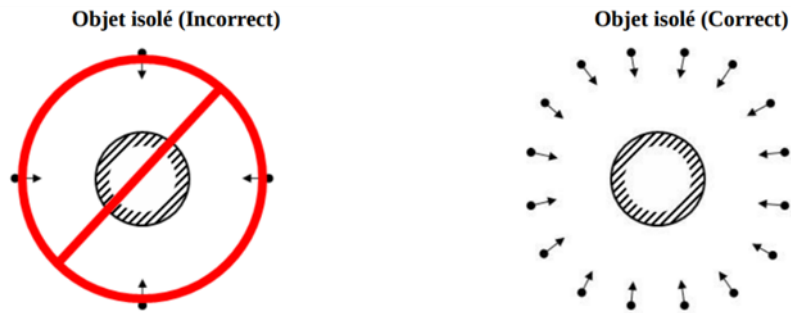


5. Capturer des scénarios

- Couvrez la totalité du sujet sous plusieurs angles (vue en plongée, latérale, oblique, etc.).
- Respectez un recouvrement de 70 à 80 % entre chaque image.
- Alternez les trajectoires en spirale ou en zigzag autour du sujet si possible.



- Gardez une distance constante à l'objet d'environ 2m pour éviter les déformations.
- Orientez la caméra perpendiculairement aux surfaces, mais variez légèrement l'angle entre les prises pour aider le logiciel à reconstruire les volumes.
- Évitez les bulles ou particules entre l'objectif et le sujet.
- **En cas de faible visibilité, approchez-vous**
- Utilisez la fonction time-lapse (si disponible) pour prendre une photo toutes les secondes environ lors de vos déplacements autour de la structure. Cela permet d'assurer un bon recouvrement entre les images sans avoir à déclencher manuellement.



6. Après la plongée : gestion des données

- Transférez immédiatement les images sur un ordinateur dédié.
- Nommez les dossiers de photo selon le protocole suivant : Structure_Site_Date_Numéro (ex : Babel_CapBreton_2025_1).
- Notez les conditions de prise de vue : Heure, profondeur, visibilité, courant, éclairage, matériel utilisé.
- Stockez les photos originales dans un dossier sécurisé avec sauvegarde (cloud ou disque dur externe).

Annexe B - Traitement des données photogrammétriques

Protocole de traitement des photographies sous-marines

Application aux récifs artificiels de l'association Atlantique Landes Récifs

BAUD Eloïs – 2025

Introduction

Le traitement des photographies sous-marines est une étape cruciale avant la reconstruction 3D des récifs artificiels. Les images RAW issues des plongées contiennent des informations précieuses mais présentent des caractéristiques spécifiques : dominante bleue, faible contraste, bruits.

L'objectif de ce protocole est de standardiser le traitement des photos, afin de produire des images TIFF homogènes, précises et optimales pour l'utilisation dans les logiciels de photogrammétrie tels que Metashape. Ce protocole s'inscrit comme une continuité du protocole de prise de vue sous-marine.

1. Organisation et sauvegarde des images

1. Après chaque sortie, transférer immédiatement les fichiers RAW sur un ordinateur dédié.

2. Créer un dossier par structure selon la convention : Structure_Site_Date_Numéro (ex : Babel_CapBreton_2025_1).
3. Conserver une copie intacte des fichiers RAW originaux pour garantir la traçabilité et permettre un retraitement si nécessaire.
4. Noter les conditions de prise de vue : heure, profondeur, visibilité, courant, éclairage et matériel utilisé.

2. Prétraitement des images

1. **Balance des blancs (!!)** : utiliser la pipette pour corriger la dominante bleue. Vérifier que les marqueurs et éléments connus apparaissent avec des couleurs réalistes.
2. **Exposition et luminosité (!)** : ajuster pour rendre les détails de la structure visibles, tout en évitant la saturation ou la perte d'information dans les zones sombres.
3. **Contraste et clarté (-)** : augmenter légèrement pour faire ressortir les textures et améliorer la lisibilité des détails.
4. **Uniformité (!!)** : appliquer les mêmes réglages à toutes les images pour assurer la cohérence nécessaire à la reconstruction 3D.

Légende des niveaux :

- **!! Critique** : indispensable pour la reconstruction 3D
- **! Requis** : fortement recommandé pour la qualité des modèles
- **- Optionnel** : améliore le rendu mais non indispensable

3. Retouches ponctuelles

- - Supprimer uniquement les éléments perturbateurs tels que bulles ou particules très visibles qui pourraient altérer l'alignement des photos.
- - Éviter toute modification des zones contenant des détails structurels ou écologiques, afin de ne pas compromettre la précision scientifique des modèles 3D.

4. Exportation

1. **!!** Exporter les images en TIFF sans perte, à la résolution maximale de l'appareil photo.
2. **!!** Vérifier visuellement la cohérence et la qualité des images exportées avant de les importer dans le logiciel de photogrammétrie.
3. **!** Conserver une copie des fichiers TIFF dans un dossier sécurisé avec sauvegarde (cloud ou disque dur externe).

