



Marianne BRICQUIR

Les îlots du lagon calédonien : mise en place de
méthodes pour le suivi et l'analyse de leurs
évolutions géomorphologiques.

Application aux îlots Larégnère et Mbé Kouen

Mémoire de stage de Master 2

Année Universitaire 2016-2017

Structure d'accueil : [Université de la Nouvelle-Calédonie](#)

Tuteur universitaire : [Alain Hénaff](#)

Maître de stage : [Pascal Dumas \(UNC\)](#)

Stage co-encadré par [Myriam Vendé-Leclerc \(SGNC\)](#)
et [Jérôme Aucan \(IRD\)](#)

Avant-propos

Le projet EMIL portant sur l'étude de « l'Evolution Morphologique des Îlots du Lagon calédonien comme indicateur de l'impact du changement climatique » est né en 2016 d'un constat de besoin de connaissances sur l'environnement littoral et les risques côtiers de la Nouvelle-Calédonie fait par la communauté scientifique et par les collectivités locales et organismes publics travaillant sur le littoral. Porté par le Service de la Géologie de la Nouvelle-Calédonie (SGNC), il repose sur divers travaux préalables menés par ce service gouvernemental et par le Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM) réalisés dans le cadre de l'Observatoire du Littoral de Nouvelle-Calédonie (OBLIC). Ce dernier, créé en 2013, constitue un pôle de recherche et d'expertise sur le littoral calédonien. Il permet de fédérer des projets de recherches portant sur la problématique de la vulnérabilité des espaces côtiers du territoire, de pérenniser et de valoriser les informations et les données recueillies par l'ensemble des acteurs locaux.

Mené dans le cadre de l'OBLIC, ce projet apparaît complémentaire à d'autres travaux s'intéressant aux systèmes côtiers calédoniens et à la question des risques tels que le projet MOM Litto qui vise la « Mise en place d'un réseau participatif de suivi du rivage : expérimentation des Iles Loyautés en Nouvelle-Calédonie » et la thèse de Matthieu LE DUFF « La Nouvelle-Calédonie face au changement climatique et aux risques côtiers : quelles stratégies mettre en place ? Réflexion sur le développement d'un dispositif de gestion adaptée, application aux îles Loyauté » (Université de la Nouvelle-Calédonie).

Ainsi, le projet EMIL regroupe :

- L'Université de la Nouvelle-Calédonie (UNC) et l'Institut de Recherche pour le Développement (IRD), organismes scientifiques qui cherchent à acquérir des connaissances s'inscrivant dans leurs axes d'étude ;
- Le SGNC et le BRGM, organismes publics ainsi que la Province Sud, collectivité territoriale, qui souhaitent une meilleure compréhension du système côtier calédonien et veulent mener une réflexion en termes de gestion intégrée et de stratégie d'aménagement de la zone côtière.

L'étude des îlots du lagon sud calédonien est au cœur du projet EMIL. Le lagon compte presque 150 îlots de sables, des structures géomorphologiques singulières reposant sur des plates-formes récifales lagonaires ou sur le récif barrière et constituées d'apports biodétritiques et bioclastiques. Caractériser leur évolution sur le temps long, autrement dit à l'échelle des temps géologiques ainsi que sur le temps court c'est-à-dire de quelques décennies à quelques années voire à l'échelle de l'événement météorologique ponctuel, exige de faire appel à plusieurs disciplines scientifiques. Tout d'abord, la géologie permet d'étudier les évolutions sur la période de l'Holocène s'étendant sur 10 000 ans jusqu'à aujourd'hui. L'océanographie étudie les phénomènes météo-marins qui surviennent à des échelles de temps courtes à très courtes (quelques heures à quelques jours) ainsi que les conditions courantes de circulation des eaux océaniques. Enfin, la géographie permet d'avoir une approche intégrée des systèmes côtiers en prenant en compte l'ensemble des échelles temporelles et spatiales. C'est en cela que le projet EMIL constitue un travail pluridisciplinaire.

Ce projet consiste à caractériser pour deux îlots leur évolution géomorphologique sur les deux années que dure le projet ainsi que leur dynamique passée récente à partir de différentes méthodes d'acquisition et d'analyse qui seront spécifiées et testées au cours du projet. Ensuite ces résultats seront corrélés avec les facteurs de forçage qui influent de façon directe ou indirecte sur l'évolution des côtes de la Nouvelle-Calédonie à différentes échelles spatiales.

L'étude qui fait l'objet de ce présent rapport s'inscrit dans ce projet. Elle repose sur une mission de stage de master 2 en recherche appliquée qui se déroule sur 6 mois de mars à août 2017 à l'UNC. Elle s'attache à comprendre l'évolution à moyen (une dizaine d'années) et à court terme (à l'échelle d'une année ou d'une saison) des formes sédimentaires constitutives du lagon du sud-ouest de la Nouvelle-Calédonie. Ces îlots possèdent une importante aptitude à réagir très rapidement aux conditions météorologiques et à l'évolution du climat. En effet, ils sont peu affectés par les processus continentaux qui influent considérablement sur les systèmes côtiers de la Grande-Terre. Ils sont également peu ou pas soumis à une pression anthropique. Ainsi, en termes d'acquisition de connaissances, ils permettent de se soustraire aux éventuelles conséquences des actions anthropiques sur le fonctionnement géomorphologique. Les impacts des facteurs météo-marins et climatiques y sont donc plus directs et plus facilement détectables (*Garcin et al, 2016*). Ainsi, le choix des deux îlots pilotes du projet EMIL s'est porté sur les îlots Larégnère et Mbé Kouen. Tous deux n'ont pas été modifiés par des actions humaines de type aménagements de protection contre l'érosion côtière et restent relativement peu fréquentés. Leur distance à la côte reste raisonnable, facilitant ainsi les déplacements sur le terrain.

Les objectifs de l'étude relèvent principalement de la mise en place de méthodes d'acquisition de données géomorphologiques et environnementales, de traitements, d'analyse de ces données afin de mettre en évidence une corrélation entre les résultats issus des deux types de données pour raconter l'histoire passée récente et les tendances évolutives actuelles des deux îlots étudiés.

Ce stage a bénéficié du soutien à la mobilité internationale du LabexMER, sous la forme d'une aide de l'état gérée par l'Agence Nationale de la Recherche au titre du programme « Investissements d'avenir » portant la référence ANR-10-LABX-19-01.

Remerciements

La réalisation de ce stage en recherche appliquée a été pour moi l'opportunité de découvrir le monde de la recherche à travers un sujet qui me passionne et une étude sur de petits îlots d'un magnifique lagon à l'autre bout du monde, une chance exceptionnelle.

Je remercie sincèrement mon maître de stage, Pascal DUMAS ainsi que la porteuse du projet EMIL, Myriam VENDE-LECLERC, pour le suivi de mon travail, leur disponibilité et pour leur investissement à mes côtés. Leurs nombreux conseils méthodologiques et rédactionnels m'ont guidé à travers les différentes étapes réalisées au cours du stage. Je remercie également Jérôme AUCAN, océanographe à l'IRD ainsi que Mathieu Le DUFF, notamment pour ses conseils bibliographiques. Je désire également remercier mon tuteur universitaire, Alain HENAFF, pour le temps qu'il m'a consacré et pour ses conseils avisés.

Je souhaite remercier l'ensemble des gardes nature de la Direction de l'Environnement (DENV) de la province Sud ainsi que les opérateurs de la Direction de l'Aménagement et du Foncier (DFA) pour leur investissement dans la mise en œuvre des missions sur le terrain.

Au sein du département LLSH de l'Université de la Nouvelle-Calédonie, je veux remercier Jean-Marie pour son enthousiasme et son envie de partager sa passion, la recherche en géographie, ainsi que notre voisin de bureau et professeur d'histoire, Gwénaél. Je tiens aussi à remercier Monsieur HOIBIAN pour ses conseils relatifs à l'utilisation du logiciel Agisoft Photoscan.

J'exprime ma reconnaissance envers mes collègues stagiaires Sabrina et Sylvain, pour leur constante bonne humeur, les moments passés avec eux lors des pauses café à contempler la vue qu'offre la presqu'île de Nouville et pour tout le soutien qu'ils m'ont apporté. Merci à eux deux, à Emile et à tous les autres, nouvelles amitiés formées ou vieille amie retrouvée (Lina), pour toutes les aventures calédoniennes partagées, de l'île des Pins en passant par le Grand sud, jusqu'à la Poule de Hienghène. Merci infiniment au gardien de la résidence J, Souané et à sa femme, Antoinette, pour leur grande générosité et leur constante bonne humeur.

Je remercie de tout cœur Clémence, Esther, Vincent, Fabien, Yann et surtout Françoise, pour son appui sans faille et les heures passées à relire et imprimer mes dossiers de candidature. Un grand merci à eux tous pour leurs encouragements constants au cours de mes études et pour avoir fait voyager de par le monde crêpes bretonnes, chocolats et livres qui m'ont apporté de petits moments de réconfort. Je remercie également grandement Joachim, pour son soutien quotidien malgré ces 17 000 kilomètres de distance.

Une dernière pensée pour Iwan LE BERRE que je désire remercier pour sa grande disponibilité et son soutien dans mes démarches de candidatures en master géomatique.

Sommaire

Avant-propos	2
Remerciements.....	4
Sommaire	5
Table des figures	6
Liste des tableaux	9
Liste des acronymes	10
Introduction générale	11
Chapitre 1. Contexte général et positionnement scientifique	15
Section 1. L'étude de l'évolution morphologique des littoraux : quelles techniques pour quelles échelles spatio-temporelles ?	15
1. Des échelles temporelles et spatiales pour l'étude des dynamiques littorales	15
2. Les méthodes de suivi de la mobilité des côtes	18
Section 2. Lagon, récif, îlots de Nouvelle-Calédonie : des objets d'étude singuliers	23
1. Le lagon sud de Nouvelle-Calédonie.....	24
2. Les îlots de sable.....	26
Chapitre 2. Données et méthodologie adoptée	31
Section 1. Des données à différentes échelles.....	31
1. Des données à l'échelle du sud-ouest de l'océan Pacifique	31
2. Des données à l'échelle de la Nouvelle-Calédonie	33
3. Des mesures <i>in situ</i>	39
Section 2. Méthodes adoptées pour le traitement des données topographiques	58
1. La réalisation des profils de plage et leur comparaison	58
2. La réalisation des Modèles Numériques de Terrain (MNT).....	59
3. La réalisation des Modèles Numériques de Surface (MNS).....	61
Chapitre 3. Interprétation des résultats : évolution de la morphologie des îlots à moyen et court termes.....	67
Section 1. L'évolution récente des îlots	67
1. Larégnère	67
2. Mbé Kouen	76
3. Mise en corrélation des évolutions récentes avec les paramètres environnementaux	81
4. La typologie OBLIC appliquée aux deux îlots étudiés	82
Section 2. L'évolution actuelle des îlots	84
1. Larégnère	84
2. Mbé Kouen	91
3. Tentative de corrélation entre les observations géomorphologiques et les données issus des capteurs océanographiques.	97
Section 3. Discussion des résultats	98
1. Une analyse de l'évolution récente des îlots limitée	98
2. Une analyse de l'évolution actuelle des îlots selon plusieurs méthodes comparables	99
3. Perspectives pour la continuité du suivi des évolutions morphologiques de Larégnère et Mbé Kouen	107
Conclusion	108
Bibliographie et webographie	109
Annexes	116

Table des figures

Figure 1 : Les éléments constitutifs du littoral, d'après Faye, 2010 et le rapport OBLIC 2013	15
Figure 2 : Structure schématique du système morphodynamique côtier (schéma de Cohen et al. 2002, adapté de Cowell et Thorn, 1994)	16
Figure 3 : Echelles spatio-temporelles des changements du littoral (d'après Suanez S., 2009, adapté de S. Fenster et al., 1993)	17
Figure 4 : Talus d'érosion photographié à Larégnère le 24/08/2016. Le carnet donne l'échelle.....	19
Figure 5 : Schéma et principe du cadre d'Emery, technique utilisée dans la réalisation de profils de plage (Trodec, 2012).....	19
Figure 6 : Repère fixe et base du DGPS installée lors du levé terrain du 05/07/2017 sur l'îlot Mbé Kouen (photographie : Marianne BRICQUIR)	20
Figure 7 : Le degré de précision en fonction de l'échelle d'utilisation des outils pour le suivi des littoraux (Cohen et Gardel, 2011)	22
Figure 8 : Localisation de la Nouvelle-Calédonie (Réalisation : Marianne Bricquir, 2017 ; source : Géorep).....	23
Figure 9 : MNT terre-mer du sud-ouest de la Grande Terre de Nouvelle-Calédonie (interpolations d'après les mesures bathymétriques multifaisceaux, Chevillote et al, 2005).....	24
Figure 10 : Circulation de l'eau dans un système côtier "récif-lagon" (source : Low et Falter, 2015)	25
Figure 11 : banc de beachrocks au sud-ouest de l'îlot Mbé Kouen (image acquise par drone lors de la mission du 05/06/2017)	26
Figure 12 : Les différents stades évolutifs des îlots calédoniens et leur cycle de vie (d'après Garcin et Vendé-Leclerc, 2015).....	28
Figure 13 : Localisation et image aérienne de l'îlot Larégnère et de sa plate-forme récifale (source : Province Sud, 2011) dans le lagon sud-ouest calédonien. Le carton de localisation en haut à droite a été réalisé à partir d'une image satellite Digital Globe (Google).....	29
Figure 14 : Localisation et image aérienne de Mbé Kouen et de sa plate-forme récifale (source : GIE SERAIL, 2016) dans le lagon sud-ouest calédonien. Le carton de localisation (en dessous de la carte à gauche) a été réalisé à partir d'une image satellite Digital Globe (Google)	30
Figure 15 : niveau marin global obtenu à partir des marégraphes entre 1900 et 2001 (Church et al. 2004 ; Jevrejeva et al. 2006, d'après Cazenave et al., 2010)	31
Figure 16 : niveau marin global obtenu à partir des mesures par altimétrie satellitaire entre janvier 1993 et 2008. Les données brutes acquises tous les 10 jours apparaissent en bleu, la ligne rouge correspond au lissage de 90 jours de données brutes (d'après Cazenave et al., 2010).....	31
Figure 17 : Cartographie des tendances du niveau marin dans l'océan Pacifique ouest entre 1950 et 2009. Les cercles et étoiles noirs correspondent aux marégraphes dont sont issues les données utilisées pour l'étude (source : Becker et al., 2012)	32
Figure 18 : Représentation de l'indice OIN entre 1982 et aujourd'hui (d'après les données recueillies sur le site internet de la NOAA)	33
Figure 19 : Cartographie de la trajectoire des événements cycloniques ayant impactés la Nouvelle-Calédonie entre 2000 et 2017 (source : NOAA)	34
Figure 20 : 1) creusement du talus de la plage nord-est ; 2) beachrocks de la plage sud-ouest recouvert par le sable (apport de sédiments). Source : DENV, 23 décembre 2016	36
Figure 21 : 1) talus d'érosion, végétation rampante arrachée, arbres déracinés sur la plage sud de Larégnère (10/02/2017) 2) talus d'érosion sur la plage sud-ouest de Mbé Kouen (13/02/2017). Source : DENV	36
Figure 22 : 1) Nombreux débris coralliens et 2) talus d'érosion sur la partie est de l'îlot Larégnère (le 13/02/2017, après le passage du cyclone Cook) 3) talus d'érosion, arbres déracinés et débris coralliens à l'est de Larégnère et 4) falaisage en haut de plage et laisse de mer en pied de talus sur la plage nord-est de l'îlot (le 12/05/2017 après le passage du cyclone Donna. Source : DENV	37
Figure 23 : Niveau marin absolu mesuré au marégraphe de Numbo (bleu foncé) et la courbe de tendance (bleu clair), source : <i>Système d'Observation du Niveau des Eaux Littorales – SONEl</i>	38
Figure 24 : Distribution du temps de vidange locale, en jours, dans la zone sud du lagon de la côte ouest de Nouvelle-Calédonie (Jouon et al., 2006).....	39
Figure 25 : localisation de l'emplacement des capteurs à proximité des îlots, Réalisation : OBLIC 2017.	40
Figure 26 : : localisation du point d'extraction du modèle de vague Wave Watch III. Réalisation : OBLIC, 2017	41
Figure 27 : les étapes du protocole méthodologique appliqué dans le cadre de l'analyse diachronique de l'évolution des îlots .	43
Figure 28 : Impression écran lors du géoréférencement de l'image de l'îlot Larégnère du 08/08/2012 (à gauche) à partir de l'orthophotographie de 2011 (à droite. Les points rouges correspondent aux amers utilisés pour le géoréférencement des images.	45
Figure 29 : Choix dans la numérisation de la LVP lors de la rencontre de percée dans la végétation, exemple du secteur nord-ouest de Larégnère.....	46

Figure 30 : Limites de végétation permanente numérisée pour 6 dates pour l'îlot Larégnère.....	46
Figure 31 : Signification de la marge d'erreur calculée pour l'analyse diachronique des îlots.....	47
Figure 32 : capture d'écran montrant les transects (tous les 10 mètres) créés autour d'une ligne de base virtuelle pour Larégnère.....	48
Figure 33 : Cartographie de l'avancée et du recul de la LVP à Larégnère sur la période 2004-2016 par secteur d'évolution homogène.....	49
Figure 34 : détail chronologique des différentes missions terrain réalisées dans la cadre du projet EMIL.....	50
Figure 35 : Repère existant (plot coin feu province Sud, source : OBLIC, 2017).....	50
Figure 36 : Mise en pratique de l'outil « cadre » par les gardes nature lors de la mission du 14/04/2016, Larégnère (photographie de Mathieu Le Duff).....	51
Figure 37 : Les 6 profils de Larégnère.....	52
Figure 38 : Les 4 profils de Mbé Kouen.....	52
Figure 39 : Exemple de cibles disposées sur l'îlot Larégnère lors de la mission du 02/11/2016 (image drone).....	55
Figure 40 : Les données recueillies pour l'étude selon leur échelle spatiale d'utilisation en fonction de l'échelle temporelle.....	57
Figure 41 : les étapes du protocole de traitement appliqué pour la création des profils de plage et pour leur comparaison.....	58
Figure 42 : les étapes du protocole de traitement appliqué pour la création des MNT.....	59
Figure 43 : Du semi de point (DGPS) à l'interpolation, exemple de la création d'un MNT (Larégnère, 18/03/2016).....	60
Figure 44 : schéma qui souligne la différence entre les éléments sols et bathymétries représentés sur un MNT réalisé à partir de levés terrestres (en noir) et les éléments du sursol représentés par un MNS (en rouge). Réalisation : Marianne BRICQUIR.....	61
Figure 45 : les étapes du protocole de traitement appliqué pour la création des MNS.....	62
Figure 46 : Chaîne de traitement générale utilisée en vision par ordinateur (d'après Bhandari et al. 2015 « Generation of High Resolution DSM Using UAV Images »).....	64
Figure 47 MNS différentiel vertical et vertical/oblique.....	66
Figure 48 : Evolution de la surface de l'îlot Larégnère exprimée en m ²	67
Figure 49 : Les beachrocks de l'îlot Larégnère (Réalisation : Marianne BRICQUIR, 2017 source : province Sud).....	68
Figure 50 : Photographie (d'orientation SE-NO) de plusieurs générations de beachrocks obliques par rapport à la plage actuelle et distants d'environ 40 mètres par rapport au rivage actuel (plage sud de l'îlot Larégnère, source : OBLIC).....	68
Figure 51 : Photographie (d'orientation SE-NO) de plusieurs générations de beachrocks obliques par rapport à la plage actuelle (extrémité est de la plage sud de l'îlot Larégnère, source : OBLIC).....	69
Figure 52 : localisation des transects qui ont permis de définir les secteurs d'évolution homogène, regard porté sur la « pointe est », S1.....	70
Figure 53 : 1) photographie du S1 de 2016 (d'orientation NO-SE) témoignant d'une zone en accrétion mais avec de légères traces d'érosion 2) photographie du S1 de 2017 (d'orientation NE-SO), source : OBLIC.....	70
Figure 54 : Talus d'érosion situé à la pointe sud-est (S2) témoin de la phase de recul de 2007 à 2015 (photographie 2015, OBLIC).....	70
Figure 55 : Figure 52 : Photographie (2016) du secteur 3 (sud-est) sur laquelle on peut observer une recolonisation par une végétation rampante (pourpier), source : Myriam Vendé-Leclerc.....	71
Figure 56 : Photographie (2017) du secteur 3 (sud-est) sur laquelle on peut observer le talus d'érosion de 1,20 mètre. Source : Myriam Vendé-Leclerc.....	71
Figure 57 : Photographie de 2014 qui témoigne de phase de stabilité du S4 (sud) entre 2007 et 2014. Source : OBLIC.....	72
Figure 58 : Photographie récente (2016) du S5 qui illustre la légère phase d'accrétion entre 2012 et 2015. Source : OBLIC.....	72
Figure 59 : Photographie du S6 de 2015 qui illustre la phase d'accrétion entre 2012 et 2016. Source : OBLIC.....	72
Figure 60 : Photographie de 2016 qui témoigne de la stabilité du S7. A droite, on remarque la barrière de protection et une végétation rampante avancée. Source : DENV.....	73
Figure 61 : Photographie de 2016 qui témoigne de la situation en engraissement du S8 sur la période 2004-2016. Source : DENV.....	73
Figure 62 : 1et 2) photographies du S9 de 2014 (1) et 2015 (2) témoignant la phase d'érosion active. 3) photographie du S9 de 2016 qui montre la cicatrization du talus et la recolonisation par la végétation pionnière (source : OBLIC, DENV).....	74
Figure 63 : photographie du S10 en 2016 (source : DENV), secteur stable ponctué de brefs épisode de recul.....	74
Figure 64 : Représentation des vitesses moyennes d'évolution (m/an) de Larégnère sur l'ensemble de la période (haut), et dans le détail par secteur (les deux figures du bas). Réalisation : Marianne BRICQUIR, 2017 ; source : orthographie de la province Sud, 2011.....	75
Figure 65 : Evolution de la surface de l'îlot Mbé Kouen exprimée en m ²	76
Figure 66 : photographie du S1 de Mbé Kouen (2016) en accrétion depuis 2009. Source : OBLIC.....	76
Figure 67 : 1) Photographie du S1 de Mbé Kouen (2016) qui témoigne de la phase d'érosion de 2013-201. 2) Photographie du S1 (2017) qui illustre la stabilité observée actuellement. Source : OBLIC.....	77
Figure 68 : Photographie du S3 de 2016, en phase d'accrétion (2009-2017). Source : Myriam Vendé-Leclerc.....	77
Figure 69 : Photographie du S4 de 2017, stable sur l'ensemble de l'étude (2009-2017). Source : OBLIC.....	78

Figure 70 : 1) Photographie du S 5 de Mbé Kouen (2014) en dynamique de recul. 2) Photographie du S5 (2017) avancée de la LVP qui s'observe au niveau du faux-tabac, par rapport à la photographie précédente. Source : OBLIC	78
Figure 71 : Schématisation de la dynamique sur la période récente (2009-2017) de l'îlot Mbé Kouen (Réalisation Marianne BRICQUIR, 2017).....	79
Figure 72 : Les beachrocks de l'îlot Mbé Kouen (Réalisation : Marianne BRICQUIR, 2017 source : GIE SERAIL).....	79
Figure 73 : Représentation des vitesses moyennes d'évolution (m/an) de Mbé Kouen sur l'ensemble de la période (haut), et dans le détail par secteur (les deux figures du bas). Réalisation : Marianne BRICQUIR, 2017 ; source : orthographie de GIE SERAIL, 2016.....	80
Figure 74 : 1) Niveau marin relatif (source : marégraphes de Chaleix et Numbo) ; 2) ONI (source : NOAA) ; 3) événements cycloniques (source : Météo France) ; 4) superficie de Larégnère ; 5) superficie de Kouen entre 2004 et 2017	81
Figure 75 : MNT différentiels d'une résolution de 5 mètres et interpolés par krigeage (logiciel Surfer version 13) réalisés à partir de semis de points levés au DGPS	84
Figure 76 : emplacement schématique des différents secteurs et des profils de plage utilisés pour l'analyse des évolutions actuelles et exposition de l'îlot aux différentes vagues (Réalisation : Marianne BRICQUIR, 2017).....	85
Figure 77 : Profil 1-a à 5 dates (14/04/2016 ; 08/08/2016 ; 02/11/2016 ; 19/01/2017 ; 07/06/2017), Larégnère	85
Figure 78 : le 19/01/2017, apparition d'un talus de haut de plage d'une hauteur de 60 cm situé entre 13 et 15 m sur le profil de plage. Source : DENV.....	86
Figure 79 : le 07/05/2017, aplanissement du profil en haut de plage et disparition du talus. Source : DENV	86
Figure 80 : Profil 4 à 5 dates (14/04/2016 ; 08/08/2016 ; 02/11/2016 ; 19/01/2017 ; 07/06/2017), Larégnère	88
Figure 81 : le 07/05/2017, formation d'un talus de 40 cm en haut de plage. Source : DENV	88
Figure 82 : Profil 3 à 5 dates (14/04/2016 ; 08/08/2016 ; 02/11/2016 ; 19/01/2017 ; 07/06/2017), Larégnère	89
Figure 83 : A gauche 19/01/2017 et à droite 07/05/2017 : avancée de la limite de végétation rampante mesurée à partir du panneau, Source : DENV	89
Figure 84 : Profil 1-b à 5 dates (14/04/2016 ; 08/08/2016 ; 02/11/2016 ; 19/01/2017 ; 07/06/2017), Larégnère	90
Figure 85 : A gauche 02/11/2016 et à droite 19/01/2017 : recul du talus de 1 m environ. Source : DENV	90
Figure 86 : MNT différentiels d'une résolution de 5 mètres et interpolés par krigeage, réalisés à partir de semis de points levés au DGPS (Surfer version 13).....	91
Figure 87 : emplacement schématique des différents secteurs et des profils de plage utilisés pour l'analyse des évolutions actuelles de Mbé Kouen et exposition de l'îlot aux différentes vagues.....	92
Figure 88 : Profil 5-a à 5 dates (14/04/2016 ; 08/08/2016 ; 02/11/2016 ; 19/01/2017 ; 07/06/2017), Mbé Kouen	93
Figure 89 : A gauche 14/04/2016 et à droite 07/05/2017 : avancée de la LVP. Source : DENV	93
Figure 90 : Profil 6-a à 5 dates (14/04/2016 ; 08/08/2016 ; 02/11/2016 ; 19/01/2017 ; 07/06/2017), Mbé Kouen	95
Figure 91 : A gauche 02/11/2016 et à droite 19/01/2017 : engraissement du bas de plage entre ces deux dates. Source : DENV	95
Figure 92 : Profil 5-b à 5 dates (14/04/2016 ; 08/08/2016 ; 02/11/2016 ; 19/01/2017 ; 07/06/2017), Mbé Kouen	96
Figure 93 : le 24/08/2016, formation d'un talus sur le profil 5b bien visible sur le profil. Source : DENV.....	96
Figure 94 : le 05/06/2017, talus d'érosion toujours actif. Source : OBLIC	97
Figure 95 : représentations du profil 1-a de Larégnère réalisées avec les données acquises au cadre d'Emery (courbe bleue) et les données acquises au DGPS (courbe grise) le 02/11/2016.	99
Figure 96 : représentations du profil 5-b de Mbé Kouen réalisées à partir des données acquises au cadre d'Emery (courbe bleue) et des données acquises au DGPS (courbe grise) le 02/11/2016.	100
Figure 97 : représentations du profil 5-b de Mbé Kouen du 02/11/2016 réalisées à partir des données acquises au cadre d'Emery (courbe bleue en trait plein), au DGPS (courbe grise en trait plein) et à partir de modèles interpolés : d'un MNT (courbe noire en pointillés) et d'un MNS issu d'un traitement photogrammétrique (courbe rouge en pointillés).....	101
Figure 98 : Représentation de la différence d'élévation (Z) entre un MNT (krigeage, 5 mètres de résolution) et un MNT issu de traitements photogrammétriques (résolution de 1,7 cm)	102
Figure 99 : représentations du profil 5-b de Mbé Kouen à la date du 02/11/2016 réalisées à partir d'un MNT « semi de points » (courbe noire en pointillés) et d'un MNT « photogrammétrique » (courbe rouge en pointillés).....	103
Figure 100 : A gauche, MNT différentiel de l'îlot Mbé Kouen entre novembre 2016 et avril 2017, qualifié de MNT différentiel « semi de points » car réalisés à partir de mesures DGPS acquises sur le terrain. A droite, un MNT différentiel de l'îlot Mbé Kouen entre novembre 2016 et juin 2017, qualifié de MNT différentiel « photogrammétrique » car issu du traitement par photogrammétrie d'images acquises par drone.....	104

