

MASTER SML

SCIENCES DE LA MER ET DU LITTORAL

MENTION

Sciences de la Terre, des Planètes et de
l'Environnement – Géosciences Océan

SPÉCIALITÉ

Sédimentologie et Paléoenvironnement

DELSOL Simon

Développement d'une plateforme de bathymétrie optique et déploiement pour la mesure de la rugosité

Mémoire de stage de Master 2

Année Universitaire 2022-2023

Structure d'accueil : IUEM - UBO (Géo-Océan)

Tuteur universitaire : LE DANTEC Nicolas

Maître de stage : JAUD Marion



L'Université est une chance

Remerciements

Je tiens à remercier Marion Jaud et Nicolas Le Dantec pour avoir pris la peine d'initier ce projet de stage à mes côtés. Et encore merci à Marion pour m'avoir encadré et avoir toujours su trouver le temps pour moi.

Une pensée particulière pour Isabel Urbina-Barreto, et Emmanuel Cordier pour leur encadrement et leur dévouement sans commune mesure pour faire de mon temps à La Réunion une expérience aussi enrichissante qu'épanouissante. Merci infiniment à vous deux.

Une pensée pour Sophie Bureau et François Guilhaumon pour tout le temps qu'ils ont su m'accorder, que ce soit pour préparer et m'assister sur le terrain dans le cas de Sophie, ou les problèmes plus informatiques dans le cas de François. Merci.

Je tiens à remercier Emmanuel Augereau, qui nous a accompagnés sur le terrain au Dellec et a assisté tant dans la conceptualisation que la fabrication du prototype. Merci à son fils Marius également, pour nous avoir généreusement prêté son bodyboard lors des levés.

Merci à Quentin Ruaud dont l'expertise photographique a permis d'obtenir des clichés du déploiement de la plateforme dans le lagon.

Merci à Pascal Mouquet et Sylvain Poulain, de l'équipe SEAS-OI de l'IRD, pour leur coopération tout au long de ce stage.

Merci à Yoan, Pierre et Erwan de l'OSU-R (Observatoire des Sciences de l'univers Réunion) pour m'avoir aidé sur le plan matériel, et fourni un accès au VPN de l'OSUR pour les traitements Metashape.

Merci à Margaux, doctorante à l'IRD, d'avoir gracieusement prêté ses GoPro.

Merci à Rodolphe Devilliers, et de nouveau à Isabel, pour m'avoir donné l'opportunité d'organiser et participer au workshop de Geohab.

Un grand merci à Clément, mon accolyte stagiaire pour l'organisation de l'atelier Geohab. Et un autre merci à Edouard, mon collègue de bureau lors de mes présences à Brest.

Merci également à ISblue pour avoir financé à la fois ce stage et la mission longue à La Réunion. Et je tiens à remercier les équipes de SEAS-OI, d'ENTROPIE et de l'OSU-Réunion pour leur accueil durant mon séjour sur l'île.

Enfin, je remercie tout lecteur qui prendra de son temps pour lire le rapport suivant.

Résumé

La santé des récifs coralliens joue un rôle protecteur pour la biodiversité en tant que refuge, et pour les communautés humaines en causant une déperdition d'énergie de la houle. Ces deux facteurs sont notamment associés à la complexité structurelle. Elle est estimée à partir de méthodes photogrammétriques. La faible profondeur de ces environnements (< 2 m) fait qu'il y est difficile de déployer des plongeurs, ROV ou des navires avec des moyens de suivi. Pour étudier ces systèmes, la solution des dernières années s'est orientée sur des méthodes d'acquisition aériennes. Ces dernières présentent des limites dans la reconstruction des modèles 3D. Une des solutions pour lever ce verrou est de conceptualiser une plateforme low-cost de bathymétrie optique opérant en subsurface. Un prototype fonctionnel utilisant la photogrammétrie « *Structure from Motion* » et une méthodologie associée sont désormais disponibles. L'étude de la complexité structurelle pointe vers un faible impact de la résolution des modèles numériques d'élévation sur le résultat final. Les méthodes actuelles sont la meilleure option disponible, mais semblent avoir des limitations de l'usage de la 2.5D. D'autres méthodes plus intégratives de la 3D sont à mettre en œuvre dans le futur pour améliorer les calculs de rugosité les modèles digitaux.

Mot-clés : récif corallien, photogrammétrie SfM, low-cost, bathymétrie optique, complexité structurelle, rugosité, La Réunion.

Abstract

The health of coral reefs plays a protective role for biodiversity as a refuge, and for human communities by causing energy loss from swell. These two factors are notably associated with structural complexity. The shallow depth of these environments (< 2 m) makes it difficult to deploy divers, ROVs or ships with monitoring equipment. To study these systems, the solution in recent years has been to use aerial acquisition methods. However, these have limitations when it comes to reconstructing 3D models. One solution is to design a low-cost optical bathymetry platform operating on the subsurface. A working prototype using "Structure from Motion" photogrammetry and an associated methodology are now available. The study of structural complexity points to a low impact of the resolution of digital elevation models on the final result. Current methods are the best available option, but seem to have limitations in the use of 2.5D. Other, more 3D-integrated methods should be implemented in the future to improve roughness calculations on digital models.

Key words : coral reef, SfM photogrammetry, low-cost, optical bathymetry, structural complexity, rugosity, La Reunion.

Table des matières

I.	INTRODUCTION	6
II.	SITES D'ÉTUDE	12
	A) L'anse du Dellec	12
	B) La Réunion	12
	1 – Géologie	12
	2 – Climat et géomorphologie	13
	3 – Récif	14
III.	MÉTHODOLOGIE	17
	A) Photogrammétrie " <i>Structure from Motion</i> " (SfM)	17
	B) Prototype (low-cost et low-tech) et procédures standards d'acquisition et de traitement	19
	1 – Prototype	19
	2 – Procédure standard d'acquisition	22
	3 – Procédure standard de traitement	24
	4 – Calculs de rugosité	27
	C) Tests et levés réalisés <i>in-situ</i>	28
	1 – L'anse du Dellec	28
	2 – L'Hermitage	30
IV.	RÉSULTATS	33
	A) Validation de la méthode au Dellec	33
	B) Application de la méthode à La Réunion	37
	1 – Modèles 3D	37
	2 – Calculs de la complexité structurale (rugosité)	39
V.	DISCUSSIONS	41
	A) Méthodologie	41
	B) Choix de la configuration caméra	43
	C) Choix de la plateforme support	44
	D) Calculs de rugosité	45
VI.	CONCLUSION	47

Liste des figures

Figure 1 : Graphes liant l'impact de la complexité structurale sur le déferlement et le run-up de la houle	6
Figure 2 : Localisation des sites d'étude du projet TELEMAT	11
Figure 3 : Localisation et carte géologique de l'île de La Réunion	13
Figure 4 : Schéma de la formation des îles Mascareignes (théorie de Darwin, 1842) ...	15
Figure 5 : Répartition géomorphologique d'un récif frangeant corallien	16
Figure 6 : Schéma de la procédure théorique d'acquisition en photogrammétrie " <i>Structure-from-Motion</i> "	18
Figure 7 : Schéma des différentes étapes de la procédure standard d'acquisition élaborée au cours de ce stage	20
Figure 8 : Schéma du prototype et photographies de son déploiement sur le terrain ...	22
Figure 9 : Schémas de la trajectoire d'acquisition et du recouvrement entre les caméras ...	23
Figure 10 : Abaque de recouvrement entre les images issues des deux caméras selon la profondeur et l'espacement intercaméra	24
Figure 11 : Schéma des différentes étapes de la procédure standard de traitement élaborée au cours de ce stage	27
Figure 12 : Schéma des différentes méthodes de calcul de la rugosité	28
Figure 13 : Localisation de la zone et levés réalisés au Dellec	29
Figure 14 : Localisation de la zone et levés réalisés à l'Hermitage	31
Figure 15 : Visualisations et comparaison des nuages de points denses (données brutes) du Dellec	35
Figure 16 : Graphe de la distribution gaussienne des distances entre les nuages de point du Dellec	36
Figure 17 : Visualisations des nuages de points denses (données brutes) de l'Hermitage reconstruits selon différentes configuration caméra	38
Figure 18 : Visualisation en filtre « Indice de confiance » du nuage de point dense (données brutes) de l'Hermitage conservé pour la suite	39
Figure 19 : Graphe des rugosités calculées selon différentes méthodes et à différentes résolution sur la zone de l'Hermitage	40
Figure 20 : Schéma des différentes structures coralliennes enregistrées selon la résolution choisie	41
Figure 21 : Visualisations des nuages de points denses (données brutes) de l'Hermitage issus des différents tests et superposés pour comparaison	44

Figure 22 : Schéma de la problématique des zones non-considérées du modèle 3D lors de la génération du MNE (modèle 2.5D)	46
--	----

Liste des tableaux

Tableau 1 : Résumé des principales avancées technologiques pour le suivi spatial des environnements de récif corallien	7
Tableau 2 : Quelques exemples d'autres plateformes de photogrammétrie sous-marine existantes	10
Tableau 3 : Matériel nécessaire au prototype	21
Tableau 4 : Paramètres de traitements Metashape	26
Tableau 5 : Récapitulatif des paramètres externes des caméras des différents relevés effectués le 13/03/2023 à l'Hermitage	32
Tableau 6 : Résultats des calculs de rugosité pour le Test 1 sur la zone de l'Hermitage ...	40

I. INTRODUCTION

Le rôle essentiel des récifs coralliens dans la protection des personnes, des économies et des infrastructures côtières est largement reconnu. Des modèles récents suggèrent que 26 % du littoral des pays dotés de récifs coralliens offrent une protection à la submersion et l'érosion, ce qui représente quelque 5,3 millions de personnes et 109 milliards de dollars de PIB protégés par les récifs coralliens (*Burke et Spalding, 2022*).

Ce rôle de protecteur des littoraux est lié à la diminution de l'énergie de la houle que cause les récifs coralliens (*Lowe et al., 2005*) par la friction sur le fond et en forçant le déferlement des vagues (*Quataert et al., 2015*). Cette déperdition d'énergie par les récifs peut atteindre 97% de l'énergie initiale de la houle dont 86% pour les platiers récifaux (*Ferrario et al., 2014*). *Carlot et al. (2023)* montre une augmentation drastique des hauteurs de run-up et de la périodicité des événements extrêmes de submersion pour un récif fragilisé (*figure 1*).

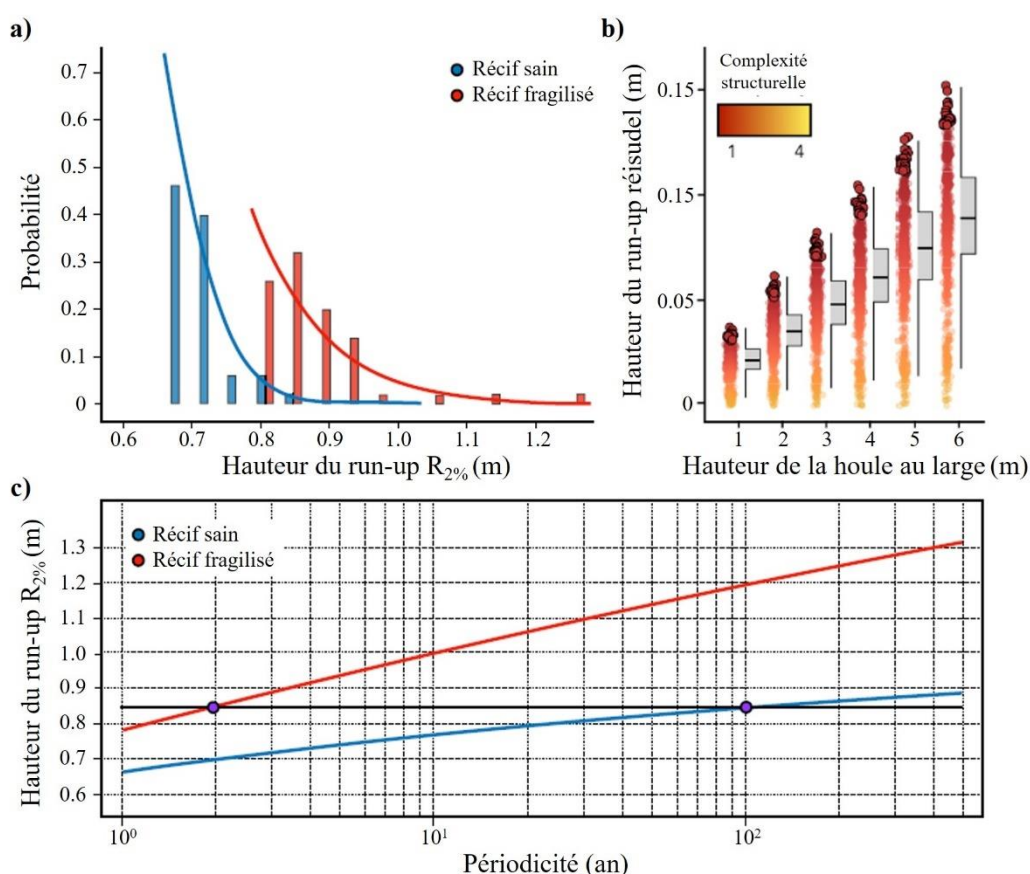


Figure 1. Comparaisons de la hauteur de run-up de la vague dépassant les 2% dans des conditions de récifs coralliens sains (bleu) et en mauvaise santé (rouge) (a) ; Hauteur de run-up résiduel en fonction de la perte de complexité structurelle et de l'ampleur de l'événement ; hauteur de run-up extrême de la vague dépassant 2% ($R_{2\%}$) dans des conditions de récifs coralliens sains (bleu) et en mauvaise santé (rouge) avec la période de retour (c), d'après *Carlot et al., 2023*.

Les récifs coralliens ont grandement bénéficié de l'avènement des techniques de surveillance spatiale. Un résumé de l'ensemble de leurs avancées est fourni à titre informatif dans le *tableau 1*. Parmi les progrès primordiaux se trouvent les images satellites qui permettent un suivi sur le temps long et à grande échelle avec des résolutions métriques à décimétriques (*Mumby et al., 2004 ; Knudby et al., 2007*), le LiDAR (Light Detection And Ranging) aéroporté qui fournit des modèles 3D à résolution pluricentimétrique (*Xharde et al., 2006*), et la photogrammétrie qui permet la reconstruction de modèle 3D à résolution centimétrique (*Bythell et al., 2001*). La démocratisation de ces divers outils de télédétection s'est révélé être un support formidable pour les problématiques de gestion des récifs coralliens, et a simplifié l'analyse de leurs descripteurs physiques (*Hamylton, 2017*).

Tableau 1 : Un résumé des principales avancées technologiques, tant pour la collecte d'informations spatiales que pour les approches d'interprétation et de traitement de ces informations dans les environnements de récif corallien (d'après *Hamylton, 2017*).

<i>Avancée technologique (année)</i>	<i>Avantages</i>	<i>Inconvénients</i>
Technologie de collecte de la donnée		
Photographie aérienne (1928)	A permis d'observer et d'interpréter pour la première fois des récifs coralliens depuis une vue du-dessus	Mauvaise qualité des négatifs Photographies acquises avec angle oblique et non verticaux
Satellite d'observation (1960)	Grande emprise au sol Données constantes prises sous la forme de valeur de radiance par pixel	Les données acquises sont sujettes à des distorsions induites par l'atmosphère et la colonne d'eau
Programme Landsat (1972)	Suivi temporel de la donnée constant sur plus de 40 ans	Faible résolution spatiale (30 cm) en relation aux échelles de variabilité des environnements coralliens Faible résolution temporelle
Capteurs hyperspectraux aéro- et spatioporté (1982)	Les informations spectrales permettent un plus large éventail de traitement Capacité à résoudre avec précision un plus grand nombre de caractéristiques	Taille des données d'images et des processus de traitement conséquents, pose des problèmes de stockage
LiDAR ("Light Detection and Ranging", aéroporté, Terrestre, marin) (1960)	Génère fidèlement des modèles numériques d'élévation et des modèles numériques de terrain S'applique aux environnements aériens comme sous-marins	Onéreux au déploiement (généralement opéré depuis un avion) Génère des nuages de points conséquents, avec les problèmes de gestion de la donnée associés
Capteurs acoustiques (1960)	Fonctionne en eaux profondes (> 1 km) Collecte en parallèle des informations sur la colonne	Les données acquises exigent une correction de marée

	d'eau et la texture de l'élément imagé	"Faible" emprise comparablement aux autres méthodes
Drones et UAVs (Unmanned Aerial Vehicle) (2000)	L'utilisateur a un plus grand contrôle sur le temps et les paramètres de l'étude Meilleure résolution des images collectées grâce à des vols à plus faible altitude	Les vols d'acquisitions sont dépendants de conditions météorologiques favorables "Faible" emprise d'image comparativement aux capteurs aériens et spatiaux
Véhicules sous-marins autonomes (AUV) (1957)	Résolution plus fine des images collectées au-dessus du fond marin	Faible emprise d'image due à la proximité du capteur au fond
Technologie de traitement de la donnée		
Structure-from-Motion (SfM) (1975)	Modélise fidèlement les caractéristiques des surfaces 3D	Fonctionne difficilement à travers l'interface air-eau Requiert des logiciels de photogrammétrie spécialisés
Algorithmes de classification d'image spectrales (1990)	Peut s'appliquer Résoud fidèlement des classes thématiques avec peu d'action- utilisateur	Requiert Les classifications terrestres et sous-marines requièrent différentes calibration spectrales
"Fluid lensing" (2016)	Résolution spatiale élevée (cm) des éléments à travers de grandes aires (~10 kms)	Limité aux environnements sous-marins Requiert des conditions optimales de houle

L'un des descripteurs physiques clés des récifs coralliens est la complexité structurelle (*Urbina-Barreto et al., 2022*). Pour les écologues et les biologistes, la complexité structurelle est un moteur de la biodiversité. Elle joue un rôle central en tant que refuge face à la prédation et aux courants pour les communautés benthiques et de poissons (*Fisher et al., 2007 ; Graham et Nash, 2013*). En hydrodynamique, la complexité structurelle joue un rôle essentiel dans la dissipation de l'énergie des vagues (*Costa et al., 2016 ; Duvall et al., 2019*). La complexité structurelle est le moteur de la microtopographie, elle-même corrélée à la rugosité de fond (*Sous et al., 2022 ; Dinh et al., 2023*). La microtopographie est rattachée au coefficient de Nikuradse k_n (*Soulsby et Whitehouse, 1997*). Il est usuellement inféré par calcul depuis les mesures *in situ* et les équations de dissipation d'énergie de la houle $f_w = A_b / Z_0$ (f_w = dissipation d'énergie de la houle, A_b = amplitude d'excursion d'une particule sur le fond d'eau, Z_0 = rugosité de fond) et de celle de la rugosité de fond $Z_0 = k_n / 30$. Depuis cette année, *Carlot et al. (2023)* ont lié directement par équation $k_n = 0.01 \times SC^{2.98}$ le coefficient de Nikuradse (k_n) à la complexité structurelle (SC).

En écologie, la complexité structurelle – ou topographie de surface – est également synonyme de rugosité. Il s'agit alors du rapport de la distance 3D sur la distance 2D. Sur le terrain, elle est acquise par la méthode du « Chain and Tape » (*Risk, 1972 ; McCormick, 1994*). Puis est apparue l'analyse numérique sur des transects d'épaisseur centimétrique extraits de modèles 3D récupérés par photogrammétrie SfM (*Friedman et al., 2012 ; Burns et al., 2015 ; Young et al., 2017*). Enfin, une bascule s'est faite des transects numériques vers des études surfaciques de plus grande ampleur à l'aide d'algorithmes calculant divers descripteurs physiques dont la complexité structurelle depuis des modèles numériques d'élévation (*Fukunaga et al., 2019 ; Urbina-Barreto et al., 2021*).

Plusieurs protocoles sont bien développés en écologie pour la photogrammétrie SfM sous-marine (*Burns et al., 2015 ; Guo et al., 2016 ; Urbina-Barreto, 2020*). Cependant ces protocoles sont pensés pour des plongeurs opérant dans des milieux avec une profondeur d'au moins 2m et ne sont pas géoréférencés. Il est complexe d'appliquer ces mêmes méthodes sur des platiers récifaux de quelques dizaines de centimètres à 1m de profondeur. La méthode déployée alors est celle des drones permettant de couvrir de larges zones (*Leon et al., 2015 ; Storlazzi et al., 2016 ; Casella et al., 2017*), ou des kite (*Bryson et al., 2016*). Ces méthodes aériennes ont le bénéfice d'être non-intrusives, mais ne peuvent opérer qu'en conditions météo spécifiques : pas de vent, pas de vagues et une luminosité partielle. Elles présentent des limites également techniques : les reconstructions tridimensionnelles qui en découlent sous-estiment les altitudes des structures coralliennes (*Agrafiotis et al., 2020 ; Casella et al., 2022*). Cela requiert d'appliquer des algorithmes correctifs sur les images (*Woodget et al., 2015 ; Agrafiotis et al., 2020*) ou d'utiliser des « Ground Control Point » pour avoir un géoréférencement (*David et al., 2021*). Mais même avec ces correctifs, les résultats présentent une forte dérive par rapport à la réalité terrain (*David et al., 2021*).