5. Conseils pratiques

- Ne pas appliquer de filtrage ou de correction excessive ; la photogrammétrie nécessite le maximum de détails pour créer un modèle précis.
- Privilégier la cohérence des couleurs et de la luminosité sur toutes les images
- Conserver toujours une copie des fichiers RAW pour toute modification future ou recalcul des modèles.

Annexe C - Protocole d'utilisation d'Agisoft Metashape pour la photogrammétrie sous-marine

Mise en application sur les récifs artificiels de l'association Atlantique landes récifs
Rouge Adrien – 2025

- Figure 1: Exemple de masquage appliqué sur nos photos **Erreur ! Signet non défini.**
Figure 2: Tie point avec angle des cameras alignés **Erreur ! Signet non défini.**
Figure 3: Nuage de point dense52
Figure 4: Modèle 3D solide53

Introduction

La photogrammétrie est une méthode permettant de reconstituer des objets ou scènes en 3 dimensions. Cette méthode utilise un set de photo prise sous différents angles. Ces objets ou images sont mesurables sur ordinateurs à l'aide de logiciels tel que Agisoft Metashape.

L'objectif de ce protocole est de présenter les paramètres du logiciel utilisé dans le cadre de la photogrammétrie en milieu sous-marin.

La finalité de ce travail est de créer un modèle solide le plus précis possible de nos récifs sous-marins pour pouvoir les utiliser dans nos calculs mathématiques de complexité.

Préparation des photos.

Les photos sont déjà passées à travers plusieurs logiciels pour modifier corriger la colorimétrie et pouvoir récupérer un maximum d'informations.

Il reste une dernière étape de préparation des photos. Il s'agit du masquage, cette étape consiste à volontairement supprimer des zones inintéressantes des photos. Les photos sous-marines sont une source importante de bruit en raison des particules en suspension et de la luminosité particulière. Après plusieurs essais, nous avons déterminé que supprimer des zones autour de la structures rendait l'alignement des photos plus difficile. Mais pour supprimer du bruit dans les ouvertures de notre structure masquée ces zones intérieures sont efficaces.

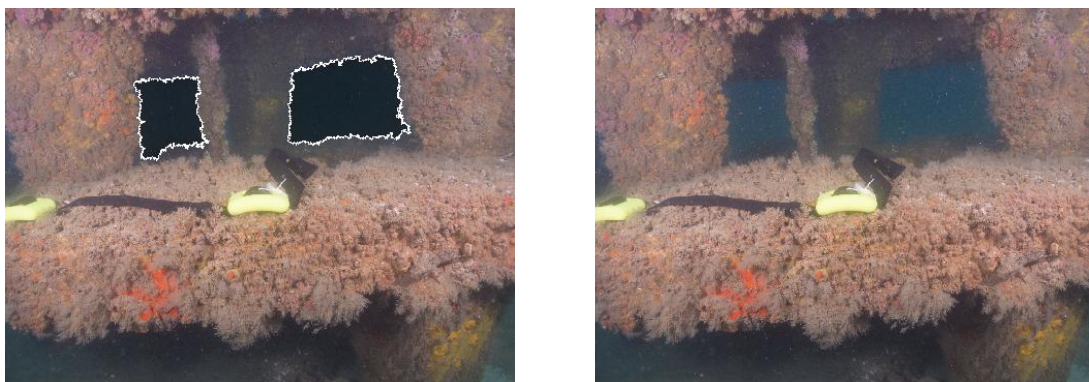


Figure 18: Exemple de masque appliqué sur une photo

Alignement des photos

Les paramètres que nous utilisons ont été sélectionnés après plusieurs essais et sont adaptés aux données et au matériel que nous utilisons.

Les paramètres de photos doivent s'adapter aux données que nous avons à disposition, à savoir jeu de données photographiques limitées en taille et sous-marines. Ces contraintes imposent l'utilisation du paramètre *accuracy* à un niveau *high* pour ne pas perdre trop d'informations. On augmente aussi le nombre limite de *tie points* à 10000 et de *Key points* par Mpx à 1000 pour essayer d'augmenter la précision ne gardant le plus d'informations possible. Nous utilisons le paramètre adaptif *camera fitting* car nos photos ont des angles et des distances vis-à-vis de l'objet qui ne sont pas constantes. Nous n'utilisons pas *Exclude stationary tie points* car l'arrière-plan de nos images n'est pas fixe et la profondeur de champ est difficile à gérer avec des photos à faible luminosité comme nous avons. Nous utilisons aussi *Guided image matching* car nous avons des photos chargées en végétation et en détails.