Liste des tableaux

Tableau 1 : Eléments caractéristiques des plates formes récifales et des îlots qu'elles portent.....	30
Tableau 2 : Classification des événements cycloniques (source : Météo France)	33
Tableau 3 : Evénements cycloniques depuis 2002 à aujourd'hui (source : Météo France)	34
Tableau 4 : Evénements météorologiques notables ayant touché le sud-ouest de la Nouvelle-Calédonie par mois et par année (source : Météo NC)	35
Tableau 5 : Les images aériennes et satellites récoltée pour l'analyse diachronique de l'évolution des îlots et leurs caractéristiques	43
Tableau 6 : Paramètres de transformation pour le géoréféencement des images récoltées.....	45
Tableau 7 : Exemple de secteurs d'évolution homogène définis pour Larégnère	49
Tableau 8 : Typologie des tendances évolutives en fonction de leur vitesse d'évolution (m/an)	49
Tableau 9 : Les dix profils et leurs caractéristiques	52
Tableau 10 : Caractéristiques des semis de points levés au DGPS par mission	53
Tableau 11 : Caractéristiques des missions « drone » du projet EMIL.....	55
Tableau 12 : Nombre d'images drones rejetées lors du tri des photographies.....	63
Tableau 13 : Caractéristiques du traitement photogrammétrique appliqué à chaque jeu d'images drones (par îlot et par date) ..	65
Tableau 14 : Evolution de la surface de l'îlot Larégnère entre 2004 et 2016	67
Tableau 15 : Evolution de la surface de l'îlot Larégnère entre 2004 et 2016	76
Tableau 16 : Stade d'évolution des îlots Larégnère et Mbé Kouen	83
Tableau 17 : Volumes de sédiments calculés par secteur (îlot Larégnère)	87
Tableau 18 : Pertes et gains en sédiments par période et par secteur (îlot Larégnère)	87
Tableau 19 : Volumes de sédiments calculés par secteur (îlot Mbé Kouen)	94
Tableau 20 : Pertes et gains en sédiments par période et par secteur (îlot Mbé Kouen)	94
Tableau 21 : Avantages et inconvénients des méthodes d'acquisition et de traitement de données topographiques testées dans notre étude.....	105

Liste des acronymes

ANR : Agence Nationale de la Recherche
BP : Before Present
BHNC : Base Hydrographique de Nouvelle-Calédonie
BRGM : Bureau de Recherches Géologiques et Minières
CT : Cyclone tropical
EMIL : Projet portant sur « l'Evolution Morphologique des Ilots du Lagon calédonien »
DENV : Direction de l'Environnement de la province Sud (Nouvelle-Calédonie)
DFA : Direction du Foncier et de l'Aménagement de la province Sud (Nouvelle-Calédonie)
DGPS : Differential Global Positioning System
DPO : Decadal Pacific Oscillation
DSAS : Digital Shoreline Analysis System
DTM : Dépression tropicale modérée
DTF : Dépression tropicale forte
ENSO : El Niño-Southern Oscillation
GNSS : Global Navigation Satellite System
GPS : Global Positioning System
IGN : Institut National de l'Information Géographique et forestière
IPO : Interdecadal Pacific Oscillation
IPPC : Intergovernmental Panel on Climate Change
IRD : Institut de Recherche pour le Développement
ITCZ : Intertropical Convergence Zone
LiDAR : Laser Detection and Ranging
LVP : Ligne de Végétation Permanente
MobiTC : Logiciel Mobilité du Trait de Côte
MNS : Modèle Numérique de Surface
MNT : Modèle Numérique de Terrain
OBLIC : Observatoire du Littoral Calédonien
RMS : Root-Mean-Square error
SGNC : Service Géologique de la Nouvelle-Calédonie
SHOM : Service Hydrologique et Océanographique de la Marine
SONEL : Système d'Observation du Niveau des Eaux Littorales
SPCZ : South Pacific Convergence Zone
SCR : Système de Coordonnées de Référence
SSS : Sea Surface Salinity
SST : Sea Surface Temperature
TC : Trait de Côte
UNC : Université de la Nouvelle-Calédonie
VLM : Vertical Land Movement
WPWP : West Pacific Warm Pool

Introduction générale

A l'occasion de la 21^{ème} Conférence des Parties sur le climat (COP 21) qui s'est déroulée à Paris en novembre 2015, les petites îles basses du Pacifique ont été érigées comme l'un des symboles du changement climatique actuel. Dans un article intitulé « *Les îles Kiribati, entre enfer et Paradis* »¹ (19/09/2015), le journal Le Monde dépeint l'archipel et ses habitants comme très vulnérables face à la remontée rapide du niveau marin, cet archipel s'élevant à 2 mètres en moyenne de la surface de l'océan. Pourtant, l'auteur souligne la difficulté de la communauté scientifique à prédire ces changements et leurs impacts et à démêler les processus dus à ces changements environnementaux des causes structurelles tels que les aménagements humains. Le 16 février 2017, une dépression tropicale a touché le Sud du Pacifique. « *A partir de 14h30-15h, les vagues ont commencé à se déchaîner dans la passe et ça a commencé à casser la maison* » témoigne une habitante de l'atoll de Nihiru (Archipel de Tuamotu) dans l'émission France Inter « *Voyage en terre d'Outre-Mer* » du 09/07/2017². Les quelques habitants de l'île d'une superficie de 14 km² ont été évacués par hélicoptère. Ici aussi, on s'inquiète des conséquences du changement climatique. En fin d'année 2017, après la COP 22 qui s'est tenue à Marrakech (Maroc), ce sont les Fidji, petit état insulaire du Pacifique, qui organiseront ce prochain rassemblement étatique dans l'objectif de « *montrer au monde les problèmes* » qu'ils traversent (Frank Bainimarama, 1^{er} ministre fidjien). Cyclones, submersions marines et inondations, perte de terres par l'érosion côtière sont autant de phénomènes auxquels ces états insulaires sont confrontés et qui sont actuellement mis sur le devant de la scène médiatique internationale.

Dans ce contexte actuel de changements climatiques résultants de l'action anthropique responsable d'une accélération de la variabilité naturelle du climat du globe (Rapport du GIEC 2014, Chapitre 5 « Coastal Systems and low-lying areas, Wong et al.) les forçages climato-océaniques et météo-marins connaissent des modifications jouant un rôle important dans l'évolution des littoraux (Paskoff, 1998 ; Chaumillon et al., 2011). Ces derniers sont à l'heure actuelle des systèmes d'interface Terre-Mer particulièrement sensibles aux quatre principaux effets des changements environnementaux : une élévation rapide du niveau marin, une augmentation de la température des eaux océaniques, une acidification des océans et une recrudescence des phénomènes cycloniques (Wong et al., 2014). Ces changements et leurs impacts sont variables d'une région à l'autre du globe. Ils sont l'objet de multiples questionnements scientifiques auxquels tente de répondre, à titre d'exemple, le Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat (GIEC ou IPCC³) qui effectue, en s'appuyant sur de nombreuses études scientifiques, l'évaluation de ces changements globaux afin de déterminer leurs origines et conséquences. Leur premier rapport a été publié en 1990 et le cinquième et dernier en date, en 2014.

Le climat de la planète s'est modifié au cours de son histoire géologique. Il repose sur une succession au fil des millénaires de périodes glaciaires et interglaciaires, responsables d'une alternance entre phases de régressions et de transgressions marines. Lors du Würm, dernier maximum glaciaire du Pléistocène (entre 24 000 et 17 000 BP⁴) précédant l'Holocène (débutée entre 14 000 et 12 000 BP), période interglaciaire dans laquelle nous vivons actuellement, le niveau marin se trouvait à une centaines de mètres environ en dessous du niveau actuel. Puis, vers 5 000 BP (entre 6 000 et 3 000 BP) le niveau de la mer se stabilise, fixant le rivage au voisinage de sa position actuelle (Lombard, 2006). Cependant, une hausse récente et rapide du niveau absolu de la mer sur l'ensemble de la planète entre 1.6 et 1.8 mm/an sur la période allant du siècle dernier à ce début du 21^{ème} siècle a été mesurée par des marégraphes et plus récemment, par des satellites (Peletier, 2001 ; Church et White, 2006, Jevrejeva et al., 2008 ; Ray et Douglas, 2011). Les causes de cette élévation ont pour origine le réchauffement climatique actuel responsable de l'augmentation de la température moyenne des continents et des océans. Ces phénomènes impliquent par conséquent la dilatation thermique de l'eau de mer et une modification du cycle de l'eau entraînant la fonte des glaces continentales et des échanges d'eau douce plus important avec les réservoirs continentaux.

¹ http://www.lemonde.fr/planete/visuel/2015/09/19/les-iles-kiribati-enfer-et-paradis_4753156_3244.html#zWVpg45RrCrQP3uQ.99, Angela Bolis

² Voyage en Outre-Mer, Anne Pastor, France Inter, émission diffusée le 09/07/2017

³ Intergovernmental Panel on Climate Change

⁴ Before Present

Au niveau local, le niveau marin relatif peut également être modifié par des mouvements verticaux, les phénomènes de subsidence ou de surrection, particulièrement important dans les zones côtières situées près des marges actives (*Pelletier, 2009 ; Cabioch, 2003 pour la Nouvelle-Calédonie*).

Outre cette élévation rapide du niveau marin, les océans connaissent une augmentation de leur température, de leur salinité de surface (SST⁵ et SSS⁶) et de leur acidité à l'origine de changements dans la stratification et la circulation des masses d'eau océaniques. Ces modifications ont, entre autres, pour conséquences l'augmentation du blanchiment et de la mortalité des coraux, la migration des espèces vers les pôles ou encore l'augmentation des blooms phyto-planctoniques (*Wong et al., 2014*). L'acidification des masses d'eau océanique a pour origine l'augmentation rapide de la concentration de gaz à effet de serre d'origine anthropique dans l'atmosphère dont le CO₂ absorbée par l'océan. Cette assimilation est à l'origine d'une réduction de 0.1 unité de pH de l'eau de mer, représentant une augmentation de 30 % de la concentration en ions hydrogènes (*Beaugrand et Goberville, 2010*). Ce phénomène limite notamment le processus de calcification d'organismes marins comme les coraux et de certaines espèces planctoniques telles que les foraminifères et les mollusques ptéropodes (*Orr et al, 2005*). Or, les coraux possèdent deux fonctions essentielles pour les plages, ils jouent, d'une part, le rôle de barrière protectrices faces aux houles de tempêtes et d'autre part, celui de pourvoyeur de matériaux sédimentaires biodétritiques.

Ces tendances observées à l'échelle des océans du globe ne sont pas uniformes dans l'espace et le temps. Les structures régionales sont marquées par l'influence de fluctuations climatiques interannuelles et saisonnières (*Cassou et Guilyardi ; Lima et Wetthey, 2012*).

C'est le cas dans l'océan Pacifique qui constitue le plus vaste océan du monde avec une surface de 166 millions de km² et s'étendant sur les deux hémisphères. Des structures climatiques lui sont associées comme la West Pacific Warm Pool (WPWP), immense étendue d'eau délimitée par l'isotherme à 28°C (*Godfrey et al, 1998*), une zone de convection de chaleur, d'humidité, de pluviométrie importante correspondant à la zone de convergence des alizés des deux hémisphères et à la branche ascendante de la cellule de Hadley nommée zone de convergence intertropicale (ITCZ). Enfin, la zone de convergence du Pacifique Sud (SPCZ) est une autre cellule convective propre au Pacifique. L'ensemble de ces structures influencent le climat global et régional.

Des fluctuations interannuelles sont à l'origine d'anomalies de la SST⁶ et de la SSS⁷ qui diffèrent des cycles saisonniers. Ce sont des phénomènes de variabilité climatique régionaux, l'IPO⁷, l'Oscillation Décennale du Pacifique (ODP ou DPO)⁸ ou encore, ENSO⁹. Ces phénomènes climatiques cycliques surviennent au sein d'un bassin océanique donné peuvent avoir de l'influence à une plus large échelle, autrement dit, à celle d'autres océans ou de l'océan global.

El Niño-Southern Oscillation (ENSO), oscillation la plus connue de l'océan Pacifique, est définie par le GIEC comme étant « *un phénomène océanique lié à une fluctuation de la configuration de la pression en surface des zones intertropicales, dénommée oscillation australe. Lors d'un épisode el niño, les alizés dominants faiblissent, réduisant les remontées d'eau froide et modifiant les courants océaniques de telle sorte que la température de la mer en surface augmente, ce qui a pour effet d'affaiblir entre davantage les alizés. [...] La phase froide du cycle est appelée la Nina* ». Lors d'un tel phénomène, une hausse moyenne des masses d'eau océaniques est observée (*Becker, 2011 ; Cazeanve, 2012*). Phénomène couplé atmosphère océan, l'alternance El Nino-La Nina se produit à des échelles de temps de 2 à 7 ans d'environ (*Wang et Wang, 1996*). Depuis ces dernières décennies, la recherche s'est attachée à décrire le phénomène oscillatoire ENSO (*ex. Weisberg et Wang, 1997 ; Wang et Picaut, 2004 ; Cazenave et al, 2012*) et tenter de le modéliser à partir des scénarii de réchauffement climatique (*Walsh et al., 2012 ; Collins et al., 2010*).

Un second phénomène cyclique, l'Oscillation décennale Pacifique (OPD ou DPO¹⁰) décrite par Mantua Steve Hare en 1997, est une fluctuation climatique qui s'observe principalement dans le nord de l'océan mais qui a des répercussions sur l'ensemble du Pacifique tropical. D'origine encore peu connue et débattue par les scientifiques (*Cassou et Guilyardi, 2007*), elle possède une amplitude similaire à l'ENSO et peut se manifester par des épisodes chauds ou froids s'ajoutant ou se retranchant aux épisodes el Niño-la Niña (*Merle, 2006*).

Ainsi, océan et climat sont intimement liés. Les cycles interannuels et multi-décennaux observés au niveau des structures régionales sont donc à prendre en compte dans l'analyse du climat et de ces changements globaux. L'accélération de la hausse du niveau marin et la modification de divers processus physiques et biogéochimiques affectant les environnements côtiers présentés précédemment sont autant d'éléments rentrant en jeu dans les évolutions des littoraux de la planète.

⁵ Sea Surface Temperature

⁶ Sea Surface Salinity

⁷ Interdecadal Pacific Oscillation

⁸ Decadal Pacific Oscillation

⁹ El Niño-Southern Oscillation

A l'instar des forçages climato-océaniques, des forçages météorologiques et marins interviennent également dans la dynamique de ces espaces aux échelles spatiales et temporelles plus fines des processus morphodynamiques événementiels et journaliers. A l'échelle de la journée, la marée, les vents et les houles sont autant de facteurs influant sur la morphologie des côtes. Les événements extrêmes tels que les tempêtes tropicales ou cyclones ont aussi des impacts sur les littoraux qui dépendent de la fréquence des événements et de leurs paramètres : trajectoire, intensité et force des vents. Ils génèrent de forts vents, houles, courants et des ondes de tempêtes à l'origine de surcotes responsables de phénomènes de submersions et d'érosion des littoraux à court terme, de quelques heures à quelques jours (Schroeder, 2000). Une augmentation de la fréquence de ces événements paroxysmaux et de leur intensité liée à un réchauffement de la température de la mer envisagée par le GIEC entraînerait une modification du comportement des systèmes littoraux sur le long terme. Le changement climatique décrit précédemment pourrait entraîner une modification des régimes de vents et par conséquent, des climats de vagues (hauteurs significatives, orientation, fréquences...) et ainsi entraîner des modifications des processus côtiers sédimentaires.

« *Peut-on prévoir les effets du changement climatique sur les littoraux coralliens ?* » Telle est la question que s'est posée en 2008, Virginie Duvat¹¹. Elle expose alors la difficulté de cette prévision au vu de la complexité du fonctionnement de ces milieux qui sont, d'une part, commandés par trois systèmes distincts : le système couplé océan/atmosphère, l'écosystème corallien et les systèmes sédimentaires comprenant les plages et îles coralliennes ; d'autre part, ces systèmes entretiennent des interrelations complexes. Enfin, les actions anthropiques telles que les pollutions d'origine humaine et l'artificialisation du trait de côte menacent l'équilibre de ces espaces fragiles.

Ainsi, des auteurs se sont penchés sur le fonctionnement systémique de littoraux tropicaux. De cette façon, Mirault et David¹² ont analysé les fonctions et logiques d'interfaces des récifs coralliens en prenant l'exemple du littoral de la Réunion. Ainsi, ils les décrivent comme des espaces plurifonctionnels composés d'une zone « tampon » entre océan et milieu terrestre permettant la dissipation de l'énergie des vagues protégeant ainsi la ligne de rivage. Ils possèdent également une fonction de « filtre » permettant le recyclage des nutriments et constituent des espaces « refuges » pour les êtres vivants. Ils sont le théâtre de flux de matières organique et minérale entre le milieu terrestre et le milieu marin et disposent ainsi d'une fonction d'enrichissement, notamment en sédiments, pour le littoral. Enfin, ils constituent des éco-socio-systèmes reposants sur des fonctions de ressources alimentaires et économiques pour les hommes et constituent des supports spatiaux pour leurs activités culturelles et touristiques.

L'impact des changements climatiques sur ces systèmes singuliers, aux enjeux écologiques et sociétaux importants, a été étudié à travers des travaux menés sur l'impact de l'acidification de l'océan sur les coraux (ex. Doney et al., 2007 ; Hofmann et al., 2011) et de l'augmentation des SST entraînant des épisodes de blanchiment des coraux. De plus, la résilience des coraux face à la remontée actuelle du niveau marin, c'est-à-dire leur capacité à adapter leur croissance face à cette modification rapide de leur environnement (Webb et Kench, 2010) a été étudiée. La notion de « seuil » est sous-jacente à ces questionnements : à partir de quelle vitesse de remontée du niveau marin les systèmes coralliens ne pourront plus s'adapter ?

Il est donc indispensable de garder à l'esprit que les réponses possibles des systèmes coralliens aux changements climatiques semblent difficiles à prévoir, tant en termes d'incertitudes liées aux changements futurs du système couplé océan-atmosphère qu'à celles émanant de la réponse des organismes coralliens et des systèmes sédimentaires qui en dépendent. A cela s'ajoutent les impacts anthropiques (pollutions diverses, artificialisation des terres...) pouvant jouer un rôle non négligeable d'altération de ces écosystèmes à des échelles plus fines. Dès lors, il apparaît important « *d'approfondir les travaux de recherches aux échelles locales et régionales afin d'améliorer la connaissance et la compréhension des réponses des récifs et des côtes aux évolutions en cours* » comme le souligne Virginie Duvat.

A l'échelle régionale, des études ont été menées dans la partie intertropicale de l'océan Pacifique, notamment sur des structures coralliennes situées au sud-ouest de cet océan. Concernant l'Australie, le fonctionnement physique et biologique de la Grande Barrière de Corail a été décrit (ex. Webb et al., 2016 ; Gourlay et Colleter, 2004 ; Fabricius et al., 2012 ; Perry et al., 2011). Les conséquences du changement climatique sur ses systèmes côtiers ont également fait l'objet de nombreuses publications. On retrouve des travaux dont l'objectif est de caractériser les risques auxquels sont exposées les côtes australiennes face aux événements ponctuels entraînant des surcotes importantes tels que les cyclones ou à plus long terme, les conséquences

¹¹ Duvat V Peut-on prévoir les effets du changement climatique sur les littoraux coralliens? in : F. BART (coord. – *Les natures tropicales : enjeux actuels et perspectives*, Presses Universitaires de Bordeaux, Collection Espaces Tropicaux, XII^e Journées de Géographies Tropicales, Bordeaux, 1618 octobre 2008, pp 465-479)

¹² Mirault É, and David G 2009 Fonctions et logiques d'interface des récifs coralliens sur le littoral de la Réunion. Communication présentée aux XI^e Journées de Géographie tropicale, «Les interfaces. Ruptures, transitions et mutations», 7-10 novembre 2005, et actualisée en décembre 2009. *Les Cahiers d'Outre Mer Revue de géographie de Bordeaux* 62 571-588

de la tendance actuelle d'élévation du niveau marin (ex. Colberg et McInnes, 2012 ; Harvey et Woodroffe, 2008 Harper et al., 2009).

Ces problématiques se retrouvent sur d'autres types de territoires littoraux telles les nombreux archipels qui parsèment le Pacifique. Les îles coralliennes et les micros-états insulaires de cette partie du monde ont également été étudiés sous l'angle de leur vulnérabilité face aux aléas côtiers tels que l'érosion, la submersion marine, les inondations, la salinisation des sols et des aquifères côtiers. Leurs contraintes physiques telles que leur faible altitude, leurs terres limitées, la grande mobilité de leur trait de côte due à une forte exposition aux variations climatiques, aux extrêmes météorologiques et aux éléments anthropiques comme des densités de population importantes ou encore des opportunités économiques limitées, entraînent une vulnérabilité croissante de ces territoires aux changements environnementaux (Duvat et al., 2013). Cette vulnérabilité a été décrite, à titre d'exemple, sur les atolls de Funafuti dans l'archipel des Tuvalu, (Yamano et al, 2007), de Majuro aux îles Marshall (Spennemann, 1996 ; Ford, 2012), les îles Manihi (archipel des Tuamotu) et Manuae (archipel de la Société) en Polynésie Française (Yates et al., 2013 ; Duvat et Pillet, 2017), aux Fidji (Mimura, 1999), aux Kiribati (Duvat et al., 2013), ou en Nouvelle-Calédonie (Dumas, 2004). En 2010, Christian Bouchard qualifie les petites îles basses coralliennes de « véritables sentinelles dans l'observation des effets des changements climatiques » ou encore « d'excellents laboratoires des dynamiques socio-territoriales contemporaines » (Bouchard et al., 2011).

D'un côté, les dynamiques littorales sont observables aux échelles temporelles diverses : de la journée, lors d'un événement extrême, au niveau des saisons, des années, des décennies, des siècles... Multiples, ces dynamiques se placent sur des échelles temporelles imbriquées. D'un autre côté, les changements environnementaux globaux modifient les dynamiques sédimentaires des littoraux à une petite échelle spatiale, c'est-à-dire avec des phénomènes qui se déroulent sur l'ensemble de la « machine » terrestre régie par l'océan et le climat. Cette imbrication d'échelles rend difficile l'attribution d'une origine, qui elle aussi peut s'exprimer à différentes échelles spatiales, à telle ou telle modification d'un environnement côtier local.

Ainsi, s'inscrivant dans ce contexte planétaire de changements environnementaux, on peut se demander si **les changements géomorphologiques littoraux étudiés à différents pas de temps peuvent être des révélateurs pertinents de ces changements ?**

Les îlots du lagon du sud-ouest de la Nouvelle-Calédonie, territoire d'Outre-Mer français de l'arc mélanésien, constituent des objets d'étude qui ont la particularité d'être des systèmes sédimentaires dont le fonctionnement est intimement lié aux complexes récifaux qui les portent, à leur position dans le lagon et à leur proximité avec la barrière de corail (Garcin et al., 2016). Peu anthropisés, ces îlots pourraient permettre l'observation des seuls changements dus aux forçages climatiques et météorologiques au cours des saisons, des années, des décennies. Ils seraient alors, en quelques sortes, des « laboratoires » permettant la mise en place de méthodes de suivi et d'analyse des changements observés à différentes échelles spatio-temporelles.