En parallèle de cette mouvance, l'idée d'utiliser des plateformes de photogrammétrie sous-marine de subsurface pour opérer dans ces milieux peu profonds s'est développée. Ce concept prend sa source dans les méthodes archéologiques (*Bojakowski et al., 2015 ; Teague et Scott., 2017*). Les « Remote Operated Vehicle » (ROV) ont notamment eu le vent en poupe (tableau 2). Mais ils sont confrontés à différents problèmes : (1) leur déploiement est coûteux ; (2) leur capacité de manœuvre n'est pas prévue pour opérer dans ces milieux récifaux de très faible profondeur ; (3) les petits modèles de ROV ont rarement l'aptitude de faire un géoréférencement, tandis que les modèles plus imposants qui en sont aptes requièrent une centrale inertielle interne en plus d'être raccordés par une Standard Base Line (SBL) à un navire disposant d'un GPS. Quelques initiatives ont toutefois vu le jour, tel que le Reef Rover de *Raber*

et Schill (2019) ou le SQUID-5 de *Hatcher et al. (2020)* (tableau 2). Ces plateformes ont été conçues pour opérer dans des environnements peu profonds et pour réaliser de la bathymétrie optique en utilisant la photogrammétrie SfM avec des antennes GPS pour le géoréférencement. Depuis, l'usage de ces modèles n'a plus été mentionné. Il est donc possible de considérer que l'acquisition de modèle bathymétrique optique en environnements peu profond présente une lacune méthodologique et matérielle.

Tableau 2 : Un récapitulatif non-exhaustif des plateformes et véhicules de subsurface développés et disponibles sur le marché, pour la pratique de la photogrammétrie sous-marine.

Modèle	Créateur/Fabricant	Année	Prix (\$)	Usage	Profondeur
<i>Reef Rover</i>	<i>Raber et Schill (USA)</i>	2019	3426	Scientifique	< 20 m
<i>Blueye Pionner</i>	<i>Blueye (Norvège)</i>	2021	7000	Industriel / Scientifique / Etat	< 300 m
<i>Seaviews</i>	<i>Photocean (France)</i>	2018	4350	Industriel / Scientifique	< 15 m
<i>SQUID-5</i>	<i>USGS (USA)</i>	2020	Non-communicé	Scientifique	Dépend de la turbidité
<i>SeaArray</i>	<i>Marine Imaging Technology (USA)</i>	2020	500/jour	Scientifique	Dépend de la turbidité
<i>BlueROV2</i>	<i>Bluerobotics (USA)</i>	2022	5720	Industriel / Scientifique / Etat	< 300 m
<i>Perception ROV Skids</i>	<i>Voyis (Canada)</i>	2020	Non-communicé	Industriel / Scientifique / Etat	< 1000 m
<i>Seaeye Falcon</i>	<i>Saab (Royaume-Uni)</i>	2020	106 000	Industriel	< 300 m

Ce stage a suscité le lancement du projet de recherche TELEMAT : TELEDétection Multi-échelle Appliquée aux récifs Coralliens. L'une des questions principales du projet porte sur l'échelle d'observation et la résolution les plus adaptées pour effectuer ces suivis. L'objectif principal de TELEMAT est de réaliser une étude interdisciplinaire centrée sur la cartographie 3D de la topographie du récif corallien frangeant de la Réunion, et basée sur une approche multi-échelle. Cette étude a pour ambition de déterminer des indicateurs quantitatifs de haute précision de la rugosité du dit récif, et donc son impact sur l'hydrodynamique. L'estimation précise de la rugosité vise à l'amélioration de la modélisation numérique des processus physiques et côtiers. La rugosité étant une notion liée à la complexité structurale d'un récif, le projet présente également un intérêt pour l'écologie et la biologie pour les questionnements de vitalité corallienne. Le perfectionnement de ces outils peut fournir des données de références pour de futures études d'écologie et océanographie côtière (ANR Futurisk). Par extension, dans le contexte corallien, l'amélioration de cette métrique de rugosité peut contribuer à la gestion du littoral et les initiatives de restauration des récifs (ex : Future Maore Reef).

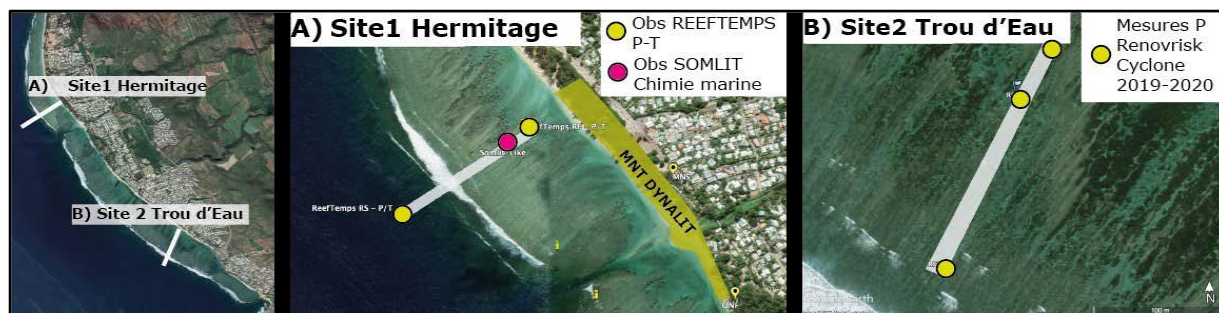


Figure 2. Localisation des sites d'étude du projet TELEMAT pour les levés topographiques sous-marins (échelle exagérée). Le premier site correspond au transect pilote ILICO à l'Hermitage avec la localisation des points d'observations pérennes réalisés dans le cadre du Service National d'Observation (SNO) Reeftemps (a). Le second site est celui de Trou d'Eau (b). *(Projet pour la Fédération OMNCG – 2023, TELEMAT - TELEDétection Multi-échelle Appliquée aux récifs Coralliens, pour estimer leur rugosité hydrodynamique et rôle protecteur du littoral, Emmanuel Cordier, Isabel Urbina-Barreto, François Guilhaumon, Mars 2023.)*

Le projet TELEMAT cible deux sites d'études. Seul le premier de ces sites d'étude est le sujet de ce stage. Il correspond au site pilote transverse instrumenté ILICO (Infrastructure de recherche Littorale et Côtière), localisé sur le récif frangeant de l'Hermitage, à proximité de la passe. La zone à couvrir est illustrée en *figure 2 (a)*. Les acquisitions bathymétriques optiques se focaliseront sur le platier récifal et la pente externe. Ce transect borde la zone sanctuaire de la réserve marine, sans y pénétrer et représente une emprise de 10 mètres de large pour des longueurs de 200 mètres et 100 mètres respectivement sur le platier récifal (profondeur moyenne inférieure à 1 mètre) et sur la pente externe (profondeur moyenne à 6 mètres). Elle recouvre les points d'observations suivis dans le cadre des Services Nationaux d'Observation ReefTems et Somlit, la plage étant déjà un site du SNO Dynalit.

C'est dans le cadre de ce projet que le présent stage propose de répondre à la principale problématique associée aux levés bathymétriques optiques : les difficultés liées au géoréférencement. Ce stage a pour objectif de (1) proposer une méthode innovante et low-tech de photogrammétrie sous-marine permettant de générer un modèle bathymétrique géoréférencé et à très haute résolution en petits fonds, et (2) donner un exemple de l'ensemble de la méthodologie, de l'acquisition sur le terrain au calcul de rugosité final. A cet effet, la conception de la plateforme a été initiée à l'IUEM, avec des premiers tests de validation de la méthode au site du Dellec. Par la suite, une mission longue, effectuée au sein de l'UMR ENTROPIE basée à La Réunion, avait pour objectif d'effectuer des tests d'acquisition in situ, de traiter les données acquises, de produire les modèles 3D requis pour les calculs de rugosité sur le site de l'Hermitage et de réaliser les dits calculs de rugosité.

II. SITES D'ÉTUDE

A) L'anse du Dellec

L'anse du Dellec (48°21'16''N, 4°33'59''W) se situe en face de la Pointe des Espagnols dans le goulet de Brest (Finistère), qui assure la jonction entre la rade de Brest à l'Est et la Mer d'Iroise à l'Ouest. La rade de Brest est une dépression dégagée par l'érosion fluviale, puis progressivement remplie par les eaux marines à partir de l'Holocène. Le trait de côte est assez conforme avec les grands schémas structuraux hérités des plissements varisques. La géologie du Dellec se partage entre un substratum rocheux de gneiss de Brest provenant du métamorphisme de granodiorites précambrienne et des dépôts sableux. Ce sable provient de l'érosion du Massif armoricain voisin, ainsi que des apports sédimentaires consécutif aux forts courants de marée – jusqu'à 4 nœuds – présents dans le goulet Brest. Le régime de marée à Brest est semi-diurne, avec un marnage conséquent d'en moyenne 4,5m. L'anse du Dellec se situe donc en zone macro-tidale. Cela présente un avantage certain, puisque les marées de vives-eaux découvrent un large estran sur le long de falaise, zone usuellement recouvert par une colonne d'eau profonde de 2 m en moyenne. L'anse du Dellec est donc un lieu de prédilection pour effectuer sur une même zone des levés bathymétriques et des acquisitions topographiques. Pour cette raison, un relevé de chaque type y est réalisé pour validation de la méthodologie.

B) La Réunion

1 – Géologie

L'île de La Réunion se situe dans l'Océan Indien (21°S, 55°E), à 700 km à l'est de Madagascar (*figure 3*). Elle occupe une superficie de 2512 km² sous une forme elliptique étirée dans un axe N120. L'île est un édifice volcanique qui est l'expression active de surface du point chaud de La Réunion. Ce même point chaud est apparu avec l'émission des Trappes du Deccan à ~65 Ma et a par la suite formé le plateau des Mascareignes (~40 Ma) dans l'Océan Indien (**Duncan et al., 1989**). La réactivation du point chaud il y a ~10 Ma est à l'origine de l'archipel des Mascareignes, avec l'accrétion et l'émergence dans l'ordre des îles Rodrigues et Maurice (10-8 Ma), puis la croissance de l'île de La Réunion il y a 5 à 7 Ma (**McDougall, 1971 ; Gillot et al., 1989**).

La partie subaérienne de La Réunion ne représente qu'environ 3 % du volume total de l'édifice volcanique (*de Voogd et al., 1999*) : la majeure partie du massif est sous-marine. Il se caractérise par un diamètre d'environ 240 km à sa base, pour une hauteur totale d'environ 7 000 m, dont environ 4 000 m sous le niveau de la mer, et culmine à 3 070 m au-dessus du niveau de la mer. L'île de La Réunion est dominée par deux formations géologiques juxtaposées mais distinctes observables sur la *figure 4*. Elles correspondent aux deux grands volcans boucliers basaltiques que sont le Piton des Neiges et le Piton de la Fournaise (*Fèvre, 2005, Lénat et al., 2012*). Le Piton des Neiges, en sommeil depuis 22 ka (*Salvany et al., 2012*), occupe la partie nord-ouest de l'île. Le Piton de la Fournaise est localisé dans la partie sud-est de l'île. C'est l'un des volcans les plus actifs de la planète, qui entre en éruption en moyenne une fois par an (*Chevallier et Bachèlery, 1981 ; Lénat., 1989*).

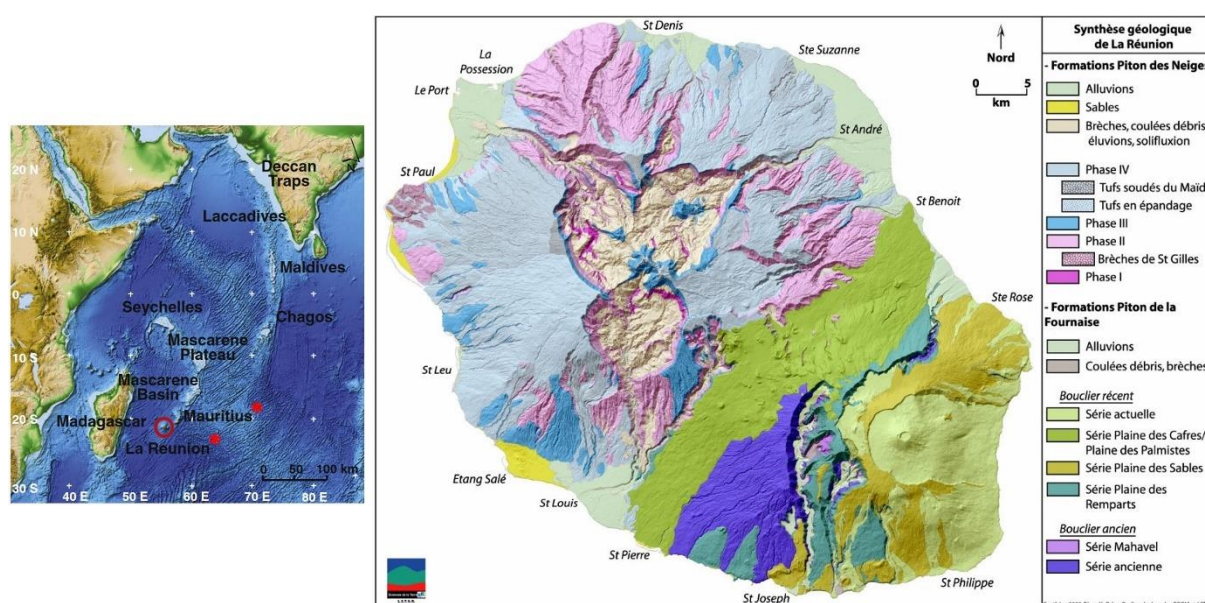


Figure 3. Carte de localisation de l'île de La Réunion dans l'océan Indien (a). Fond bathymétrique et topographique ombré ETOPO1 (*Mazuel et al., 2016*). Carte géologique synthétique de l'île de La Réunion (b), *Fèvre (2005)*.

*** édifices volcaniques construits par le point chaud de la Réunion**

2 – Climat et géomorphologie

Du fait de sa position océanique sous les tropiques, La Réunion est régie par un climat tropical humide avec une hygrométrie moyenne de 70 à 80% (*Mazuel et al., 2016*). Elle n'est affectée que par 2 saisons : l'été austral et l'hiver austral. Durant l'été austral, les alizés de l'est sont à l'origine de régimes de précipitations variés dans le temps et dans l'espace. La Côte au vent (Est) est majoritairement humide (plus de 5000 mm/an de pluie) alors que des conditions plus sèches prévalent sur la Côte sous le vent (Ouest). C'est également la saison des cyclones

tropicaux, récurrents sur l'île. En hiver, les alizés du sud-est déplacent l'air humide vers les hauteurs, provoquant un refroidissement adiabatique et des précipitations principalement sur les pentes montagneuses, tandis que le littoral reste plus préservé des pluies. Les moyennes des précipitations annuelles sur l'île connaissent une amplitude de 750 mm au minimum sur la côte ouest, à 10 000 mm à maxima sur les pentes du Piton de la Fournaise.

La géomorphologie de la Réunion est marquée par des vallées fortement incisées, des structures plurikilométriques particulières de forme circulaire appelées « cirques » (Cilaos, Mafate et Salazie) et des caldeiras qui jouent crucial dans la structuration du réseau de drainage de l'île (*Fèvre, 2005*). La combinaison de ce réseau de drainage, des jeunes reliefs abrupts et des intenses précipitations contribue à faire de l'île, l'une des régions avec les taux d'érosion les plus élevés du globe (*Garcin et al., 2005*), et est conséquemment responsable d'un fort transport sédimentaire vers la côte.

La côte réunionnaise s'étend sur 250 km et est divisée en 3 grandes catégories (*Villeneuve et al., 2014*). (1) 140 km de côtes volcaniques, délimitées par de hautes falaises, sont les témoins de l'activité des Pitons de l'île, et représentent la plus grande part du littoral de l'île. (2) 85 km de côtes alluviales, sous la forme de plages de galets, marquent l'important flux sédimentaires et se répartissent le long des différentes rivières et ravines de l'île. (3) 25 km de plages coralliennes complètent cet ensemble. Elles ont été construites récemment (~8000 ans), par accumulation des éléments biodétritiques des récifs qui matérialisent les fameuses plages de sable blanc. L'unité de Saint-Gilles est la plus étendue. Elle exhibe 5 km de linéaire pour 250 m de large à son maximum. La plage de l'Hermitage (*figure 14*) fait partie de cette unité.

3 – Récif

Le récif de La Réunion est de type frangeant (*figure 4-2*). Sa genèse suit l'hypothèse de Charles Darwin (1842). Cela signifie que le récif croît verticalement jusqu'à la surface de l'eau sur les côtes des îles volcaniques (*figure 4*). Pendant que l'île volcanique s'enfonce par subsidence, les structures coralliennes poursuivent leur croissance à la même allure que le niveau de montée des eaux, jusqu'à former en phase terminale, un atoll avec un lagon central à la disparition de l'île volcanique (*figure 4-4*).

Les édifices récifaux sont répartis sur le littoral occidental de l'île. Cette localisation s'explique par la présence des conditions océanographiques et géométriques répondant aux critères d'exigences des organismes constructeurs : des faibles profondeurs et une faible turbidité ; des températures de l'eau comprises entre 22 °C et 30 °C toute l'année ; une côte sous le vent qui bénéficie d'un régime hydrodynamique modéré ; une pluviométrie faible qui limite les apports sédimentaires d'origine terrigène en zone littorale, qui souvent inhibent la croissance corallienne. L'édification de récifs coralliens sur le littoral occidental a débuté il y a environ 10 000 ans (*Camoin et al., 1997*). Le récif constitue une ceinture discontinue de 25 km de long sur le linéaire côtier (*Montaggioni & Faure, 1980*). Il recouvre une surface totale de 12 km², soit 0.50 % des 2512 km² de superficie totale de La Réunion.

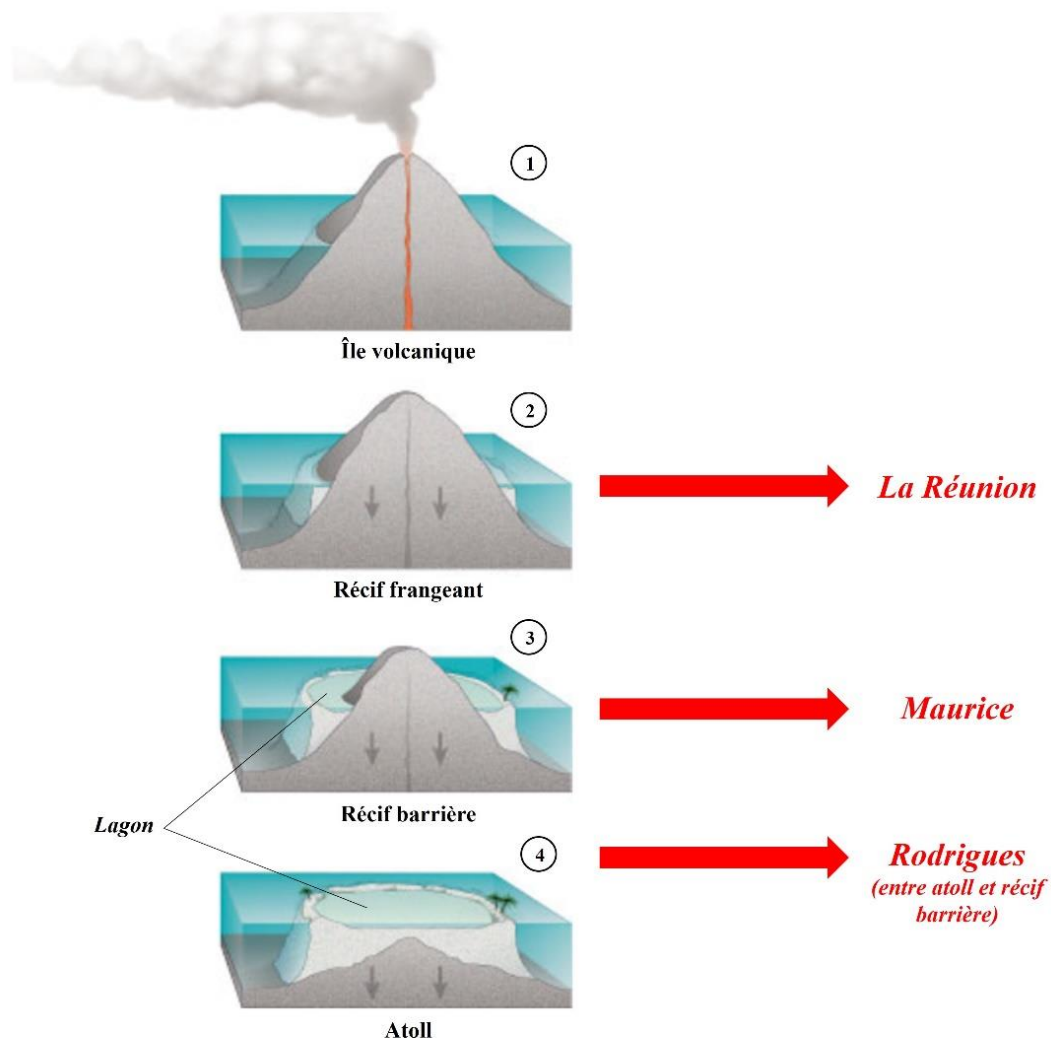


Figure 4. Schéma de la formation des îles Mascareignes depuis un point un point, et de la croissance d'un récif corallien selon l'hypothèse de *Darwin (1842)*, avec les étape de croissance correspondante pour chacune des îles des Mascareignes (source : <http://pubs.usgs.gov/fs/2002/fs025-02>).