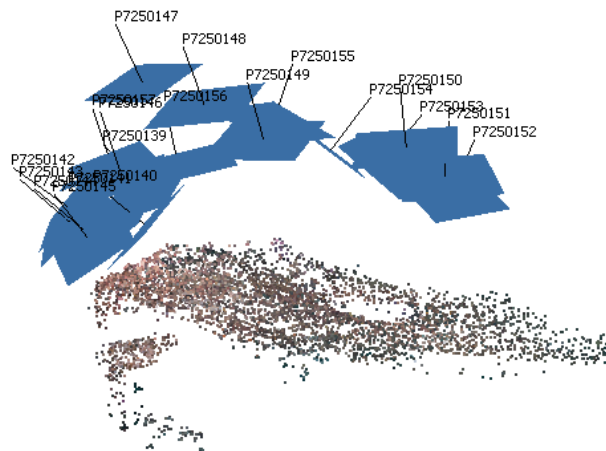


Figure 19: Tie point avec angle des cameras alignés

Traitement du nuage de points clairsemé (TIE Points)

Optimize camera est un outil essentiel pour optimiser l'alignement des photos. En clair il minimise l'erreur entre le modèle 3D construit et les photos en 2D. Nous utilisons le paramètre *fit f*, ainsi que *fit k1*, *fit k2*, *fit p1*, *fit p2*, *fit Cx*, *Cy* et *adaptive camera model fitting*. Ce dernier est utile à cause des conditions changeantes dans lesquelles nos images sont prises (lumière, eau, éclairage). *Fit f* et *fit Cx*, *Cy* servent à affiner la géométrie de notre modèle. Nous gardons ensuite seulement *fit k1* et *fit k2* car avec la faible densité de nos images ce n'est pas recommandé de pousser plus loin le coefficient de distorsion radiale. Enfin nous utilisons *fit p1* et *fit p2* pour corriger le coefficient de distorsion tangentielle.

Le tri des points s'effectue en premier avec une suppression manuelle des points qui sont du bruit et qui ne rentrent pas dans la structure de notre objet. L'objectif aussi est de n'a pas supprimer des points sur une zone trop concentrée car cela briserait les chaînes de polygones qui forment notre modèle.

Nous traitons ensuite nos objets avec *gradual selection*. Cela permet de supprimer tous les points statistiquement aberrants.

Nous opérons dans cet ordre en utilisant en premier *Image count*, *reprojection error*, *projection accuracy* et enfin *reconstruction uncertainty*.

Image count permet de supprimer les points vus sur un certain nombre d'images. Dans certain cas le nombre de photos faible ne permet pas d'utiliser *image count* car il supprime une part beaucoup trop importante de nos points (90%).

Reprojection error permet de calculer la distance entre les points sur le modèle 3D et les points sur les photos. Plus cette distance est grande plus les points sont mal placés. Utiliser une distance de 0,5 pixel permet de garantir une quantité de points suffisante en supprimant néanmoins les points les moins fiables.

Projection accuracy fonctionne d'une manière similaire à *reprojection error* mais de manière individuelle. Nous nous arrêtons à 15 RMSE pour ne pas supprimer une quantité de point trop importante.

Pour finir *reconstruction uncertainty* fonctionne par calcul d'une valeur d'incertitude. Cette valeur vient d'une matrice de covariance, la valeur qui en ressort met en lumière la précision de la triangulation grâce aux angles de vue et aux nombres d'images sur lequel le point est vu. La valeur choisie dépend beaucoup de chacun des objets que nous traitons. Le but est de supprimer un nombre cohérent de points sans supprimer des zones entières du model ce qui peut avoir lieu.

Création du nuage de point dense :

Le nuage de points dense est une reconstruction détaillée de notre modèle 3D. Après cette étape, nous verrons une vraie reconstruction 3D de notre modèle. Il n'est pas directement basé sur le nuage de points clairsemé. Ce nuage de point est utilisé pour calibrer les caméras leurs orientations et leurs positions. Cela permet de créer les *depth maps* des photos. Chaque photo aura une *depth map*, elle permet de calculer la profondeur de chaque pixel par rapport à la caméra. Le logiciel utilise ensuite des méthodes de stéréoscopie (méthodes pour créer du relief depuis des images) pour trouver les pixels qui apparaissent sur toutes les images. La finalité est la fusion des pixels communs en supprimant les points ayant des valeurs particulièrement aberrantes.

Les paramètres que nous utilisons peuvent varier en fonction de notre objet, de sa taille et de son set de photos. Le premier est la source de génération du modèle de points dense. On utilise les *depth maps* calculées sur chacune des images, c'est la source qui offre le plus de précision pour les modèles pleins de détails. Ensuite pour la qualité nous utilisons généralement *ultra high* pour un maximum de qualité. L'option de *depth filtering* permet de gérer le nettoyage des *depth maps* et de le rendre plus ou moins agressif. Nous utilisons le plus souvent le niveau de filtre *Mild*. Nous sélection *calculate point colors* pour avoir un rendu coloré même si ce n'est pas scientifiquement utile. Nous utilisons aussi *calculate point confidence* pour permettre le nettoyage post-génération du nuage de points.

Nous filtrons ensuite ce nuage de points dense grâce au niveau de confiance que nous avons demandé lors de sa génération. La confiance fonctionne avec les *depth maps* qui ont permis leur création. Plus le point a une position cohérente avec les *depth maps* sur lesquelles il se trouve, plus sa valeur de confiance est élevée. Nous ne pouvons pas supprimer un nombre trop important de points sur notre modèle car notre nombre total de points ne le permet pas. C'est pourquoi en fonction des cas nous nous arrêtons parfois en mettant 2 en limite minimale de confiance.