En s'appuyant sur le cas de deux îlots du lagon, Larégnère et Mbé Kouen, nous pouvons ainsi nous demander plus précisément quelles sont les interrelations/interdépendances qu'entretiennent le système océan/atmosphère, les écosystèmes coralliens et les systèmes sédimentaires étudiés ? Quelles sont les évolutions futures de chacun de ces sous-systèmes que peuvent entraîner les changements environnementaux actuels ? Comment étudier l'évolution de l'ensemble du système à différents pas de temps (des évolutions saisonnières à l'évolution sur plusieurs décennies) ? Cette étude vise à apporter certains éléments de réponse à ces questionnements.

Un premier chapitre sera consacré à la présentation d'un état de l'art concernant les méthodes de l'étude géomorphologique des littoraux à différents pas de temps. Le contexte général de la Nouvelle-Calédonie et plus précisément du lagon sud calédonien et de ces îlots sera dépeint. Nous nous attacherons à décrire le jeu de données utilisé pour analyser l'évolution morphologique et la réponse aux forçages environnementaux des îlots Mbé Kouen et Larégnère. Ces données sont de sources multiples et concernent aussi bien l'échelle régionale (sud-ouest de l'océan Pacifique) que l'échelle locale (le lagon sud et les îlots). Puis, nous nous appliquerons à détailler et justifier la méthodologie adoptée pour traiter les données topographiques récoltées lors des missions terrain effectuées dans le cadre du projet EMIL. Le chapitre 3 exposera les différents résultats obtenus à partir de profils de plages, de Modèles Numériques de Terrain et de Surface (MNT/MNS) et de modèles océanographiques. Une analyse de la corrélation entre facteurs de forçages et évolution des îlots à diverses échelles spatio-temporelles y sera également exposé. Enfin, cet ultime chapitre permettra de discuter autour des limites des résultats obtenus et des perspectives que laisse entrevoir cette étude quant à l'observation des littoraux calédoniens.

Chapitre 1. Contexte général et positionnement scientifique

« Toute morphologie dérive d'un système d'érosion mis en place par le climat et qui s'exerce sur des terrains et des reliefs divers dus à la structure et à la tectonique » écrivait en 1950 André Cholley, géographe et géomorphologue français. Dans ce premier chapitre, notre objectif consiste à replacer l'étude de la morphologie des îlots du lagon sud calédonien dans le cadre plus global de l'étude des dynamiques littorales. Ainsi, une première section s'intéresse à la définition de concepts de base tels que le littoral, les systèmes côtiers et les processus physiques et environnementaux qui s'y déroulent. Nous reviendrons également sur les différentes méthodes possibles pour étudier les littoraux à différents pas de temps et échelles spatiales et nous justifierons notre approche. Enfin, ces quelques pages seront l'occasion de décrire le contexte physique de la Nouvelle-Calédonie, le fonctionnement du lagon sud et de présenter les deux sites de notre étude.

Section 1. L'étude de l'évolution morphologique des littoraux : quelles techniques pour quelles échelles spatio-temporelles ?

1. Des échelles temporelles et spatiales pour l'étude des dynamiques littorales

1.1. Le littoral, un objet géographique fondamentalement dynamique

Le littoral se définit en tant qu'espace à l'interface entre lithosphère, hydrosphère et atmosphère (Paskoff, 1998). Ainsi, il est régi par des dynamiques à la fois marines, terrestres et atmosphériques, chacune marquée par une forte variabilité spatiale et temporelle. La zone côtière est soumise aux agents météo-marins (le vent, la houle, les courants), au ruissèlement et infiltration des eaux continentales et aux phénomènes astronomiques (onde de marée) et à divers agents biologiques et anthropiques. Ces agents peuvent se regrouper sous le terme de « forçages » (Suarez, 2009) et sont responsables de processus morphogènes. C'est en cela que le littoral est fondamentalement dynamique (Meur Ferrec, 2006).

Au sens physique du terme, le littoral se décompose comme suit :

- un **domaine marin** avec, une plage au sens large, elle-même composée de la zone intertidale (zone de balancement des marées, située entre les Pleines Mers de Vives Eaux (PMVE) et les Basses Mers de Vives Eaux (BMVE) aussi nommée estran et de la zone subtidale ou plage sous-marine, toujours immergée ;
- un **domaine terrestre**, composé du haut de plage et de la côte ;
- la **limite entre ces deux domaines**, que nous allons nommer « **trait de côte** » (Faye, 2010) tout au long de ce rapport.

Le schéma ci-dessous reprend l'ensemble de ces éléments et donne leurs équivalences anglophones.

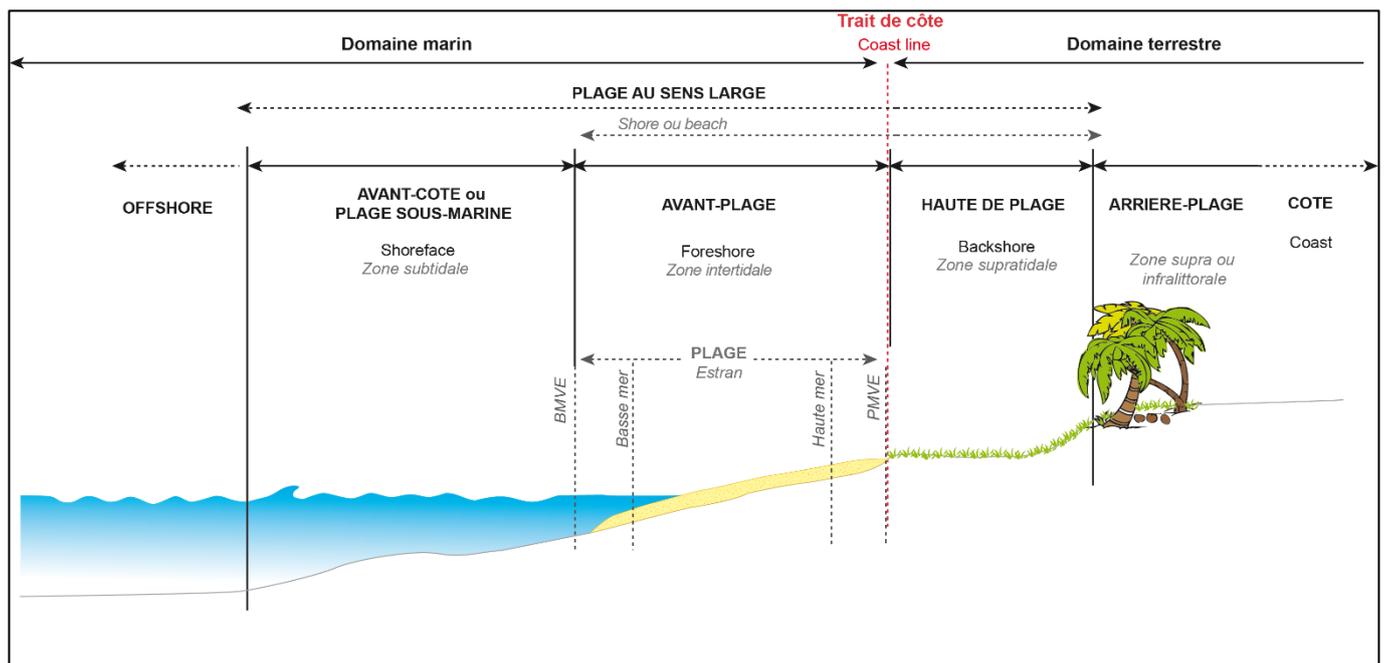


Figure 1 : Les éléments constitutifs du littoral, d'après Faye, 2010 et le rapport OBLIC 2013

Cependant, le littoral ne se définit pas seulement par son seul cadre physique. Il constitue également un espace de vie pour les sociétés humaines. La bande côtière s'élargit alors pour devenir « littoral d'œkoumène », habité et transformé par l'homme (Bousquet, 1990). Cette anthropisation de la zone côtière peut être à l'origine d'une artificialisation responsable à son tour de la modification des processus contrôlant les formes littorales (Corlay, 1995 ; Paskoff, 1985 ; Meur Ferrec, 2006).

Les littoraux du monde revêtent différentes formes : côtes à falaise, plages de sable, marais maritimes... Dans les années 1985, les travaux menés par Bird soulignent déjà que pour 70 % des côtes sableuses, le processus dominant se trouvait être l'érosion, que 20 % étaient relativement stables et que seulement 10 % d'entre elles connaissaient une phase d'accrétion. Rolland Paskoff montre lui aussi l'importance des processus érosifs qui se déroulent sur les côtes à l'échelle mondiale et régionale (Paskoff, 1985 ; Paskoff et Clus-Auby, 2007). A l'échelle européenne ce sont 20 000 kilomètres de côtes, soit 20% du linéaire côtier qui subit cette tendance régressive (EUROSION, 2004). En France métropolitaine, près d'un quart des côtes sont en érosion (Institut Français de l'Environnement, 2007). Les scientifiques ont fait le même constat dans l'Outre-Mer français (ANR CECILE¹³, Le Cozannet et al. 2011) : ainsi, en Guadeloupe, la moitié des côtes basses sableuses sont concernées (Roques et al, 2010).

Le littoral est donc par définition mobile, mais l'érosion des côtes se révèle être une préoccupation des sociétés contemporaines installées au plus près des côtes, d'autant plus dans un contexte de changements climatiques où l'élévation rapide du niveau marin accentue les phénomènes érosifs. Afin de comprendre l'ensemble des processus modifiant l'environnement côtier, qu'ils soient naturels ou anthropiques, il est important de voir le littoral comme un système complexe.

1.2. La géomorphologie littorale ou l'étude physique des systèmes côtiers

La géomorphologie se définit comme « la discipline scientifique dont l'objet est de nommer et de mesurer les formes du relief, mais aussi d'expliquer leur genèse et de prévoir leur évolution » (source : encyclopédie Universalis en ligne). En géomorphologie littorale, une côte sableuse peut être assimilée à un système régi par l'action des forçages physiques et environnementaux. La plage repose sur un substratum correspondant à la roche mère géologique. Sa topographie dépend avant tout des agents responsables du transport de sédiments. Le bilan sédimentaire d'une plage correspond à la différence entre les volumes de sédiments entrant et sortant (Cohen et al., 2002). Notion très ancienne dans le champ disciplinaire de la géomorphologie, c'est à partir des années 1960 que les premières applications en recherche apparaissent à travers des études régionales, notamment une étude de cas en Californie réalisée par Bowen et Inman en 1966¹⁴ (Suanez S., 2009). Le bilan sédimentaire permet de qualifier et quantifier les pertes et les gains en sédiments du système côtier sous l'action des forçages naturels et anthropiques. Le schéma ci-dessous correspond à une représentation du système « plage » (Cohen et al, 2003), intégrant l'ensemble des flux entrant et sortant d'énergie et de sédiments.

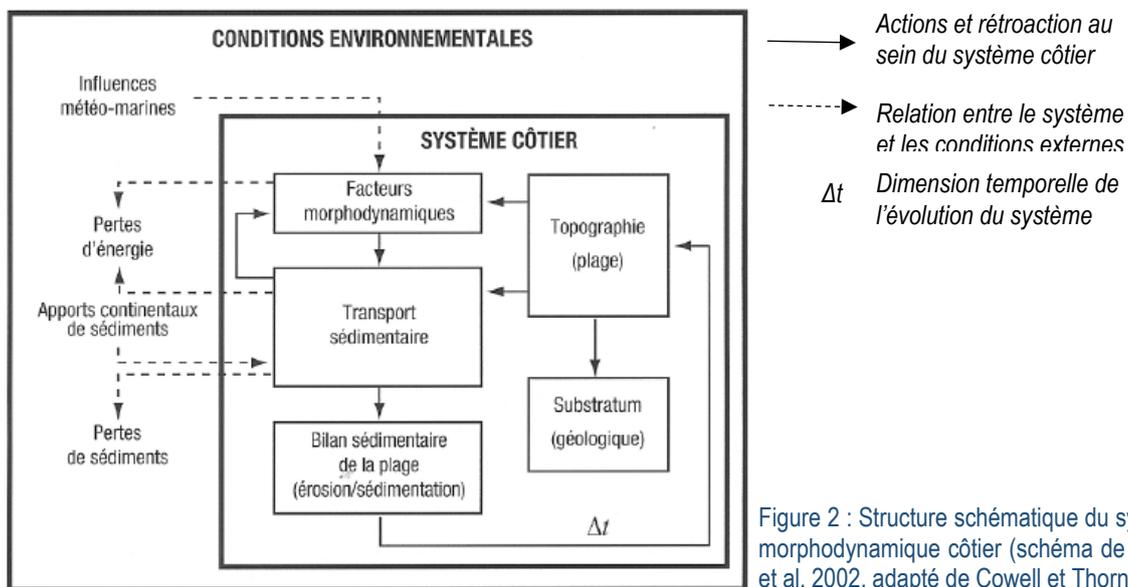


Figure 2 : Structure schématique du système morphodynamique côtier (schéma de Cohen et al. 2002, adapté de Cowell et Thorn, 1994)

¹³ Agence Nationale de la Recherche (ANR) : projet Changement Environnementaux Côtiers : Impact de L'Elévation du niveau de la mer (CECILE) incluant le BRGM, le laboratoire LEGOS, l'Université de La Rochelle, le CNRM, CREOCEAN, le SHOM et le CERFACS

¹⁴ Bowen A.J., Inman D.L. (1966) : Budget of littoral sands in the vicinity of Point Arguello, California, U.S. Army Coastal Engineering Research Center, Tech. Memorandum, n° 19, 41 p. non publié.

La dimension temporelle de l'évolution d'un système côtier est à prendre en compte. Les phénomènes côtiers relèvent de trois échelles temporelles naturellement imbriquées (Henaff et al., 2013). On distingue ainsi :

- l'échelle des temps géologiques, où les processus morphologiques ont façonné les formes littorales actuelles ;
- l'échelle séculaire permettant l'étude de l'évolution historique du trait de côte ;
- enfin, l'échelle météorologique des événements tempétueux, où des évolutions brutales, comme des phénomènes d'érosion importants, peuvent être observés.

Les facteurs de forçage à l'origine de ces phénomènes régissant les dynamiques littorales peuvent agir à différentes échelles spatiales (Suanez, 2009), du grain de sable au linéaire côtier mondial. La complexité de cette variabilité spatio-temporelle des processus côtiers peut être illustrée de la manière suivante :

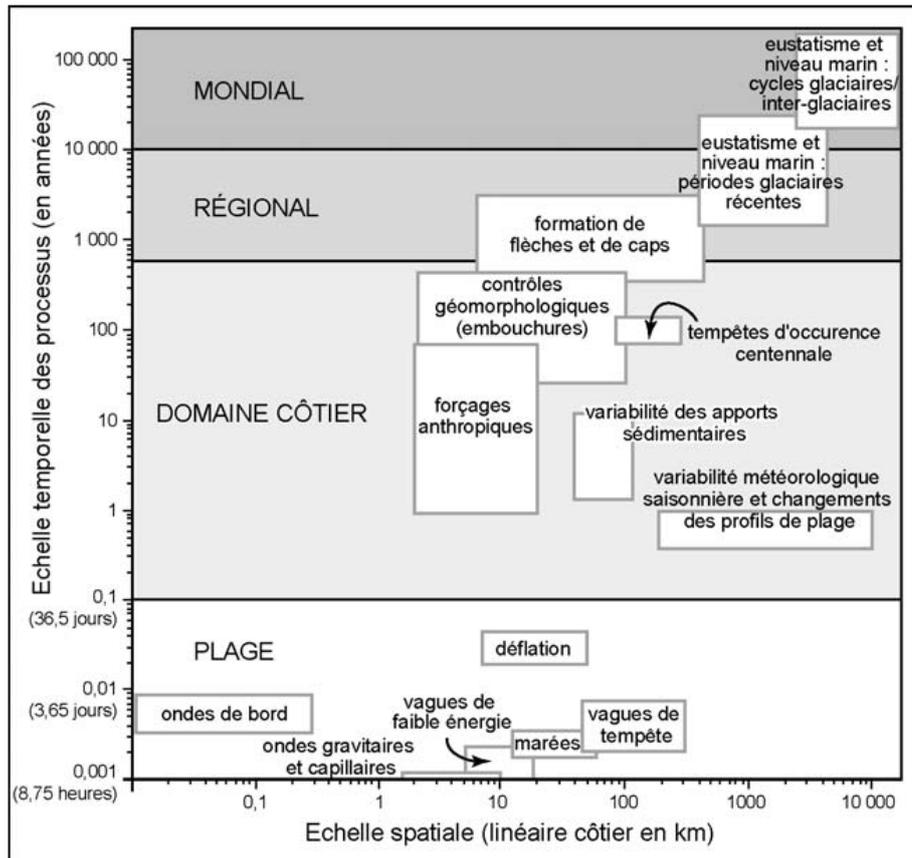


Figure 3 : Echelles spatio-temporelles des changements du littoral (d'après Suanez S., 2009, adapté de S. Fenster et al., 1993)

Comme le rappellent Aagaard et al. en 2004¹⁵, l'une des problématiques majeures dans les recherches actuelles en géomorphologie consiste à intégrer les différentes échelles spatiales et temporelles dans la compréhension de la dynamique des formations sédimentaires. Les géomorphologues ont donc développé des cadres théoriques différents pour quantifier et modéliser les interactions entre formes sédimentaires et processus physiques sur le court et très court termes d'une part, et, d'autre part, pour comprendre les principaux schémas de circulation sédimentaire régulant l'évolution du littoral sur des pas de temps plus importants et donc généralement à une plus petite échelle géographique (Pian S., 2010). Ces techniques ont, elles aussi, évoluées dans le temps en fonction de l'avancée technologique (Cohen et Gardel, 2011). Nous allons à présent en présenter les principales.

¹⁵ Aagaard T, Davidson-Arnott R, Greenwood B, and Nielsen J 2004 Sediment supply from shoreface to dunes: linking sediment transport measurements and long-term morphological evolution. *Geomorphology* 60 205-224

2. Les méthodes de suivi de la mobilité des côtes

2.1. A moyen et long termes (< 10 ans – échelle séculaire) : l'analyse de la mobilité du trait de côte par l'étude diachronique

L'étude diachronique de la cinématique du trait de côte du littoral permet une analyse de l'évolution antérieure des côtes, pouvant remonter jusqu'au début du 20^{ème} siècle à partir de documents iconographiques : cartes anciennes, cartes postales, photographies aériennes verticales, images satellites (Hénaff et al., 2015).

Les observatoires photographiques

Dans une étude des changements littoraux à l'échelle séculaire, on peut reconstituer l'évolution du trait de côte à partir d'images d'archives ou de cartes postales anciennes et ainsi reconstituer les évolutions passées. Ainsi, plusieurs observatoires du littoral de la côte métropolitaine ont mis en place ce type d'observatoire photographique (par exemple : Lambert et Garcin, 2013 dans Garcin et Vendé-Leclerc, BRGM 2016).

L'analyse de la mobilité du trait de côte à partir d'images aériennes et de cartes

Des photographies aériennes (IGN, SHOM, US army) et des cartes anciennes peuvent être recueillies pour ensuite, par méthode de photo-interprétation, en extraire le trait de côte. Les anciens documents doivent être au préalable scannés, géoréférencés et, si possible, ortho-rectifiés pour pouvoir être interprétés. La précision de restitution de la position historique du trait de côte dépend de leur résolution, de la précision de leur géoréférencement et des marqueurs de l'évolution du littoral choisi.

De nombreux littoraux ont ainsi fait l'objets de travaux. A titre d'exemple, sur la côte méditerranéenne, on retrouve les travaux de Paul Durand (1998) concernant le littoral de Saint-Cyprien. En Bretagne, c'est l'évolution du trait de côte de l'archipel des Glénans dans le Finistère Sud qui a été l'objet de recherches (Hénaff et al. 2015). Ailleurs dans le monde, l'ensemble de la côte mauritanienne jusqu'à la Guinée-Bissau a fait l'objet d'une thèse qui s'appuyait sur la récolte et le traitement d'images aériennes et de cartes topographiques anciennes (Faye, 2010).

2.2. A grande échelle et à court terme (< 1 ans – 10 ans) : l'approche morphodynamique

Dans les années 1980, l'approche morphodynamique est conceptualisée par Wright L.D et B.G Thom (Wright et Thom, 1984 et 1994). Ils la définissent alors comme une approche permettant d'analyser « (1) les caractéristiques et la variabilité spatio-temporelle des conditions de l'environnement côtier, (2) les processus hydrodynamiques et morphodynamiques des interactions et transformations qui s'opèrent au sein du système côtier qui produisent les comportements des formes et leurs changements morphologiques observables, (3) les séquences d'évolution à court et long termes ». Cette approche se veut être un cadre méthodologique pour l'étude des formations sédimentaires côtières. Elle propose en effet « d'étudier les mouvements de sédiments sur une plage à grande échelle spatiale (c'est-à-dire une petite surface) à court terme » (Cohen et al. 2002).

A l'échelle d'une plage ou d'une côte rocheuse, différentes méthodes d'acquisition sur le terrain se sont développées et sont aujourd'hui mises en œuvre de manière régulière pour l'étude d'un grand nombre de littoraux. Elles ont été recensées en 2012 par le BRGM dans une « Synthèse de références des techniques de suivi du trait de côte » à destination des gestionnaires, opérateurs techniques et scientifiques. Ces méthodes permettent l'obtention de données soient qualitatives, soient quantitatives à court, moyen et long termes.

a. Les levés terrestres

Les observations géomorphologiques et sédimentologiques

Cette méthode consiste à observer, noter, caractériser des marqueurs géomorphologiques, botaniques ou hydrodynamiques sur le terrain tels que, à titre d'exemple : talus d'érosion (Figure 4), zones en accrétion, limites de végétation, granulométrie des sédiments (Garcin et Vendé-Leclerc, BRGM, 2016) etc... C'est une approche qualitative, qui, avec des observations régulières, peut permettre de repérer des tendances évolutives d'un segment de côte étudié. Elle peut être complétée par une observation par rapport à un repère fixe présent sur le site d'étude. On peut alors mesurer la distance entre ce repère, généralement fixé en arrière de la plage, et les marqueurs géomorphologiques.



Figure 4 : Talus d'érosion photographié à Larégnère le 24/08/2016. Le carnet donne l'échelle.

Les outils et méthodes que nous allons exposer par la suite permettent de réaliser des profils de plage et/ou de modéliser la topographie d'un site côtier.

Le cadre

Le cadre est un instrument de mesure topographique mis en place dans les années 1960 par Emery (*Emery, 1961*) et repris vingt ans plus tard par Troadec pour le suivi des côtes de la Réunion (*Troadec, 2012*). Plus récemment, il a été appliqué pour le suivi des littoraux des Comores (*Sinane et al., 2010*) et d'Ouvéa en Nouvelle Calédonie (*Le Duff et al., 2017*). L'outil se réfère aux principes de la topométrie : il combine un niveau à bulle et une mire coulissante, permettant la mesure du dénivelé tous les mètres, à partir d'un repère fixe (dont les coordonnées sont connues) et le long d'un profil matérialisé au sol (corde tendue, tracé rectiligne sur le sable) ayant un azimuth connu et perpendiculaire à la côte (*Rapport OBLIC 2016*). Ses principaux intérêts sont son faible coût et sa facilité de mise en œuvre sur le terrain.

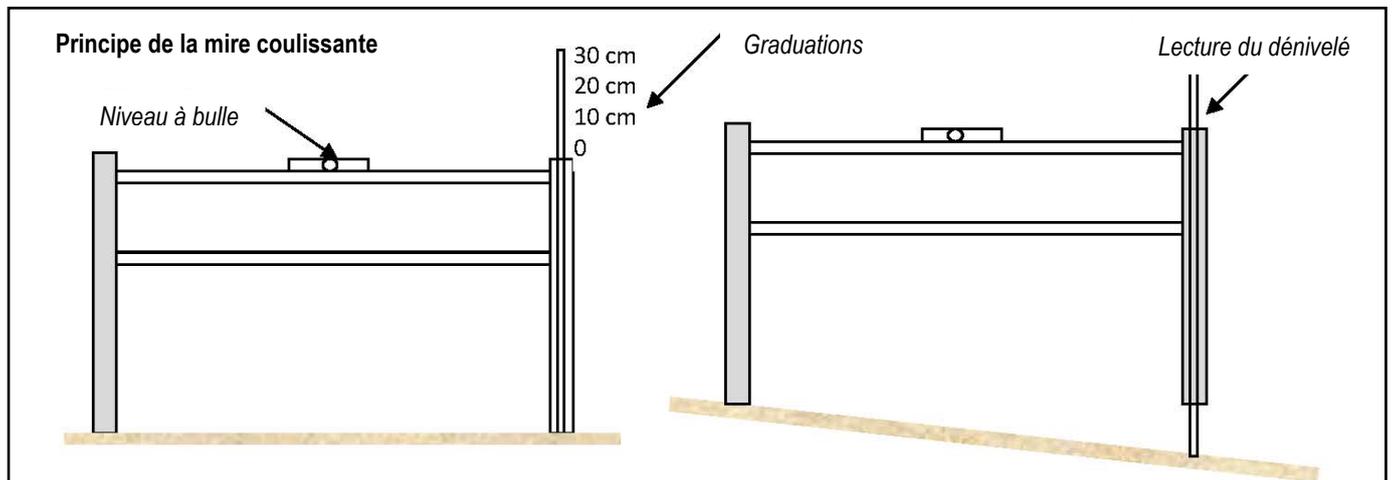


Figure 5 : Schéma et principe du cadre d'Emery, technique utilisée dans la réalisation de profils de plage (Trodec, 2012)

Les théodolites

Le terme théodolite regroupe l'ensemble des instruments de géodésie tels que le tachéomètre. Ce sont des outils de mesure topographique très précis, alliant principes de géodésie et d'optique. Pour les utiliser, il faut cependant faire appel à un personnel qualifié tant pour la mise en œuvre sur le terrain que pour le traitement des données.