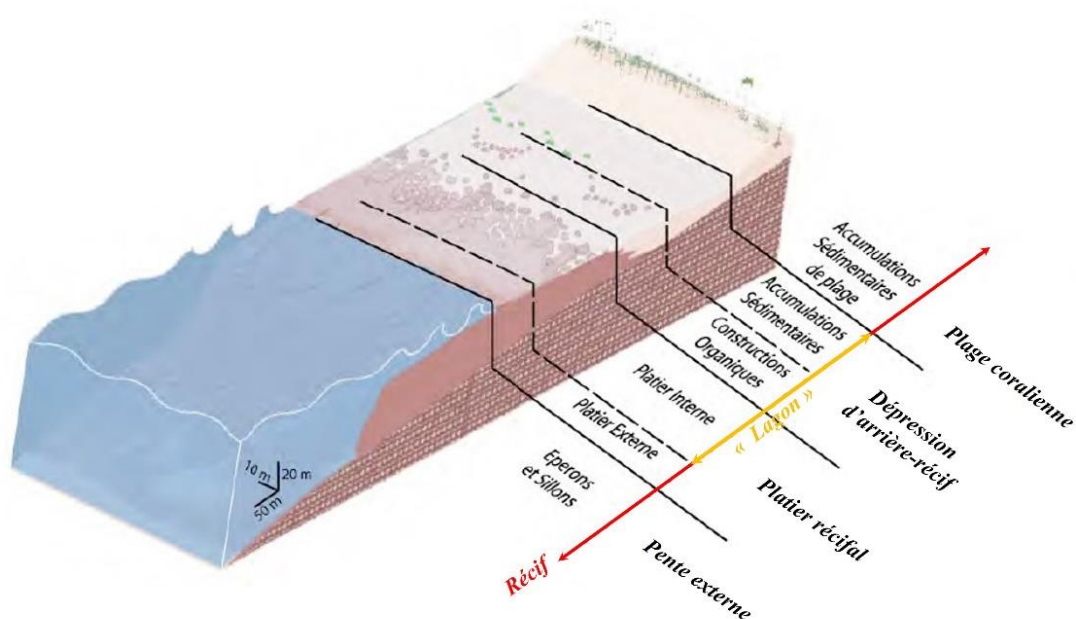


Figure 5. Répartition géomorphologique d'un récif frangeant corallien : de la pente externe à la plage.
Exemple de la Réunion, d'après **Montaggioni & Faure (1980)**.

Le récif réunionnais comprend quatre compartiments géomorphologiques décrits par **Montaggioni & Faure (1980)**. Cette compartimentation est visible en *figure 5*. Du large vers le littoral se trouve la **pente externe** qui correspond à la partie antérieure toujours immergée du récif ouverte sur le large. Elle est composée de constructions coralliennes et de dépôts sédimentaires à dominance bioclastique. Jusqu'à une profondeur de 25 m, cette partie antérieure du récif est bâtie par une alternance de crêtes bio-construites et de dépressions disposées perpendiculairement au front récifal. Cette structure lui vaut le nom de zone à éperons et sillons. Vient successivement le **platier récifal**, parfois émergé aux basses mers de vives-eaux. Ce platier récifal est à son tour subdivisé en un platier externe à éléments coralliens transversaux et en un platier interne à éléments coralliens dispersés. Le platier externe est assimilé à la crête récifale, c'est-à-dire la zone de déferlement de la houle océanique. La profondeur sur le platier récifal est généralement faible (de quelques dizaines de centimètres) et excède rarement le mètre d'eau. Cette zone est le cœur d'étude du projet TELEMAR. En approchant de la côte se situe la **dépression d'arrière-récif (DAR)** qui correspond à une étendue d'eau de faible profondeur à basse mer, comprise entre 1 et 2 mètres. Ce compartiment sépare le platier récifal de la ligne de rivage et renferme l'essentiel des sédiments, constitués d'épandages bio-détritiques et d'accumulations sableuses. L'ensemble platier récifal et DAR forme ce qui est communément appelé « **le lagon** ». Enfin se trouve le **front littoral**, qui comprend les formations sédimentaires littorales, totalement dépourvues de structures bio-construites et

constamment émergées aux basses mers. Cela correspond aux plages coralliennes. Elles sont constituées de sables bioclastiques fins et homogènes associés à une proportion significative d'éléments bio-détritiques grossiers.

La Réunion est assujettie à une marée de type semi-diurne à inégalité diurne. Sur le littoral occidental – là où se situe le récif réunionnais – l'onde de marée arrive depuis le Sud. Les amplitudes maximales enregistrées ne sont respectivement que de 0.1 m et 0.9 m pour respectivement les marées de mortes eaux et de vives eaux (**Farrow et Brander, 1971**). En dehors des grandes marées, les marnages moyens à La Réunion oscillent de 40 à 60 cm pour les vives eaux et de 10 à 30 cm pour les mortes eaux. Ces faibles marnages sont liés à la présence d'un point amphidromique à proximité des côtes réunionnaises.

III. MÉTHODOLOGIE

A) Photogrammétrie « Structure from Motion » (SfM)

La méthode de photogrammétrie "*Structure-from-Motion*" (SfM) s'appuie sur les mêmes principes de base que la photogrammétrie stéréoscopique, à savoir que la structure tridimensionnelle (3D) de l'objet d'intérêt peut être reconstruite à partir d'une série d'images superposées (**Westoby et al, 2012**). Elle diverge toutefois de la stéréo-photogrammétrie conventionnelle, en ce sens que la géométrie de la scène, la position et l'orientation de la caméra sont résolues automatiquement par procédure itérative avec résolution d'équations de colinéarité lors du traitement sur ordinateur. Ainsi ces paramètres n'ont pas à être mesurés *a priori*. L'approche dépend de deux facteurs majeurs : (1) elle requiert d'acquérir un ensemble de photographies à haut degré de recouvrement (au moins 80%) et (2) elle nécessite de multiplier les points de prises de vues pour optimiser la couverture de la structure tridimensionnelle de l'objet étudié (*figure 6*). Comme le nom le suggère, cela signifie que les captures d'images sont réalisées à l'aide d'un capteur en mouvement (*figure 6*).

À la suite d'un relevé photogrammétrique, les photographies acquises sur le terrain sont ajoutées dans un logiciel de traitement dédié (*Agisoft Metashape, MicMac, OpenDroneMap, Pix4D, 3DMetrics, Meshroom*) à la génération de modèles 3D. Le logiciel utilisé au cours de ce stage est *Agisoft Metashape*. Au plus simple, il procède en 3 étapes de traitement : (1) l'alignement des photos ; (2) l'optimisation de l'alignement ; (3) la construction du nuage de points dense. Lors de l'alignement (1), grâce au détecteur SIFT (Scale Invariant Feature

Transform, *Lowe et al., 2004*), *Metashape* détecte et assemble les points homologues sur l'ensemble des photographies. Via aérotriangulation il estime par procédure itérative les paramètres internes et externes de la caméra, triangule les positions relatives en XYZ des points homologues, puis génère un nuage de points épars. L'optimisation de l'alignement (2) s'appuie sur des contraintes géométriques, tels que les paramètres externe de la caméra, les coordonnées de référence ou des éléments de tailles ou positions connues, pour limiter les déformations non linéaires et les erreurs d'estimations de positions des photographies. La construction du nuage de points dense (3) s'effectue depuis le nuage épars sur la base des positions estimées des caméras et de la génération de cartes de profondeur.

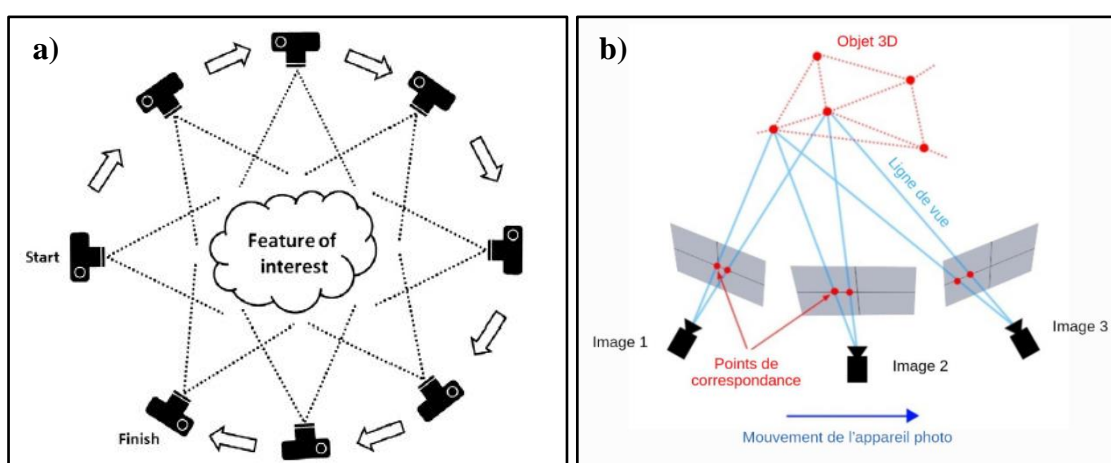


Figure 6. Schéma de la procédure théorique d'acquisition en photogrammétrie "Structure-from-Motion" (SfM) autour d'un objet d'intérêt (a), *Westoby et al., 2012*. Schéma d'acquisition en stéréophotogrammétrie sous-marine (b), *Abadie et Viala, 2018* (source https://www.merigeo.fr/content/download/116290/file/Poster_Abadie_Viala_merIGeo2018.pdf).

Pour optimiser les temps de traitement et de calculs lors de l'alignement, et minimiser considérablement les déformations et erreurs géométriques lors de la reconstruction, l'algorithme d'optimisation des équations de colinéarités doit avoir des « contraintes de position ». Ces contraintes peuvent être des points de contrôles ou "Ground Control Points" (GCPs) en anglais. Ces GCPs peuvent être des cibles dont les coordonnées (X, Y, Z) sont connues, ou des barres d'échelles de taille connue. La connaissance de ces coordonnées et barres d'échelle simplifie les équations de colinéarité lors du traitement. Ces étapes de géoréférencement sont chronophages, tant lors de l'acquisition sur le terrain (dépose, mesure et ramassage des cibles) que lors du traitement des données en laboratoire (pointage des cibles sur chaque image). Une autre méthode pour appliquer des « contraintes de positions » est de pratiquer la photogrammétrie SfM assistée par "Real Time Kinematic Global Navigation

Satellite System" (RTK GNSS) en enregistrant les positions des caméras avec une précision centimétrique aux différents points de prise de vue (*Jaud et al, 2020*). Cette méthode s'affranchit alors des contraintes liées aux GCPs.

Toutefois, en milieu subaquatique, une antenne RTK GNSS ne peut être utilisée. En effet le signal GPS est bloqué à l'interface air-eau. Pour pallier le problème, il faut alors développer une structure permettant à la fois à une antenne GPS de se maintenir en zone aérienne, tandis que les capteurs optiques sont immergés.

B) Prototype (low-cost et low-tech) et procédures standards d'acquisition et de traitement

1 – Prototype

Pour continuer dans la thématique des appellations grecques du projet TELEMAR, le prototype a pour nom POSEIDON, acronyme de Platform Operating in Shallow-water Environment For Imaging and 3D reconstruction. Son concept repose sur une ossature métallique enserrant une plateforme flottante (bodyboard, paddle, ou autre). Le schéma du prototype est visible en *figure 7a* et l'ensemble du matériel requis pour assembler le prototype et son prix sont résumés dans le *tableau 3*. Pour l'armature, le choix de profilés d'aluminium 20mm × 20mm à rainure interne de 6mm a été fait pour plusieurs raisons : le faible coût du matériau, la résistance à la corrosion, la simplicité de découpe des profilés lors de l'assemblage et la légèreté de l'ensemble pour son transport. L'armature est composée de quatre profilés horizontaux reliés ensemble en transversale par 2 profilés horizontaux (*figure 7a*). Quatre profilés verticaux complètent cet ensemble : un profilé de qui sert de base de fixation au GPS, et trois autres profilés verticaux pour assurer la stabilité de la plateforme. Deux profilés fixés chacun à la verticale sur le profilé inférieur de proue servent d'ancrage pour les capteurs optiques. Pour garantir la contrainte de positionnement des images, l'un de ces deux profilés est placé de sorte que le capteur soit directement dans l'axe du GPS. Pour consolider les profilés entre eux, des équerres de fixation en aluminium moulé sont chevillées à raison de deux écrous à tête marteau, deux rondelles plates et deux vis 6 pans à têtes hexagonales chacune aux rainures de la structure. Les profilés, les équerres de fixation et les écrous à tête marteau ont été achetés auprès de RadioSpare. Les rondelles plates et les vis 6 pans à têtes hexagonales sont trouvables dans n'importe quelle quincaillerie (Brico Dépôt dans le cas présent). Deux vis et deux écrous servent également à la fixation des trois supports GPS et GoPro.

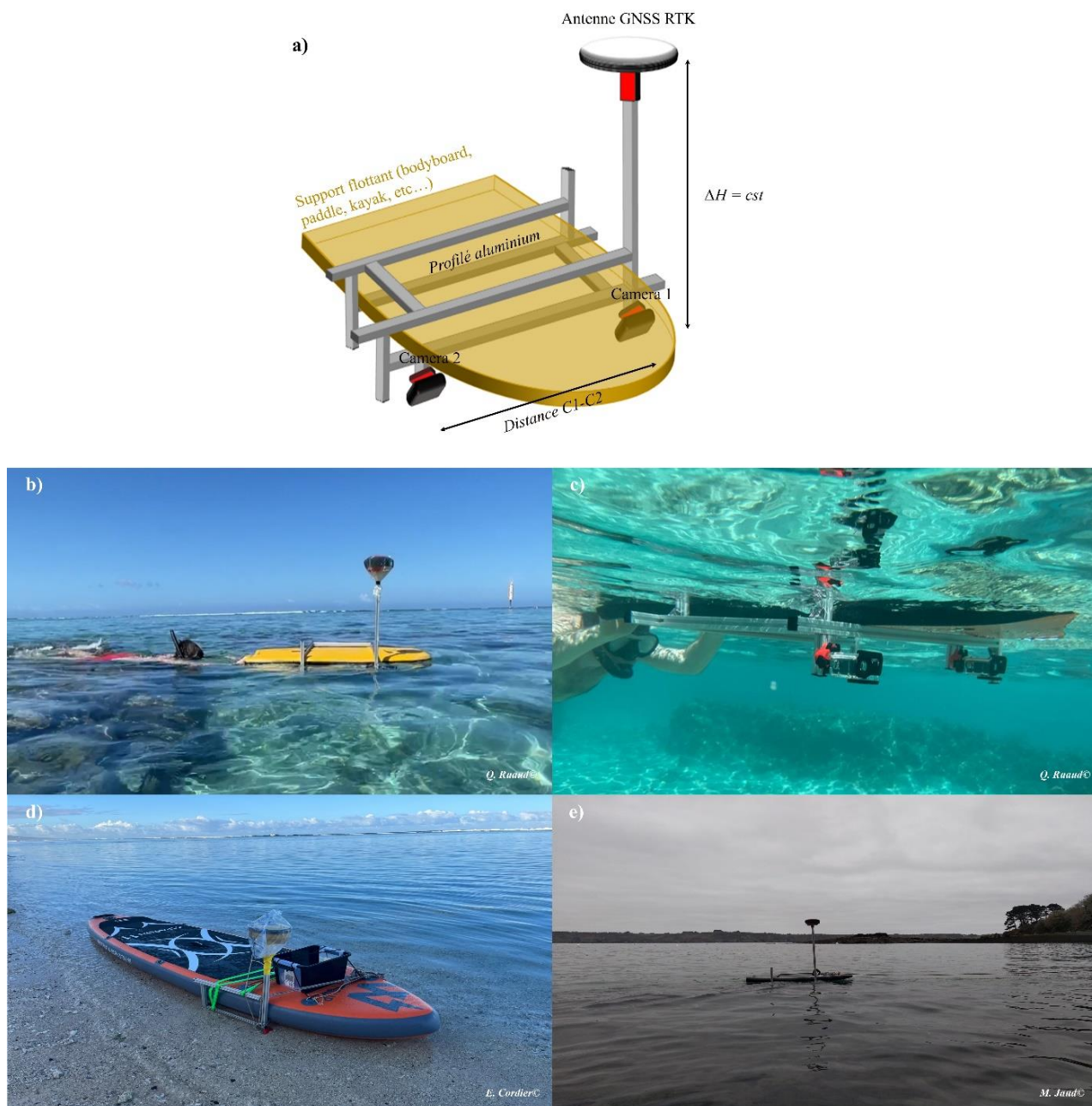


Figure 7. Schéma du prototype POSEIDON (a) et photographies de sa mise en action dans différents environnements : récif de l'Hermitage (a), (b) sous différents angles de vue ; et l'anse du Dellec (e). Différentes configuration de propulsion sont également visibles : déployé avec un bodyboard et à la nage (a), (b) ; déployé sur un paddle (d) ; déployé avec un bodyboard et tiré par une corde (e).

Ce matériel permet au prototype d'être entièrement modulable. Ainsi lorsqu'il faut enchâsser la plateforme flottante dans l'armature, les équerres de fixation sont dévissables pour pouvoir ajuster les profilés à l'épaisseur du support flottant. Quand ces derniers sont bien ajustés, il ne devrait y avoir aucun jeu entre la structure et la plateforme support. Point d'attention : en conséquence de son déploiement en eau de mer, une corrosion importante affecte les rondelles plates et les vis métalliques utilisés lors de ce stage. Il est recommandé de

traiter régulièrement la structure avec un agent antirouille, ou d'utiliser du matériel en acier inoxydable.

Le GPS choisi est un Sparkfun Rover RTK Facet fixé sur un embout imprimé en 3D. Il est connecté au réseau Centipede – dispositif mis en place par l'INRAE et accessible librement pour toute personne dans la zone de couverture (voir <https://centipede.fr/>) qui permet le positionnement RTK – lors des levés terrains. Ce type d'appareil dispose également du Bluetooth. Il est connecté à un smartphone (Crosscall dans le cadre de ce stage), depuis lequel une application de géopositionnement est utilisée (SW Maps dans le cadre de ce stage). Cela compose un ensemble fonctionnel qui permet tant d'enregistrer les coordonnées géographiques que de suivre le déplacement de POSEIDON sur un fond cartographique précis en temps réel. Pour les capteurs optiques, le choix est porté sur des GoPro Hero Black 7 dans leur caissons étanches fixés sur des supports amovibles produits sur mesure par imprimante 3D (*figure 7a*). Ce choix tient à la simplicité d'utilisation, la résilience et la modularité d'un tel ensemble. De plus, **Raoult et al. (2016)** ont réalisés un comparatif de différents capteurs photogrammétriques, et recommandent l'usage des GoPro tant dans le cadre de la science ouverte que pour le ratio performance–prix.

Tableau 3 : Matériel nécessaire à la fabrication de POSEIDON, avec le coût de chaque composant et le coût cumulé du prototype.

Matériel	Unité		Prix (€)
	Achetée	Utilisée	
GoPro Hero Black 7	2	2	550
Caissons étanches GoPro	2	2	50
Cartes SD 128 Go	2	2	30
Sparkfun Rover RTK Facet	1	1	600
Bodyboard	1	1	30
Profilés aluminium 20mm	3 x 3 m	1 x 50 cm	91
		4 x 70 cm	
		2 x 40 cm	
		3 x 15cm	
		2 x 6cm	
Embouts plastique	1 sachet de 10	9	10
Équerres de fixation	1 sachet de 20	14	12
Écrous à tête marteau	4 sachets de 10	34	19
Boulons poêlier	1 boîte de 50	34	13
Rondelles plates	1 boîte de 100	28	6
Support GoPro	2	2	/
Support GPS	1	1	/
			1411
			Total

2 – Procédure standard d'acquisition

Le déploiement de POSEIDON est simple. La procédure est résumée sous forme de schéma en *figure 8*. Une fois le prototype assemblé et l'armature ajustée à la plateforme flottante, il suffit de fixer le Rover RTK sur son support. Une fois le GPS fixé, il est allumé. Le smartphone entre ensuite en jeu. Les données mobiles sont activées – pour capter le signal satellite et celui de la base RTK – ainsi que le Bluetooth. Le smartphone est connecté au Rover via SW Maps. SW Maps sert également à se connecter à la base RTK (le réseau Centipede au cours de ce stage) la plus proche. Toujours sur cette application un projet est créé pour paramétrer l'enregistrement de la trajectoire de POSEIDON avec un point par seconde. Cela crée une trace en temps réel sur le fond cartographique intégré à SW Maps, ce qui permet de corriger le cap en temps réel. Une fois initialisé, il faut attendre que le Rover soit en fixe, c'est-à-dire que la précision centimétrique RTK soit active (se manifeste par un point vert sur l'interface de SW Maps).

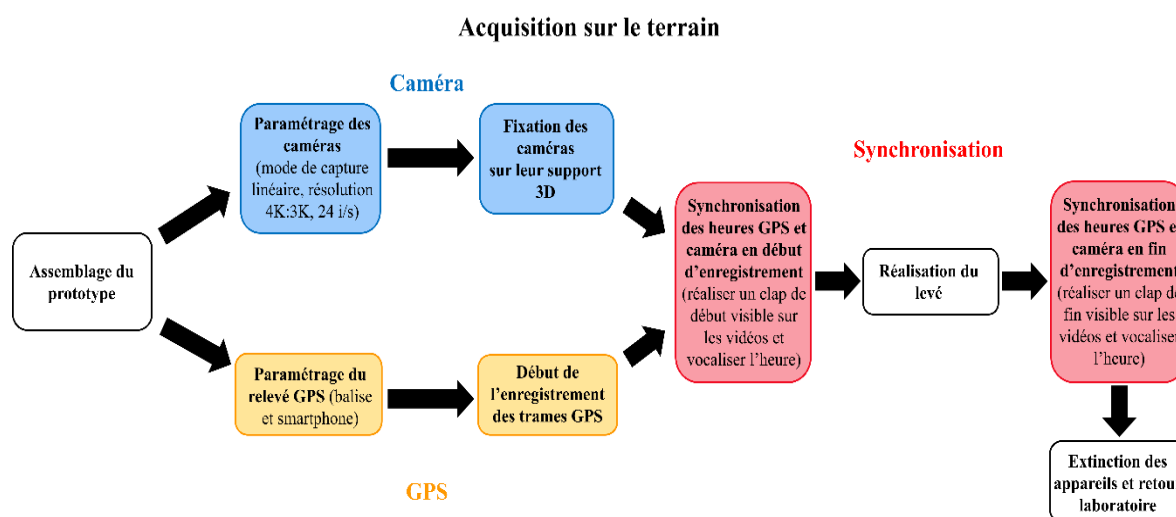


Figure 8. Schéma des différentes étapes de la procédure standard d'acquisition élaborée au cours de ce stage, dans le but de réaliser un levé reproductible par tout utilisateur. Les cases en rouge représentent les 2 étapes les plus cruciales pour permettre un traitement des données rapides et efficaces.