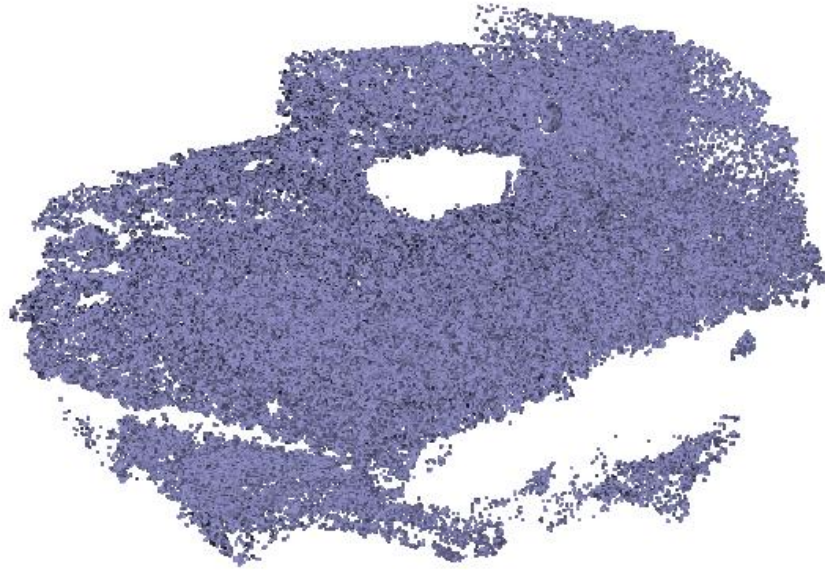


Figure 20: Nuage de point dense

Construction du modèle 3D :

La construction du modèle est la dernière étape avant l'exportation de notre modèle 3D final. Nous construisons le modèle 3D à partir des *depth maps* car c'est la méthode la plus précise. La surface type est le paramètre que l'on définit en fonction de la nature géométrique de l'objet. *Arbitrary 3D* est la seule option possible en utilisant les *depth maps*, il est utilisé pour les objets sans créer de contraintes verticales. Il y a ensuite la qualité du modèle, on peut choisir *high* ou *ultra high* pour préserver un maximum de détails. *Face count* définit le nombre maximum de triangles du maillage, nous utilisons *high* pour ne pas rendre le fichier trop compliqué à manipuler. Nous sélectionnons ensuite l'option *Enable* de l'interpolation pour ne pas combler les gros trous laissés dans le modèle. Nous réglons ensuite le niveau *depth filtering* à *mild* car nous avons effectué un nettoyage précis avant de créer le modèle 3D. Nous gardons enfin sélectionnée l'option *calculated vertex color* pour avoir un modèle coloré, bien que cela n'ait pas d'influence sur le reste de nos études.

Le nettoyage du *mesh* (le modèle 3D) se fait de manière manuelle en supprimant les polygones en suspension qui sont détachés de la forme principale. Nous utilisons ensuite *close holes* afin comme son nom l'indique de refermer les trous qui auraient pu être créés dans notre objet.

Le modèle solide est à ce stade-là fini et exportable pour les opérations suivantes, il remplit les contraintes nécessaires pour les futurs traitements.

La texture peut ensuite être faite à des fins esthétiques c'est la raison pour laquelle la méthode n'est pas détaillée ici.