GPS et DGPS

Le GPS (Global Positioning System) permet le radio-positionnement d'un point à partir d'une pléiade de satellites. Ainsi, l'instrument détermine l'emplacement du point à partir de la mesure du temps de trajet des signaux radioélectriques émis par les satellites par triangulation. La précision des coordonnées en x et en y est de l'ordre de 1 à 10 mètres en fonction du lieu et du matériel. Sa trop grande incertitude concernant la valeur de l'altitude z ne convient pas à une étude topographique de précision. Les points ainsi levés peuvent être ensuite insérer dans un SIG pour être traités.



Figure 6 : Repère fixe et base du DGPS installée lors du levé terrain du 05/07/2017 sur l'îlot Mbé Kouen (photographie : Marianne BRICQUIR)

Le GPS différentiel (DGPS : Differential Global Positioning System) est davantage utilisé pour le suivi des littoraux du fait de sa plus grande précision qui est de l'ordre du centimètre. A la différence du GPS, il est composé d'un récepteur GPS, aussi appelé « base », (illustrée par la Figure 6 ci-contre) positionné sur une station dont les coordonnées en x,y et z sont connues avec précision. Cette station peut être, par exemple, une borne géodésique. La base est couplée à un GPS mobile. Ainsi, ce système permet de calculer l'écart entre la position réelle connue et celle donnée par les satellites. Les points levés au DGPS peuvent être intégrés à un SIG et permettre l'obtention d'un semi de points pour la réalisation de Modèles Numériques de Terrain (MNT).

Scanner 3D ou LIDAR terrestre

Le scanner 3D (ou Terrestrial Laser Scanning : TLS), aussi nommé LiDAR terrestre est notamment utilisé pour l'étude des falaises rocheuses afin de suivre leur évolution dans le temps et de quantifier les volumes effondrés entre chaque période (*exemple de travaux sur les côtes à falaise de la Manche : Rohmer et Dewez 2015 ; Letortu et al., 2015*). Il possède une précision centimétrique et est employé pour la création de modèles 3D et pour la cartographie. Le principe repose sur l'émission-réception d'un signal laser. Les mesures peuvent être prises à partir du sol ou à partir d'une station mobile terrestre ou marine (bateau). Si le scanner est embarqué, il doit être couplé avec un dispositif DGPS et une centrale inertielle¹⁶ pour la prise en compte des mouvements du porteur ou véhicule. Cette technique permet l'acquisition d'un nombre très important de mesures, qui peut atteindre le million de points par minute, avec plus d'un point par millimètre.

Des techniques innovantes : imagerie vidéo et drone

La stéréophotogrammétrie est une technique d'imagerie qui permet de déterminer la position en trois dimensions d'un point à partir de son observation sous deux angles de vue différents. Elle est aussi nommée photogrammétrie. Elle est aujourd'hui grandement utilisée pour le traitement d'images acquises sur le terrain afin de quantifier l'évolution des littoraux.

L'imagerie vidéo est utilisée sur les côtes métropolitaines. Le BRGM a mis en place la première installation de ce type dans les années 1980 afin de suivre l'évolution du site de Sète (Occitanie). Les caméras numériques sont connectées à des ordinateurs qui enregistrent les données. Les images ainsi acquises permettent d'étudier quantitativement l'évolution de la côte en réalisant des Modèles Numériques de Surface (MNS) à partir du principe de la photogrammétrie décrit précédemment. Cette technique ne nécessite pas de ressources importantes, qu'elles soient financières ou humaines, et permet d'obtenir des images à une très haute fréquence temporelle (toutes les heures par exemple).

¹⁶ Inertiel : relatif à la détermination de la position d'un mobile par la mesure de ses accélérations (Source : Dictionnaire Larousse en ligne)

De même, une nouvelle technique est en plein essor : l'acquisition de vidéos et de photographies par drone. Des essais d'utilisation sur les littoraux sont réalisés par le laboratoire EPOCH (Bordeaux), le BRGM (STOOB-Obstlitt, *Rosu et al. 2015*) et par l'Université de Nouvelle-Calédonie (*Cohen et al. 2015*). Les données acquises permettent la réalisation de MNS pour quantifier des volumes de sédiments gagnés ou perdus, à une précision très importante, de l'ordre de 5 à 10 cm (*Rapport OBLIC, 2016*).

b. Les levés aériens et images satellites pour l'utilisation des techniques de télédétection.

La télédétection se définit comme « l'ensemble des techniques qui permettent, par l'acquisition d'images, d'obtenir de l'information sur la surface de la Terre (y compris l'atmosphère et les océans), sans contact direct avec celle-ci. La télédétection englobe tout le processus qui consiste à capter et enregistrer l'énergie d'un rayonnement électromagnétique émis ou réfléchi, à traiter et analyser l'information qu'il représente, pour ensuite mettre en application cette information » (d'après le site Web du Centre Canadien de Télédétection : <http://www.ccrs.nrcan.gc.ca>). Sur la frange côtière, c'est une méthode largement utilisée pour l'extraction du trait de côte par photo-interprétation ou par extraction numérique.

Les images proviennent de diverses sources. On retrouve :

- Les images aéroportées regroupant les images aériennes et LiDAR :
 - o Les campagnes d'acquisition d'images aériennes par l'IGN ou la DITTT en Nouvelle-Calédonie ;
 - o Le programme LITTO3D (porté par le SHOM et l'IGN) vise à produire un Modèle Numérique de Terrain (MNT) couvrant l'intégralité des côtes métropolitaines et des collectivités d'Outre-Mer depuis l'altitude de 10 m au-dessus du zéro IGN jusqu'à l'isobathe -10 m ;
- Les images satellitaires ;
- Les données radar.

c. Les levés en mer

Pour l'étude de la bathymétrie des fonds marins, plusieurs techniques basées sur l'utilisation des ondes acoustiques émises et réfléchies par le fond, sont utilisées tels que : l'échosondeur monofaisceaux et multifaisceaux, l'échosondeur sismique réflexion, le sonar à balayage latéral¹⁷.

Les différents outils permettant de réaliser des levés terrestres ou en mer ont été présentés dans le but de souligner la diversité des méthodes existantes, plus ou moins faciles à mettre en œuvre dans le suivi de la mobilité des littoraux. Les approches à l'ensemble des échelles spatio-temporelles sont complémentaires (*Levoy, 1994*). On peut récapituler l'ensemble de ces techniques d'observation, de qualification et de quantification des évolutions littorales selon l'échelle d'utilisation possible et leur degré de précision qui a augmenté avec l'avènement de nouvelles technologies (Figure 7) permettant d'aller vers une plus grande finesse d'analyse (*Cohen et Gardel, 2011*).

¹⁷ Mallet C. Michot A., avec la collaboration de De la Torre Y., Lafon V. Robin M., et Prevotiaux B., 2012 : *Synthèse de références des techniques de suivi du trait de côte* – Rapport BRGM/RP – 60616-FR, 162 p., 100 fig., 7 ann.

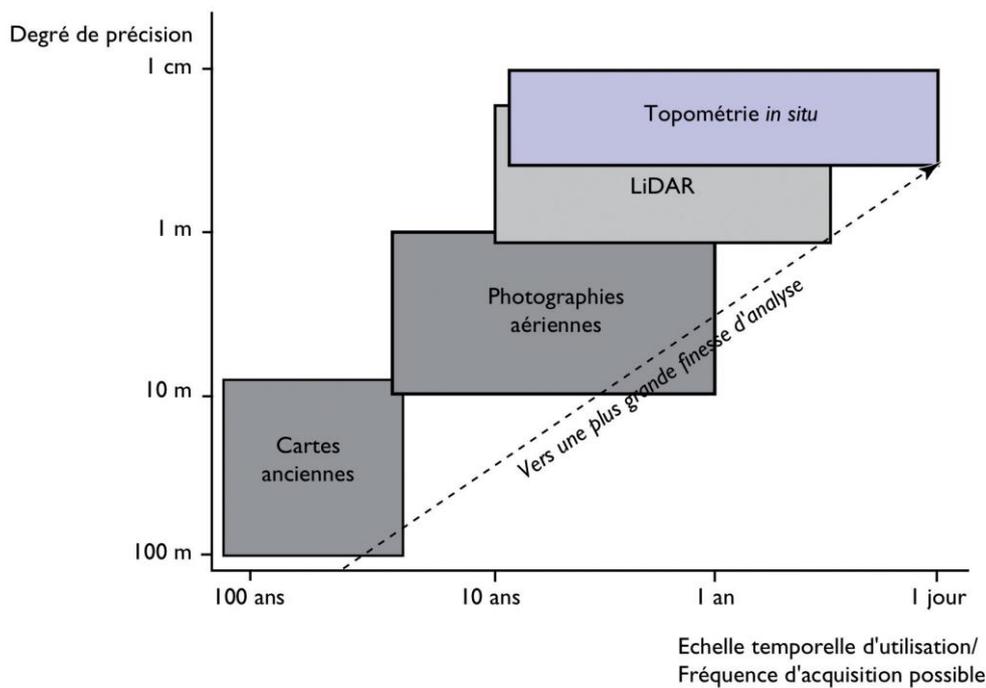


Figure 7 : Le degré de précision en fonction de l'échelle d'utilisation des outils pour le suivi des littoraux (Cohen et Gardel, 2011)

Ainsi, dans la lignée des travaux entrepris par *Garcin et Le Gozannet, 2013*¹⁸ portant sur le fonctionnement systémique d'une île haute telle que la Nouvelle-Calédonie, nous allons tester les deux approches décrites précédemment. Notre étude s'y prête particulièrement bien : la combinaison d'une approche à court terme sur le temps du projet EMIL (2016-2017) d'un côté et de l'autre, une approche diachronique à moyen terme (à partir d'une récolte d'images aériennes) nous permettra de caractériser les réponses des systèmes « îlots » aux facteurs de forçages à l'origine de ces processus en intégrant un emboîtement d'échelles temporelles et spatiales.

¹⁸ **Garcin M, Le Cozannet** 2013 The driving factors of coastal evolution : toward a systemic approach. Climate change and sea level rise : coastal vulnerability and societal impacts, Jun 2013, Collège de France – Paris, France.

Section 2. Lagon, récif, îlots de Nouvelle-Calédonie : des objets d'étude singuliers

La Nouvelle-Calédonie se situe à 1 500 kilomètres de l'Australie au sud de l'arc mélanésien et à proximité du tropique du Capricorne. Elle est constituée d'une île principale, la Grande-Terre entourée d'un large lagon ceinturé par un récif barrière de plus de 1 000 kilomètres de long et d'îles secondaires, l'archipel des Loyautés à l'Est (Maré, Tiga, Lifou et Ouvéa), de l'île des Pins au Sud et des îles Bélep au Nord (Figure 8). Le long de l'axe sud-est / nord-ouest du centre de la Grande-Terre se dresse une chaîne de montagnes dont les plus hauts sommets s'élèvent à plus de 1 600 mètres d'altitude.



Figure 8 : Localisation de la Nouvelle-Calédonie, de ses récifs, îles et îlots de notre étude (Réalisation : Marianne Bricquir, 2017 ; source : Géorep, DITTT)

Ses systèmes coralliens et ses littoraux ont fait l'objet de plusieurs études scientifiques. La barrière de corail qui borde le territoire est la deuxième plus grande au monde, après la Grande Barrière de corail (Australie). Dès les années 1960, Avias se penche sur l'étude spécifique des récifs coralliens de la Nouvelle-Calédonie (Avias, 1959 ; Avias et Coudray, 1967) alors que Guilcher s'intéresse à l'étude géomorphologique du grand récif sud (Guilcher, 1965). Peu après les chercheurs étudient davantage la formation du lagon à travers la reconstitution de son évolution au cours du Quaternaire supérieur (Dugas, 1980) et la représentation de ses faciès sédimentaires par le biais de cartographies (Launay, 1970 ; Dugas et Debenay, 1980 et 1981 ; Debenay, 1987). En continuité avec les travaux précédents, les scientifiques s'attachent dans les années 2000 à comprendre - l'évolution géologique de la Nouvelle-Calédonie et de ses paléo-environnements (Lafay, 2000 et Lagabrielle, 2005), l'histoire de l'édification des récifs calédoniens (Gabioch et al., 1996 ; Gabioch et al., 2008 ; Le Roy et al., 2008) et la dynamique tectonique actuelle de l'île (Regnier et al., 1999 ; Pillet et Pelletier, 2004). En 2004, Andréfouët et Torres-Pullizza publient l'« Atlas des récifs coralliens de Nouvelle-Calédonie » (Andréfouët et Torres-Pullizza, IRD).

Plus récemment, les systèmes lagonaires ont suscité de l'intérêt au sein de la communauté scientifique travaillant sur le territoire (ex. Andréfouët et al., 2009 ; Yamano et al., 2014). Le fonctionnement hydrodynamique des lagons, c'est-à-dire la circulation des eaux et des courants, a été modélisé (Douillet, 1998 ; Douillet et al., 2001 ; Jouan et al., 2006 ; Le Gendre et al., 2008 ; Ouillon et al., 2004 ; Faure et al., 2010 ; Chevalier, 2015). Ces conditions environnementales particulières sont à l'origine d'une activité biologique qui y est directement liée (Carassou, 2010).

Le complexe « récif-lagon » a également été analysé à travers l'étude de sa réponse hydrodynamique aux forçages de la houle, de la marée (Chevalier et al., 2015), des niveaux marins extrêmes (Thiebot et al., 2010) et des cyclones (Guillemot et al., 2010). Plus largement, les conditions océanographiques au large de la Nouvelle-Calédonie et à proximité du lagon ont également fait l'objet de modélisation (Lefèvre, 2010 ; Cravatte et al., 2015).

Le lagon sud-ouest de Nouvelle-Calédonie a été analysé sous l'angle des dynamiques humaines qui s'y déroulent et de leur gestion. En effet, le lagon est un support pour des activités socio-économiques telles que la plaisance, la pêche de loisir ou encore les sports nautiques (ex. Dumas, 2009 ; Jollit, 2010)

Notre étude concerne le littoral composé par le lagon qui borde l'ouest de la Grande-Terre, s'étendant de la passe Saint-Vincent au Nord à la Corne Sud, dont une partie a été classé au Patrimoine Mondial de l'Organisation des Nations Unies pour l'Education, la Science et la Culture (UNESCO) depuis 2008. Il apparaît important d'en décrire les composantes physiques afin de mieux saisir son fonctionnement sédimentaire dont dépendent les formations qui le parsèment.

1. Le lagon sud de Nouvelle-Calédonie

1.1. Caractéristiques physiques

Un lagon est défini comme une « étendue d'eau peu profonde (moins de 50 mètres) enserrée dans un atoll – ou fermée par un récif-barrière, au fond sableux ou vaseux, parsemé parfois de pinacle, de récifs ou d'îlots » (*Dictionnaire de géomorphologie, Genest, 2000*). Le lagon sud-ouest possède une superficie de 2 000 kilomètres carrés et une profondeur moyenne de 17,5 mètres.

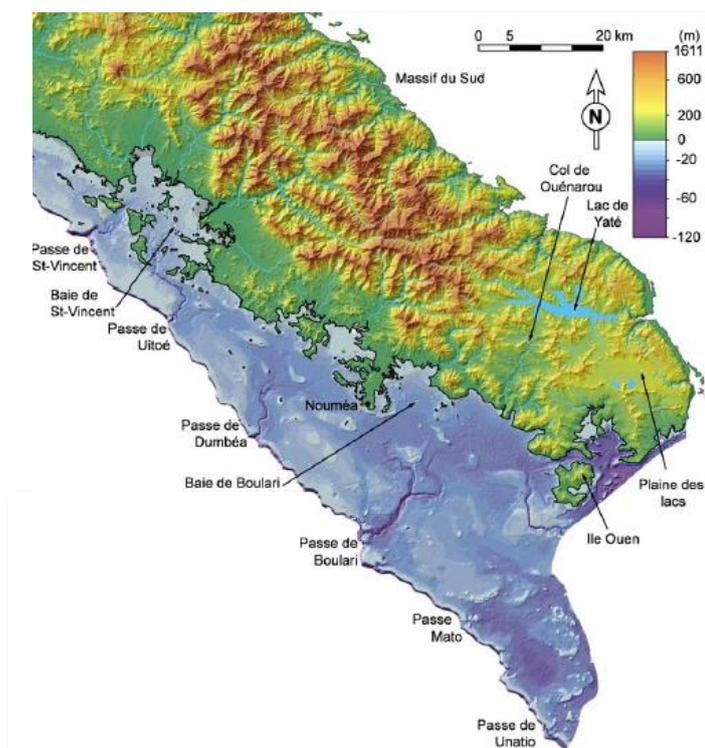


Figure 9 : MNT terre-mer du sud-ouest de la Grande Terre de Nouvelle-Calédonie (interpolations d'après les mesures bathymétriques multifaisceaux, *Chevillote et al, 2005*)

Cette portion du lagon calédonien, aussi nommée « lagon de Nouméa », est la résultante d'une superposition de constructions récifales, depuis une centaine de milliers d'années qui se sont développées en réponse à la subsidence des marges de la Nouvelle-Calédonie, aux variations du niveau marin d'origine glacio-eustatiques qui se sont manifestées au cours de l'Holocène et à la tectonique récente (*Chevillote et al., 2005*).

Composé de canyons sous-marins, de zone de dépressions et de rides, le lagon doit sa géomorphologie actuelle (Figure 1) aux phases de transgression et régression marines qui se sont succédées aux cours des périodes glaciaires et interglaciaires du Quaternaire. La présence de fleuves, lacs et rivières aujourd'hui ennoyés témoignent de l'existence d'un paléo-réseau hydrographique.

Six passes permettant des échanges entre l'océan et le lagon, découpent la barrière de corail, respectivement du Nord au Sud : la passe de Saint-Vincent, la passe de Uitoé, la passe de Dumbéa, la passe de Boulari, la passe Mato et enfin, la passe de Unatio. Son extrémité sud est caractérisée par une large ouverture sur l'océan, au sud de l'île Ouen, où s'engouffrent directement les eaux océaniques (Figure 9). C'est donc un lagon qualifié de semi-clôt (*Jouon et al., 2007*)

La rivière de Dumbéa, dont le bassin versant représente 238 km², la rivière de La Coulée qui draine une aire de 85 km² et enfin, la rivière des Pirogues, possédant un bassin versant de 140 km² constituent les trois principales sources d'entrée d'eau douce dans le lagon.

Le climat calédonien est gouverné par des influences tropicales et tempérées dont les principaux agents climatiques sont les positions de la zone de convergence intertropicale (ITCZ) et de la zone de convergence du Pacifique sud (SPCZ). On distingue :

- De janvier à mars, une saison chaude, où l'influence tropicale prédomine et le temps est rythmé par la position de la Zone de Convergence du Pacifique Sud (ZCPS) et par les trajectoires des dépressions tropicales. Les précipitations sont abondantes et les températures moyennes élevées. Les extrêmes sont toutefois limitées par l'influence maritime et les alizés du sud-est.
- D'avril à mai, la ITCZ est dans sa position la plus australe ;

- De juin à septembre, on observe une saison plus fraîche, où la ZCPS se décale vers le nord-est et la ITCZ se déplace vers l'hémisphère nord, entraînant des perturbations à l'origine de fortes précipitations et de coups d'ouest. Le temps est généralement sec et frais avec des températures minimales relativement basses. Les alizés sont plus faibles et leur direction varie davantage (source : *Atlas climatique de la Nouvelle-Calédonie, Météo France, 2007*).

Le phénomène de variabilité climatique ENSO influence également le climat local (Leroy, 2007), notamment au cours de la saison chaude. La période *El Niño*, qui se trouve être la phase positive du phénomène, se caractérise par un risque accru de sécheresse et des températures anormalement basses alors que lors de la phase négative du phénomène, nommée *La Nina*, le risque de fortes précipitations est accru, les vents d'alizés sont généralement plus établis et les températures peuvent être plus élevées que la moyenne (Caravero et al., 2012).

1.2. Fonctionnement du système « récif-lagon »

L'hydrodynamisme d'un lagon dépend des échanges avec l'océan, de la circulation des eaux, de leur temps de résidence, des climats locaux de vents et de vagues ainsi que des forçages atmosphériques.

A l'approche de la barrière de corail, la **houle océanique** se brise au niveau de la crête du récif. Cela génère une élévation du niveau marin dynamique (noté η) relatif au niveau moyen au large (msl). Les flux d'eau entrants sont notés $q(r)$. Ils passent par-dessus le récif. Les flux sortants (*seaward flow*) sont notés $q(c)$ et traversent les passes. Ces échanges d'eaux océan/lagon sont schématisés dans la Figure 10 ci-dessous.

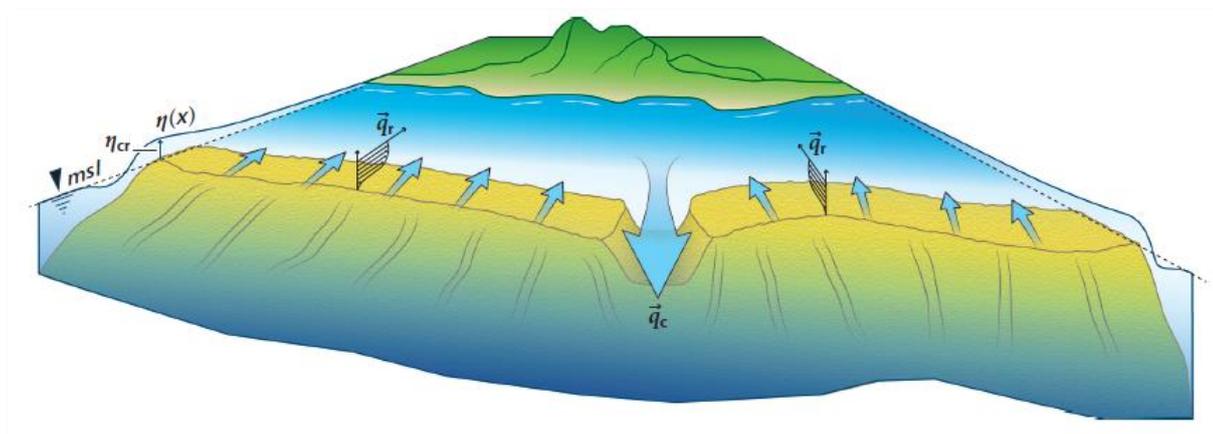


Figure 10 : Circulation de l'eau dans un système côtier "récif-lagon" (source : Low et Falter, 2015)

L'énergie transmise par la houle océanique dans notre zone d'étude dépend fortement de sa direction (Ouillon et al., 2010). Ainsi, les courts épisodes d'houles d'ouest génèrent une importante énergie dans l'ensemble du lagon et jusqu'aux rivages tandis que d'autres conditions de houles n'engendrent qu'une faible énergie. La hauteur moyenne significative des vagues est d'environ 1,3 à 3,4 mètres et la moyenne annuelle de leur période est de l'ordre de 7.1 secondes à 8.7 secondes (Caires et al., 2005 ; Young et al., 1999). On distingue ainsi trois principales familles de houles affectant le lagon sud :

- la **houle d'alizé**, de direction sud-est – est (SEE), générée par les alizés ;
- la **houle d'australe**, de direction sud-sud-ouest (SSO), générée par des dépressions polaires ;
- la **houle d'ouest** ;
- la **houle cyclonique**.

La **marée** possède un rôle non négligeable dans la circulation des eaux du lagon et par conséquent, sur la redistribution sédimentaire. Ce dernier est soumis à un régime de marée micro-tidal avec un marnage compris entre 0.4 mètres et 1.6 mètres et semi-diurne (Douillet, 1998). La vitesse moyenne des courants de marée est de 0.05 – 0.1 m/s dans le lagon et de 0.2-0.3 m/s dans les passes (Ouillon et al. 2010).

Le **vent** constitue un autre élément de forçage de la circulation des eaux. Les vagues dues à la « mer de vent » (avec une période de 5 à 10 secondes) se développent rapidement et se propagent à l'intérieur du lagon. Le fetch, qui correspond à la distance horizontale sur laquelle le vent local exerce son action sur la surface de la mer sans rencontrer d'obstacles et sans changer de direction, est plus important lors des épisodes d'alizés du sud-est. Les vagues ont alors une hauteur significative de 0,8 à 1,4 mètres et une période de 3 secondes (Jouon et al., 2009). Une importante mer de vent est également observée lors de courts et énergétiques épisodes de coup d'ouest ainsi que durant les phénomènes cycloniques.

L'ensemble de ces éléments hydrodynamiques comprenant la marée et les phénomènes météorologiques qui régissent les systèmes de vent et de houles exerce une influence sur le fonctionnement sédimentaire des entités géomorphologiques du lagon.

2. Les îlots de sable

2.1. Généralités

Le lagon est composé de larges platiers récifaux, sur lesquels des accumulations sableuses forment des îlots plus ou moins végétalisés. Ces dernières résultent du démantèlement des édifices coralliens sous l'action des houles et des tempêtes (Duvat, 2005). Les îlots calédoniens n'ont été que peu étudiés.

Récemment, Yamano *et al.* (2014) se sont intéressés à la formation de ces îlots et à leur évolution au cours de l'Holocène. Ainsi, à partir de forages, les chercheurs ont pu dater les foraminifères et déterminer l'âge d'îlots dans le lagon. Il semblerait qu'il existe plusieurs générations d'îlot : la formation de l'îlot Mba a été identifiée à 4 500 ans cal BP alors que celle de l'îlot Signal est plus récente (environ 2 800 ans cal BP).

En 2016, Garcin *et al.* étudient 21 îlots localisés dans le lagon sud-ouest, le lagon est et au sud de l'île des Pins afin de déterminer leurs tendances évolutives en fonction des processus géomorphodynamiques en action (érosion, accrétion ou stabilité sédimentaire). A partir de ces récents travaux, une typologie des différents stades d'évolution des îlots calédoniens a été établie (Figure 12). Elle est constituée de six phases, qui ne s'enchaînent pas forcément de manière séquentielle :

- Stade n°1 : Nucléation

Elle correspond à la phase d'apparition d'un banc de sable bioclastique issu de l'arrachement de morceaux du récif lors d'évènements marins et/ou météorologiques importants. L'accumulation de sédiments est rendue possible par une conjonction d'évènements hydrométéorologiques énergétiques capables de générer des sédiments bioclastiques arrachés du récif ainsi que par un régime de vagues créant des courants de fond permettant le transport des sédiments de la zone de production vers la zone convergente d'accumulation. Ces courants peuvent changer de direction au cours du temps, par exemple, des saisons.