Les GoPro sont paramétrées pour une acquisition de 24 images/s en 4:3 linéaire, c'est-à-dire en que la profondeur de champ est uniforme pour éviter toute déformation des bords de la vidéo. La vidéo est découpée automatiquement en fichiers de 8min52s (soit 3,73 gigaoctets de données) une fois le bouton-déclencheur enfoncé. Les GoPro sont ensuite fixées sur leurs supports respectifs.

Une fois le projet créé, l'enregistrement des coordonnées lancé et la capture vidéo mise en route, il faut procéder à l'étape cruciale pour la réussite de la méthode, à savoir la synchronisation des données vidéos et GPS. Pour cela, l'écran du smartphone – où apparaît l'heure GPS – est filmé. Un clap de début est ensuite accompli dans le champs de vision des caméras, et l'heure est déclamé de façon suffisamment intelligible pour être capté par les GoPro. Ainsi 3 repères temporels sont disponibles pour la synchronisation.

Une fois ces étapes préliminaires parachevées, la mise à l'eau peut avoir lieu. L'acquisition repose sur un fort taux de recouvrement entre les différentes images. Pour assurer cela et couvrir la plus grande zone possible, il est nécessaire d'effectuer des lignes de levé parallèles (*figure 9*), ou à défaut d'au moins effectuer un aller-retour sur le transect levé. Tout au long de la manœuvre, il s'avère judicieux de vérifier de temps à autre que le Rover est toujours en fixe. Si possible, il est optimal d'essayer de maintenir une vitesse constante (tâche simplifiée avec des palmes). En fin d'acquisition, une fois hors de l'eau, la synchronisation est de nouveau effectuée par un clap et une déclamation de l'heure GPS. Ensuite il ne reste qu'à éteindre les caméras et le GPS.

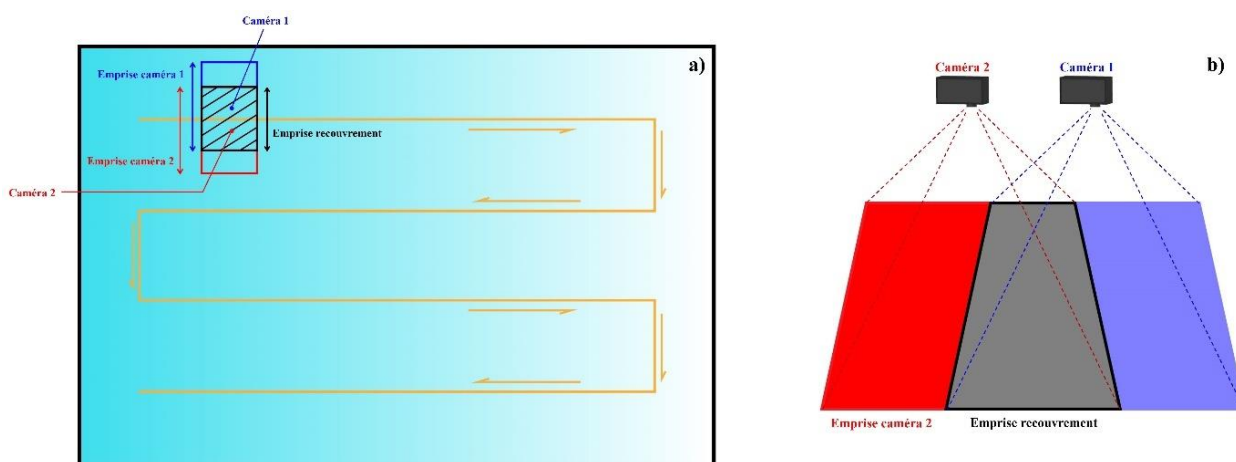


Figure 9. Schéma de la trajectoire idéale de la plateforme et de l'emprise des caméras lors de l'acquisition d'une zone (a) ; schéma 3D de la notion de recouvrement des caméras (b).

Au cours de ce stage, un abaque de recouvrement entre les images selon la profondeur et l'espacement intercaméras a été produit (*figure 10*). Il a pour vocation d'être employé par de futurs utilisateurs. Il est voué à optimiser l'espacement entre les caméras selon la profondeur attendue lors de l'acquisition. A noter qu'à partir de 80% de recouvrement (minima recommandé en photogrammétrie SfM), il est possible d'augmenter la distance intercaméras pour augmenter l'emprise des images sur le fond et donc accroître la taille de la zone étudiée.

Cet abaque a été calculé à partir de l’emprise au fond qu’a une GoPro, avec une focale de 2,92 mm. Cela correspond à une focale équivalente de 16 mm et une ouverture équivalente de f/15.7.

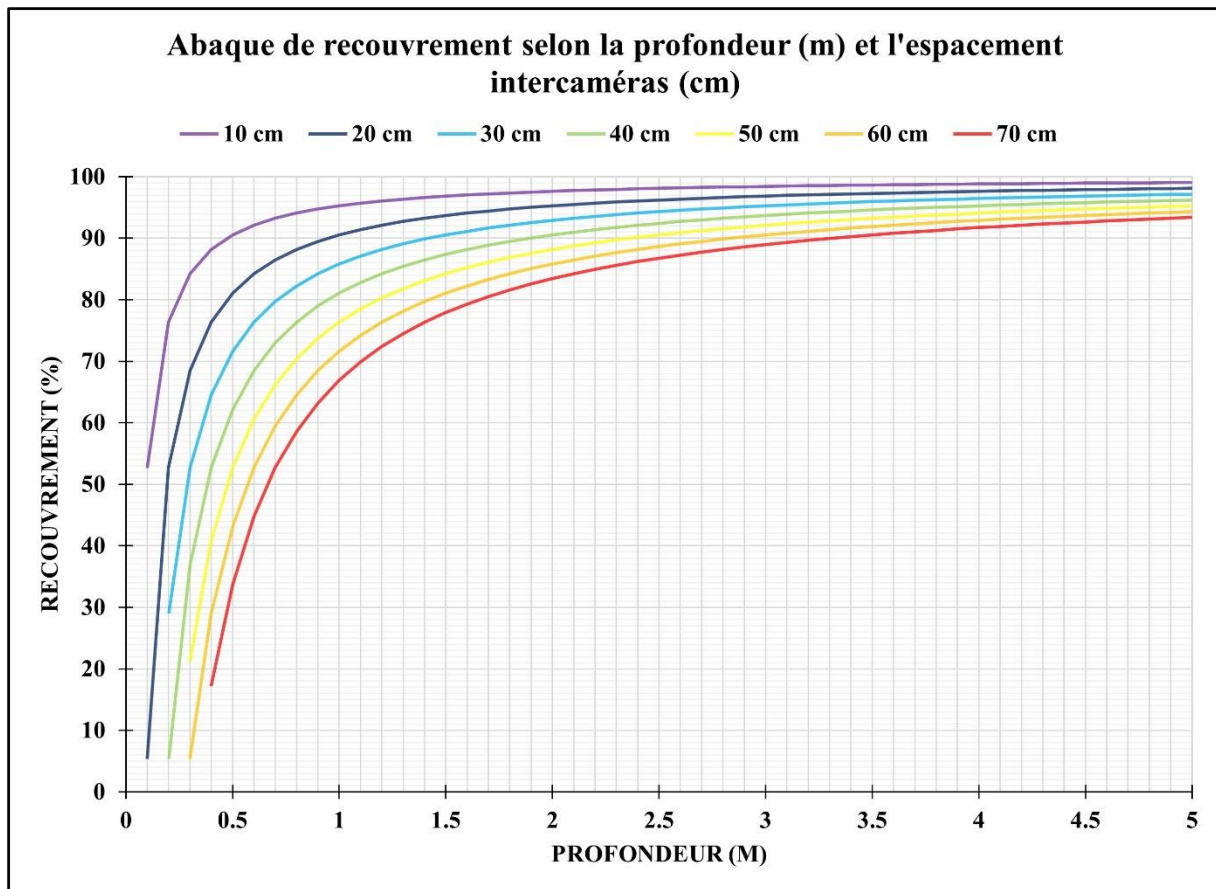


Figure 10. Abaque de recouvrement entre les images issues des deux caméras selon la profondeur (m) et l’espacement intercaméras (cm). Les calculs ont été réalisés à partir de l’emprise de chaque caméra sur le fond. L’emprise a elle-même été calculée à partir de la profondeur, de la focale utilisée (ici une de 2,92 mm, correspondant à celle utilisée par une GoPro Hero 7 Black) et de la taille de l’image sur l’appareil.

3 – Procédure standard de traitement

Pour exploiter les données levées et reconstruire les modèles sous *Metashape*, il est nécessaire de formater les données acquises. Toute cette procédure est résumée sous forme de schéma en *figure 11*. Deux sous-chaînes de traitement ont été conçues : (1) une pour les images ; (2) une pour les données GPS.

(1) Concernant les images, la procédure est simple. Un visionnage des vidéos est requis pour déterminer les bornes temporelles d’intérêt de l’acquisition (*figure 10*). Une routine Python a été codée au cours de ce stage et permet d’extraire les images d’une vidéo à partir des numéros d’image dans la vidéo. Le décompte des images débute à 0 et il y a 24 images par secondes. Une première extraction est effectuée à 1 seconde de fréquence. Cela signifie que les

numéros d'images sont calculés dans un tableur par incrément de 24 (*figure 10*). L'incrémentation des numéros est ajustable pour augmenter la fréquence d'extraction (ex : $f = 0.25$ seconde et 24 images/s, donc $\text{incrément} = 0.25 \times 24 = 6$). Une fois les numéros d'images déterminés, l'extraction est lancée et dure en moyenne 10 à 15 min (*figure 10*).

(2) Concernant les données GPS, une automatisation du traitement est développée sous Python. Depuis les trames NMEA, sont extraites les lignes possédant les informations d'intérêts, à savoir les trames débutant par le sigle « GNGGA » (France) ou « GPGGA » (La Réunion) sous forme de fichier CSV (*figure 10*). Il est parfois nécessaire à ce moment-là de vérifier le fichier CSV afin d'éliminer les trames superflues, c'est-à-dire celles hors des limites temporelles désirées (d'après la synchronisation GPS-Caméra au moment de l'acquisition, voir *figure 9*) et les trames erronées. Cette étape peut se révéler gourmande en temps si la réception GPS a connu des ratés. Dans les trames restantes, les informations recherchées (heure, latitude, longitude, hauteur ellipsoïdale, correction de hauteur ellipsoïdale nécessaire pour calculer l'altitude selon la zone) sont extraites via une routine Python selon leur numéros de colonnes dans le fichier CSV dans un nouveau fichier CSV (*figure 10*). L'enregistrement brut de l'heure GPS se fait sous format HHMMSS. Pour rendre ce format plus lisible, quelques lignes de code suffisent à le transformer en HH:MM:SS (*figure 10*). L'enregistrement des coordonnées géographiques brutes se fait en format Degrés Minutes Décimales (DMD). Ce type de format n'est pas pris en compte par les logiciels photogrammétriques, et n'est réellement utilisé que pour l'enregistrement de données brutes. Un court programme Python a été écrit pour remédier à la situation. Il convertit les DMD en Degré Minutes Secondes (DMS) ou Degré Décimaux (DD) (*figure 10*).

Une fois les données GPS correctement traitées, et les images extraites, il faut procéder à l'étape cruciale sur laquelle repose l'ensemble de la méthodologie, à savoir l'attribution des coordonnées à leurs images respectives. Pour cela, les images extraites à une seconde sont injectées dans *Metashape* puis la liste des caméras est exportée sous format de fichier texte. Ce fichier est ouvert avec un tableur ou un outil type « Bloc-Note » ou « Notepad++ ». Chaque image correspond à une heure GPS précise. Cette heure est retrouvée depuis le visionnage vidéo et est calculée à partir de la synchronisation enregistrement GPS et capture vidéo sur le terrain (voir *figure 9*). Les informations de latitude, longitude et altitude y sont ajoutées et alignées par « copier-coller » en face des numéros de caméras. Une vérification sur QGIS est effectuée pour s'assurer de la superposition entre les positions assignées aux caméras et la trace du relevé. Si tout concorde, il est possible d'extraire de nouvelles images à une fréquence supérieure à 1

image/s (qui ne seront pas géoréférencées) pour compléter la reconstruction 3D. Dans le cas contraire, la procédure est répétée jusqu'à concordance.

Tableau 4 : Paramètres utilisés sur Metashape pour la production des modèles 3D (nuages de points denses et modèles numériques d'élévation).

ÉTAPES DE PROCESSING	PARAMÈTRES
(1) Alignement	Précision : Haute Présélection générique : Oui Présélection par références : Source Limite de points-clés : 40 000 Limite de points-clés par Mpx : 1 000 Limite de points de correspondance : 10 000 Exclure les points de correspondance fixes : Oui Correspondance d'images guidée : Oui Ajustement progressif du modèle de caméra : Non
(2) Optimisation de l'alignement	Par défaut
(3) Génération du nuage de points denses	Données sources : Nuage épars Filtrage de la profondeur : Aggressif Échantillonnage uniforme Qualité : Haute Réutilisation des cartes de profondeur : Oui Calcul de la confiance des points : Oui
(4) Génération du MNE	Données sources : Nuage dense Qualité : Haute Interpolation : Oui Résolution : Automatique
(5) Génération des MNE à différentes résolutions	Filtrage du MNE initial à la résolution souhaitée (exprimée en mètre)

Une fois le jeu de données prêt, un protocole classique est appliqué dans *Metashape*. Un traitement par lot est lancé avec les étapes suivantes: (1) l'alignement ; (2) l'optimisation de l'alignement ; (3) la génération du nuage de points dense ; (4) la génération du modèle numérique d'élévation à résolution brute (MNE) ; (5) la génération des MNE à différentes résolutions (1cm, 2cm, 5cm, 10cm, 50cm). La configuration de ces différentes étapes se trouve dans le *tableau 4*. L'ensemble du traitement peut être une activité très chronophage, selon la puissance de l'ordinateur et les GPU (« Graphical Processing Unit ») disponibles. Les MNE sont ensuite exportés dans un SCR projeté (coordonnées métriques), comme le Lambert 93 en France, ou le RGR92 / UTM zone 40S à La Réunion

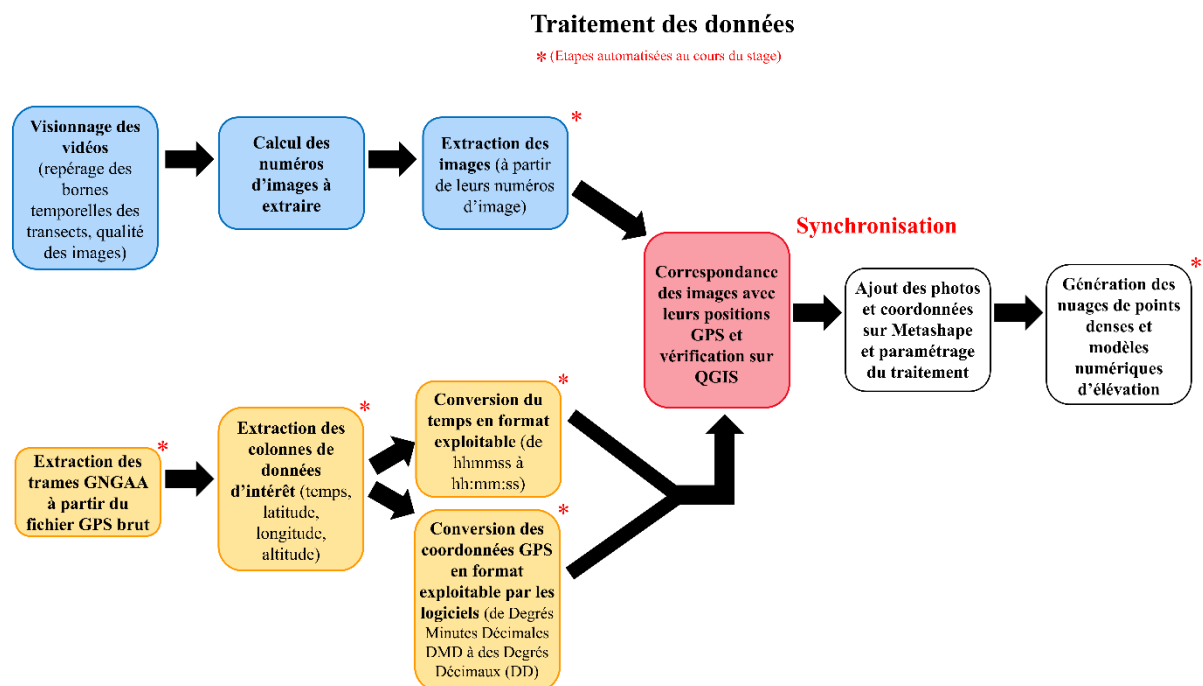


Figure 11. Schéma des différentes étapes de la procédure standard de traitement élaborée au cours de ce stage, dans le but d'optimiser des traitement libre d'accès et d'assurer une reproductibilité par tout utilisateur.

4 – Calculs de rugosité

Les différents MNE obtenus sont ensuite intégrés dans un projet QGIS, qui sert de base pour leur analyse. Les calculs de rugosité effectués au cours de ce stage se fondent sur 3 méthodes distinctes. (1) La première est directement implémentée sous QGIS et correspond à l'algorithme développé par *Riley et al. (1999)* sous le nom d'indice de rugosité topographique (« Topographic Ruggedness Index » en anglais). Il calcule les différences absolues d'élévation entre un pixel central et ses voisins dans un rayon de 3 pixels (*figure 12a*), puis moyenne ces différences. (2) La seconde est accessible sous forme de module complémentaire téléchargeable sur QGIS. Cet algorithme recherche la valeur d'élévation la plus élevée et la plus faible dans

un rayon de 5 pixels (*figure 12a*) autour d'un pixel central. La rugosité qu'il calcule ensuite correspond à la différence de ces deux valeurs (**Wilson et al., 2007**). (3) La troisième est une évolution de l'algorithme de **Jenness (2004)** développé pour mesurer la rugosité à partir de la distance 3D sur la distance 2D d'un transect sur ArcGIS (et indisponible sur QGIS). Sur cette base **Fukunaga et al. (2019)** ont développé un code R qui calcule différents descripteurs physiques à partir d'un MNE, dont la complexité structurelle depuis le ratio de la valeur surfacique 3D sur celle planaire 2D (*figure 12b*).

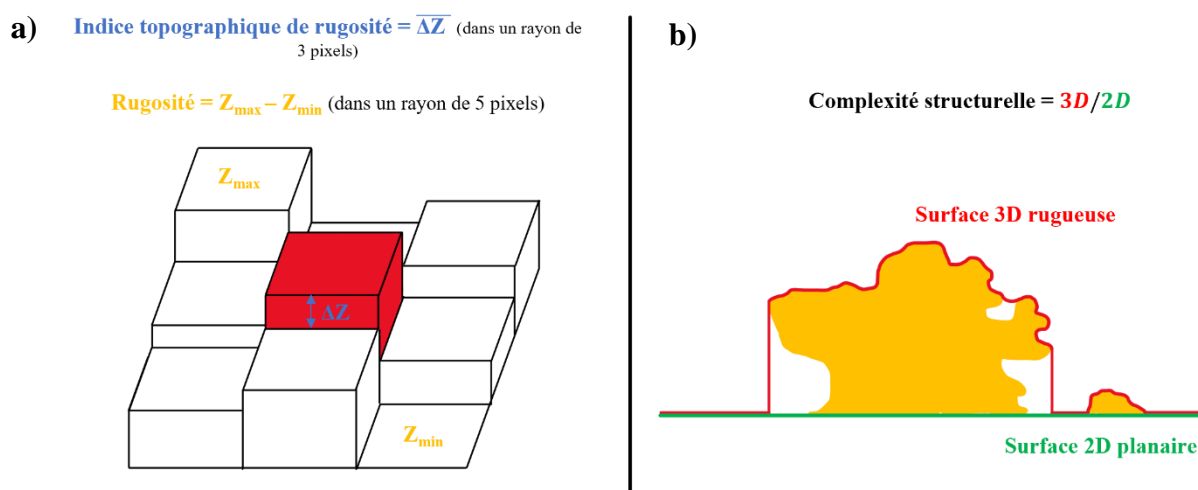


Figure 12. Schéma des différentes méthodes de calculs de la rugosité : **Indice Topographique de Rugosité** (Riley et al., 1999) (a) ; **Rugosité** (Wilson et al., 2007) (b) ; **Complexité structurelle** (Fukunaga et al., 2019) (c).