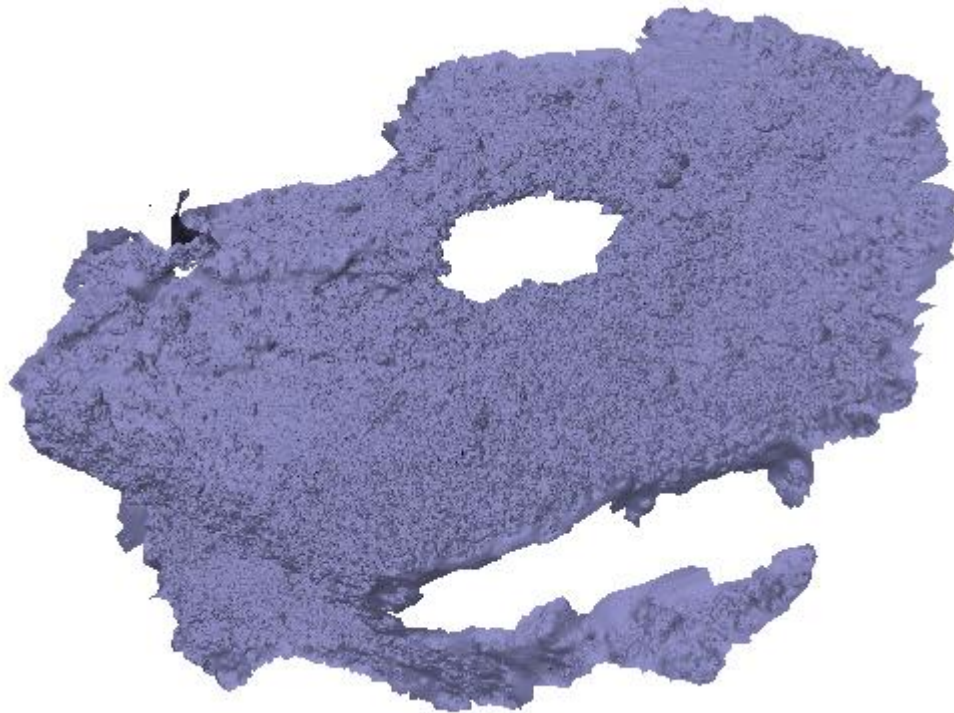


Figure 21: Model 3D solide

Exemple d'un calcul effectué par photogrammétrie : le calcul de rugosité

Le calcul de rugosité est un calcul basé sur l'étude des fractures. Ce calcul participe fortement à l'établissement des lois de l'écoulement des fluides sur une surface. La classification se fait entre très rugueux, dentelée, lisse et très lisse. Il existe une norme appelée ISO 25178-2 elle caractérise plusieurs études de surfaces par leurs textures et autre et donc notamment la rugosité.

En photogrammétrie l'utilisation des logiciels permet d'avoir des études sur la caractérisation de la surface d'un matériel. Une fois la surface mesurée, plusieurs traitements sont appliqués. Le premier est appelé S-filter, il supprime le bruit de très courte longueur d'onde. Défini dans le norme ISO 25178-2, son utilisation permet un premier nettoyage et permet l'utilisation de traitement suivants. Après ce filtre S, des méthodes tel que « *form correction* », « *surface levelling* », « *polynomial fitting* » sont utilisés, leurs buts sont de corriger la forme des modèles, cela comble leur trou en cad de manque d'information par endroit, élimine les anomalies et d'une manière générale lisse le modèle. **(Wyjadłowski et al., 2024)**

Les paramètres étudiés par la norme afin d'établir l'état de rugosité de la surface sont l'amplitude de rugosité, la hauteur, la portance et aussi la distribution de ces paramètres. **(Wyjadłowski et al., 2024)**

Le calcul de rugosité d'une surface peut se faire en étudiant le rapport entre les paramètres suivants :

$$\frac{\text{(longueur développée)}}{\text{(longueur au sol)}}$$

Cela permet de créer une classification dans laquelle une surface lisse a une valeur nulle et une échelle peut être établi pour les surfaces rugueuses.

Annexe E : Protocole de suivi environnemental sous-marin

Application aux récifs artificiels de l'association Atlantique Landes Récifs
Kelly Conteh / Clément Delbey – 2025

Introduction

Le suivi environnemental des récifs artificiels vise à mesurer différents paramètres physico-chimiques et biologiques qui permettent de suivre l'état du milieu marin et la santé des communautés benthiques et halieutiques.

À Capbreton, l'association Atlantique Landes Récifs (ALR) a immergé plusieurs récifs artificiels depuis 1999. Leur localisation dans une zone soumise à de multiples pressions anthropiques (port de Capbreton, Gouf, activités de pêche et nautiques) rend crucial un suivi rigoureux permettant de quantifier l'impact physico-chimique de l'océan sur ces structures.

Le protocole suivant a été conçu pour :

- **Standardiser** les relevés réalisés par les plongeurs de l'ALR,
- **Assurer la comparabilité** des données d'une année sur l'autre,
- **Identifier précocement** les risques liés à la pollution ou aux déséquilibres écologiques.
- Récolter des données afin de **créer un indice environnemental** afin de le **comparer à l'indice mathématique** de complexité et ainsi déterminer l'impact du récif artificiel sur la faune et la flore locale.

1. Équipement

- **Ordinateur de plongée** (montre ALR) (prof., durée, température).
- **Flacons stériles** (100–250 mL) pour les prélèvements d'eau destinés à l'analyse des paramètres physico-chimiques (pH, salinité, oxygène, nutriments).
- **Flacons en verre ambré** (500 mL) pour les contaminants organiques et métaux lourds (évite la dégradation par la lumière).
- **Carottier** (PVC ou inox) ou cuillère inox pour les prélèvements de sédiments.
- **Glacière isotherme** avec accumulateurs de froid (4°C, jamais de congélation).
- **Plaquettes immergeables + crayons gras** pour notes sous l'eau.
- **Appareil photo/caméra sous-marine** pour compléter les relevés visuels.
- **Fiches de prélèvement avec étiquettes étanches** pour identifier immédiatement chaque échantillon (date, site, profondeur, type de prélèvement).
- **Gants jetables** (évite la contamination croisée).
- **Penta-décamètre.**
- **Feuilles de comptage.**

2. Méthode d'acquisition des données

Les paramètres physico-chimiques sont mesurés à différentes profondeurs (surface, colonne d'eau intermédiaire et proximité immédiate du récif) afin de prendre en compte la variabilité verticale du milieu.

2.1 Température

L'objectif est de suivre les variations saisonnières et leur influence sur les cycles biologiques (reproduction, croissance, mortalité).

- **Méthode :**
 - Mesurer la température à l'aide du thermomètre inclus dans l'ordinateur de plongée, à trois niveaux : surface, milieu de colonne d'eau, proximité immédiate du récif.
 - Noter conditions météo (ensoleillement, vent) car elles influencent la stratification thermique.
- **Précaution :** Effectuer la mesure de température au fond au milieu de la plongée, pour s'assurer que l'ordinateur s'est bien stabilisé dans sa mesure de températures. Noter les conditions météorologiques au moment de l'intervention (ensoleillement, vent) car elles influencent la stratification thermique (JORGE, 2022).