- Stade n°2 : Croissance

Elle correspond à la phase de stabilisation d'une partie du banc de sable et à sa végétalisation. La végétalisation de l'îlot et un accroissement de sa surface par un apport de sédiments bioclastiques sont observés au cours de cette phase. Le bilan sédimentaire de l'îlot est alors positif : plus d'apport de sédiments que d'érosion.

- Stade 3 : Maturité

Cette phase se décompose en trois stades possibles :

- **La stabilité (a)** correspond à une stabilisation de l'îlot durant une certaine période avec une situation d'équilibre entre érosion et accrétion. C'est à ce moment-là qu'une phase de lithification¹⁹ peut se produire, conduisant à la formation de **beachrocks** (Figure 11) et donc à la fossilisation de la forme et de la position de l'îlot.



Figure 11 : banc de beachrocks au sud-ouest de l'îlot Mbé Kouen (image acquise par drone lors de la mission du 05/06/2017)

Les beachrocks sont des roches sédimentaires formées par l'induration précoce des sables de plage et des débris bioclastiques et biodétritiques par cimentation carbonatée. Cette cimentation se produit uniquement pendant les périodes de stabilité des plages. C'est pourquoi ils caractérisent les anciennes lignes de rivage et indiquent donc la position et la géométrie anciennes des îlots.

¹⁹ Processus géologique de compaction des sédiments amenant à la formation de roches sédimentaire (source : www.universalis.fr)

- **La migration (b)** est une forme d'adaptation de l'îlot aux contraintes et aux forçages environnementaux. Alors que certains rivages connaissent des périodes d'érosion, d'autres sont en accrétion. L'îlot migre progressivement. Ce phénomène peut être généré par des processus autophages : ainsi, le côté en accrétion est nourri par les sédiments produits par la face de l'îlot qui subit l'érosion, tel une sorte de « tapis roulant sédimentaire ». La migration n'est toutefois pas systématique et se trouve limitée par l'extension de la plateforme récifale.

Si l'îlot se retrouve sur les bords de la plateforme, alors les sédiments sont exportés vers les zones plus profondes du lagon, surnommées « puits sédimentaires ». Il passe alors au stade 4 d'évolution : la décroissance.

- **L'adaptation (c)** apparaît quand on observe un changement de géométrie de l'îlot, induite par les modifications des contraintes et des facteurs de forçages environnementaux sans pour autant qu'il y ait migration, perte ou gain de surface.

- **Stade n°4 : Décroissance**

Cette phase s'enclenche lorsque le bilan sédimentaire de l'îlot devient négatif, c'est-à-dire quand il se produit plus d'érosion que d'apport de sédiments. L'îlot peut ainsi perdre plus ou moins rapidement de la surface. D'importantes zones d'érosion sont repérables, dont les indices peuvent être un retrait par rapport aux limites antérieures indiqué par les beachrock ou la présence de souches d'arbres morts sur les plages ou avant-plages par exemples.

- **Stade n°5 : Relique**

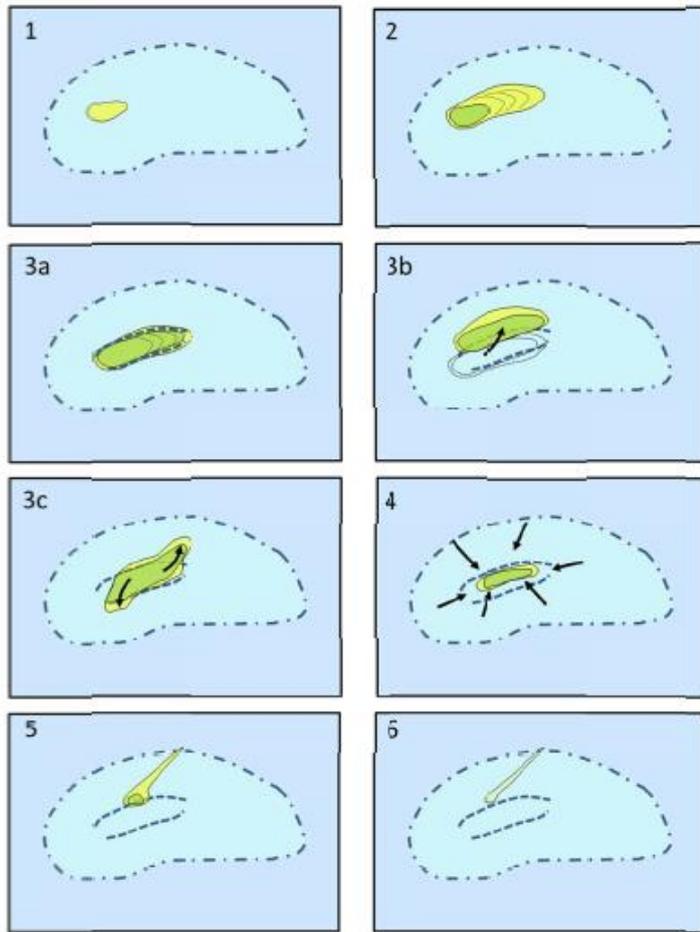
L'îlot relique possède une géométrie très éloignée de celle qu'il formé lors de sa phase de maturité. Sa surface a largement diminué et le son bilan sédimentaire est négatif. L'îlot présente ainsi un caractère résiduel. La présence d'un panache sableux en « queue de comète » s'étalant sur la plate-forme récifale correspond à l'épandage des sédiments issus de la destruction de l'îlots transportés par les courants et peut constituer un indice de ce stade de relique.

- **Stade n°6 : Disparition**

Il ne reste de l'îlot que des bancs de sables résiduels, des panaches sableux en « queue de comète » et des beachrocks qui l'encadraient auparavant. Si des conditions environnementales favorables réapparaissent, un nouvel îlot peut se construire à la place de l'ancien.

Les différents stades évolutifs des îlots calédoniens

Stade 1 : nucléation ; Stade 2 : croissance ; Stade 3a. : mature stable ;
 Stade 3b. : mature migration ; Stade 3c. : mature adaptation ; Stade 4 :
 décroissance ; Stade 5 : Relique ; Stade 6 : disparition



Légende : sables nus (jaune), surfaces végétalisées (vert), plateforme récifale (bleu clair), lagon (bleu), limite de la plateforme récifale (tiret-point), beachrocks (tiret)

Cycle de vie des îlots et séquences successives possibles (Source : Garcin et Vendé-Leclerc, 2015)

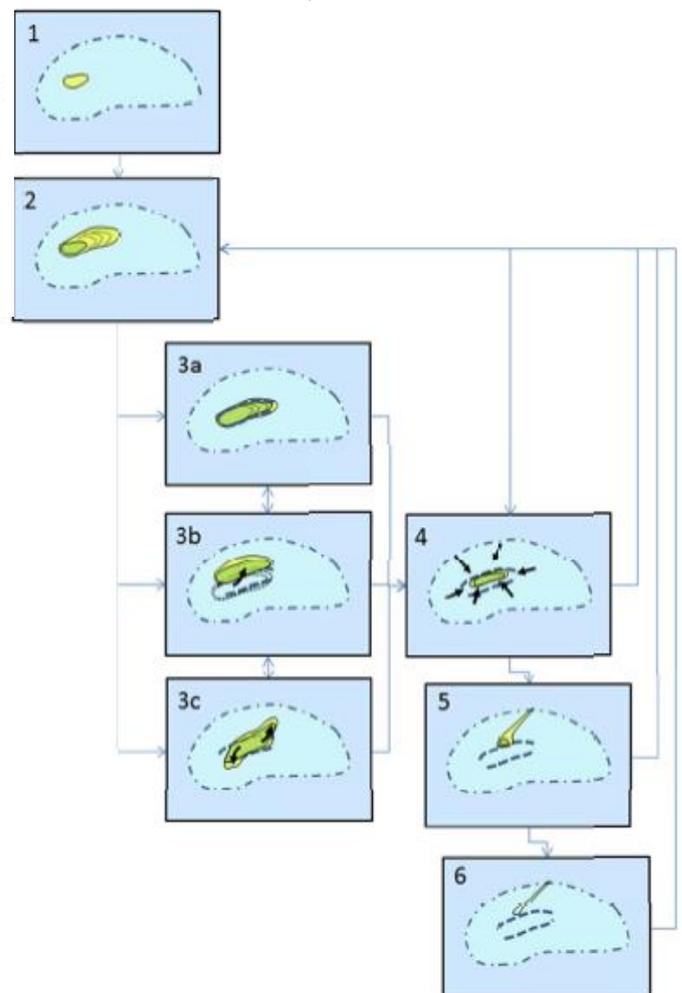


Figure 12 : Les différents stades évolutifs des îlots calédoniens et leur cycle de vie (d'après Garcin et Vendé-Leclerc, 2015)

Nous nous inspirons de certaines méthodes mises en place dans le cadre des travaux de l'OBLIC pour notre étude (*Garcin et Vendé-Leclerc, Rapport BRGM, 2016*). Il apparaît important de retracer l'évolution récente et actuelle des îlots étudiés pour en déterminer leur stade d'évolution et leur devenir. Au préalable, nous allons nous attacher à caractériser la position géographique et la forme actuelle de ces deux îlots.

2.2. Présentation générale de l'îlot Larégnère

Il se situe à 15 kilomètres au sud-ouest de Nouméa et est éloigné de 6.5 kilomètre de la barrière de corail. La passe la plus proche est celle de Dumbéa, distante de 7,8 km. Larégnère se trouve dans l'axe de cette passe. L'îlot surplombe un édifice récifal oblong de 3 kilomètres de long, orienté est-ouest (E-O). Cette structure récifale est discontinue : moins large au nord, elle s'agrandit vers le sud et sa largeur maximale est de 0.6 kilomètre (*Garcin et Vendé-Leclerc, 2015*). Possédant actuellement une superficie d'environ 1.04 hectares (2016), l'îlot est d'une longueur de 220 mètres sur 70 mètres de largeur et son point le culminant s'élève à 3,2 mètres (*d'après les mesures terrain acquises en avril 2017 par la DFA*). Larégnère se compose principalement de sable bioturbé. Il possède une végétation arbustive et rampante en haut de plage et arborée en son centre.

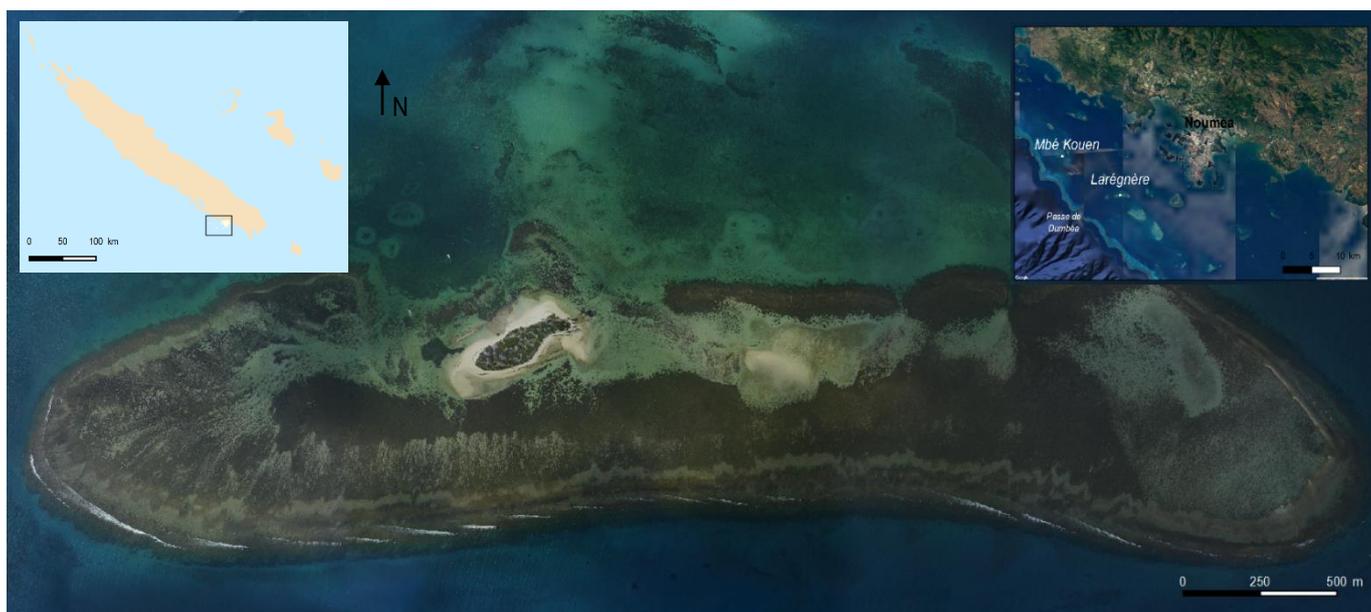


Figure 13 : Localisation et image aérienne de l'îlot Larégnère et de sa plate-forme récifale (source : Province Sud, 2011) dans le lagon sud-ouest calédonien. Le carton de localisation en haut à droite a été réalisé à partir d'une image satellite Digital Globe (Google)

Cet îlot est doté d'une certaine attractivité touristique. Fréquenté principalement pendant la saison estivale et les week-end, il possède certaines installations telles que des toilettes sèches, des farés et des aires aménagées pour barbecue.

2.3. Présentation générale de l'îlot Mbé Kouen

Au nord de l'îlot Larégnère, cet îlot se situe à 4.2 km du récif barrière et entre la passe de Uitoe et celle de Dumbéa. Il est également à proximité de la fausse passe de Uitéo. Cette dernière est située au sud-ouest de l'îlot à environ 5 km (*Garcin et Vendé-Leclerc, 2015*). Cet îlot repose au bord de la limite nord de sa plate-forme récifale. Petit îlot de très faible altitude, son point le plus haut s'élève à seulement 2,4 mètres (*d'après les mesures terrain acquises en avril 2017 par la DFA*). Il possède une superficie de 2 038 mètres carrés et a pour dimensions de 90 mètres de long sur 30 mètres de large. Mbé Kouen est composé de sable fin et de débris bioclastique moyens, c'est-à-dire de taille décimétrique. Peu végétalisé, on y trouve principalement une végétation rampante et herbacée à l'exception de quelques arbres. Très peu fréquenté contrairement à Larégnère, il est vierge de toute installation anthropique.

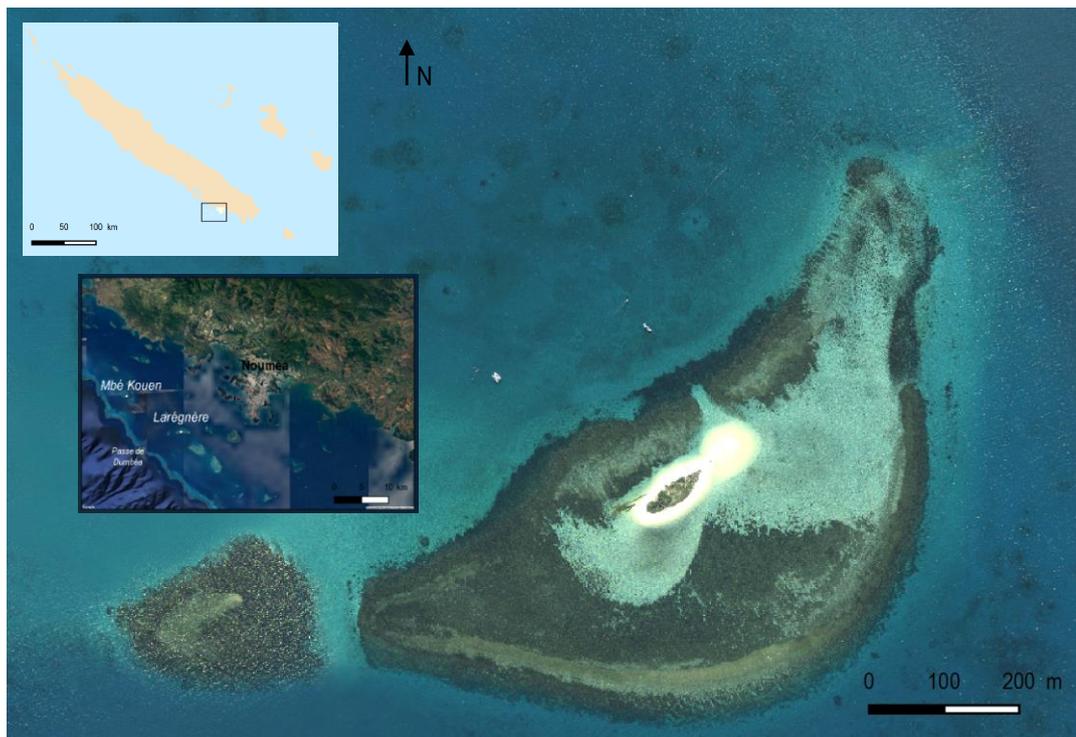


Figure 14 : Localisation et image aérienne de Mbé Kouen et de sa plate-forme récifale (source : GIE SERAIL, 2016) dans le lagon sud-ouest calédonien. Le carton de localisation (en dessous de la carte à gauche) a été réalisé à partir d'une image satellite Digital Globe (Google)

Le Tableau 1 ci-dessous reprend les différents éléments importants caractéristiques des plateformes récifales porteuses des deux îlots ainsi que les particularités morphologiques de ces derniers.

Tableau 1 : Éléments caractéristiques des plates-formes récifales et des îlots qu'elles portent

	Plate-forme récifale					Ilot				
	Orientation	Forme	Dimensions	Superficie	Position de l'îlot sur cette plate-forme	Orientation	Surface actuelle	Altitude maximale actuelle	Distance à la barrière	Distance aux passes
Larégnère	E-O	Oblong	3 km de long sur 0,6 de large	Environ 145 ha	Sur sa bordure nord-ouest	SO-NE	10 428 m ² (en 2016)	3,2 m (en 2017)	6,5 km	Situé à 7,8 km de la passe de Dumbéa dans son axe
Mbé Kouen	N-SO	Triangulaire arrondie	0,7 km de long sur 0,8 km de large	Environ 30 ha	Sur sa bordure nord-ouest	SO-NE	2038 m ² (en 2017)	2,4 m (en 2017)	4,2 km	Situé à 11 km au nord de la passe de Dumbéa, à 17 km au sud de la passe de Uitoé et à 5 km au SO de la fausse passe de Uitoé

La description de ces différents éléments constitutifs du lagon et des îlots était indispensable pour la connaissance de notre terrain d'étude. Elle a permis de replacer le contexte plus global du système « récif-lagon » dans lequel les îlots étudiés évoluent. La compréhension de ces évolutions exige une étape de recueil de données environnementales d'un côté, géomorphologiques de l'autre à différentes échelles spatio-temporelle. Ces données vont constituer une base pour la mise en place de méthodes permettant de répondre à notre problématique.

Chapitre 2. Données et méthodologie adoptée

Ce chapitre comporte deux parties distinctes. Dans la première, nous allons présenter les différentes données environnementales et topographiques récoltées à travers diverses sources d'information ou directement sur le terrain. Ces données concernent différentes échelles spatiales. Elles vont permettre de réaliser à la fois une étude diachronique à moyen terme (environ une décennie) et une étude à court terme (temps du projet EML : 2 ans) de la mobilité des îlots. Une seconde partie fera l'objet d'un exposé détaillé sur les méthodes de traitement des données topographiques acquises sur le terrain.

Section 1. Des données à différentes échelles

1. Des données à l'échelle du sud-ouest de l'océan Pacifique

1.1. Les données sur l'évolution du niveau marin

Les données sur le niveau marin à l'échelle du globe mesurées à partir des marégraphes sont disponibles depuis le 19^{ème} siècle dans certaines régions du monde. Une élévation de + 1,7 mm/an depuis 1950 a été estimée par Church et White en 2006. Depuis les années 1990, des données altimétriques de haute précision issues des satellites permettent également d'estimer l'élévation du niveau marin. Plusieurs campagnes altimétriques satellites se sont déroulées : Topex-Poseidon (1993-2001), Jason 1 (lancé en 2001) et Jason 2 (lancé en 2008). Ces campagnes permettent de mesurer des variations spatiales et temporelles du niveau des océans moyennées à partir de nombreuses mesures sur de grandes surfaces (100 à 1000 kilomètres). Par exemple, une élévation de + 3,3 mm/an (moyenne à l'échelle du globe, plus ou moins 0,4 mm) depuis 1993 a été calculée par Ablain et al., 2009 ou encore par Cazenave et al. 2010.

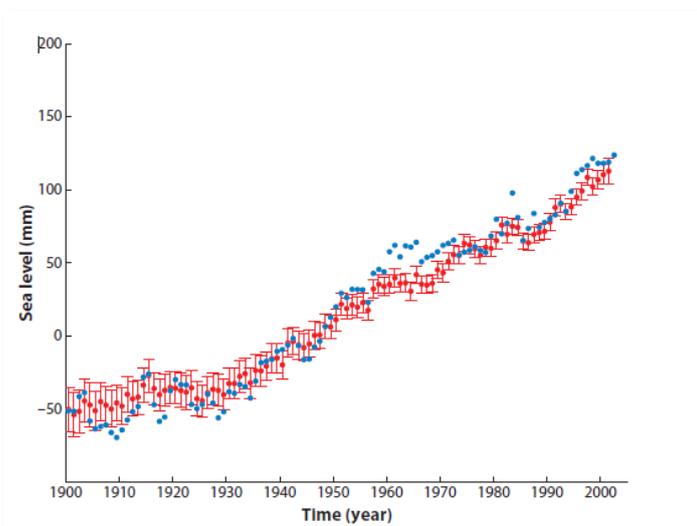


Figure 15 : niveau marin global obtenu à partir des marégraphes entre 1900 et 2001 (Church et al. 2004 ; Jevrejeva et al. 2006, d'après Cazenave et al., 2010)

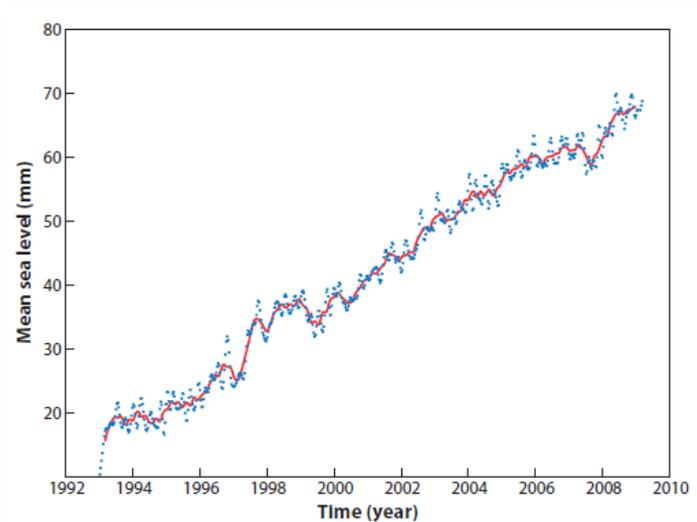


Figure 16 : niveau marin global obtenu à partir des mesures par altimétrie satellitaire entre janvier 1993 et 2008. Les données brutes acquises tous les 10 jours apparaissent en bleu, la ligne rouge correspond au lissage de 90 jours de données brutes (d'après Cazenave et al., 2010)

Des variabilités régionales de cette tendance mondiale existent. L'élévation du niveau marin dans la région de l'Océan Pacifique Ouest, autrement dit, la zone située entre 20° S, 15° N de latitude et 120° E, 135° O de longitude, a été reconstituée en 2012 par Becker et al (Figure 17). Les différentes données sources qui ont permis cette reconstitution proviennent d'une part, des marégraphes, d'autre part des mesures altimétriques.

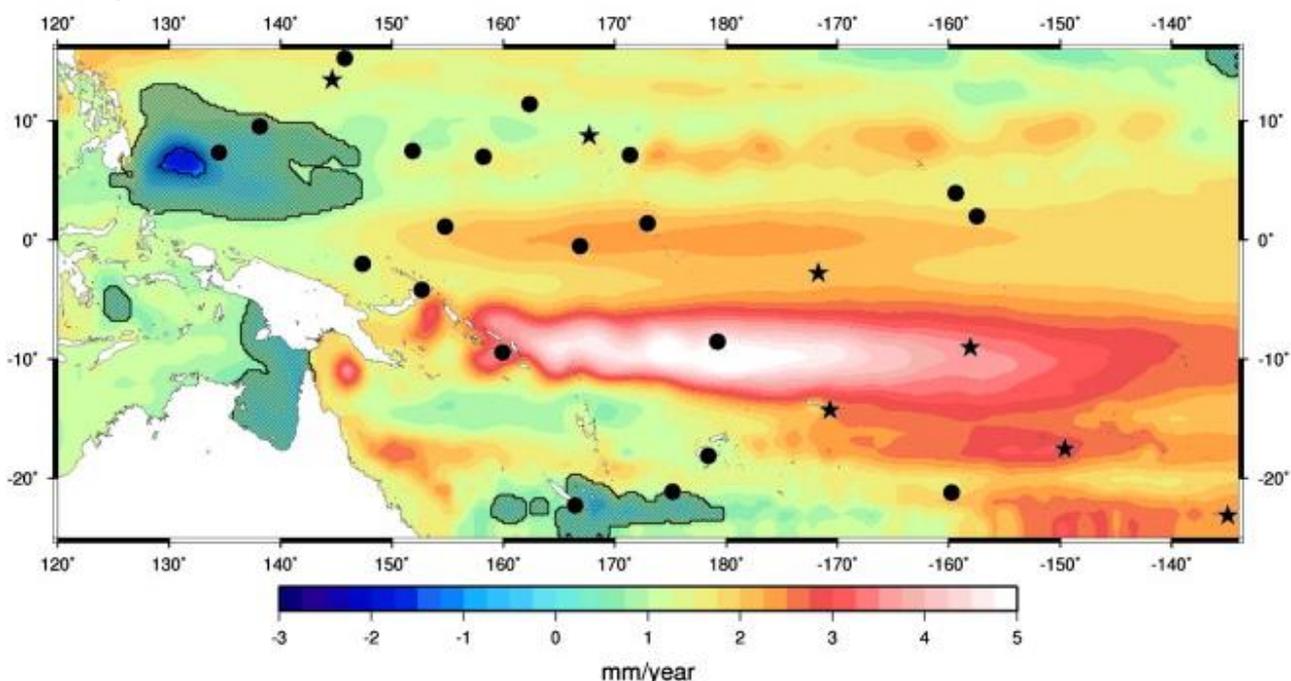


Figure 17 : Cartographie des tendances du niveau marin dans l'océan Pacifique ouest entre 1950 et 2009. Les cercles et étoiles noirs correspondent aux marégraphes dont sont issues les données utilisées pour l'étude (source : Becker et al., 2012)

Plusieurs travaux scientifiques soulignent l'influence des événements relatifs à l'ENSO sur le niveau marin du Pacifique Ouest à l'échelle interannuelle (Becker et al., 2012 ; Cazenave et al.2012).