C) Tests et levés réalisés *in situ*

1 – L'anse du Dellec

POSEIDON a été assemblé le 01/02/2023. Son premier test *in situ* a été réalisé le 02/02/2023. L'acquisition s'est faite au Dellec lors de la marée montante (10h) en absence de houle. Le levé s'est effectué en deux transects longshore (un à 40-60 cm de fond, un à 1,50-2 m de fond) et trois transects cross-shore. Malheureusement la nébulosité était de 100% en ce jour (<https://services.meteofrance.com>), ce qui aboutit à une mauvaise luminosité. Ce phénomène était couplé à une concentration de matières en suspension empêchant une vision claire au-delà de ~50cm.. Les vidéos capturées ce jour-là présentent toutes une mauvaise qualité d'image, ce qui entrave l'alignement des photos et la génération des modèles 3D. À la suite de ce levé, il est recommandé de n'effectuer les acquisitions qu'en condition lumineuse appréciable, et surtout d'éviter les eaux turbides.

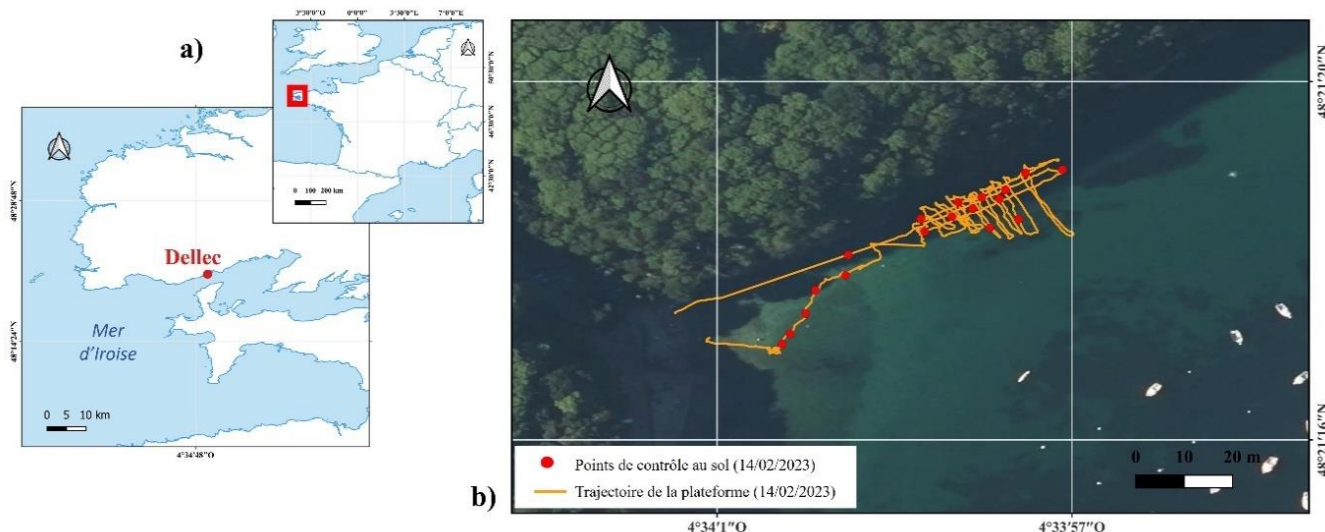


Figure 13. Cartes globale de la France et de l'emplacement de l'anse du Dellec (a). Carte situant les levés des 14/02/2023 et 20/02/2023 au cours du stage (b).

Une seconde acquisition de bathymétrie optique a été réalisée le 14/02. Les conditions de mer étaient les suivantes : houle ouest de 1 m et marée montante pour une profondeur sur site de 2m en moyenne. Le début de l'acquisition bathymétrique est enregistré à 9h39m30s heure locale (soit 8h39m30s GMT) avec 5 vidéos de 8min52 et 1 de 8min03 soit 43min26s de levé bathymétrique. La trajectoire suivie est en bord de falaise, avec 3 transects cross-shore espacés de 2m chacun (*figure 13b*) et 10 transects longshore espacés de 2.3m en moyenne chacun (*figure 13b*). La distance totale parcourue est de 506.5m. En tout 4170 images ont été extraites des vidéos. Les données ont ensuite été pleinement exploitables. Le formatage des données a duré ~10h, et le temps de traitement sur *Metashape* a été de 28h22min. Dans le but de valider la méthode, une comparaison entre ce levé sous-marin et un levé terrestre est à réaliser.

L'acquisition topographique terrestre a eu lieu le 20/02. Cette date a été choisie du fait des forts coefficients (105) de vives-eaux durant laquelle la zone acquise le 14/02 est émergée sur un estran de 20m. 18 points de contrôles sous la forme de cibles sont disposés au sol le long du parcours du 14/02 (*figure 13b*). Ces cibles agissent comme contraintes de positions lors de l'alignement sur *Metashape*. Les coordonnées de ces cibles sont collectées via le Rover RTK Facet utilisé avec POSEIDON et enregistrées par SW Maps sur le Crosscall. Le capteur optique utilisé est l'une des GoPro placée au bout d'une perche GoPro de 3m. La caméra est réglée sur le mode « Photos en accéléré » avec une capture toutes les demi-secondes. La perche est tenue de façon à ce que la GoPro soit en visée verticale et suffisamment inclinée pour éviter que

l'opérateur apparaisse sur les images. La zone du 14/02 est de nouveau parcourue à la marche. Une fois l'acquisition achevée (550 photos), les cibles sont ramassées. La manipulation dure en tout 1h15 sur site.

Les coordonnées géographiques (WGS84) acquises sont converties en coordonnées projetées métriques (RGF Lambert 93) via le logiciel Circé (<https://geodesie.ign.fr/index.php?page=circe>). Sur *Metashape*, les photos sont ajoutées, suivies des coordonnées Lambert 93 des cibles. Un premier alignement à précision basse est lancé. Il faut ensuite pointer les cibles sur chaque photo pour fournir les contraintes de positions. Ce pointage des cibles sur les photos est une activité très chronophage : 5h pour 550 photos, avant de définir des masques sur le ciel et l'eau afin qu'ils ne soient pas en compte lors du traitement. L'alignement est relancé à haute précision, suivi de la génération du nuage de points dense et d'un modèle numérique d'élévation.

Afin de comparer les modèles générés à la suite de ces deux acquisitions photogrammétriques, le logiciel *CloudCompare* a été utilisé. Il s'agit d'un logiciel libre de droit créé spécifiquement pour l'analyse de nuages de points dense, dans le but de les analyser, et notamment d'en extraire des différences de distance. *CloudCompare* met à disposition l'outil Segmentation, qui permet d'isoler des zones d'intérêt. Cet outil est utilisé pour délimiter des zones de comparaison d'emprise égale sur les deux nuages, notamment pour éviter que des zones reconstruites sur l'un d'eux et non sur l'autre ne viennent biaiser la comparaison. Dans le cas présent, c'est la zone de levé topographique terrestre qui est segmentée depuis la zone acquise par POSEIDON pour assurer une comparaison nette (*figure 15c*).

CloudCompare offre différentes solutions pour calculer des différences de distances entre nuages de points. Celle employée au cours de ce stage correspond à une estimation des distances absolues entre 2 nuages de points : c'est le *Cloud-to-Cloud* ou C2C. Le logiciel fonctionne en calculant les distances (minimale, moyenne et maximale) entre un nuage de référence, et le nuage comparé dont les écarts de distance par rapport à la référence sont recherchés. Le résultat s'exprime sous la forme d'un champ scalaire appliqué au second nuage. Ici, le nuage de référence correspond à l'acquisition topographique terrestre du 20/02/2023, tandis que le nuage comparé est celui du levé bathymétrique du 14/02/2023.

2 – L'Hermitage

Une première manipulation a été programmée le 10/03. Elle a eu lieu dans la dépression d'arrière-récif. En tout, 10 transects cross-shore de 60 ± 10 m sur 3 transects longshore de 35 ± 5

m ont été parcourus pour une distance totale de 744m à la nage. L'acquisition a débuté à 8h35m50s heure locale soit 5h35m50s GMT. Il n'y avait aucune houle lors de l'acquisition et une profondeur d'eau variant entre 1 et 0.9m. En tout, 6 vidéos ont été enregistrées : cinq de 8min52s, une de 42s, soit un total de 45min02s d'acquisition, avec 19min32 de temps de la mise à l'eau et de recherche du site d'acquisition. La durée réel du levé bathymétrique est de 25min30s. Les données ont été traitées mais le modèle est incomplet par suite d'un faible recouvrement de la zone. Il y a un trop grand écart (3 à 6m) entre chaque transect. Cependant un transect presque continu (46,2 m de long) est acquis sur la trajectoire observable en orange sur la *figure 14b*.

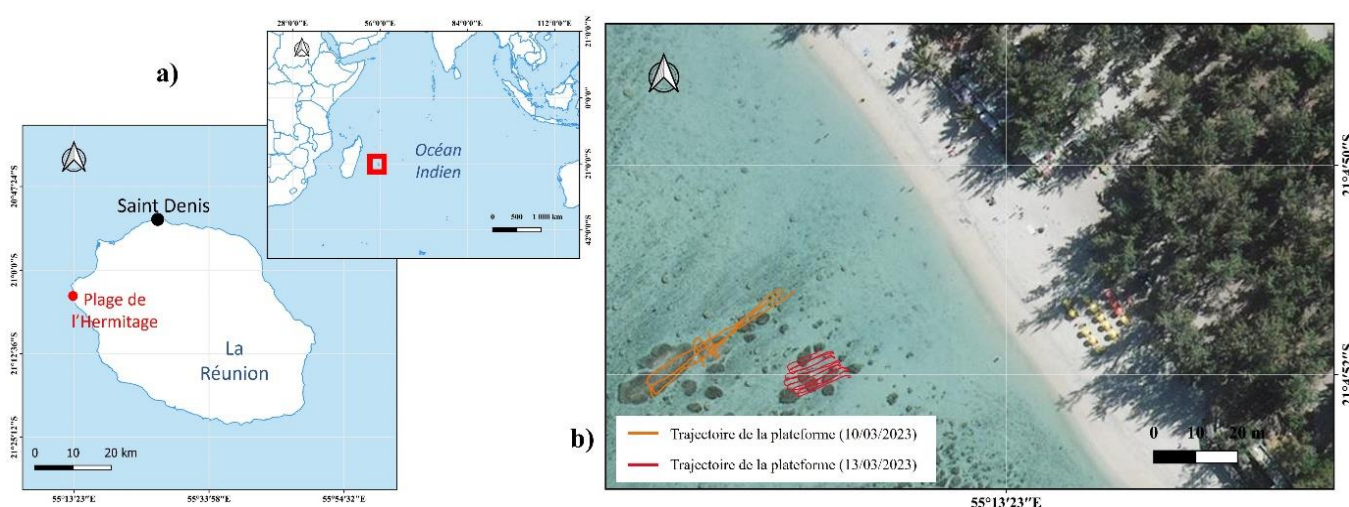


Figure 14. Cartes globale de La Réunion et de l'emplacement de la plage de l'Hermitage (a). Carte situant les levés des 10/03/2023 et 13/03/2023 au cours du stage (b).


Une seconde sortie de terrain a eu lieu le 13/03 toujours dans la zone de la dépression d'arrière-récif. Les conditions de mer ce jour étaient les suivantes : absence de houle, marée descendante, pour une profondeur sur site oscillant entre 1 et 0.9m. L'acquisition a commencé à 7h53m30s heure locale, soit 4h53m30s GMT. 7 vidéos ont été filmées : six de 8min52s et une de 2min soit 56min12s d'acquisition, desquelles sont décomptées 12min27s pour le temps de chercher la zone de test et de préparer le projet SW Maps. Le levé bathymétrique effectif est de 43min45s. La distance parcourue est de 898m et la trajectoire de POSEIDON est visible en rouge sur la *figure 14b*. 4 tests différents ont été mis en place lors de ce levé en suivant la même trajectoire, avec un changement des paramètres externes de la caméra entre chaque test. Ces paramètres sont compilés dans le *tableau 5*.

Les 4 tests se répartissent comme-suit : **test 1** : 8min07s pour 204m ; **test 2** : 10min14s pour 247m ; **test 3** : 10min02s pour 252m ; **test 4** : 6min02s pour 195m. Ces temps cumulés

s'élèvent à 34min25s de levé stricto-sensu, ce qui signifie qu'il y a 9min20s de temps « perdu » entre les différents tests pour la reconfiguration des caméras dont 4min50s pour le passage entre le **test 3** et le **test 4** (sortie d'eau pour dévisser et rapprocher le support caméra). Le protocole de formatage de la donnée s'est étalé sur 2 journées de travail de 8h (une demi-journée de 4h par test). Les temps de traitements *Metashape* ont été de : **test 1** : 5h14min pour 2863 photos ; **test 2** : 7h01m pour 3732 photos ; **test 3** : 7h33min pour 3524 photos ; **test 4** : 6h10min pour 2630 photos.

Tableau 5 : Un récapitulatif des paramètres externes des caméras des différents relevés effectués le 13/03/2023 à l'Hermitage. Le code couleur **Test 1**, **Test 2**, **Test 3**, **Test 4** sera conservé pour la suite du rapport.

Delta_dc (cm) = distance intercaméras
Angle exprimé en degré



Test (n°)	Configuration plateforme		Trajectoire		
	Delta_dc (cm)	Angle (°)	Aller-retour	Nombre radiales	Distance inter-radiales (m)
1	58	Gauche : 23 Droite : 25 ± 2	Oui	8	1.025
2	58	Gauche : 23 Droite : Nadir	Oui	9	0.925
3	58	Gauche : Nadir Droite : Nadir	Non	10	0.8855
4	40	Gauche : Nadir Droite : Nadir	Non	8	1.040625

Une autre sortie de terrain a eu lieu le 28/04 sur le transect TELEMAT défini dans la *figure 2*. À cette occasion, la configuration de POSEIDON a été modifiée pour réaliser le levé en paddle (voir *figure 7d*). Le matériel d'acquisition a également changé : des GoPro Hero Black 8 ont été utilisées et le GPS a été basculé sur un vieux modèle de GPS : Topcon HiPer V GNSS Receiver avec son pad de contrôle FC-500 sur le terrain (impossible à utiliser autrement) et le logiciel d'exploitation Topcon MAGNET Field sous Windows. Le Topcon est programmé pour enregistrer un point toutes les secondes. Le levé a été accompli durant la marée montante, avec un début de houle sud-ouest de 1m rentrante et une profondeur d'eau de 1m. Ont été acquises 15min44 de vidéo (1 vidéo de 8min52 et 1 vidéo de 6min52) sur un transect de 27 m au plus long avec 4 radiales pour une distance totale parcourue de 106,5 mètres. A posteriori, un problème dans la connectique du Topcon a été découvert, ce qui a causé des pertes

récurrentes le signal satellite et Centipede et à s'y reconnecter en continu. Cela a créé des lacunes dans la capture des données GPS. Or le Topcon n'enregistre pas l'heure lors de l'export des données, mais uniquement le numéro du point. Ces lacunes et cette absence de borne temporelle cause un décalage dans l'attribution des coordonnées aux bonnes images. Ce jeu de données est exploitable uniquement en relatif (c'est-à-dire sans coordonnées), ce qui n'est pas le but de la méthode développée au cours de ce stage.

Un dernier levé bathymétrique a été effectué le 07/06 sur le platier récifal en suivant le transect TELEMAT (figure 2a). Il s'est déroulé en compagnie de *Sophie Bureau* et *Isabel Urbina-Baretto*, de l'UMR Entropie, à 15h30 heure locale (soit 11h30 GMT) lors de la marée montante, avec une profondeur sur site oscillait de 0.8 à 0.3m. Un transect aller-retour cross-shore de 166 m répété sur 3 radiales espacées de 1.2 m chacune a été acquis, soit une distance totale parcourue de 664m. La configuration caméra était semblable à celle du test 2 du 13/03 (voir tableau 5). Un régime de houle sud-ouest de 1.6 m était présent tout au long du levé. Cela a induit des courants importants lors de la manipulation, mais un cap relativement stable a été maintenu grâce à la participation de Sophie et Isabel qui servaient de balise de repère. En tout, 33min14 de vidéo ont été capturées (3 vidéos de 8min52 et 1 vidéos de 6min38). Transect cross-shore de 166m (sur les 200m que fait le transect TELEMAT) réalisé sur 3 radiales espacées de 1.5m. À l'heure où ce rapport est écrit, cette acquisition n'a malheureusement pu être traitée dans son intégralité.

IV. RÉSULTATS

A) Validation de la méthode au Dellec

Sur le levé au Dellec, l'alignement de la bathymétrie optique s'appuie 6 455 927 points de correspondance. 4088 des 4170 photos ont été alignées, soit un alignement réussi à 98.03%. L'erreur moyenne de positionnement des caméras est estimée par *Metashape* à 2.62 m, ce qui n'est pas aberrant considérant l'erreur de précision d'un mètre configurée en entrée des images gauches couplée à la houle de 1m. Il en ressort un nuage de points dense de 453.070.503 points pour une surface de 659m² (figure 15b). La résolution initiale du nuage de points dense et du MNE est millimétrique avec 1.63 mm/pix, pour une densité de points de 37.8 points/cm². Le modèle est alors considéré comme très résolu.

L'alignement du modèle de topographie terrestre résoud 196 855 points de correspondance pour 537 photos alignées sur 550, soit un alignement réussi à 97,63%. L'erreur

moyenne de positionnement des points de contrôle est de 6.31 cm. En sortie de traitement, le nuage de points dense contient 436 343 004 points couvrant une surface de 2610m² (*figure 15a*). La résolution initiale du nuage de points dense et du MNE est millimétrique avec 3.61 mm/pix, pour une densité de points de 7.68 points/cm².

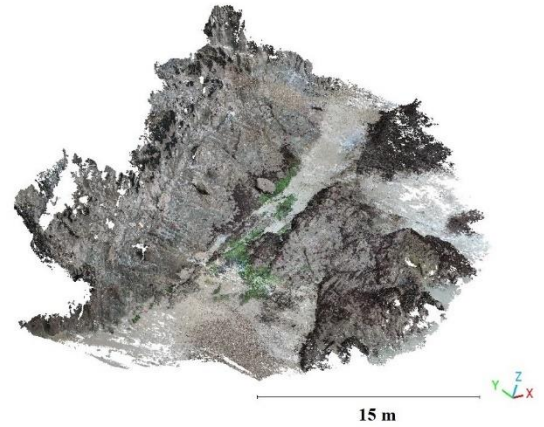
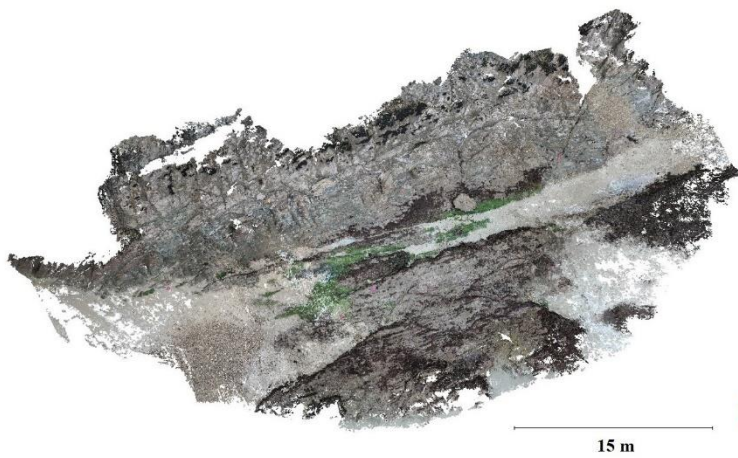
Sur la *figure 15*, les falaises et structures rocheuses sont bien distinctes tant sur le levé bathymétrique optique que sur le levé topographique. La rugosité et les aspérités du relief sont bien reconstruites. Sur les deux modèles, le fond sableux est uniforme et simple, quand il n'est pas absent. Cela est dû à un faible nombre de points homologue inventoriés par Metashape sur la zone. Cette zone est moins considérée par *Metashape* lors de la génération 3D. Les algues sont bien visibles sur le levé topographique : elles forment un tapis vert au centre du nuage de points dense du 20/02. En revanche, les algues ne sont pas reconstruites sur le levé bathymétrique : leur caractère mobile dans l'eau signifie que les points homologues ne peuvent être identifiés du fait de leur changement continu de position. Elles génèrent néanmoins un bruit discret de sous la forme de zones ombrées, de points noirs ou tout simplement de trous parsemés sur le fond (*figure 15b*). Aucun effet d'ombrage de la plateforme n'est observable.

La méthode C2C donne un champ scalaire (*figure 15c*) allant de 0,000 m (pas d'écart entre les nuages de points) à un maxima de 0,600 m (soit 60 centimètres d'écart). Ces valeurs maximales extrêmes sont localisées en une même zone, à savoir la falaise. Cet écart peut s'expliquer par un faible rendu de ce pan de falaise lors de l'acquisition topographique aérienne, mais non lors de l'acquisition bathymétrique optique. En ce sens, cela augmente la distance pour les points du nuage comparé (bathymétrique) vis-à-vis du nuage de référence (topographique), aboutissant à ces disparités de distances absolues. Ces valeurs peuvent être considérées comme non-significatives. Dans l'ensemble, le reste de la zone présente une couleur bleue électrique vive, appliquée aux distances proches de celle minimale, à savoir 0 m, notamment sur les zones sableuses. Les distances un peu plus élevées observables en vert au niveau des fonds rocheux (falaise et platier) peuvent s'expliquer par la couverture algale qui se sert du substratum rocheux comme point de fixation. Cela augmente l'élévation du « plancher » lors de l'acquisition sous-marine (les algues sont alors dressées et flottent dans la colonne d'eau, ce qui génère du bruit lors des attributions de position des points du nuage dense), tandis que l'élévation diminue lors de l'émersion, les algues se retrouvant à même le sol.