2.2 Salinité

Il est ici objectif de déterminer l'influence des apports fluviaux et des masses d'eau du Gouf.

- **Méthode :**
 - Prélever un échantillon d'eau (100mL) à deux profondeurs : surface et pied du récif.
 - Remplir jusqu'au bord sans bulles et refermer immédiatement.
 - Identifier clairement (site, profondeur, heure)
 - Stocker en glacière (< 4°C) jusqu'à analyse en laboratoire
- **Analyse :** conductivité mesurée en laboratoire pour calculer la salinité (en PSU).
- **Valeurs de référence :** on peut retrouver des valeurs d'un ordre de 33 à 36 PSU pour les eaux marines standards

2.3 Oxygène dissous (OD)

L'objectif ici est de détecter les phénomènes d'hypoxie, critiques pour la faune fixée et mobile.

- **Méthode :**
 - Prélever un flacon d'eau (250mL) à proximité du récif.
 - Remplir lentement le flacon sans créer de bulles d'air.
 - Fermer hermétiquement et placer immédiatement dans la glacière.

Autre méthode : trouver un kit de test ?

- **Analyse :** dosage en laboratoire par méthode de Winkler ou sonde optique fixe.
- **Seuils critiques :**
 - <6 mg/L → vigilance,
 - <3 mg/L → conditions hypoxiques dangereuses.

2.4 pH

- **Objectif** : Suivre l'acidification et ses impacts sur les organismes calcifiants (moules, huîtres, crustacés).
- **Méthode** :
 - Prélever un échantillon d'eau (100mL) dans un flacon stérile, à 1m au-dessus du récif.
 - Éviter tout contact avec des bulles ou sédiments.
 - Stocker à l'abri de la lumière à 4°C.
- **Analyse** : mesure du pH réalisée en laboratoire avec pH-mètre calibré à 25°C.
- **Valeurs de référence** :
 - 8,1–8,3 : normales,
 - <7,8 : risque accru pour la calcification.

2.5 Nutriments (nitrates, nitrites, ammonium et phosphates)

- **But** : Détecter les excès de nutriments favorisant prolifération d'algues et déséquilibres trophiques.
- **Méthode** :
 - Prélever de l'eau à -1 m du récif dans un flacon stérile (rincer 3 fois avant prélèvement).
 - Remplir jusqu'au bord sans bulles.
 - Identifier clairement (site, profondeur, heure).
 - Stocker immédiatement en glacière (≤ 4 °C).
- **Analyse** : réalisée en laboratoire (spectrophotométrie ou chromatographie ionique) pour :
 - Nitrates (NO_3^-),
 - Nitrites (NO_2^-),
 - Ammonium (NH_4^+),
 - Phosphates (PO_4^{3-}).

Résultats exprimés en $\mu\text{mol/L}$ ou mg/L .

- **Erreur à éviter** : Ne jamais exposer les flacons au soleil → risque de réaction chimique.

2.6 Substrat et état du récif

- **But** : Évaluer la stabilité des récifs et les conditions de colonisation benthique.
- **Méthode** :
 - Observer la nature du fond : sable grossier, vase, graviers, roches.
 - Noter les signes de mobilité du substrat (enfouissement partiel du récif, déplacement).
- **Mesure de la profondeur d'enfouissement des récifs** (JORGE, 2022) :

Deux plongeurs de la palanquée se répartissent les rôles :

- Plongeur 1 : responsable de la boussole pour la prise de direction et du penta-décamètre pour les repères de prises de mesures
- Plongeur 2 : chargé de relever les profondeurs avec son ordinateur de plongée

Protocole de mesure :

- Accrocher le décimètre au récif dans la direction choisie
- Dérouler entièrement le décimètre dans cette direction jusqu'à 20m
- À 20m, corriger la direction du décimètre si nécessaire
- Prendre les mesures au retour. Bien poser la main au sol et attendre que le profondimètre se stabilise. Puis rembobiner.

Les points de mesure se font à 20m, 10m, 5m, 2m et 1m du récif. La profondeur maximale et la profondeur minimale du récif sont également relevées.

- Documentation photographique et vidéo :
 - Réaliser des prises de vue selon des angles reproductibles pour permettre des comparaisons interannuelles :
 - Vue d'ensemble du récif
 - Gros plans sur le macrofaune benthique fixée (éponges, bryozoaires)
 - Vue du fond adjacent
- **Conseil** : Toujours prendre les photos sous le même angle pour comparaison dans le temps.