1.2. Les données concernant la variabilité climatique

Les deux principaux phénomènes de variabilité climatique jouant un rôle non négligeable dans le Pacifique sont l'Oscillation Interdécennale du Pacifique (OIP ou IPO²⁰) ou encore, l'ENSO²¹. Ce dernier serait à l'origine d'importantes variations interannuelles du niveau marin de + 0,20 à + 0,30 mètres dans le Pacifique Sud-Ouest (Becker et al.2012) par rapport au niveau marin moyen observé habituellement dans cette région du monde.

Le phénomène peut se découper spatialement en 4 régions. On distingue :

- **Niño 1 et 2** (0°N - 10°S, 90°E - 80°O) : elle correspond à la région du Pacifique est, bordant les côtes de l'Amérique Latine. C'est où l'on observe les plus grandes différences des indices de SST ;
- **Niño 3** (5°N - 5°S, 150°E - 90°O) : au centre du Pacifique ;
- **Niño 3-4** (5°N - 5°S, 170°E - 120°O) : elle correspond à la zone actuellement utilisée pour la prédiction de l'ENSO (Trenberth, 1997) ;
- **Niño 4** (5°N - 5°S, 160°E - 150°O) : région située la plus à l'Ouest de l'océan Pacifique, elle est aussi influencée par l'oscillation interdécennale.

Les données de l'ENSO sont disponibles sur le site internet de la NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration²²), un des Centres Nationaux pour l'Information Environnementale (NCEI) américains.

²⁰ Interdecadal Pacific Oscillation

²¹ El Nino-Southern Oscillation

²² Adresse du site internet : www.cpc.ncep.noaa.gov

L'un des principaux indices utilisés pour caractériser l'oscillation ENSO est l'**ONI** (Oceanic Niño Index, Figure 18). Il est calculé à partir de la moyenne des anomalies de la température de surface de la mer (SST) de la région Niño 3-4 sur 3 mois. Les évènements sont qualifiés de El Niño ou La Niña à part entière si ces anomalies dépassent respectivement $0,50^{\circ}\text{C}$ ou $-0,50^{\circ}\text{C}$ pendant au moins trois périodes consécutives de trois mois. Plus l'indice est élevé ($> 0,5^{\circ}\text{C}$), plus nous sommes en présence d'un El Niño (phase positive) important. Au contraire, plus l'indice est faible ($> -0,5^{\circ}\text{C}$), plus le phénomène El Niña (phase négative) est marqué.

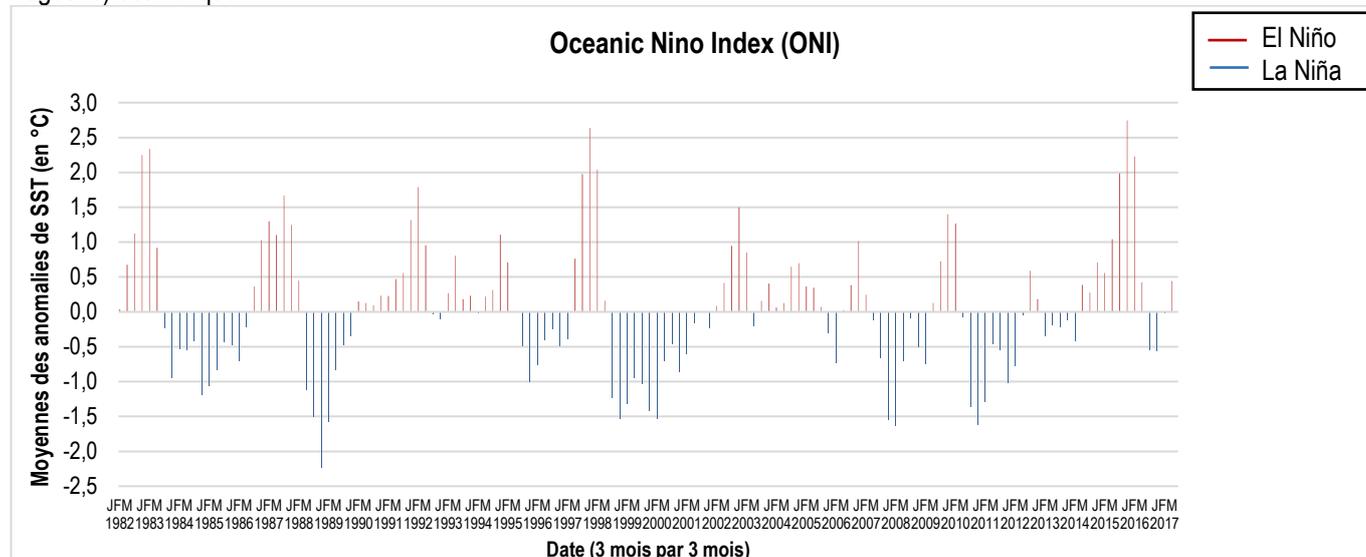


Figure 18 : Représentation de l'indice OIN entre 1982 et aujourd'hui (d'après les données recueillies sur le site internet de la NOAA)

Ces données à l'échelle du Pacifique Sud-Ouest constituent une base dans notre travail de mise en relation de ces données avec ce que l'on observera à l'échelle locale des îlots. Nous n'avons trouvé que peu de données sur l'IPO, ainsi, nous avons choisi de ne pas les utiliser par la suite.

2. Des données à l'échelle de la Nouvelle-Calédonie

2.1. Les événements météorologiques extrêmes

On entend par « *événements météorologiques extrêmes* » les perturbations atmosphériques tropicales telles que les dépressions tropicales et les cyclones. Les phénomènes cycloniques se classent suivant leur intensité (catégorie) décrite par l'échelle de Safir-S qui prend en compte la vitesse des vents. Le Tableau 2 ci-dessous nous expose la classification utilisée par le service de la météorologie de la Nouvelle-Calédonie.

Tableau 2 : Classification des événements cycloniques (source : Météo France)

Dénomination du système	Echelle de Beaufort	Vent moyen en km/h sur 10 minutes	Pression en hectopascal (hpa)
Dépression tropicale faible	7 (grand frais)	< 63	> 997
Dépression tropicale modérée	8 et 9 (coup de vent)	63 à 87	985 à 996
Dépression tropicale forte	10 et 11 (tempête ou forte tempête)	89 à 117	970 à 985
Cyclone tropical	12 (ouragan)	118 à 159	970 à 940
Cyclone tropical intense	12 (ouragan)	160 à 199	940 à 915
Cyclone tropical très intense	12 (ouragan)	> 200	< 915

Ces événements ont fait l'objet d'un travail de mémoire en 2016 intitulé « *Caractérisation du risque cyclonique en Nouvelle-Calédonie* » (Godet, 2016), recensant l'ensemble des dépressions tropicales modérées et fortes (DTM et DTF) ainsi que les cyclones ayant touchés le territoire depuis le 19^{ème} siècle jusqu'à 2015. Le Tableau 3 ci-dessous récence quant à lui les événements météorologiques extrêmes (DTM, DTF et cyclones) qui sont passés à proximité de la Nouvelle-Calédonie depuis le début des années 2000, d'après les informations pouvant être récoltés sur le site internet de Météo France. Une carte représentant la trajectoire des cyclones a été réalisée à partir de données récoltées sur le site de la NOAA.

Tableau 3 : Evénements cycloniques depuis 2002 à aujourd'hui (source : Météo France)

Nom	Type	Date	Vents maximums instantanés (km/h) à Nouméa
Des	Dépression tropicale forte	06-07/03/2002	83
Erica	Cyclone tropical	14/03/2003	202
Ivy	Cyclone tropical	27/02/2004	61
Kerry	Cyclone tropical	08-09/01/2005	72
Yanni	Cyclone tropical	23-24/11/2006	61
Gene	Cyclone tropical	31/01 - 05/02/2007	61
Becky	Dépression tropicale forte	25-29/03/2007	79
Innis	Dépression tropicale modérée	17-18/02/2009	68
Jasper	Dépression tropicale forte	22-25/03/2009	83
Ului	Cyclone tropical	13-19/03/2010	83
Vania	Cyclone tropical	11-16/01/2011	144
Wilma	Cyclone tropical	21-22/01/2011	65
Atu	Cyclone tropical	17-21/02/2011	61
Freda	Cyclone tropical	02-04/01/2013	100
Sandra	Cyclone tropical	06-14/03/2013	63
June	Dépression tropicale modérée	17-19/01/2014	92
Pam	Cyclone tropical	7-16/03/2015	100 (le 14/03)
Solo	Cyclone tropical	09-12/04/2015	71
Cook	Cyclone tropical	10/04/2017	129
Donna	Cyclone tropical	08/05/2017	81

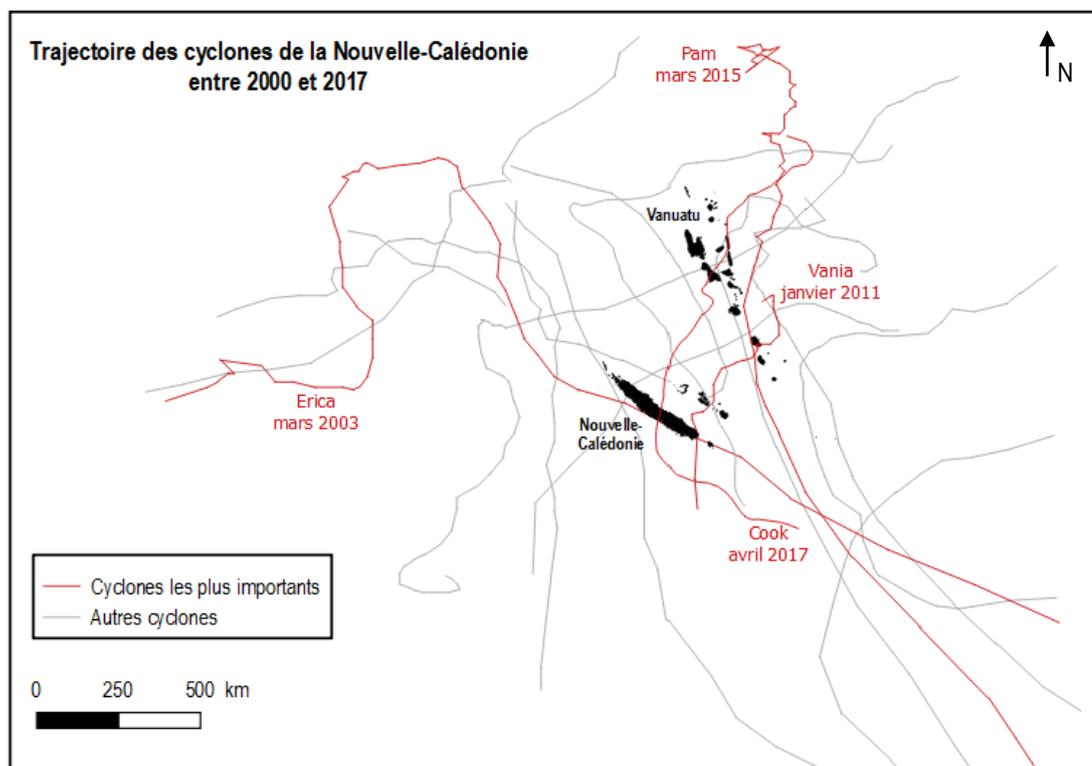


Figure 19 : Cartographie de la trajectoire des événements cycloniques ayant impactés la Nouvelle-Calédonie entre 2000 et 2017 (source : NOAA)

Afin de compléter cette première liste, nous avons recensé au cours du projet à l'aide des bulletins météorologiques Météo France par mois depuis 2016 jusqu'à juin 2017 (période du projet EMIL) les événements météorologiques les plus importants ayant pu impacter les îlots du lagon sud (colonnes grisées) dans le Tableau 4 ci-dessous.

Mois/date de l'événement	2016							2017		Juillet	Août	
	24/02	07-08/05	Juillet	4-5, 13-14 et 28-29/08	Septembre/octobre	Novembre	Décembre	07-10/02	09-11/04			Mai
Nom/Nature	Cyclone Winston	Petite dépression au sud, donnant naissance à un orage localisé sur Nouméa	Perturbation le 10/07/2016	Courants d'ouest / vents moyens	Temps très sec	Gros événement pluvieux les 21-22. <i>Glissement de terrain à Houailou (côte est), pertes humaines.</i>	16/12 : épisode de fort vent combiné à un coefficient de marée important. <i>Modifications observées par les gardes natures sur Larégnère</i>	Dépression tropicale faible (non nommée)	Cyclone tropical Cook (passage sur la Grande-Terre la nuit du 10 au 11)	Cyclone tropical intense Donna (07 - 11/05), surtout touché les îles Loyautés	Coup d'ouest le 20	Coup d'ouest les 19 et 20
Caractéristiques principales	Fortes précipitations et orages dans le sud de la Nouvelle-Calédonie	Pluies très importantes, inondations à Nouméa	Flux d'Ouest (36 kt soit 67 km/h au sud enregistré à Goro)	Disparition du phénomène El Nino : peu de pluies sauf lors du passage des perturbations amenées par les courants d'ouest	Forts alizés ponctuels(08-10 sept), et épisode pluvieux le 10 octobre (amené par un courant d'Ouest)	Les pluies ont été apportées par un flux d'est. Cependant, <i>des impacts ont été observés sur la côte ouest par des opérateurs de l'OBLIC</i>	Moyennes des vents : + de 15 kt (28 km/h) au sud	Fort vent (111 km/h à Nouméa le 09/02)	Vents : 40 kt – 75 km/h (moyenne horaire), jusqu'à 180 km/h sur la côte Ouest	Sud de la Grande-Terre : rafales le 10 (81 km/h enregistré à Nouméa le 09 mai)		

Tableau 4 : Evénements météorologiques notables ayant touchés le sud-ouest de la Nouvelle-Calédonie par mois et par année (source : Météo NC)

Des photographies prises par les gardes nature sur l'îlot Larégnère après les événements de décembre 2016 (fort vent) Figure 20, de février 2017 (DTF) Figure 21, et des cyclones Cook et Donna d'avril et mai de cette même année (Figure 22) illustrent les modifications engendrées par ces événements extrêmes.

Episode de fort vent combiné à un coefficient de marée important de décembre 2016



Figure 20 : 1) creusement du talus de la plage nord-est ; 2) beachrocks de la plage sud-ouest recouvert par le sable (apport de sédiments). Source : DENV, 23 décembre 2016

Dépression tropicale faible de février 2017



Figure 21 : 1) talus d'érosion, végétation rampante arrachée, arbres déracinés sur la plage sud de Larégnère (10/02/2017) 2) talus d'érosion sur la plage sud-ouest de Mbé Kouen (13/02/2017). Source : DENV

Observations post-cyclones (Cook et Donna, 2017)



Figure 22 : 1) Nombreux débris coralliens et 2) talus d'érosion sur la partie est de l'îlot Larégnère (le 13/02/2017, après le passage du cyclone Cook) 3) talus d'érosion, arbres déracinés et débris coralliens à l'est de Larégnère et 4) falaisage en haut de plage et laisse de mer en pied de talus sur la plage nord-est de l'îlot (le 12/05/2017 après le passage du cyclone Donna. Source : DENV

Tout comme les données sur le niveau marin et la variabilité climatique, ces informations vont nous permettre de mettre en relation les événements météorologiques et les changements morphologiques des îlots à court et moyen termes.

2.2. Le niveau marin local

Les valeurs locales du niveau marin sont prises à partir d'un instrument de mesure, le marégraphe. Ce dernier donne les valeurs absolues, c'est-à-dire celles exemptées des mouvements verticaux telles que la subsidence ou la surrection. En effet, la mesure de ces derniers est indispensable pour obtenir le niveau marin relatif servant pour certaines études globales ou encore pour la calibration des satellites. La différence entre niveau marin relatif et absolu est théoriquement égale au mouvement de terrain vertical (VLM²³).

A Nouméa, le premier marégraphe est installé par le Service Hydrologique et Océanographique de la Marine (SHOM) en 1957 à la pointe de Chaleix. En 1967, un nouveau marégraphe combinant les technologies américaines Fisher and Porter Analog-to-Digital et françaises, marégraphe mécanique OTT R16 (Aucan, 2017) remplace le précédent. Le niveau marin y est alors mesuré jusqu'en 2005. Puis, à 6 kilomètres de là, dans la baie de Numbo, un nouvel instrument est mis en place en 2005, équipé d'un radar khrono BM100 et de la technologie *Marella acquisition unit* (Aucan, 2017).

Les mouvements verticaux en Nouvelle-Calédonie correspondent aux réajustements isostatiques et aux mouvements tectoniques. En effet, la Nouvelle-Calédonie se situe en bordure orientale de la plaque australienne et est engagée dans la subduction au niveau de la fosse des Nouvelles Hébrides-Vanuatu. Ainsi, on estime le taux de subsidence sur les derniers 125 000 ans à **0.07 mm/an** (Gabioc et al.2008). Depuis 2015, un GNSS²⁴ est installé sur le site de Numbo, pour compléter les mesures du niveau marin absolu du site recueillies par le marégraphe avec des mesures des mouvements verticaux.

Les séries de données issues des deux marégraphe ont été corrigées lors d'une étude menée par l'IRD (Institut de recherche pour le Développement), le SHOM et la Base Hydrographique de Nouvelle-Calédonie (BHNC) à partir de données altimétriques venant de trois missions satellites successives (Topex-Poseidon, Jason 1 et Jason 2). Par exemple, les taux des VLM à Numbo, sur la période allant de 2005 à 2013 ont pu être estimés à **- 2.51 +/-1.99 mm/an** (Aucan, 2017). Un tableau récapitulatif des différentes campagnes de mesures des mouvements verticaux sur ces deux sites se trouve en annexe du rapport.

Sur une période courte, celle de notre étude (2016-2017), nous avons pu extraire les données du niveau marin absolu à Nouméa à partir du marégraphe de Numbo (Figure 23).

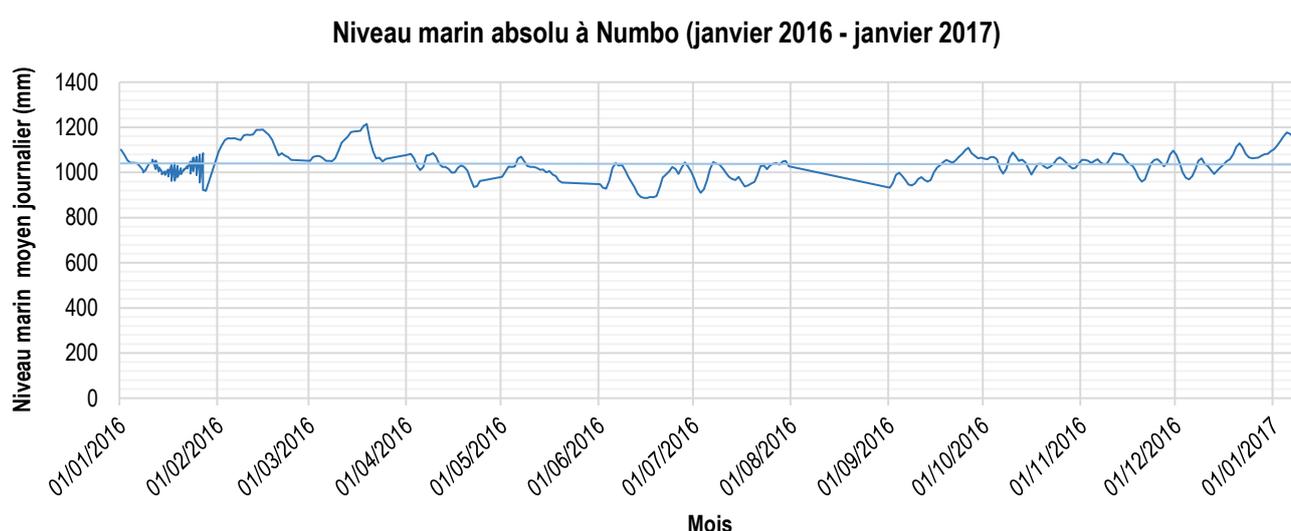


Figure 23 : Niveau marin absolu mesuré au marégraphe de Numbo (bleu foncé) et la courbe de tendance (bleu clair), source : *Système d'Observation du Niveau des Eaux Littorales – SONEL*.

²³ Vertical Land Movement

²⁴ Global Navigation Satellite System

2.3. Un modèle hydrodynamique du lagon sud-ouest calédonien

Nous avons vu précédemment que les deux forces à l'origine de la circulation hydrodynamique au sein du lagon sont le vent et la marée²⁵. Elles sont toutes deux étudiées depuis une quarantaine d'années au sein du lagon (*Jarrige et al. 1975 ; Morlière et Crémoux, 1981 ; Morlière 1985 ; Rougerie, 1985*). Des mesures régulières de la marée, des vents et des courants ont été levées *in situ* dans les années 1980. Un modèle hydrodynamique a été développé par l'IFREMER²⁶ à partir de ces mesures afin de décrire le fonctionnement du lagon sud-ouest calédonien : **MARS3D** (*Douillet, 1998*). Premier modèle hydrodynamique utilisé dans un environnement « récif-lagon », il a été validé à travers plusieurs études (*Douillet et al., 2001, Ouillon et al., 2004, Jouon et al., 2006*). Il prend en compte les courants générés par la marée (modèle bidimensionnel) et par les vents (modèle tridimensionnel). Ce modèle tient aussi compte des éléments géomorphologiques du lagon comme les passes ou les canyons sous-marins. La Figure 24 ci-dessous représente le temps de résidence des eaux dans le lagon sud (Fichez et al., 2008). C'est un exemple d'application du modèle MARS3D parmi d'autres.

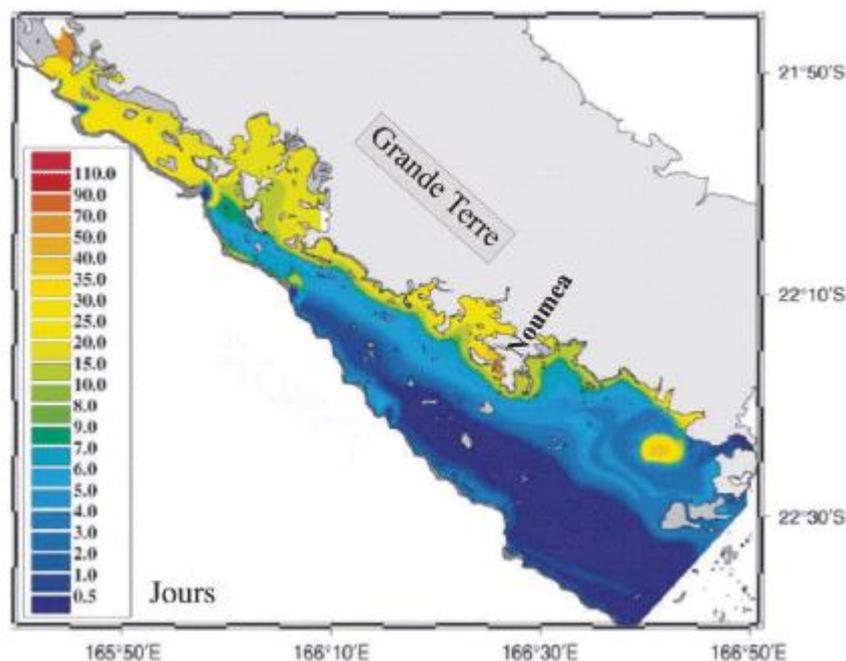


Figure 24 : Distribution du temps de vidange locale, en jours, dans la zone sud du lagon de la côte ouest de Nouvelle-Calédonie (*Jouon et al., 2006*).