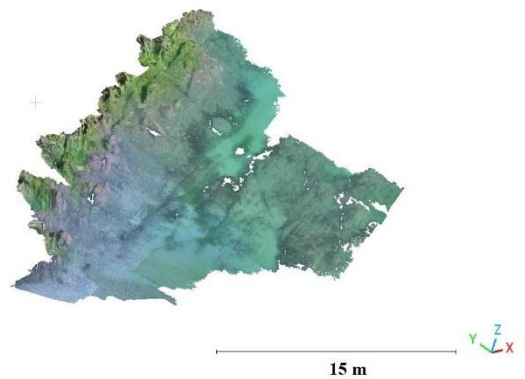
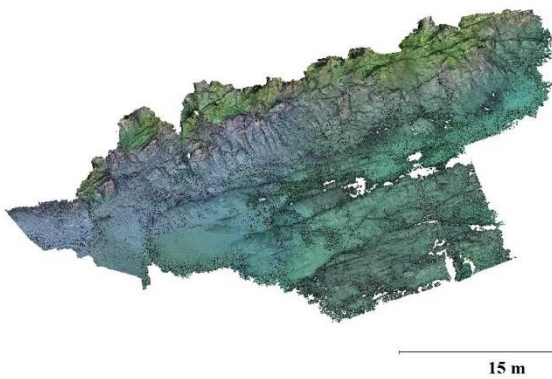
Modèle topographique à marée basse

Vue de dessus

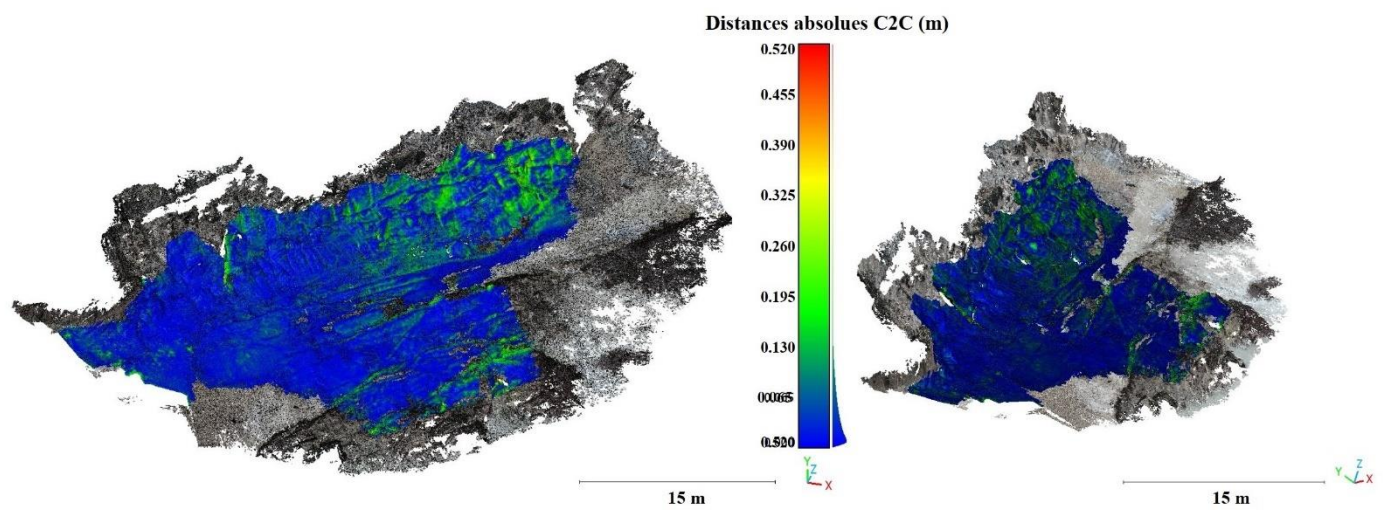
Vue de côté



Modèle de bathymétrie optique à marée haute



Comparaison des modèles



Y = Nord ; X = Est ; Z = hauteur

Figure 15. Visualisations en composition RGB (couleurs naturelles) sous CloudCompare des nuages de points denses (données brutes) du Dellec obtenus après traitement Metashape, et issu de l'acquisition topographique par photogrammétrie terrestre du 20/03/2023 (a) et de l'acquisition photogrammétrie sous-marine du 14/02/2023 (b). Les nuages de points denses ont été sous échantillonnés à 1 cm chacun. Visualisation sous forme de champs scalaires du résultat des comparaison C2C *Cloud-to-Cloud Comparison* de distances entre les deux nuages de points de la méthode (c), le modèle de topographie terrestre ayant servi de référence.

La distribution gaussienne des distances (*figure 16*) montre que la majorité des points se situent en-deçà de 10 cm de distance entre les deux nuages, avec un pic de répartition autour de 15 cm. Il en ressort une distance moyenne de 5,2 cm et un écart-type de 4,6 cm. Compte-tenu des paramètres pouvant impacter la reconstruction bathymétrique sous-marine (particules en suspension, algues, angles de prise de vue variables au rythme de la houle versus angle constant d'acquisition lors du levé terrestre), cette distance moyenne et cet écart-type sont considérés comme acceptables.

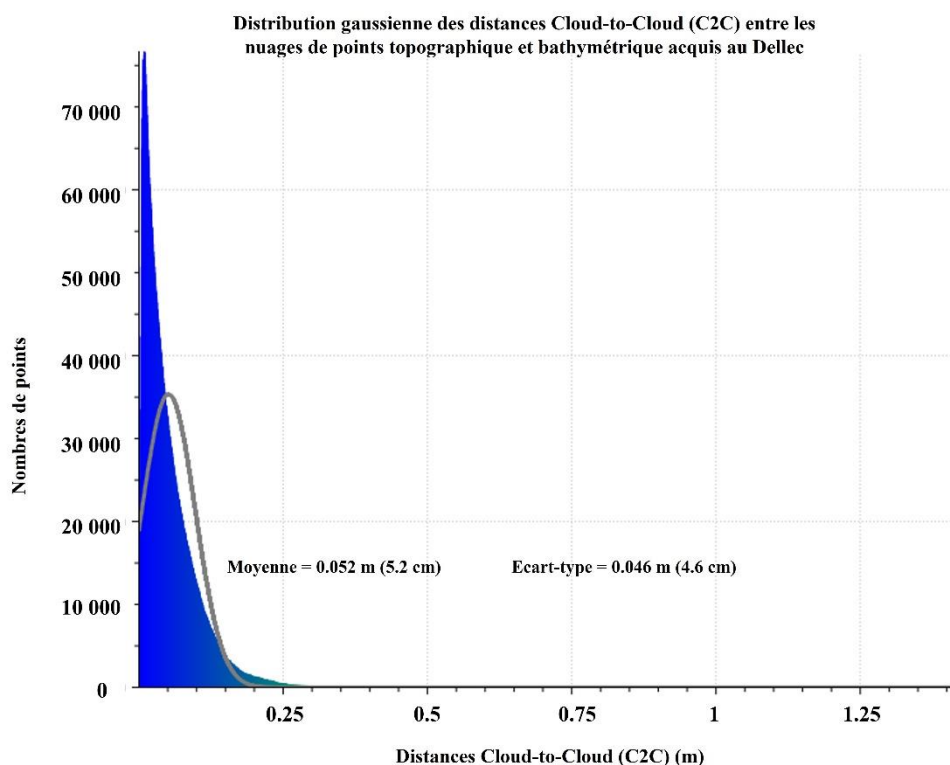


Figure 16. Graphique de la distribution gaussienne des distances entre les nuages de points denses du 14/02/2023 et du 20/02/2023 acquis au Dellec, tous deux sous-échantillonnés à 1cm. Les distances ont été comparées par la méthode C2C *Cloud-to-Cloud Comparison*, intégrée au logiciel CloudCompare.

B) Application de la méthode à l'Hermitage

1 – Modèles 3D

Pour les différentes configurations testées sur le site de l'Hermitage, les résultats suivants sont obtenus. L'alignement du **test 1** s'appuie sur 2 369 003 points de correspondance. 2230 des 2863 photos ont été alignées, soit un alignement réussi à 77.89%. L'erreur moyenne de positionnement des caméras calculée par *Metashape* est de 71.64 cm, ce qui est correct en considérant l'erreur de précision d'un mètre configurée en entrée des images gauches. Il en ressort un nuage de points dense de 508 103 069 points pour une surface de 230m² (*figure 17a*). La résolution initiale du nuage de points dense et du MNE est submillimétrique avec 0.79 mm/pix, pour une densité de points de 160 points/cm².

L'alignement du **test 2** résoud 196 855 points de correspondance pour 537 photos alignées sur 550, soit un alignement réussi à 97,63%. L'erreur moyenne de positionnement des caméras est établie à 96.25 cm. Cela est une valeur supérieure à celle du **test 1**, mais elle reste toujours correcte vu la précision initiale de 1m imputée aux caméras gauches. En sortie de traitement, le nuage de points dense contient 588 004 876 points couvrant une surface de 210m² (*figure 17b*). La résolution initiale du nuage de points dense et MNE est submillimétrique avec 0.74 mm/pix, pour une densité de points de 185 points/cm². Le modèle est alors considéré comme très résolu.

L'alignement du **test 3** s'appuie sur 3 072 181 points de correspondance. 2924 des 3524 photos ont été alignées, soit un alignement réussi à 83.6%. L'erreur moyenne de positionnement des caméras calculée par *Metashape* est de 1.2 m, ce qui est plus élevé que pour les deux tests précédents. Il en ressort un nuage de points dense de 492 951 386 points pour une surface de 156m² (*figure 17c*). La résolution initiale du nuage de points dense et du MNE est submillimétrique avec 0.72 mm/pix, pour une densité de points de 191 points/cm². Le modèle est alors considéré comme très résolu.

L'alignement du **test 4** résoud 2 655 359 points de correspondance pour 2140 photos alignées sur 2630, soit un alignement réussi à 81,37%. L'erreur moyenne de positionnement des caméras est établie à 76.73 cm. Cela est une valeur supérieure à celle du **test 1**, mais elle reste toujours correcte vu la précision initiale de 1m imputée aux caméras gauches. En sortie de traitement, le nuage de points dense contient 436 343 004 points couvrant une surface de 148m² (*figure 17d*). La résolution initiale du nuage de points dense et MNE est submillimétrique avec

0.76 mm/pix, pour une densité de points de 172 points/cm². Le modèle est alors considéré comme très résolu.

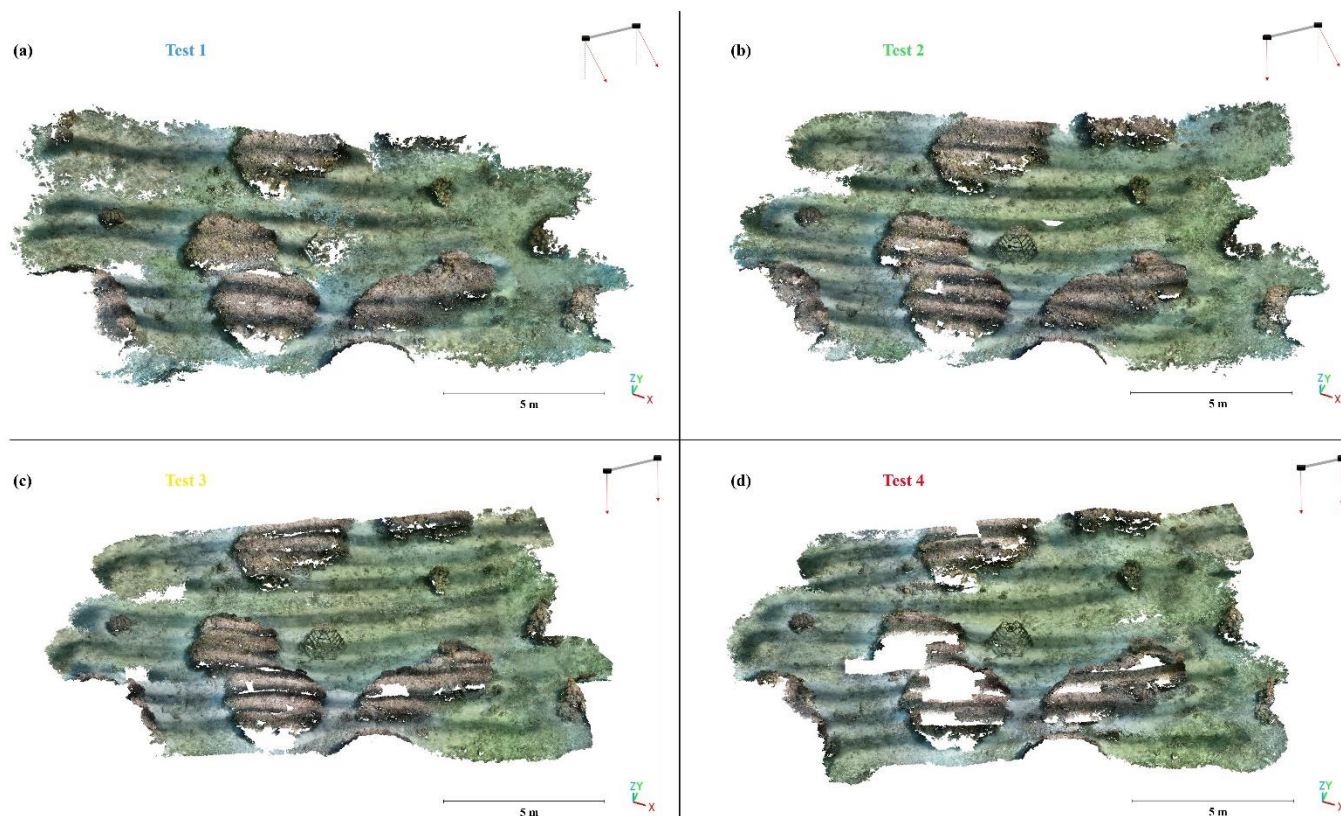


Figure 17. Visualisations en composition RGB sous CloudCompare des nuages de points denses des **test 1** (a), **test 2** (b), **test 3** (c) et **test 4** (d) de l’Hermitage obtenus après traitement Metashape, et issu du levé photogrammétrique sous-marin du 13/03/2023. Les nuages de points denses ont été sous échantillonnés à 1 cm chacun.

Sur les modèles des différents tests (figure 17) un phénomène d’ombrage est visible. Ce dernier suit la trajectoire de POSEIDON. Cela est cohérent dans la mesure où ce dernier projette son ombre au fond. La marquise (structure artificielle pour la fixation des coraux) présente sur site est reconstruite. Des lacunes parsèment le fond sableux. Au regard des édifices coralliens, les reconstructions des **test 3** et **test 4** sont plus parcellaires que celle des **test 1** et **test 2**, tant sur le replat que sur les flancs des constructions organiques. Cela peut ‘expliquer par différents facteurs : (1) l’absence d’aller-retour sur un même transect pour ces tests diminue le nombre d’images, et donc le recouvrement, d’une même zone disponible pour la reconstruction tridimensionnelle; (2) la visée au nadir (sans dépointage des caméras) diminue l’emprise des images. Les modèles les mieux reconstruits sont ceux les plus à même de fournir un MNE proche de la réalité terrain. Le choix se porte de travailler sur le MNE de la meilleure reconstruction, à savoir le **test 2**.

La *figure 18* est une visualisation du nuage de points dense du **test 2** en filtre « Indice de confiance ». Cet indice est directement calculé par Metashape et il correspond à la densité locale de points, c'est-à-dire le nombre de voisins pour chaque points. L'indice de confiance est un simple indicateur de la qualité du recouvrement : plus ce dernier est élevé, plus il y a de voisins pour chaque points. Dans le cas présent, les zones avec le plus fort indice de confiance (en bleu sur la *figure 18*) correspondent aux fond sableux, tandis que les zones avec des indices de confiance plus faible se retrouvent en bordure du modèle et au niveau des édifices coralliens, de la marquise et sur les extrémités de radiales. Seul le **test 2** est montré ici car il est représentatif des autres tests également.

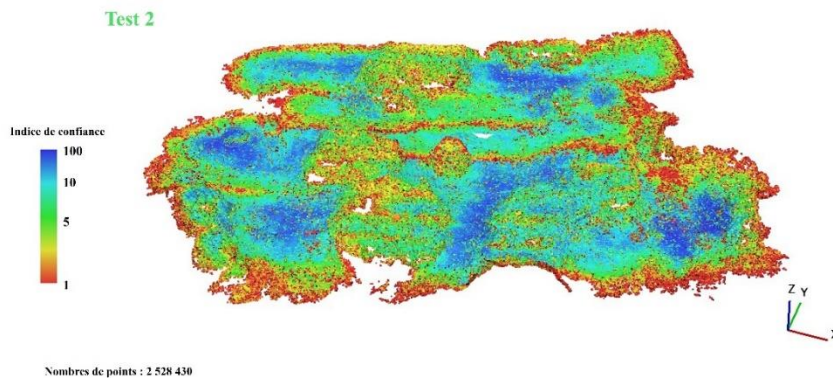


Figure 18. Visualisation sous Metashape en filtre « Indice de confiance » du nuage de points dense du **test 2** de l'Hermitage obtenu après traitement Metashape, et issu du levé photogrammétrique sous-marin du 13/03/2023.

2 – Calculs de la rugosité

Les résultats des calculs de rugosité sont exposés dans le *tableau 6* et la *figure 19* pour le **test 2**. Les valeurs calculées les plus élevées pour l'indice de rugosité topographique correspondent aux résolutions de 1cm et 50cm. Les résultats des autres résolutions leur sont inférieur de 0.2 à 0.4. Le coefficient de corrélation estimé pour cette méthode est de $R^2 = 0.3073$. Pour la rugosité, les hautes résolutions ont des valeurs dans une gamme de valeur proche, tandis que le résultat le plus élevé appartient à la plus faible résolution (50cm). Le coefficient est de $R^2 = 0.7683$. Les valeurs de complexité structurelles sont plus uniformes, avec des variations de l'ordre du centième, et un $R^2 = 0.0099$.

Tableau 6 : Résultats des calculs de rugosité selon les 3 méthodes et à différentes résolutions pour le *test 2*.

Resolution (cm)	Topographic Ruggedness Index	Roughness	Structural Complexity
1	1.012216	0.728828	1.159341
2	0.667767	0.575961	1.163158
5	0.833475	0.66895	1.127374
10	0.802447	0.69395	1.116714
50	1.031298	0.893064	1.144270

Graphes des rugosités calculées en fonction de la résolution - **Test 2**

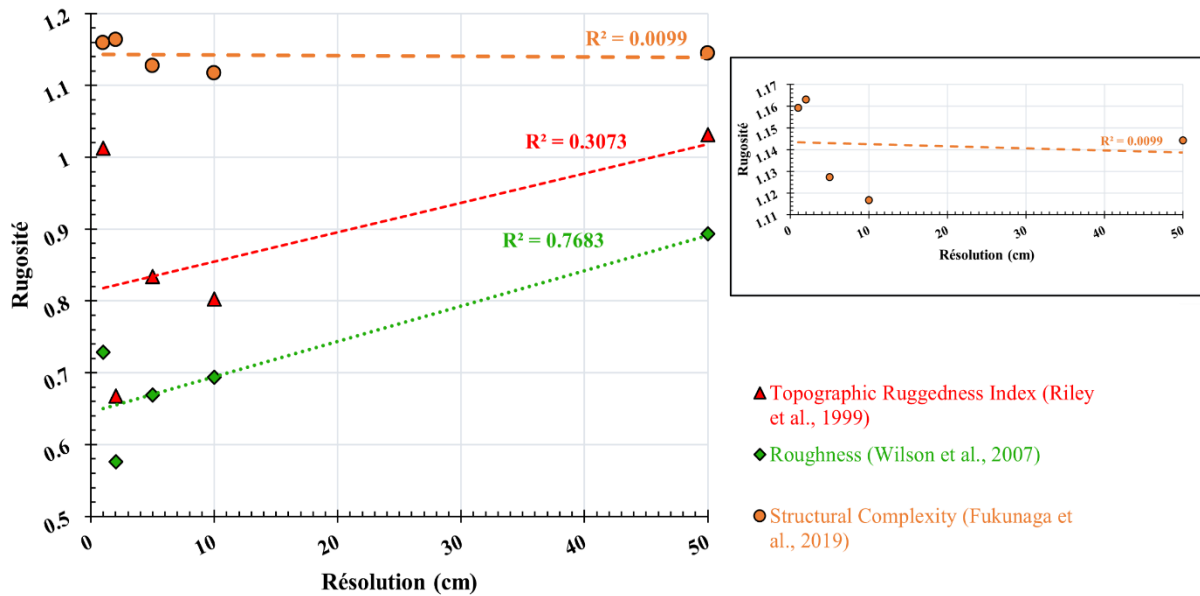


Figure 19. Graphes des rugosités calculées selon les 3 méthodes et en fonction de la résolution des modèles numériques d'élévation pour le *test 2*.

Les évolution des valeurs de rugosité calculées par chaque méthode correspondent à la rugosité enregistrée par la résolution (*figure 20*). À une résolution de 1cm, les aspérités et les alvéoles à la surface des coraux sont pris en compte par le MNE. Plus la résolution augmente (2cm, 5 cm, 10cm), plus ces microstructures sont lissées, et seules les branches sont prise en comptes. À une résolution de 50cm, la rugosité qui est enregistrée ne correspond plus aux éléments de relief de la structure corallienne, mais à la patate de corail dans son ensemble qui crée une différence d'altitude par rapport au voisinage.