2.7 Contaminants (métaux lourds, hydrocarbures)

- **But** : Identifier les pollutions chroniques ou accidentelles et leurs impacts toxiques.
- **Méthode** :
 - **Eau** : prélèvement dans un flacon en verre ambré, à proximité du récif (éviter surface).
 - **Sédiments** : prélèvement avec carottier ou cuillère inox (2–3 cm de profondeur).
 - Étiquetage immédiat et conservation en glacière.
- **Analyses en laboratoire** :
 - Métaux lourds (plomb, mercure, cadmium) analysés par spectrométrie d'absorption atomique (AAS) ou ICP-MS.
 - Hydrocarbures (HAP, hydrocarbures totaux) analysés par chromatographie en phase gazeuse (GC-MS)
 - Les échantillons doivent être acheminés au laboratoire sous 24 à 48h maximum.
- **Justification** : Ces contaminants persistent dans le temps, s'accumulent dans les organismes (bioaccumulation), provoquant effets cancérigènes ou mutagènes.

3. Observations biologiques (JORGE, 2022)

3.1 Organisation des palanquées

Le comptage s'effectue systématiquement avec deux plongeurs qui comptent en simultané. Les palanquées sont idéalement formées d'un plongeur expérimenté et d'un plongeur novice sur le suivi d'un récif artificiel. Cette composition permet :

- De compléter les manques d'information lors du débriefing
- D'assurer la formation continue des plongeurs
- D'améliorer la fiabilité des identifications

3.2 Méthode de comptage (méthode Charbonnel)

La méthode de comptage utilisée est celle développée par Charbonnel et al. (1997), visant à recenser le maximum d'espèces sur un récif artificiel. Cette méthode est particulièrement applicable aux récifs de type Babel et Typi. Pour les récifs de type Buse/Amas chaotique, une évaluation de l'applicabilité de la méthode est réalisée en fin de saison.

Étape préliminaire : Espèces craintives

Les espèces craintives sont comptées en premier, dès l'arrivée des plongeurs sur le récif. Pour éviter les confusions et limiter le temps de comptage, seules quatre espèces sont ciblées :

- Môle (*Mola mola*)
- Bar commun (*Dicentrarchus labrax*)
- Saint-Pierre (*Zeus faber*)
- Sar tambour (*Diplodus cervinus*)

Étape 1 : Espèces vivant aux alentours du récif (3 mètres de distance)

Espèces ciblées : rougets barbets, vives, ombrines bronze...

Protocole :

- Les plongeurs s'écartent à 2-3 m du récif
- Ils effectuent un trajet circulaire autour du récif
- Un plongeur part à gauche, l'autre à droite (trajets opposés)
- Le comptage se fait en simultané

Étape 2 : Espèces vivant à proximité immédiate du récif (1 mètre)

Espèces ciblées : sars, daurades, tacauds, ombrines...

Protocole :

- Les plongeurs s'écartent à 1 m du récif
- Ils effectuent un trajet circulaire autour du récif
- Un plongeur part à gauche, l'autre à droite (trajets opposés)
- Le comptage se fait en simultané

Justification des trajets opposés : Cette organisation permet de minimiser les perturbations (un plongeur de chaque côté systématiquement) et d'augmenter la probabilité d'observer des espèces cryptiques ou timides.

Étape 3 : Espèces benthiques inféodées au récif

Espèces ciblées : rascasses, congres, poulpes, seiches, blennies...

Protocole :

- Exploration minutieuse des cavités et des faces internes du récif
- Rotation complète autour et/ou dans le récif
- Mouvement en zigzag au-dessus du récif possible
- Utilisation d'une lampe pour explorer l'intérieur du récif

Étape 4 : Espèces pélagiques grégaires

Espèces ciblées : chinchards, bogues...

Protocole :

- Les deux plongeurs se positionnent au-dessus du récif à 2-3 m
- Comptage des espèces nageant en permanence dans la colonne d'eau au-dessus du récif

3.3 Techniques de dénombrement des bancs

Pour dénombrer au mieux les assemblages de poissons, deux méthodes peuvent être utilisées simultanément :

Technique du patch d'individus :

- Visualiser mentalement un groupe de 5 à 10 individus dans le banc
- Compter ensuite par patch de 10 l'ensemble du banc

Méthode de la croix :

- S'imaginer une croix traversant le champ de vision du plongeur
- Cette croix scinde le banc en quatre quartiers
- Compter le nombre de poissons dans un quartier
- Multiplier par quatre ce nombre

Les deux méthodes peuvent être combinées pour améliorer la précision du comptage.

3.4 Relevé et identification des espèces

Principe général : Le comptage doit être le plus exhaustif possible.

Niveau d'identification :

- **Priorité :** Identification à l'espèce
- **Si difficulté :** Identification jusqu'au genre (selon l'expérience du plongeur)
- **Débriefing obligatoire :** Les plongeurs débriefent sur leur plongée une fois de retour au bateau pour compléter les identifications

En cas d'espèce inconnue :

Si l'espèce et même le genre ne sont pas identifiables, noter le plus précisément possible :

- Couleur générale et motifs
- Taille estimée en centimètres
- Présence de taches, rayures, bandes
- Forme de la bouche, des nageoires, de l'œil
- Caractéristiques de la ligne latérale
- Type de nage (ondulation, battement, vol)
- Comportement observé

Enregistrement des données :

- Noter immédiatement chaque espèce identifiée sur la feuille de comptage
- Indiquer un nombre exact d'individus (pas de fourchette)
- Pour les espèces benthiques, noter également la taille estimée des individus en centimètres

Documentation photographique/vidéo :