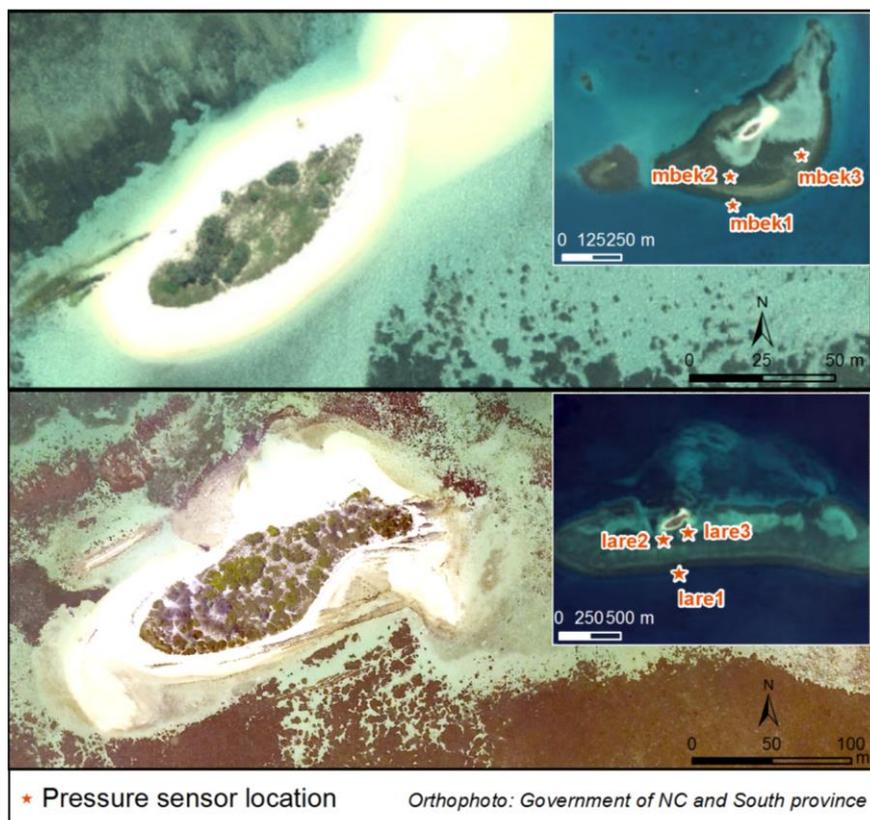
3. Des mesures *in situ*

3.1. Vents, houles et régimes de vagues à proximité des îlots (d'après un article intitulé « Wave forcing and morphological changes of the New Caledonia lagoon islets », *Aucun J., et al, en soumission dans les Comptes Rendus Geosciences*)

Six capteurs de pression ont été installés en juin 2016 à proximité des îlots et ont collectés des données jusqu'en mai 2017, soit un enregistrement s'étalant sur une période de 11 mois. Mbek1 et Lare1 se situent en avant du récif, au niveau du tombant de la plateforme récifale, exposés aux alizés. Mbek2, Mbek3, Lare2 et Lare3 sont disposés à l'intérieur de la plate-forme récifale des îlots (Figure 25). L'échantillonnage de chaque appareil de mesure est fixé à 1Hz. L'enregistrement des données est continu sur toute la période de l'expérience. Les capteurs installés sur les fonds marins permettent de suivre les variations du niveau de la mer en enregistrant la hauteur du niveau d'eau et en mesurant la pression.

²⁵ Chapitre 1, section 2

²⁶ https://dimenc.gouv.nc/sites/default/files/presentation_ifremer.pdf



Les données ainsi recueillies sont :

- la moyenne horaire du niveau marin ;
- le spectre des vagues et leur hauteur significative (H_s) sur différentes bandes de fréquence, correspondant aux périodes suivantes : 3 à 8 secondes, 8 à 25 seconde et 25 à 500 secondes.

Les capteurs ont été placés ainsi car cette localisation correspond à leur face exposée aux alizés et aux australes par conséquent, aux houles dominantes (sud-est et sud-ouest).

Figure 25 : localisation de l'emplacement des capteurs à proximité des îlots, Réalisation : OBLIC 2017.

a. Les vents et la houle au large

Les données sur le vent ont été obtenues à partir de la station Météo France du Phare Amédée. Pour compléter les mesures *in situ* des conditions de la mer dans le lagon, les conditions au large ont été obtenues à partir du modèle régional de vague Wave Watch III²⁷. Les données ont été extraites au point 22,5°sud, 166,33°est. (Figure 26).

²⁷ Modèle mis en œuvre par le centre européen pour les prévisions météorologiques à moyen terme (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts – ECMWF)

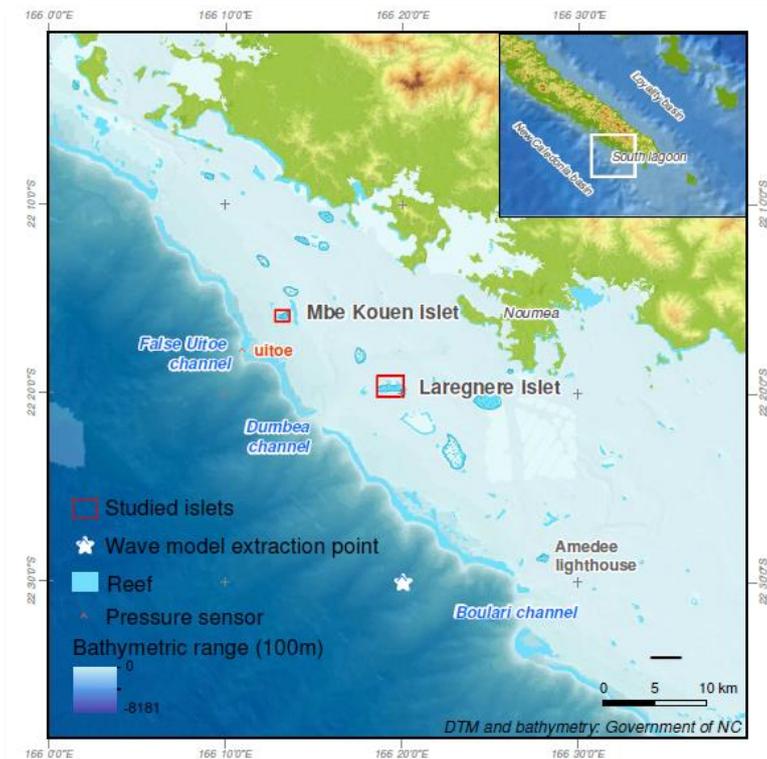


Figure 26 : : localisation du point d'extraction du modèle de vague Wave Watch III.
Réalisation : OBLIC, 2017

On retrouve deux conditions de houle au large dans la zone :

- les houles de longue période générées par les tempêtes extratropicales de la mer de Tasman²⁸ qui arrivent sur notre zone d'étude avec une orientation SSO (N 205°) : les houles d'australes ;
- les conditions de mer générées localement, à l'origine de vagues de courte période impactant notre zone avec une orientation SSE (N 150°) : les houles d'alizés.

D'autres conditions d'état de la mer peuvent se retrouver telles que les houles d'orientation N 290° arrivant de l'hémisphère Nord et se propageant le long de la côte ouest de Nouvelle-Calédonie.

La hauteur maximale des vagues au large durant la période de récolte de données est de 4,2 mètres et elle a été mesurée durant l'événement tempétueux du 09/02/2017. Leur hauteur moyenne est de 1,6 mètres. De fortes houles de sud-ouest d'une hauteur de plus de 3 mètres ont été davantage observées durant l'hiver austral (de juin 2016 à octobre 2017).

a. Les vagues haute fréquence/courte période (3- 8 secondes)

Elles correspondent à des vagues locales générées par les vents dans le lagon. Ce sont les vagues les plus fréquemment observées au niveau des capteurs lare1 et mbek1, donc au niveau de la pente externe du platier récifal de chaque îlot. Elles sont directement liées aux vents sud-est. Ce régime de vagues ne subit que peu de modifications en fonction de la marée à part sur le récif frangeant (platier) où la hauteur d'eau est moindre.

Sur Mbé Kouen, l'importante énergie véhiculée par ces ondes est observée sur l'ensemble des capteurs, ce qui n'est pas le cas de Larégnère, la longueur du fetch dans le lagon généré par les vents dominants (sud-est) étant plus importante pour atteindre Mbé Kouen.

Les vagues haute fréquence/courte période les plus importantes ont été observées lors de la tempête tropicale de février 2017 (tempête non nommée, Cf. Tableau 4, p35).

Cette zone au large est soumise aux conditions engendrées par les alizés tout au long de l'année avec des événements sud-ouest occasionnels. La vitesse des vents prédominants (vents sud-est, d'une orientation moyenne de 185°) est d'en moyenne 6,6 m/s. Elle varie entre 5 et 10 m/s.

Deux dépressions tropicales ont touché la zone durant la période de collecte des données :

- le 09/02/2017 : tempête tropicale non nommée ;

- le 10/04/2017 : le cyclone tropical Cook.

(Cf. Tableau ? : Evénements météorologiques notables ayant touché le sud-ouest de la Nouvelle-Calédonie par mois et par année (source : Météo NC)

Ces deux événements sont bien identifiables sur les enregistrements des capteurs. Ils ont généré de forts vents d'est.

²⁸ La mer de Tasman ou de Tasmanie est une mer de l'océan Pacifique sud-ouest située entre le sud-est de l'Australie et la Nouvelle-Zélande.

a. Les vagues basse fréquence/longue période (8-25 secondes)

Elles correspondent aux vagues générées par la houle de sud-ouest qui vient frapper contre la barrière de corail. Elles sont grandement influencées par la marée. On les observe davantage au niveau du capteur situé à l'avant du récif de Larégnère (Laré1) qu'au niveau de l'îlot Mbé Kouen (Mbé1). Ces vagues mesurées à Larégnère sont fortement corrélées avec les mesures prises dans la passe de Uitoe (0,94 mètres), elles arrivent donc directement sur l'îlot. Au contraire, en arrivant à Mbé Kouen, l'énergie des vagues est dissipée et atténuée par la faible profondeur et les frictions au niveau du platier récifal de l'îlot.

b. Les vagues infra gravitaires (25 – 500 secondes)

Elles peuvent être dues :

- aux vagues du large qui déferlent au niveau de la barrière et se propagent ensuite dans le lagon vers les îlots
- aux vagues du lagon qui déferlent au niveau du récif externe qui entoure le platier des îlots.

Elles seraient des résidus d'énergie des vagues à faible fréquences qui se sont brisées sur la barrière de corail. La corrélation entre les vagues infra-gravitaires et les vagues basse fréquence est modulée par la marée à l'avant du récif externe des deux sites d'étude.

Les données relatives aux conditions de la mer au large issues du modèle de vague Wave Watch III et les données issues des capteurs de pression in situ sont présentes en annexes. (Annexes n°3, 4 et 5).

4.2. Des images aériennes et satellites pour une étude diachronique

Pour réaliser une étude diachronique de l'évolution des îlots à partir de photographies aériennes et d'images satellites, nous avons récolté, dans un premier temps, le plus d'images disponibles ciblées sur les deux îlots (Tableau 5). S'en est suivi une étape de géoréférencement de ces données numériques puis de digitalisation du trait de côte permettant une analyse spatiale et statistique pour étudier l'évolution de leurs rivages. Enfin, une représentation cartographique de cette évolution récente a été élaborée. Ces trois principales étapes sont schématisées sur la Figure 27 ci-dessous.

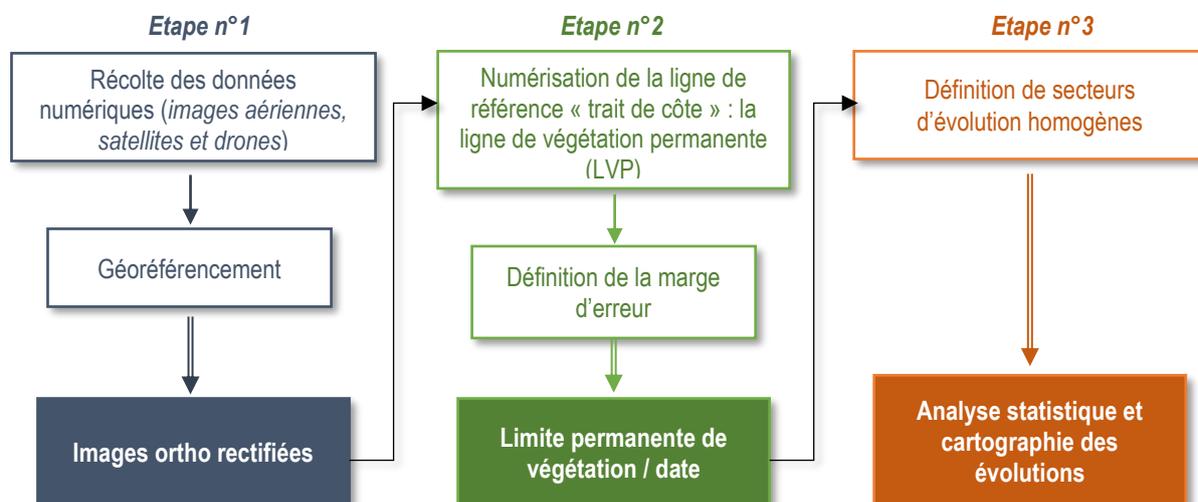


Figure 27 : les étapes du protocole méthodologique appliqué dans le cadre de l'analyse diachronique de l'évolution des îlots

Etape n° 1 : récolter et géoréférencer les données numériques

Les orthophotographies provenant de la province Sud et de GIE SERIAL sont géoréférencées et orthorectifiées alors que les images aériennes et photographies issues des données acquises par drone sont seulement géoréférencées.

Tableau 5 : Les images aériennes et satellites récoltées pour l'analyse diachronique de l'évolution des îlots et leurs caractéristiques

	Date	Type	Capteur	Résolution spatiale
Larégnère	08/09/2004	Images Digital Globe	WorldView 1	0,5 m
	15/02/2007	Images Digital Globe	WorldView 2	0,5 m
	2011	Orthophotographie de la province sud	Levé aéroportée	0,25 m
	08/08/2012	Images Digital Globe	WorldView2/3	0,5 m
	30/05/2015	Images Digital Globe	WorldView2/3	0,5 m
	11/05/2016	Images Digital Globe	WorldView2/3	0,5 m
	02/11/2016	Orthophotographie (RMS : 0,36 m)	Drone	1,2 cm
Mbé Kouen	29/11/2009	Images Digital Globe	WorldView2/3	0,5 m
	24/02/2013	Images Digital Globe	WorldView2/3	0,5 m
	10/08/2016	Orthophotographie GIE SERIAL NC	Levé aéroportée	0,5 m
	02/11/2016	Orthophotographie (RMS : 0,49 m)	Drone	1,2 cm
	05/07/2017	Orthophotographie (RMS : ? m)	Drone	1,7 cm

Pour Larégnère, 5 images satellites issues de *Google Earth*, dont l'opérateur satellitaire est Digital Globe, une société privée utilisant les satellites suivants : World-View 1, 2 et 3 ont été récupérées directement sur le logiciel de visualisation de la terre de Google. Une orthophotographie datant de 2011 a été obtenue auprès de la province Sud.

Pour l'îlot Mbé Kouen, les images satellitaires sont plus rares. Seulement deux ont pu être trouvées sur *Google Earth*. L'acquisition récente (2016) d'une image aérienne de Mbé Kouen par la société calédonienne GIE SERIAL a permis d'intégrer cette dernière à notre étude diachronique.

L'éloignement des îlots par rapport à la Grande-Terre est la principale raison expliquant la relative faible quantité d'images recueillies. Pour compléter cette collection limitée à des images datant au mieux du début des années 2000, nous pouvons y joindre les orthophotographies issues des images acquises par drone dans le cadre du projet lors de deux missions terrain (02/11/2016 ; 05/07/2017).

Suite à ce travail, le géoréférencement de ces données numériques dépourvues de références spatiales (issues des capteurs WorldView 1, 2 et 3) a constitué une étape intermédiaire primordiale. Le référentiel géodésique officiel de la Nouvelle-Calédonie est le **RGNC91-93**. Sa projection est en **Lambert NC**²⁹. Le géoréférencement a été réalisé sous le logiciel SIG **QGIS (version 2.14)** par le biais de l'extension « **géoréférenceur GDAL** ».

Les paramètres alors utilisés sont les suivants :

- **Paramètre de transformation** : la fonction Polynomiale 2. Elle utilise une fonction polynomiale axée sur des points de contrôle nommés « amer » issus d'une image possédant déjà des références spatiales dans le système de référence géographique ainsi qu'un algorithme LSF (Least Square Fittin). Elle diffère des fonctions polynomiales 1 et 3 par son degré de distorsion introduit pour faire correspondre au mieux la source aux points de contrôle. La 2 est la plus couramment utilisée dans ce type de traitement.
- **Méthode de ré-échantillonnage** : au plus proche voisin, qui permet de ne pas modifier la valeur des cellules en entrée. Cette méthode détermine l'emplacement du centre de la cellule la plus proche sur le raster en entrée et attribue la valeur de cette cellule à la cellule sur le raster en sortie.³⁰

Une erreur, appelée **RMS** (Root-Mean-Square error), est calculée et est donnée en pixel ou en unité de pixel. C'est un coefficient représentant l'écart moyen entre les coordonnées souhaitées d'un point et les coordonnées calculées par la correction. La distance entre les deux points est appelée distance résiduelle. Plus cette erreur est proche de zéro, plus l'ajustement est bon. **Pour un géoréférencement optimal, nous avons choisi de ne pas avoir une erreur totale supérieure à 3 pixels** (Tableau 6).

Pour Larégnère, l'image de référence utilisée est l'orthophotographie de 2011 (Figure 28) et pour Mbé Kouen, une orthophotographie de 2016.

La difficulté à trouver des points remarquables, les amers, sur les photographies des îlots est à souligner. En effet, les seules structures utilisables sont les bâtiments abritant des toilettes sur Larégnère, les beachrocks lorsqu'ils ne sont pas recouverts de sable ou encore les « *patates* » de coraux (ou pinacles).

Ainsi, nous étudierons Larégnère sur la période s'étalant de 2004 à 2016 et Mbé Kouen de 2009 à 2017.

²⁹ <https://dittt.gouv.nc>

³⁰ D'après : <https://desktop.arcgis.com> et <https://docs.qgis.org> [consultés le 17 mai 2017] URLs : <http://desktop.arcgis.com/fr/arcmap/10.3/manage-data/raster-and-images/fundamentals-for-georeferencing-a-raster-dataset.htm> ; https://docs.qgis.org/2.0/fr/docs/user_manual/plugins/plugins_georeferencer.html

Tableau 6 : Paramètres de transformation pour le géoréférencement des images récoltées

Généralités				Géoréférencement			Paramètres de transformation		
Site	Date de prise de vue	Capteur	Image de référence	Nombre d'amers	RMS moyenne (pixel)	RMS moyenne (mètre)	Type de transformation	Méthode de rééchantillonnage	SCR cible
Larégnère	08/09/2004	Digital Globe	Orthophotographie de la Province Sud (2011)	27	1,73	0,87	Polynomiale 2	Plus proche voisin	RGNC91-93 / Lambert New Caledonia
Larégnère	15/02/2007	Digital Globe	Orthophotographie de la Province Sud (2011)	31	2,01	1,01	Polynomiale 2	Plus proche voisin	RGNC91-93 / Lambert New Caledonia
Larégnère	08/08/2012	Digital Globe	Orthophotographie de la Province Sud (2011)	51	1,48	0,74	Polynomiale 2	Plus proche voisin	RGNC91-93 / Lambert New Caledonia
Larégnère	30/05/2015	Digital Globe	Orthophotographie de la Province Sud (2011)	31	2,06	1,03	Polynomiale 2	Plus proche voisin	RGNC91-93 / Lambert New Caledonia
Larégnère	15/11/2016	Digital Globe	Orthophotographie de la Province Sud (2011)	31	1,79	0,90	Polynomiale 2	Plus proche voisin	RGNC91-93 / Lambert New Caledonia
Mbé Kouen	29/11/2009	Digital Globe	Orthophotographie GIE SERAIL NC (2016)	31	1,64	0,82	Polynomiale 2	Plus proche voisin	RGNC91-93 / Lambert New Caledonia
Mbé Kouen	24/02/2013	Digital Globe	Orthophotographie GIE SERAIL NC (2016)	13	1,73	0,87	Polynomiale 2	Plus proche voisin	RGNC91-93 / Lambert New Caledonia
Mbé Kouen	01/05/2013	Digital Globe	Orthophotographie GIE SERAIL NC (2016)	34	1,2	0,60	Polynomiale 2	Plus proche voisin	RGNC91-93 / Lambert New Caledonia

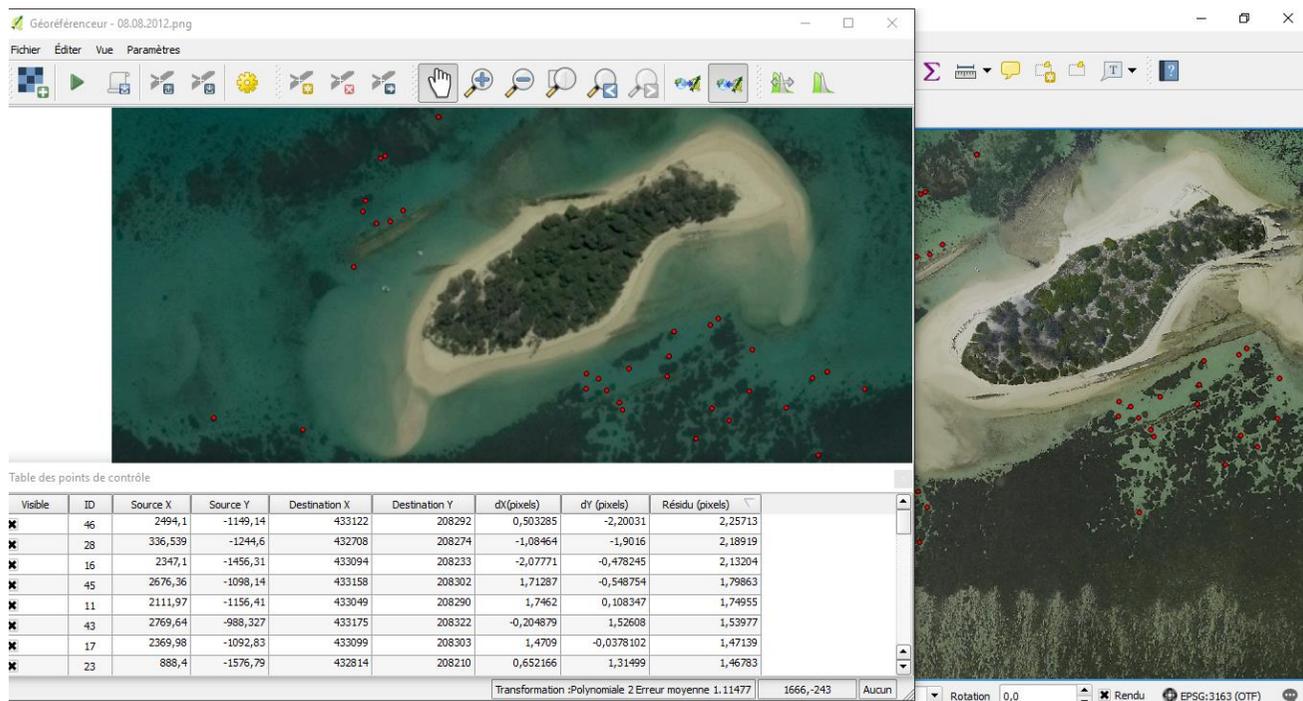


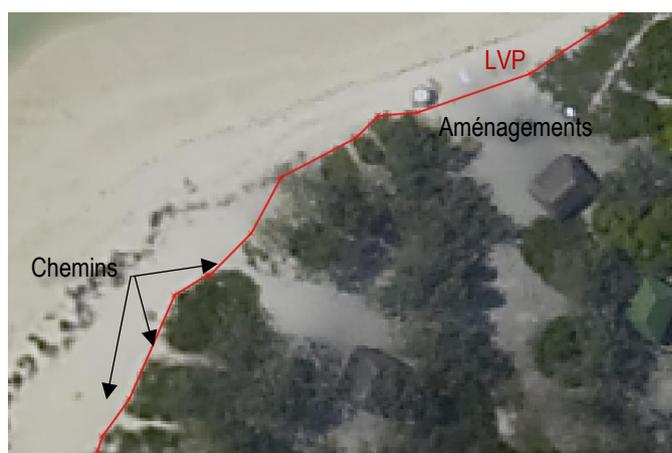
Figure 28 : Impression écran lors du géoréférencement de l'image de l'îlot Larégnère du 08/08/2012 (à gauche) à partir de l'orthophotographie de 2011 (à droite). Les points rouges correspondent aux amers utilisés pour le géoréférencement des images.

Etape n°2 : définir et numériser une ligne de référence « trait de côte »

Le trait de côte est la ligne séparant le domaine marin du domaine terrestre (comme définit dans le *Chapitre 1 – Section 1*). Cependant, cette ligne peut revêtir un grand nombre d'aspects en fonction des critères qui la définissent. Ils peuvent être de types morphologiques (rupture de pente), marégraphiques, virtuels (ligne extraite à partir de critères optiques tels que la valeur de la longueur d'onde d'un objet en télédétection), liés à un événement (ligne de tempête par exemple) ou encore liés à la limite de la végétation de bord de mer (*Faye, 2010*).

Pour notre étude, la qualité des données numériques acquises ne permet de distinguer nettement par photo-interprétation que la **limite de végétation permanente** (notée LVP dans la suite du rapport). Cette ligne va nous servir de ligne de référence de l'évolution de la mobilité du trait de côte des îlots de sable (*Garcin et al., 2016, Yates et al, 2013*). Ces modifications telles que son avancée ou son recul, nous donneront des indices sur les changements de morphologie qu'ont connu les îlots ces quinze dernières années. En effet, la LVP est un bon indicateur de la mobilité du trait de côte sur des échelles annuelles à pluriannuelles. La végétation est, sur le terrain, un indice et un marqueur de l'évolution de l'îlot. S'il y a érosion, on observe une disparition de la végétation, tandis que la ligne de pleines eaux peut rester stable alors que l'indicateur LVP est en recul (*Garcin et Vendé-Leclerc, 2016, p 99*). De plus, sur les images utilisés dans le cadre de notre étude, la ligne des plus hautes eaux s'avère impossible à distinguer. La LVP offre un dernier avantage : nous n'avons pas besoin de prendre en compte la marée et la surcote à l'heure de la prise de vue, information qui n'est, de toutes les manières, pas en notre possession.

A partir des orthophotographies obtenues lors de l'étape précédente, nous pouvons digitaliser la LVP par photo-interprétation pour chaque date (Figure 30). Cette numérisation a été réalisée sur le logiciel de SIG QGis version 2.14 sur de nouvelles couches de poly-lignes (format Shapefile).



La photo-interprétation est fortement dépendante de l'opérateur. Un seul opérateur a réalisé cette étape. Certains choix ont été faits : par exemple, lors d'une percée dans la végétation due aux aménagements humains (farés, chemins artificiels...illustration pour le secteur nord-ouest de Larégnère, Figure 29) ou de plus petite trouée, nous avons décidé de ne pas les prendre en compte et de placer la LVP au travers.

Figure 29 : Choix dans la numérisation de la LVP lors de la rencontre de percée dans la végétation, exemple du secteur nord-ouest de Larégnère.