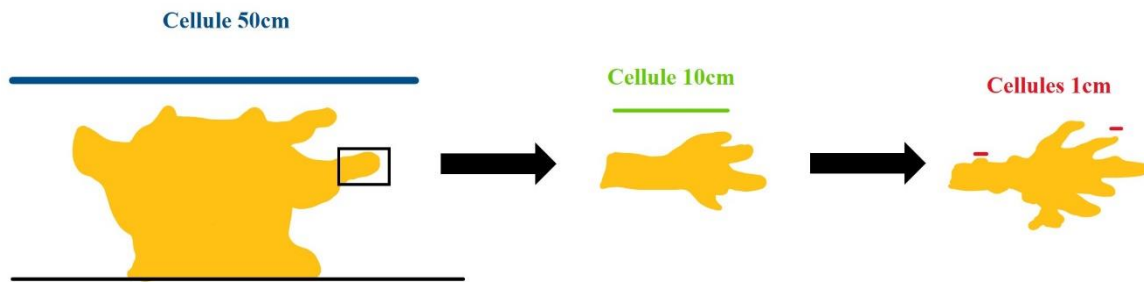


Figure 20. Structures impactant la rugosité enregistrées par les cellules du modèle numérique d'élévation à différentes résolutions.

Enfin les coefficients de corrélation de ces méthodes évoluent différemment lorsque la résolution est modifiée (*figure 19*). Il y a un faible coefficient de détermination qui semble pointer entre la complexité structurelle computationnelle et la résolution du MNE. Ainsi, il est possible d'inférer que les calculs de complexité structurelle sont bien moins sensibles aux variations de résolution. Il est possible que cela soit dû au fait que la méthode de calcul soit plus globale, et non pas basée sur un voisinage comme pour l'indice de rugosité topographique et la rugosité.

V. DISCUSSIONS

A) Méthodologie

La plateforme et la méthodologie conçues lors de ce stage ont abouti à une reconstruction fidèle de modèles 3D à partir de caméras GoPro. Cela représente une avancée par rapport au Reef Rover de **Raber et Schill (2019)** qui n'y était pas parvenu. Cela les a poussé à équiper leur prototype de 2 caméras Sony a6300 (chacune coûtant le prix de 2 GoPro). Ce succès a donc permis l'apparition d'une plateforme à moindre coût (1411€, *tableau 3*) que le Reef Rover ; lui-même étant le modèle le moins cher (3426\$) trouvé dans une bibliographie récente. Les résolutions submillimétriques obtenues par cette méthode sont une nette amélioration par rapport à celles obtenues usuellement par méthode aérienne qui sont centimétriques (**Casella et al., 2022 ; Bryson et al., 2016 ; Storlazzi et al., 2016**). La proximité du capteur à l'objet ciblé et le positionnement RTK permettent à la bathymétrie optique d'avoir une plus grande précision que celle associée aux méthodes aériennes. La bathymétrie optique résout des modèles 3D (nuage de points dense) là où le drone ne permet de résoudre que des modèles 2.5D (MNE et orthophotographie). En ce sens, POSEIDON est une réussite, puisqu'il met à disposition un USV low-cost et simple d'utilisation pour la bathymétrie optique de très haute résolution et la cartographie sous-marine en environnements peu profonds.

Bennett et al. (2020) ont développé une procédure d'automatisation pour la cartographie corallienne depuis des acquisitions drones. A terme, un tel protocole pourrait s'appliquer pour POSEIDON afin de réaliser une cartographie bathymétrique des récifs coralliens. Ou alors un couplage entre données drone et données de bathymétrie optique pourrait être mis en place, tel que proposé par **Lubczonek et al. (2021)** qui cherche à produire un modèle bathymétrique uniforme. **Bryson et al. (2016)** ont obtenu des résultats similaires entre levé drone et levé kite. Cette dernière option étant peu onéreuse au déploiement et simple d'utilisation, elle concorde avec la thématique low-cost de POSEIDON.

La méthodologie développée au cours de ce stage, et présentée dans ce rapport est cependant optimisable. Une des pistes à explorer reste le traitement des images, afin de savoir s'il est là également possible de l'automatiser. Pour l'instant, l'implication d'un utilisateur humain est nécessaire pour visionner les vidéos et déterminer les diverses fréquences d'extraction d'image. Avec les progrès de l'intelligence artificielle, il est possible que cette dernière puisse prendre le relais sur cette étape dans le futur. Il est également possible d'automatiser le traitement sur Metashape. En effet, ce logiciel dispose d'une interface de programmation compatible avec Python, ainsi que d'un guide associé (**Over et al., 2021**). Il existe déjà en écologie une telle méthodologie créée par **Lange et Perry (2020)**. Une adaptation de cette routine pour POSEIDON est envisageable.

Les tests selon des canaux spécifiques – à savoir les canaux Rouge (R pour « Red » en anglais), Vert (G pour « Green » en anglais), Bleu (B pour « Blue » en anglais) – ne se sont pas révélés plus fructueux que les tests en composition RGB (couleurs naturelles). Dans les canaux R et B, l'alignement des photos est presque inexistant (une dizaine de photos au plus). En effet, avec ce paramétrage *Metashape* ne trouve presque aucun point de correspondance. La génération des nuages de points denses ne se fait alors pas. Cela est compréhensible pour le canal R (la lumière rouge étant rapidement absorbée par l'eau), mais demeure mystérieux pour le canal B. Dans le canal G, il y a un alignement des photos et une reconstruction correcte du modèle en niveaux de gris. Cependant, les nombres de photos alignées et de points de correspondances sont moindres que leur homologues en canal RGB. La densité de points/cm² du nuage de points est également inférieure à celle du modèle généré en canal principal. La composition RGB reste donc à privilégier lors du traitement des données.

Les zones à faible indice de confiance, visible sur les patates de corail (*figure 18*) laissent à penser que la diminution de la profondeur et le rapprochement entre le capteur et l'objet étudié ont conduit à une diminution du recouvrement entre image (1 à 3 images disponibles contre 9 et plus pour le reste de la zone). Afin de remédier à cette problématique, il est concevable d'augmenter le recouvrement entre les images en augmentant la fréquence d'extraction des images. Une autre option proposée est celle de prises de vue libre, c'est-à-dire non-géoréférencées, pour compléter la reconstruction 3D. Cela est habituellement réalisée en photogrammétrie terrestre (*Westoby et al., 2012 ; Jaud et al., 2020*) ou sous-marine (*Burns et al., 2015 ; Guo et al., 2016 ; Urbina-Barreto, 2020*). Compte tenu de la faible profondeur (~1 m) du milieu où a évolué POSEIDON au cours du stage, cela nécessiterait de détacher les GoPro de leurs supports et de les opérer manuellement et indépendamment de POSEIDON.

Certaines images continuent de ne pas être alignées. Ces images présentent l'une ou l'autre de ces caractéristiques : (1) elles se situent soit en bordure de la zone d'acquisition ; (2) il y a un phénomène d'ombrage sur la photo. Ces défauts sont intrinsèques à (1) la méthode qui aboutit nécessairement à un recouvrement plus faible en bordure de modèle (1 à 2 images au mieux) ; à (2) la plateforme puisqu'elle projette son ombre sur le fond. A noter que si la hauteur d'eau augmente, l'effet d'ombrage diminue. Cela correspond donc à une limite naturelle du milieu (la profondeur) contre laquelle il est difficile d'agir. Après discussion avec *Isabel Urbina-Barreto*, une autre option d'amélioration serait de tenter la procédure de traitement en réglant le filtrage des profondeurs sur « Moyen ». *Metashape* ne recommande ce paramétrage qu'en zone où la surface imagée est abondamment émaillée de petits objets qui pouvant impacter la bathymétrie.

B) Choix de la configuration caméra

Lors de la superposition d'une même section modélisée selon les différents tests (*figure 21*), des effets de déformation et de soulèvement ou affaissement des bords sont bien observables sur les modèles générés depuis des configurations de caméra au nadir (**test 3** et **test 4** sur la *figure 21*). Ces déformations sont dues à une géométrie non-optimale du réseau d'images. *Jaud et al. (2019)* ont démontré que l'utilisation de caméras dépointées palie ce problème. Le **test 4** présente également un effet de soulèvement au niveau des patates de corail. Cet effet est problématique, puisqu'il se répercute sur la génération des MNE en leur attribuant une valeur Z (bathymétrie ou altitude) erronée. Cette erreur augmente le différentiel entre la surface 2D et la surface 3D, ce qui se répercute lors des calculs de rugosité. Sur les **test 1** et **test**

2 de la *figure 19*, aucun effet de distorsion n'est observable. Il est néanmoins possible de voir qu'il existe un léger décalage entre les deux modèles. En éliminant les zones qui ne sont pas communément présentes aux deux nuages de points, les comparaisons de distance sous *CloudCompare* place ce décalage à une moyenne de 2,8 cm. Ce décalage étant constant, il peut s'agir d'un offset lié à la marée.

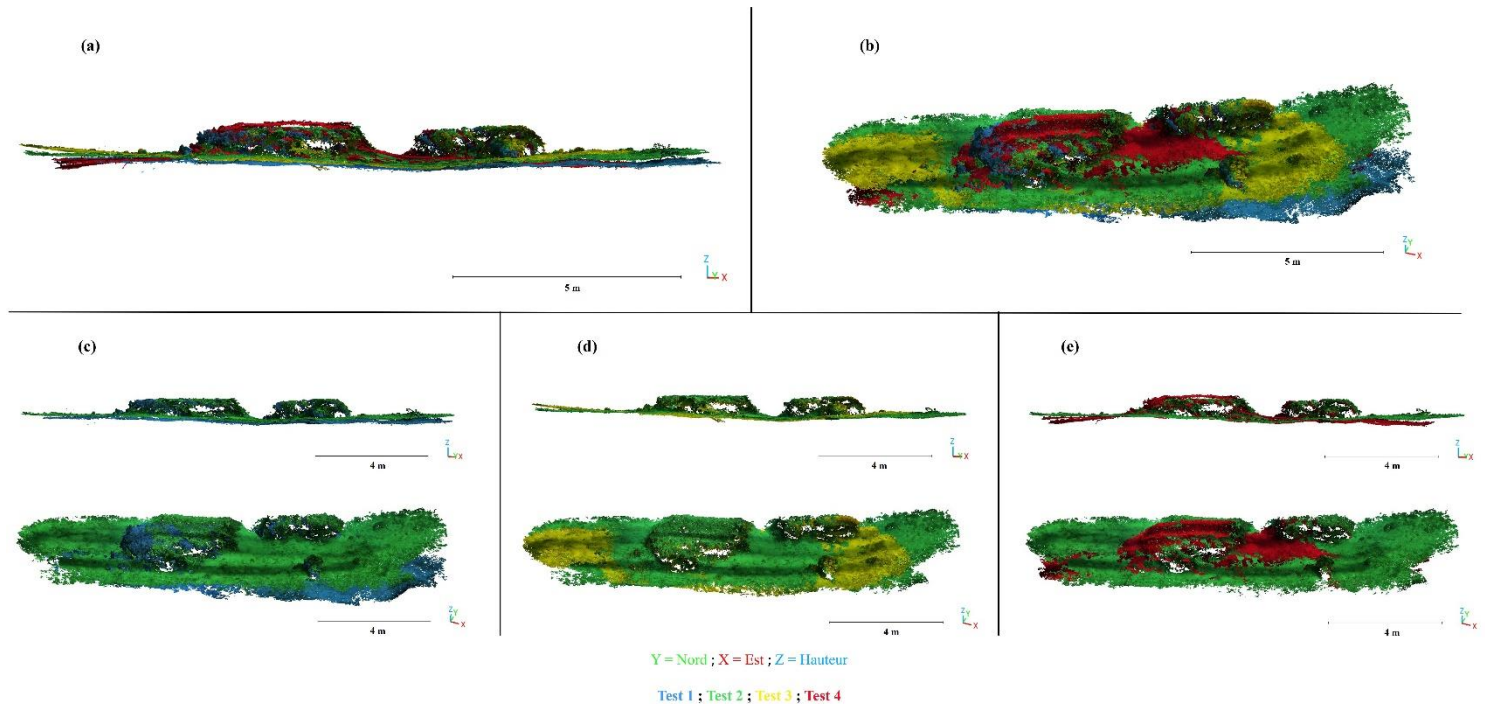


Figure 21. Visualisation sous CloudCompare de la superposition d'une même section des différents nuages de points denses des **test 1**, **test 2**, **test 3** et **test 4** de l'Hermitage obtenus après traitement Metashape le 13/03/2023 obtenus après traitement Metashape, et issus du levé photogrammétrique sous-marin du 13/03/2023 en vision latérale (a) et vue du-dessus (b). Visualisations de la superposition des nuages de points des **test 1** et **test 2** (c), des **test 2** et **test 3** (d), des **test 2** et **test 4** (e).

La configuration avec au moins une caméra dépointée est celle à favoriser pour l'acquisition. Ce type d'acquisition requiert cependant un aller-retour par radiale, ce qui augmente le temps sur le terrain. Cela peut être un facteur limitant compte tenu de la batterie des GoPro, qui à la suite des différents levés réalisés au cours du stage place empiriquement leur durée de vie à 60 ± 10 min soit un total de 8 vidéos.

C) Choix de la plateforme support

A considérer également qu'il existe un effet de balancier du GPS lors du déploiement avec de la houle. Cet effet n'est pas un handicap, mais il induit une incertitude aux « contraintes de positions » pour les étapes d'alignement et de points de corrélation (programme SIFT). Il est

possible d'envisager de limiter cet effet de balancier, pour diminuer ces incertitudes de positionnement. Deux possibilités sont présentes : (1) exclure les manipulations en état de mer agité, bien que cela limite les fenêtres d'opportunités ; (2) améliorer le prototype en lui-même pour lui assurer une meilleure stabilité (sur le principe de la gyroscopie). Mais cette dernière solution fait croître le coup du prototype, son poids, son temps d'assemblage, et diminue sa portabilité (alors que les dimensions actuelles de POSEIDON le rendent transportable partout facilement, y compris en bagage en soute).

Le caractère modulable du prototype permet de le modifier pour l'adapter à différentes plateformes de support. Chaque type de plateforme (planche de bodyboard, de paddle, kayak) présente ses avantages et ses inconvénients. Au cours de ce stage, des tests ont pu être réalisés avec un bodyboard et un paddle. Le paddle présente un avantage de navigation dans les milieux peu profonds et calmes (profondeur < 15 cm), mais il est fortement influencé par la houle et ses courants associés. Même si ces derniers sont faibles, il y a une dérive substantielle du système et de sa trajectoire. Se perd alors l'un des atouts majeurs du système, à savoir sa manœuvrabilité en milieu agité. La planche de bodyboard permet de maintenir plus facilement le cap et la stabilité du système par l'entrejeu du personnel propulsant, et ce en tout état de mer. Elle paraît alors être la plateforme support à favoriser.

Il est également envisageable de greffer un propulseur artificiel et informatisé à la plateforme, tel que cela est fait sur le modèle Plancha en cours de développement à l'Ifremer ou le modèle Reef Rover de **Raber et Schill (2019)**. Un tel ajout permet de maintenir un cap constant, avec une dérive amoindrie par rapport à un nageur. Mais cette motorisation s'accompagne d'une dépense supplémentaire et d'une complexité supplémentaire du système. Selon les attentes disponibles, ces ajouts peuvent venir à l'encontre des idées de low-cost et low-tech associées à l'origine du projet POSEIDON.

D) Calculs de rugosité

Il existe une acquisition drone effectuée à la même période (en mai) lors de l'année 2021. Le levé est l'œuvre du personnel de l'IRD. *Pascal Mouquet* a précisé que les données d'altitudes utilisées pour l'orthorectification n'étaient pas corrigées en Real Time Kinematics. Elles présentent probablement une erreur de quelques centimètres. Néanmoins, le MNE issu de cette acquisition a été fourni pour ce stage. À titre indicatif, sur la même zone que celle couverte par POSEIDON lors de ce stage, les mêmes méthodes que celles appliquées aux MNE issus de la bathymétrie optique ont été utilisées pour calculer la rugosité, à savoir : (1) **Riley et al. (1999)** ; (2) **Wilson et al. (2007)** ; (3) **Fukunaga et al. (2019)**. Les résultats de ces calculs

sont les suivants : (1) « Topographic Ruggedness Index » de 0.252681 ; (2) « Roughness » de 0.195204 ; (3) complexité structurale de 1.042378.

Ces valeurs sont toujours inférieures à celles récupérées en bathymétrie optique à résolution égale (2cm). *Agrafiotis et al. (2020)* et *Casella et al. (2022)* expliquent que la réfraction de la lumière présente à l'interface air-eau peut altérer les reconstructions d'élévation – avec une dérive de 15 à 30% par rapport à la mesure terrain – du platier récifal même en conditions d'acquisition optimale. Cela corrobore l'argumentaire des limites posées par le drone même en déployant des algorithmes correctifs basés sur la loi de Snell (*Woodget et al., 2015 ; Agrafiotis et al., 2020*) ou des GCP (*David et al., 2021*).

Casella et al. (2022) ont démontré que la complexité structurale dérivée par MNE depuis un drone est toujours inférieure à celle mesurée *in situ* par le « Chain and Tape ». Ils expliquent que la chaîne passe par de petits interstices (caractérisant les coraux branchus par exemple) qui n'apparaissent pas dans le modèle digital d'élévation (2.5D). En effet, les cavités, les reliefs, les aspérités et les interstices des édifices coralliens ne sont toujours que partiellement résolus lors de la transposition 2.5D de la réalité tridimensionnelle (*figure 22*). Ainsi la méthode de calcul de la complexité structurale dérivée par MNE n'est pas optimale. Pour ces raisons, il est proposé que les méthodes de calculs actuelles basées sur une approche 2.5D sont inadéquates pour une réalité 3D complexe. Il transparaît alors l'idée de développer une méthodologie plus ajustée et basée sur des calculs directs depuis les modèles 3D.

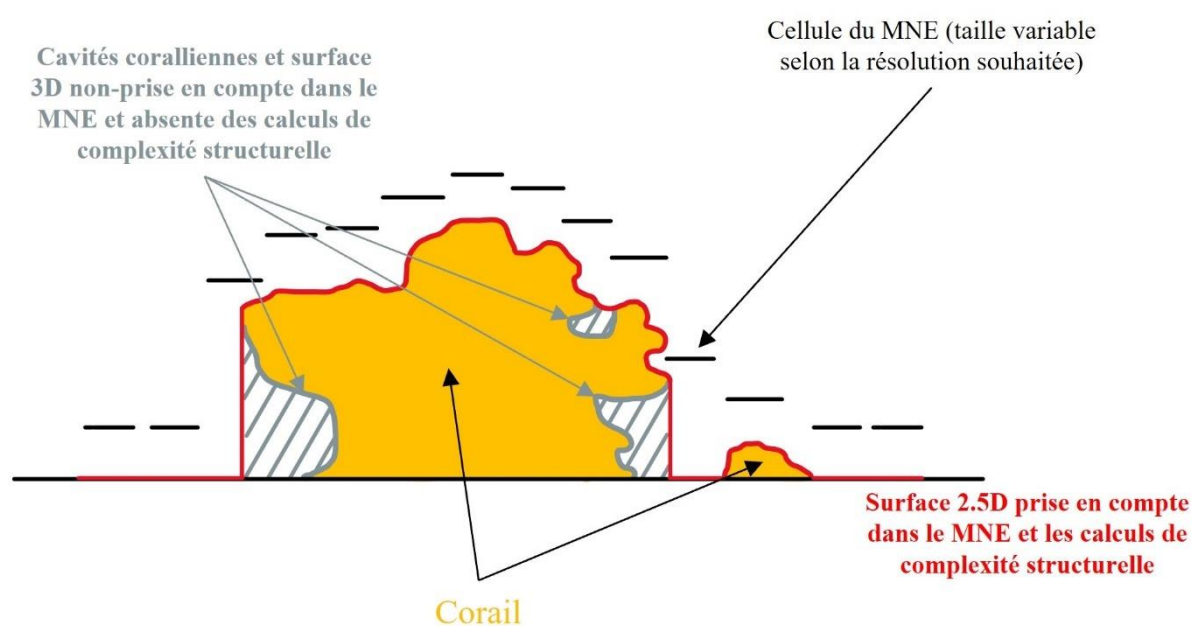


Figure 22. Schéma de la problématique des zones non-considérées du modèle 3D lors de la génération du MNE (modèle 2.5D).

Enfin il est possible que la rugosité au sens écologique (rapport 3D/2D) ne soit pas une métrique suffisante pour représenter la complexité structurale. Cette conjecture a déjà été émise par *Knudby et LeDrew, (2007)* qui ont démontré que la complexité structurale rattachée à la rugosité varie de façon imprévisible à travers les échelles spatiales des zones étudiées. Pour eux, le facteur le plus influent sur la complexité structurale serait en réalité la géométrie fractale du corail. Récemment, *Sous et al. (2020)* ont montré l'importance de la géométrie fractale pour l'estimation de la rugosité au sens hydrodynamique du terme.

VI. CONCLUSION

Le développement de POSEIDON et du protocole d'acquisition associé se sont conclus avec succès. L'utilisation de matériel accessible et abordable ; et d'antenne fonctionnelle en Real Time Kinematics pour un géoréférencement à précision centimétrique permettent de concevoir une plateforme low-cost (1411€) innovante pour la bathymétrie optique de très haute résolution en environnements peu profonds. Des chaînes de traitements partiellement automatisées ont vu le jour. Certaines des étapes restent toujours chronophages et optimisables. Comme toute méthodologie à ses débuts, de nombreuses pistes subsistent toujours pour enrichir tant le protocole que les chaînes de traitement de la donnée.