- Photographier ou filmer les espèces observées lorsque les conditions le permettent
- Documenter particulièrement les espèces rares ou difficiles à identifier
- Ces documents servent de référence pour le débriefing et la validation des identifications

4. Enregistrement des données sur le terrain

À l'issue de chaque plongée, l'ensemble des données acquises doit être reporté sur des fiches de suivi standardisées. Elles doivent comprendre :

- Conditions générales de l'intervention
 - Date, heure de début et fin
 - Site de plongée
 - Binôme de plongeurs
 - Conditions météorologiques (ensoleillement, vent, état de la mer)
- Paramètres mesurés
 - Température (aux 3 niveaux, en milieu de plongée pour stabilisation)
 - Profondeur (mesures à 20 m, 10 m, 5 m, 2 m et 1 m du récif, ainsi que profondeur min/max du récif)
 - Durée de plongée
 - Valeurs des marées
- Échantillons prélevés
 - Type d'échantillon (eau en surface, eau du fond, sédiments)
 - Code unique attribué
 - Volume prélevé
 - Température au moment du prélèvement
 - Observateur
- Observations biologiques et état du substrat
 - Espèces observées avec nombres exacts d'individus (pas de fourchettes)
 - Taille estimée des individus en centimètres
 - Comportements notés (alimentation, repos, reproduction, fuite)
 - Anomalies biologiques (mortalité, recouvrement algal anormal, dépôts suspects)
 - Nature du substrat
 - Signes de mobilité ou d'enfouissement
 - Notes sur espèces inconnues (description détaillée : couleur, taille, forme, etc.)
- Commentaires particuliers
 - Pollution visible
 - Anomalie comportementale
 - Tout élément inhabituel

5. Sécurité et précautions

- Sécurité des plongeurs :

- Respecter strictement les procédures de plongée (binôme, paliers, réserve d'air)
- Vérifier l'équipement avant chaque immersion
- Protection du milieu (limiter l'impact du suivi) :
 - Ne pas toucher les organismes fixés
 - Ne pas remuer inutilement les sédiments
 - Maintenir une bonne maîtrise de la flottabilité
- Manipulation des échantillons
 - Utiliser des gants jetables lors des prélèvements de contaminants
 - Éviter les contaminations croisées (eau/sédiments)
 - Transporter les échantillons immédiatement en glacière
 - Éviter toute exposition solaire des échantillons

6. Traitement et analyse des données

6.1 Organisation et validation des données

- Saisie dans base Excel/R.
- Vérification : valeurs aberrantes, manquantes, doublons.
- Utilisation de codes uniques pour les échantillons.

6.2 Paramètres physico-chimiques

- Les mesures de pH, salinité, oxygène dissous et température proviennent des analyses de laboratoire.
- Les valeurs sont saisies dans le tableau Excel, puis comparées aux valeurs de référence :
 - pH : 8,1-8,3 (normales)
 - OD : >6 mg/L (conditions saines)
 - Salinité : 33-36 PSU (eaux marines standards)

Les valeurs aberrantes sont vérifiées par comparaison inter-échantillons.

6.3 Nutriments

- Résultats en $\mu\text{mol/L}$ ou mg/L .
- Comparaison aux seuils d'eutrophisation ($P > 0,1 \text{ mg/L}$).
- Calcul du ratio N/P.
- Suivi temporel pour détecter apports ponctuels.

6.4 Contaminants

- Données en $\mu\text{g/L}$ (eau) ou mg/kg (sédiments).
- Comparaison aux normes européennes.
- Détection d'anomalies (dépassements seuils éco-toxicologiques).
- Suivi spatial (proximité port) et temporel (accumulations chroniques).

6.5 Substrat et état du récif

- Analyse qualitative des photos.
- Comparaison interannuelle (enfouissement, colonisation).
- Noter espèces bioindicatrices.

6.6 Observations biologiques

- Compilation listes d'espèces.
- Calcul fréquence d'observation.
- Indices de diversité (Shannon, Simpson).
- Corrélations avec conditions physico-chimiques.

6.7 Analyses statistiques et comparatives

- Séries temporelles : évolution mensuelle/annuelle.
- Comparaison spatiale : récifs proches du port vs éloignés.
- Corrélations : ex. OD bas ↔ mortalité.
- Outils : Excel, R, Python.

6.8 Visualisation et cartographie

- Graphiques : courbes, histogrammes, boxplots.
- Cartes (QGIS) : localisation stations, niveaux pollution, biodiversité.
- Photographies comparatives (multi-années).

6.9 Restitution et archivage

- Rapports annuels pour ALR et partenaires.
- Bases de données centralisées (Excel, CSV).
- Archivage photos/vidéos avec métadonnées.
- Diffusion vulgarisée pour sensibilisation.

6.10 Gestion des échantillons

- Chaque échantillon reçoit un code unique (ex : ALR2025-51-05)
- Un registre Excel recense : site, date, heure, profondeur, type d'échantillon, volume, température, observateur.
- Les résultats labo sont ensuite intégrés à ce même fichier.
- Les fichiers source (.xlsx) et rapports labo (.pdf) sont archivés séparément pour traçabilité.