Les résolutions des modèles obtenus sont submillimétriques. Les reconstructions numériques issues de cette méthode de bathymétrie optique sont actuellement parmi les plus résolus disponibles : leur concurrent direct que sont les drones ne parviennent à l'heure actuelle qu'à des résolutions centimétriques. La réfraction de la lumière à l'interface air-eau causent les méthodes aériennes à sous-évaluer l'altitude des structures sous-marines. Les tests réalisés au Dellec montrent que les modèles générés par bathymétrie optique sont exempts de ce problème. POSEIDON s'affranchit également des problème de réflexion solaire sur la surface de l'eau et des perturbations du plan d'eau par les vagues. Les modèles numériques issus de POSEIDON sont en ce sens plus fidèles à la réalité terrain.

Des calculs de rugosité ont été effectués à différentes résolutions sur un modèle numérique d'élévation acquis. les outils QGIS utilisés (indice topographiques de rugosité et rugosité) fournissent des résultats qui correspondent à la rugosité qu'enregistre la résolution étudié : à très haute résolution (1cm) apparaissent les microstructures de la surface corallienne, qui sont lissées au fur et à mesure que la résolution diminue jusqu'à ce que la rugosité ne corresponde qu'à la présence de l'édifice coralien lui-même au plus basse résolution (50cm).

Les résultats de la complexité structurelle laissent à penser que la résolution n'a que peu d'impact dans son calcul. Ces méthodes de calculs sont cependant basées sur une approche 2.5D. Il est supputé que l'utilisation actuelle des MNE en 2.5D perd la majeure partie de l'information de complexité structurelle 3D réelle. Pour obtenir des résultats plus probants, de nouvelles méthodes de calculs à partir des modèles 3D eux-mêmes représenteraient une innovation prometteuse. L'amélioration de ces calculs aurait également le potentiel d'affiner la compréhension des intrications entre complexité structurelle et rugosité de fond hydrodynamique.

Enfin dans le cadre de la science ouverte, l'intégralité des codes et des procédures innovés au cours de stage sont voués à être compilés sous forme d'un DOI et d'un projet GitHub. Cela afin de permettre leur libre accès et leur reprise par toute personne souhaitant déployer ou améliorer la méthodologie. De plus, un tutoriel sera créé afin de fournir un document de support visuel pour permettre une prise en main simplifiée.

Bibliographie

- Agrafiotis, P., Karantzas, K., Georgopoulos, A., Skarlatos, D., 2020. Correcting Image Refraction: Towards Accurate Aerial Image-Based Bathymetry Mapping in Shallow Waters. *Remote Sensing* 12, 322. <https://doi.org/10.3390/rs12020322>
- Bennett, M.K., Younes, N., Joyce, K., 2020. Automating Drone Image Processing to Map Coral Reef Substrates Using Google Earth Engine. *Drones* 4, 50. <https://doi.org/10.3390/drones4030050>
- Bojakowski, P., Bojakowski, K.C., Naughton, P., 2015. A Comparison Between Structure from Motion and Direct Survey Methodologies on the Warwick. *J Mari Arch* 10, 159–180. <https://doi.org/10.1007/s11457-015-9141-4>
- Bryson, M., Duce, S., Harris, D., Webster, J.M., Thompson, A., Vila-Concejo, A., Williams, S.B., 2016. Geomorphic changes of a coral shingle cay measured using Kite Aerial Photography. *Geomorphology* 270, 1–8. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2016.06.018>
- Burke, L., Spalding, M., 2022. Shoreline protection by the world's coral reefs: Mapping the benefits to people, assets, and infrastructure. *Marine Policy* 146, 105311. <https://doi.org/10.1016/j.marpol.2022.105311>
- Burns, J.H.R., Delparte, D., Gates, R.D., Takabayashi, M., 2015. UTILIZING UNDERWATER THREE-DIMENSIONAL MODELING TO ENHANCE ECOLOGICAL AND BIOLOGICAL STUDIES OF CORAL REEFS. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.* XL-5/W5, 61–66. <https://doi.org/10.5194/isprsarchives-XL-5-W5-61-2015>
- Bythell, J., Pan, P., Lee, J., 2001. Three-dimensional morphometric measurements of reef corals using underwater photogrammetry techniques. *Coral Reefs* 20, 193–199. <https://doi.org/10.1007/s003380100157>
- Camoin, G.F., Colonna, M., Montaggioni, L.F., Casanova, J., Faure, G., Thomassin, B.A., 1997. Holocene sea level changes and reef development in the southwestern Indian Ocean. *Coral Reefs* 16, 247–259. <https://doi.org/10.1007/s003380050080>
- Carlot, J., Vousdoukas, M., Rovere, A., Karambas, T., Lenihan, H.S., Kayal, M., Adjeroud, M., Pérez-Rosales, G., Hedouin, L., Parravicini, V., 2023. Coral reef structural complexity loss exposes coastlines to waves. *Sci Rep* 13, 1683. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-28945-x>
- Casella, E., Collin, A., Harris, D., Ferse, S., Bejarano, S., Parravicini, V., Hench, J.L., Rovere, A., 2017. Mapping coral reefs using consumer-grade drones and structure from motion photogrammetry techniques. *Coral Reefs* 36, 269–275. <https://doi.org/10.1007/s00338-016-1522-0>
- Casella, E., Lewin, P., Ghilardi, M., Rovere, A., Bejarano, S., 2022. Assessing the relative accuracy of coral heights reconstructed from drones and structure from motion photogrammetry on coral reefs. *Coral Reefs* 41, 869–875. <https://doi.org/10.1007/s00338-022-02244-9>
- Chevallier, L., Bachelery, P., 1981. Evolution structurale du volcan actif du Piton de la Fournaise, Ile de la Réunion — Océan indien occidental. *Bull Volcanol* 44, 723–741. <https://doi.org/10.1007/BF02597094>
- Costa, M.B.S.F., Araújo, M., Araújo, T.C.M., Siegle, E., 2016. Influence of reef geometry on wave attenuation on a Brazilian coral reef. *Geomorphology* 253, 318–327. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2015.11.001>

- Darwin, C., 1842. On the Structure and Distribution of Coral Reefs : Being the First Part of the Geology of the Voyage of the Beagle Under the Command of Captain Fitzroy, RN During the Years 1832 to 1836, Smith Elder. ed.
- David, C.G., Kohl, N., Casella, E., Rovere, A., Ballesteros, P., Schlurmann, T., 2021. Structure-from-Motion on shallow reefs and beaches: potential and limitations of consumer-grade drones to reconstruct topography and bathymetry. *Coral Reefs* 40, 835–851. <https://doi.org/10.1007/s00338-021-02088-9>
- de Voogd, B., Palomé, S.P., Hirn, A., Charvis, P., Gallart, J., Rousset, D., Dañobeitia, J., Perroud, H., 1999. Vertical movements and material transport during hotspot activity: Seismic reflection profiling offshore La Réunion. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* 104, 2855–2874. <https://doi.org/10.1029/98JB02842>
- Dinh, Q.C., Nguyen, Q.T., Ho, D.D., Mai, C.T., 2023. Effects of bottom roughness on wave transmission across a submerged reef. *Frontiers in Marine Science* 10.
- Duncan, R.A., Backman, J., Peterson, L., The Shipboard Scientific Party, 1989. Reunion hotspot activity through tertiary time: Initial results from the ocean drilling program, leg 115. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 36, 193–198. [https://doi.org/10.1016/0377-0273\(89\)90013-9](https://doi.org/10.1016/0377-0273(89)90013-9)
- Duvall, M.S., Hench, J.L., Rosman, J.H., 2019. Collapsing Complexity: Quantifying Multiscale Properties of Reef Topography. *Journal of Geophysical Research: Oceans* 124, 5021–5038. <https://doi.org/10.1029/2018JC014859>
- Farrow, G.E., Brander, K.M., Westoll, T.S., Stoddart, D.R., 1997. Tidal studies on Aldabra. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. B, Biological Sciences* 260, 93–121. <https://doi.org/10.1098/rstb.1971.0008>
- Ferrario, F., Beck, M.W., Storlazzi, C.D., Micheli, F., Shepard, C.C., Airolidi, L., 2014. The effectiveness of coral reefs for coastal hazard risk reduction and adaptation. *Nat Commun* 5, 3794. <https://doi.org/10.1038/ncomms4794>
- Fèvre, Y., 2005. Mécanismes et vitesses d'érosion à l'échelle géologique sur une île volcanique jeune à relief élevé – La Réunion (Océan Indien). FEVRE Yannick.
- Fisher, W.S., Davis, W.P., Quarles, R.L., Patrick, J., Campbell, J.G., Harris, P.S., Hemmer, B.L., Parsons, M., 2007. Characterizing Coral Condition Using Estimates of Three-dimensional Colony Surface Area. *Environ Monit Assess* 125, 347–360. <https://doi.org/10.1007/s10661-006-9527-8>
- 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* 7, e50440. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0050440>
- Fukunaga, A., Burns, J.H.R., Craig, B.K., Kosaki, R.K., 2019. Integrating Three-Dimensional Benthic Habitat Characterization Techniques into Ecological Monitoring of Coral Reefs. *Journal of Marine Science and Engineering* 7, 27. <https://doi.org/10.3390/jmse7020027>
- Garcin, M., Poisson, B., Pouget, R., 2005. High rates of geomorphological processes in a tropical area: the Remparts River case study (Réunion Island, Indian Ocean). *Geomorphology* 67, 335–350. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2004.11.002>
- Gillot, P.-Y., Nativel, P., 1989. Eruptive history of the Piton de la Fournaise volcano, Reunion Island, Indian Ocean. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 36, 53–65. [https://doi.org/10.1016/0377-0273\(89\)90005-X](https://doi.org/10.1016/0377-0273(89)90005-X)

- Graham, N.A.J., Nash, K.L., 2013. The importance of structural complexity in coral reef ecosystems. *Coral Reefs* 32, 315–326. <https://doi.org/10.1007/s00338-012-0984-y>
- Guo, T., Capra, A., Troyer, M., Grün, A., Brooks, A.J., Hench, J.L., Schmitt, R.J., Holbrook, S.J., Dubbini, M., 2016. Accuracy assessment of underwater photogrammetric three dimensional modelling for coral reefs, in: *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. Presented at the XXIII ISPRS Congress, ISPRS, pp. 821–828. <https://doi.org/10.5194/isprsarchives-XLI-B5-821-2016>
- Hamylton, S., n.d. Mapping coral reef environments: A review of historical methods, recent advances and future opportunities.
- Hatcher, G.A., Warrick, J.A., Ritchie, A.C., Dailey, E.T., Zawada, D.G., Kranenburg, C., Yates, K.K., 2020. Accurate Bathymetric Maps From Underwater Digital Imagery Without Ground Control. *Frontiers in Marine Science* 7.
- Jaud, M., Letortu, P., Théry, C., Grandjean, P., Costa, S., Maquaire, O., Davidson, R., Le Dantec, N., 2019. UAV survey of a coastal cliff face – Selection of the best imaging angle. *Measurement* 139, 10–20. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2019.02.024>
- Jaud, M., Bertin, S., Beauverger, M., Augereau, E., Delacourt, C., 2020. RTK GNSS-Assisted Terrestrial SfM Photogrammetry without GCP: Application to Coastal Morphodynamics Monitoring. *Remote Sensing* 12, 1889. <https://doi.org/10.3390/rs12111889>
- Jenness, J.S., 2004. Calculating landscape surface area from digital elevation models. *Wildlife Society Bulletin* 32, 829–839. [https://doi.org/10.2193/0091-7648\(2004\)032\[0829:CLSAFD\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.2193/0091-7648(2004)032[0829:CLSAFD]2.0.CO;2)
- Knudby, A., LeDrew, E., 2007. Measuring Structural Complexity on Coral Reefs, in: *Diving for Science 2007*. Presented at the Proceeding of the American Academy of Underwater Sciences 26th Symposium, Dauphin Island, Alabama.
- Knudby, A., LeDrew, E., Newman, C., 2007. Progress in the use of remote sensing for coral reef biodiversity studies. *Progress in Physical Geography: Earth and Environment* 31, 421–434. <https://doi.org/10.1177/0309133307081292>
- Lange, I.D., Perry, C.T., 2020. A quick, easy and non-invasive method to quantify coral growth rates using photogrammetry and 3D model comparisons. *Methods in Ecology and Evolution* 11, 714–726. <https://doi.org/10.1111/2041-210X.13388>
- Lénat, J.-F., 1989. Patterns of Volcanic Activity of Piton de la Fournaise (Réunion Island, Indian Ocean). A Synthesis Based on Monitoring Data Between 1980 and July 1985, and on Historic Records Since 1930, in: Latter, J.H. (Ed.), *Volcanic Hazards, IAVCEI Proceedings in Volcanology*. Springer, Berlin, Heidelberg, pp. 312–338. https://doi.org/10.1007/978-3-642-73759-6_19
- Lénat, J.-F., Bachèlery, P., Merle, O., 2012. Anatomy of Piton de la Fournaise volcano (La Réunion, Indian Ocean). *Bull Volcanol* 74, 1945–1961. <https://doi.org/10.1007/s00445-012-0640-y>
- Leon, J.X., Roelfsema, C.M., Saunders, M.I., Phinn, S.R., 2015. Measuring coral reef terrain roughness using ‘Structure-from-Motion’ close-range photogrammetry. *Geomorphology, Geomorphology in the Geocomputing Landscape: GIS, DEMs, Spatial Analysis and statistics* 242, 21–28. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2015.01.030>
- Lowe, R.J., Falter, J.L., Bandet, M.D., Pawlak, G., Atkinson, M.J., Monismith, S.G., Koseff, J.R., 2005. Spectral wave dissipation over a barrier reef. *Journal of Geophysical Research: Oceans* 110. <https://doi.org/10.1029/2004JC002711>

- Lubczonek, J., Kazimierski, W., Zaniewicz, G., Lacka, M., 2022. Methodology for Combining Data Acquired by Unmanned Surface and Aerial Vehicles to Create Digital Bathymetric Models in Shallow and Ultra-Shallow Waters. *Remote Sensing* 14, 105. <https://doi.org/10.3390/rs14010105>
- Mazuel, A., Sisavath, E., Babonneau, N., Jorry, S.J., Bachèlery, P., Delacourt, C., 2016. Turbidity current activity along the flanks of a volcanic edifice: The Mafate volcanoclastic complex, La Réunion Island, Indian Ocean. *Sedimentary Geology* 335, 34–50. <https://doi.org/10.1016/j.sedgeo.2016.01.020>
- Montaggioni, L., Faure, G., 1980. Les récifs coralliens des Mascareignes (Océan Indien). 151 p. Coll. Trav.-Centre Univ. Fr. Océan Indien.
- McCormick, M.I., n.d. Comparison of fields methods for measuring surface topography and their associations with a tropical reef fish assemblage.
- McDougall, I., 1971. The geochronology and evolution of the young volcanic island of Réunion, Indian Ocean. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 35, 261–288. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(71\)90037-8](https://doi.org/10.1016/0016-7037(71)90037-8)
- Mumby, P.J., Skirving, W., Strong, A.E., Hardy, J.T., LeDrew, E.F., Hochberg, E.J., Stumpf, R.P., David, L.T., 2004. Remote sensing of coral reefs and their physical environment. *Marine Pollution Bulletin* 48, 219–228. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2003.10.031>
- Over, J.-S.R., Ritchie, A.C., Kranenburg, C.J., Brown, J.A., Buscombe, D.D., Noble, T., Sherwood, C.R., Warrick, J.A., Wernette, P.A., 2021. Processing coastal imagery with Agisoft Metashape Professional Edition, version 1.6—Structure from motion workflow documentation (USGS Numbered Series No. 2021–1039), Processing coastal imagery with Agisoft Metashape Professional Edition, version 1.6—Structure from motion workflow documentation, Open-File Report. U.S. Geological Survey, Reston, VA. <https://doi.org/10.3133/ofr20211039>
- Quataert, E., Storlazzi, C., van Rooijen, A., Cheriton, O., van Dongeren, A., 2015. The influence of coral reefs and climate change on wave-driven flooding of tropical coastlines. *Geophysical Research Letters* 42, 6407–6415. <https://doi.org/10.1002/2015GL064861>
- Raber, G.T., Schill, S.R., 2019. Reef Rover: A Low-Cost Small Autonomous Unmanned Surface Vehicle (USV) for Mapping and Monitoring Coral Reefs. *Drones* 3, 38. <https://doi.org/10.3390/drones3020038>
- Raoult, V., David, P.A., Dupont, S.F., Mathewson, C.P., O'Neill, S.J., Powell, N.N., Williamson, J.E., 2016. GoPros™ as an underwater photogrammetry tool for citizen science. *PeerJ* 4, e1960. <https://doi.org/10.7717/peerj.1960>
- Riley, S.J., DeGloria, S.D., Elliot, R., 1999. A terrain ruggedness index that quantifies topographic heterogeneity. *Intermountain Journal of Sciences* 5, 23–27.
- Risk, M.J., 1972. Fish diversity on a coral reef in the Virgin Islands. *Atoll Research Bulletin*.
- Salvany, T., Lahitte, P., Nativel, P., Gillot, P.-Y., 2012. Geomorphic evolution of the Piton des Neiges volcano (Réunion Island, Indian Ocean): Competition between volcanic construction and erosion since 1.4Ma. *Geomorphology, Volcano Geomorphology: landforms, processes and hazards* 136, 132–147. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2011.06.009>
- Soulsby, R.L., Whitehouse, R.J.S., 1997. Threshold of Sediment Motion in Coastal Environments, in: *Pacific Coasts and Ports '97: Proceedings of the 13th Australasian Coastal and Ocean Engineering Conference and the 6th Australasian Port and Harabour Conference*. Centre for Advanced Engineering, University of Canterbury, Christchurch, NZ, pp. 145–150.

- Sous, D., Bouchette, F., Doerflinger, E., Meulé, S., Certain, R., Toulemonde, G., Dubarbier, B., Salvat, B., 2020. On the small-scale fractal geometrical structure of a living coral reef barrier. *Earth Surface Processes and Landforms* 45, 3042–3054. <https://doi.org/10.1002/esp.4950>
- Sous, D., Maticka, S., Meulé, S., Bouchette, F., 2022. Bottom Drag Coefficient on a Shallow Barrier Reef. *Geophysical Research Letters* 49, e2021GL097628. <https://doi.org/10.1029/2021GL097628>
- Storlazzi, C.D., Dartnell, P., Hatcher, G.A., Gibbs, A.E., 2016. End of the chain? Rugosity and fine-scale bathymetry from existing underwater digital imagery using structure-from-motion (SfM) technology. *Coral Reefs* 35, 889–894. <https://doi.org/10.1007/s00338-016-1462-8>
- Teague, J., Scott, T., 2017. Underwater Photogrammetry and 3D Reconstruction of Submerged Objects in Shallow Environments by ROV and Underwater GPS. *Journal of Marine Science Research and Technology*.
- Urbina-Barreto, I., 2020. Nouveaux indices quantitatifs pour le suivi des récifs coralliens issus de modélisation 3D par photogrammétrie, New quantitative indices from 3D modeling by photogrammetry to monitor coral reef environments. Université de La Réunion.
- Urbina-Barreto, I., Garnier, R., Elise, S., Pinel, R., Dumas, P., Mahamadaly, V., Facon, M., Bureau, S., Peignon, C., Quod, J.-P., Dutrieux, E., Penin, L., Adjeroud, M., 2021. Which Method for Which Purpose? A Comparison of Line Intercept Transect and Underwater Photogrammetry Methods for Coral Reef Surveys. *Frontiers in Marine Science* 8.
- Urbina-Barreto, I., Elise, S., Guilhaumon, F., Bruggemann, J.H., Pinel, R., Kulbicki, M., Vigliola, L., Mou-Tham, G., Mahamadaly, V., Facon, M., Bureau, S., Peignon, C., Dutrieux, E., Garnier, R., Penin, L., Adjeroud, M., 2022. Underwater photogrammetry reveals new links between coral reefscape traits and fishes that ensure key functions. *Ecosphere* 13, e3934. <https://doi.org/10.1002/ecs2.3934>
- Villeneuve, N., Bachèlery, P., Kemp, J., 2014. La Réunion Island: A Typical Example of a Basaltic Shield Volcano with Rapid Evolution, in: Fort, M., André, M.-F. (Eds.), *Landscapes and Landforms of France, World Geomorphological Landscapes*. Springer Netherlands, Dordrecht, pp. 261–270. https://doi.org/10.1007/978-94-007-7022-5_25
- Westoby, M.J., Brasington, J., Glasser, N.F., Hambrey, M.J., Reynolds, J.M., 2012. ‘Structure-from-Motion’ photogrammetry: A low-cost, effective tool for geoscience applications. *Geomorphology* 179, 300–314. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2012.08.021>
- Wilson, M.F.J., O’Connell, B., Brown, C., Guinan, J.C., Grehan, A.J., 2007. Multiscale Terrain Analysis of Multibeam Bathymetry Data for Habitat Mapping on the Continental Slope. *Marine Geodesy* 30, 3–35. <https://doi.org/10.1080/01490410701295962>
- Woodget, A.S., Carbonneau, P.E., Visser, F., Maddock, I.P., 2015. Quantifying submerged fluvial topography using hyperspatial resolution UAS imagery and structure from motion photogrammetry. *Earth Surface Processes and Landforms* 40, 47–64. <https://doi.org/10.1002/esp.3613>
- Xharde, R., Long, B., Fordes, D., 2006. Accuracy and Limitations of Airborne LiDAR Surveys in Coastal Environments. Presented at the Proc of IEEE Geoscience and Remote Sensing Symposium, Beijing, China.
- Young, G.C., Dey, S., Rogers, A.D., Exton, D., 2017. Cost and time-effective method for multi-scale measures of rugosity, fractal dimension, and vector dispersion from coral reef 3D models. *PLOS ONE* 12, e0175341. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0175341>