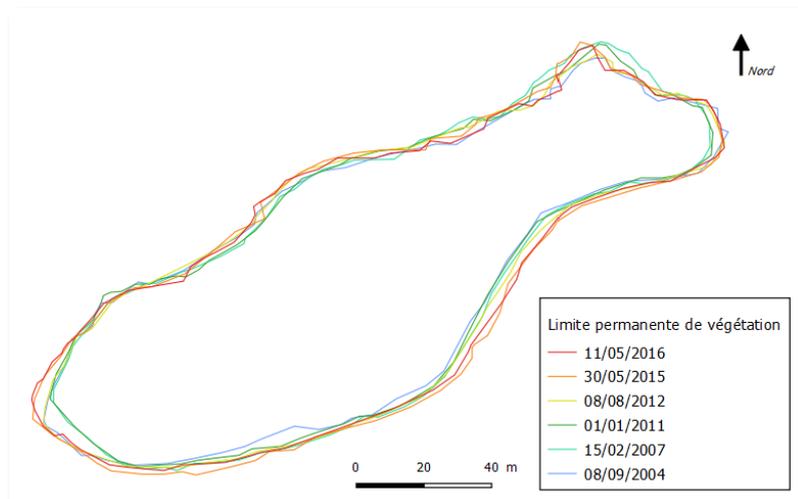


Figure 30 : Limites de végétation permanente numérisée pour 6 dates pour l'îlot Larégnère.

La marge d'erreur concernant la digitalisation des LVP pour Larégnère et Mbé Kouen prend en compte (Faye, 2010) :

- l'erreur due au géoréférencement : entre 1,2 et 2,06 d'erreur RMS pixel, entre 0,60 et 1,03 RMS en mètre ;
- l'erreur due au géoréférencement des images drones, inférieure à l'erreur de géoréférencement des images Digital Globe, elle ne sera pas comptabilisée ;
- l'erreur due à la photo-interprétation de l'opérateur (2 pixels d'erreur, soit 1 mètre), c'est-à-dire à l'opérateur qui fixe le trait de côte.

Ainsi, par exemple, la RMS (en mètre) de l'image du 30/05/2016 égale à 1,03, à laquelle on ajoute l'erreur due à la photo-interprétation pour la fixation de la LVP, on obtient une marge d'erreur totale de 2,3 mètres. Pour les besoins de l'étude, nous avons choisi de prendre une marge d'erreur de 2 mètres (correspondant à la marge d'erreur maximale calculée sur l'ensemble des images géoréférencées)

Cette marge d'erreur de **2 mètres** correspond à une marge d'erreur de **0,17 m/an** (2m/12 ans) sur l'ensemble de la période concernée (2004-2016) pour Larégnère et de **0,25 m/an** (2m/8 ans) de 2009 à 2017 pour Mbé Kouen.

Ainsi, si les distances entre chaque LVP permettant de calculer les vitesses et taux d'évolution sont égales ou inférieurs à 2 mètres alors le secteur est considéré comme stable (Figure 31).

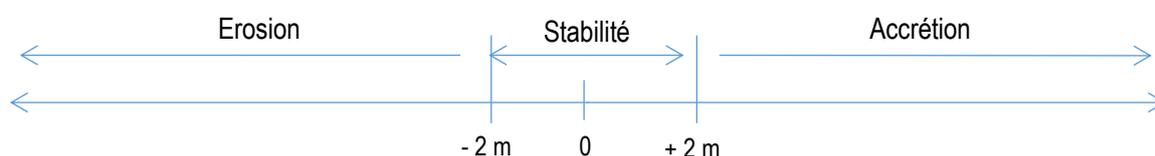


Figure 31 : Signification de la marge d'erreur calculée pour l'analyse diachronique des îlots

Cependant, pour nous permettre d'interpréter nos résultats de manière significative, cette marge d'erreur est laissée de côté. Elle nous permettra tout de même de nuancer nos résultats dans la partie discussion du chapitre

Etape n°3 : Analyser et cartographier la mobilité des îlots

Afin de réaliser l'analyse statistique comprenant des calculs de vitesses d'évolution de la LVP pour chaque îlot et de cartographier les tendances observées, nous avons tout d'abord procédé à un découpage du rivage des îlots par transects tous les 10 mètres à partir d'une ligne de base virtuelle, dessinée sous SIG (ArcGis 10.2 et QGIS 2.14) manuellement. Les transects ont été créés perpendiculaires à cette ligne imaginaire. La méthode est illustrée par la Figure 32 ci-dessous.

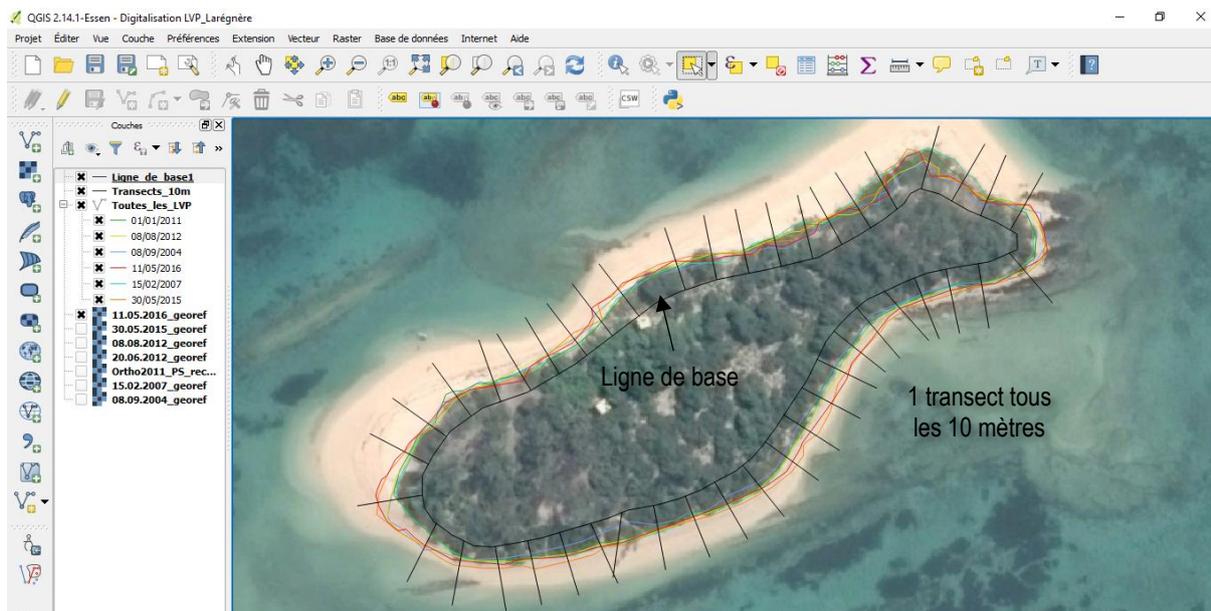


Figure 32 : capture d'écran montrant les transects (tous les 10 mètres) créés autour d'une ligne de base virtuelle pour Larégnère

Cette ligne de base a été créée vers le centre de l'îlot le plus parallèlement possible aux LVP afin de servir de base pour la création de transects orthogonaux équidistants de 10 mètres environ. Cette technique est issue du fonctionnement de l'outil DSAS (Digital Shoreline Analysis System) développé par l'United States Survey (USGS) (Himmelstoss et al., 2009 ; Faye, 2010 ; Baba Touré, 2011 ; Mallet et Michot, BRGM, 2012).

Par la suite, nous avons calculé la longueur des segments de transects entre chaque date successive afin d'en extraire les valeurs (en mètre) d'avancée ou de recul sous SIG. La table attributaire regroupant ces valeurs a ensuite été exportée au format CSV et les données traitées sous Microsoft Excel afin de faciliter l'analyse statistique comprenant :

- l'avancée ou de recul de la LVP entre chaque date (en mètre) ;
- la vitesse moyenne d'évolution de la LVP par entre chaque date (en mètre/an) ;

Afin de définir une tendance d'évolution à « moyen-terme », c'est-à-dire sur l'ensemble des périodes étudiées (12 ans pour Larégnère ; 8 ans pour Mbé Kouen), nous avons calculé :

- l'avancée ou le recul de la LVP entre 2004 et 2017 pour Larégnère (en mètre) et la vitesse moyenne de cette évolution (en mètre/an)
- l'avancée ou le recul de la LVP entre 2009 et 2017 pour Mbé Kouen (en mètre) et la vitesse moyenne de cette évolution (en mètre/an)

Les transects voisins aux évolutions semblables ont été regroupés en secteurs homogènes (Tableau 7). Une typologie des tendances évolutives a été définie (Tableau 8) dans l'objectifs de représenter sur une carte la mobilité des îlots (Figure 33).

L'ensemble de cette analyse statistique est à retrouver parmi les annexes du rapport et les résultats cartographiques sont présentés dans le chapitre suivant (Chapitre 3).

Tableau 7 : Exemple de secteurs d'évolution homogène définis pour Larégnère

Secteur	Nom	Evolution moyenne en mètre	Vitesse d'évolution moyenne en m/an	Evolution à moyen terme (sur 12 ans)
Secteur1	Pointe est	3,40	0,28	Accrétion importante
Secteur2	Extrémité sud de la pointe est	-1,84	-0,15	Erosion
Secteur3	Sud-est	-0,26	-0,02	Stabilité
Secteur4	Sud	-2,99	-0,25	Erosion importante
Secteur5	Milieu sud	-2,11	-0,18	Erosion
Secteur6	Sud-ouest	-0,38	-0,03	Stabilité
Secteur7	Pointe ouest	-2,67	-0,22	Erosion importante
Secteur8	Nord-ouest	0,78	0,06	Stabilité
Secteur9	Nord	-3,01	-0,25	Erosion importante
Secteur 10	Nord-est	0,85	0,07	Stabilité

Tableau 8 : Typologie des tendances évolutives en fonction de leur vitesse d'évolution (m/an)

Typologie	Vitesse d'évolution moyenne (m/an) sur l'ensemble des périodes d'étude	Vitesse d'évolution (m/an) sur une période particulière
Accrétion très importante	0,30 m/an	
Accrétion importante	0,20 m/an	> 1 m
Accrétion	0,10 m/an	< 1 m
Stabilité	Entre - 0,10 m et + 0,10 m/an	Entre - 0,10 m et + 0,10 m
Erosion	-0,10 m/an	< - 1m
Erosion importante	-0,20 m/an	> -1m
Erosion très importante	-0,30 m/an	

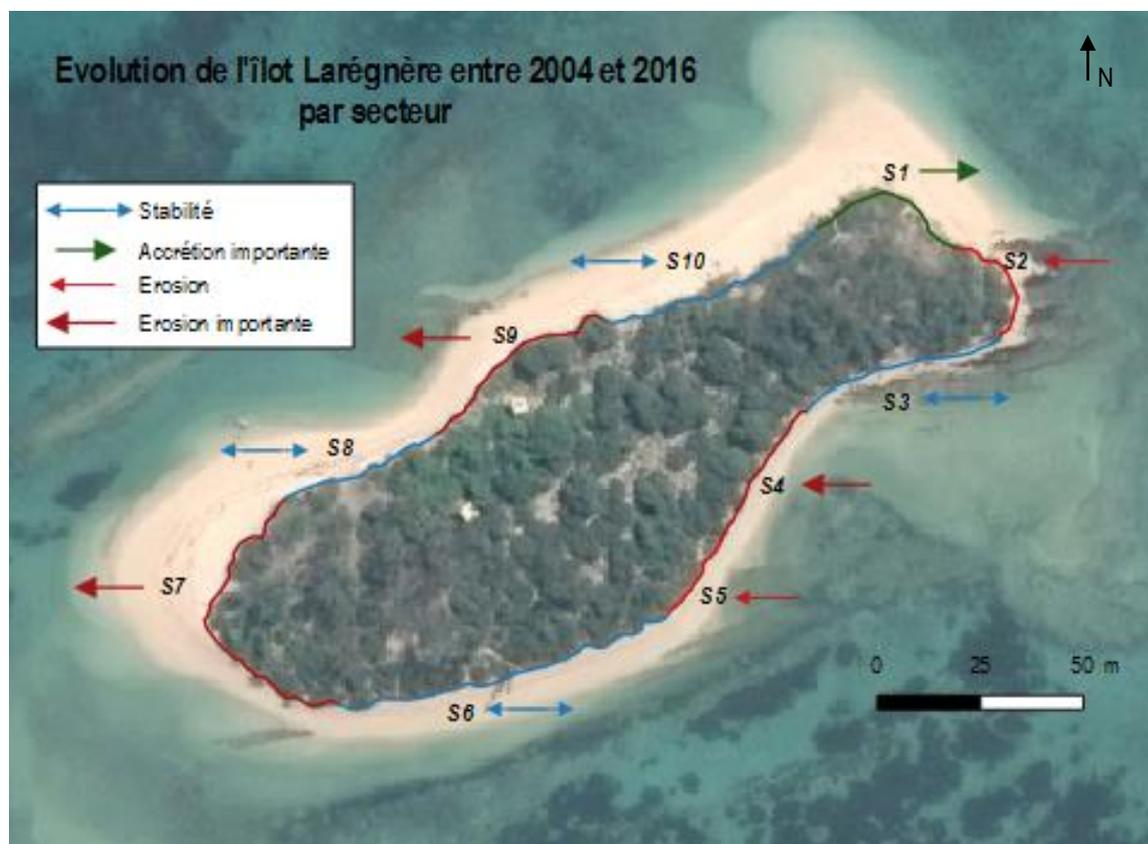


Figure 33 : Cartographie de l'avancée et du recul de la LVP à Larégnère sur la période 2004-2016 par secteur d'évolution homogène

4.3. Des mesures topographiques acquises sur le terrain

Une seconde partie de notre étude repose sur l'acquisition de données *in situ*, afin d'analyser les tendances actuelles de l'évolution des îlots. Trois méthodes différentes permettant de modéliser la topographie des îlots ont été mise en œuvre tout au long du projet EMIL (2016-2017, Figure 34) dans l'objectif de les tester pour valider leur utilité et de les comparer entre elles afin de souligner la pertinence de leur choix pour l'étude menée. Ces trois méthodes sont les suivantes : mesures topographiques au cadre d'Emery le long de profils de plage prédéfinis, mesures topographiques de semis de points au DGPS pour la création de Modèles Numériques de Terrain (MNT) et enfin, acquisition d'image drone pour leur traitement photogrammétrique pour l'obtention de Modèle Numérique de Surface (MNS). Nous avons fixé la fréquence des levés à 3/4 mois pour les profils au cadre et les observations, 6 mois pour les semis de points et profils au DGPS, 6 mois pour les levés au drone

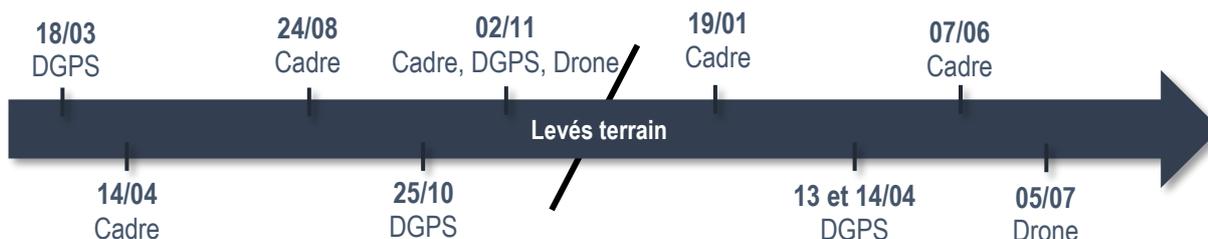


Figure 34 : détail chronologique des différentes missions terrain réalisées dans la cadre du projet EMIL

a. Le cadre

Comme nous l'avons vu dans le chapitre précédent, le cadre est une des techniques utilisées dans le suivi du trait de côte des littoraux. Méthode ancienne qui se révèle la moins coûteuse mais aussi la plus pratique à mettre en œuvre, nous l'avons mise en œuvre lors de 5 missions terrain (réalisés par les membres du projet EMIL ou par les gardes naturels des îlots) sur la période allant du 1^{er} janvier 2016 à fin 2017 (Figure 34) :

- 14/04/2016
- 24/08/2016
- 02/11/2016
- 19/01/2017
- 07/06/2017

Les profils de plages ont été implémentés sur les deux îlots. Des points/stations de références (tête de profil³¹) matérialisés par un repère fixe (existant Figure 35 ou implanté Figure 37) dont les coordonnées X et Y sont connus. L'altitude de la base du repère, notée Z RGNC est également connue (mesurée au DGPS par l'équipe topographique de la DFA, province Sud).



Figure 35 : Repère existant (plot coin feuau province Sud, source : OBLIC, 2017)

³¹ Il s'agit de repère existant (plot de la Province Sud à Larégnère, pied du support du mat installé pour la protection des oiseaux pour Mbékouen) ou de repères implantés (piquet cimenté à leur base pour s'assurer d'un maintien stable et durable de la station)

Si le repère utilisé n'est pas positionné au sol (ex, plot province Sud, Figure 35), il a été nécessaire, au cours du traitement des données, de réaliser une correction est à faire entre cette valeur (Z repère) et la hauteur du repère (en m) afin de connaître l'altitude du sol (Z sol) à un instant t lors des mesures. En effet, les mesures débutent au sommet de ces repères. L'ensemble des dix profils et leurs caractéristiques sont présentées dans le Tableau 9. Ils sont matérialisés par un trait noir sur les photographies aériennes (Larégnère : Figure 37 ; Mbé Kouen : Figure 38). La tête de repère de chaque profil correspond à un repère pré-existant sur Larégnère et Mbé Kouen, sauf pour ce qui concerne les profils 1-a et 1-b (Larégnère) qui ont été implantés pour les besoins de la mission. Les profils sont fixés selon un azimut qui reste identique entre chaque levé. La longueur du profil est variable car dépendante de la marée, ainsi, les informations relatives à cette dernière sont toujours précisées dans les fiches remplies par les opérateurs terrain (Annexe n°6). Lorsqu'un marqueur tel que la limite de végétation, la laisse de mer, la limite entre sable sec et humide... apparaît le long du profil, il est associé aux mesures pour ensuite être incorporé sur les profils.

Le cadre est déplacé sur le transect selon l'azimut définie et matérialisé au sol par un décimètre et la lecture de la mesure de la dénivelée est faite tous les mètres (longueur du cadre). La Figure 36 illustre la mise en œuvre de cet outil lors de la mission du 14/04/2016 sur Larégnère.



Figure 36 : Mise en pratique de l'outil « cadre » par les gardes nature lors de la mission du 14/04/2016, Larégnère (photographie de Mathieu Le Duff).

Les données topographiques acquises le long de ces profils permettront de mettre en avant à une échelle fine les évolutions observées sur une section rectiligne de plage des îlots. En effet, un profil topographique est constitué d'un assemblage d'une suite de pentes de trois principales sections : haut de plage, estran et avant plage (Sinane, 2013). Sans aller jusqu'à la définition de « morphotypes » pour les profils dans le cadre de cette étude, nous considérons que l'apparition d'une convexité est synonyme d'accrétion et, au contraire, l'apparition d'une concavité, synonyme d'érosion .

Nom profil	Point X	Point Y	Z repère NGNC (m) : nov 2016	Hauteur repère (m)	Z sol NGNC (m)	Azimut	Direction	Longueur moyenne des profils	Site
1-a	432968,472	208403,311	3,32	0,24	3,08	N335	NO	30,5	Larégnère
1-b	432989,018	208388,793	2,794	0,225	2,569	N140	SE	30,4	Larégnère
2-a	432864,35	208346,78	2,457	0,48	1,977	N315	NO	56,1	Larégnère
2-b	432875,36	208316,79	2,401	0,47	1,931	N145	SE	22,9	Larégnère
3	432864,35	208346,78	2,457	0,48	1,977	N235	O	73,4	Larégnère
4	433017,95	208420,36	2,31	0,61	1,7	N30	NE	29,7	Larégnère
5-a	422898,56	215307,24	2,17	0	2,17	N202	SO	61,16	Mbé Kouen
5-b	422898,56	215307,24	2,17	0	2,17	N32	NE	123,685	Mbé Kouen
6-a	422898,56	215307,24	2,17	0	2,17	N305	NO	31,785	Mbé Kouen
6-b	422898,56	215307,24	2,17	0	2,17	N130	SE	37,449	Mbé Kouen

Tableau 9 : Les dix profils et leurs caractéristiques

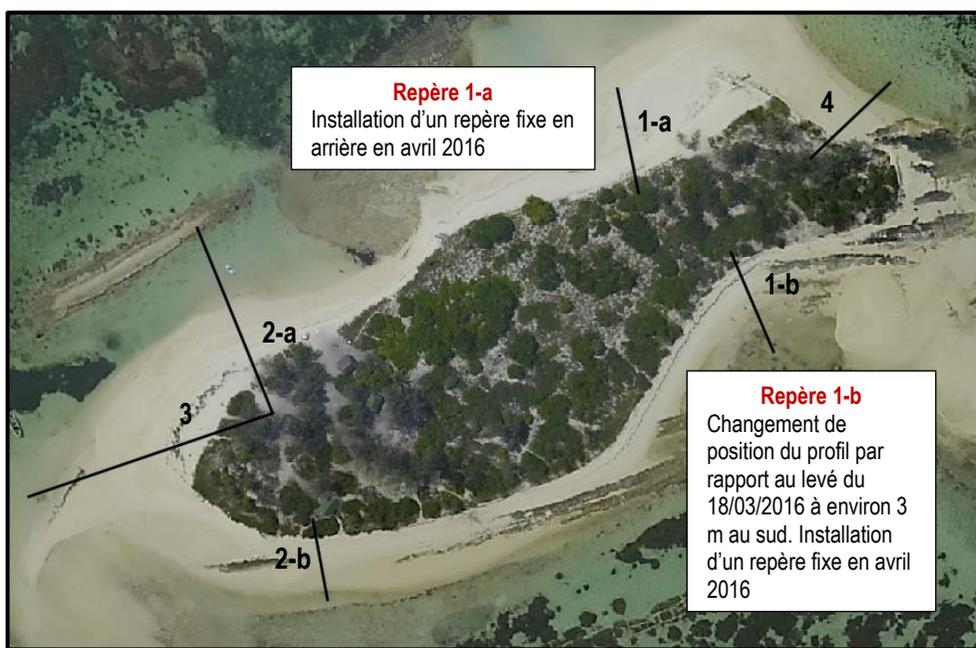


Figure 37 : Les 6 profils de Larégnère

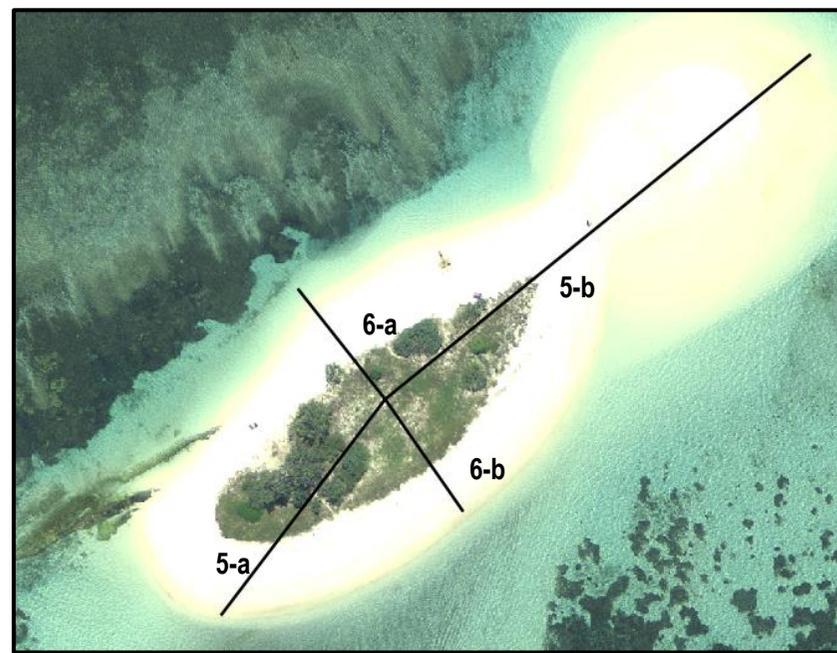


Figure 38 : Les 4 profils de Mbé Kouen

b. Le DGPS

Des données topographiques ont été acquises au DGPS³² par les opérateurs de la Direction du Foncier et de l'Aménagement (province Sud) les 18/03/2016, 25/10/2016, 13/04/2017 (mesures post-cyclone Cook) sur l'îlot Larégnère et les 14/04/2016, 02/11/2016 et 14/04/2017 sur l'îlot Mbé Kouen (Tableau 10). La méthode utilisée consiste à prendre des mesures selon une grille précise : une mesure tous les 10 mètres sur l'ensemble du terrain d'étude, avec autant de points mesurés que le permet la marée du jour. La marge d'erreur des mesures est estimée à 0,03 mètres. On obtient ainsi un semi de points auxquels on ajoute les mesures topographiques effectuées le long des profils de plage permanents (*pour les mesures du 13-14/04/2017 : données indisponibles*) afin de produire une meilleure interpolation au niveau de ces endroits du site d'étude lors de la création des Modèles Numériques de Terrain (MNT).

Tableau 10 : Caractéristiques des semis de points levés au DGPS par mission

Site, date et heure	Marée	Semi de points
Larégnère 18/03/2016	PM : 4h18 ; H : 1,34 m BM : 10h33 ; H : 0,82 m PM : 16h16 ; H : 1,17 m BM : 22h41 ; H : 0,57 m	
Larégnère 25/10/2016	PM : 3h29 ; H : 1,10 m BM : 9h39 ; H : 0,60 m PM : 16h18 ; H : 1,35 m BM : 22h47 ; H : 0,65 m	
Larégnère 13/04/2017	BM : 3h11 ; H : 0,49 m PM : 9h09 ; H : 1,49 m BM : 15h24 ; H : 0,35 m PM : 21h44 ; H : 1,52 m	

³² Voir Chapitre 1, section 1

<p>Mbé Kouen 14/04/2016 Matin</p>	<p>PM : 1h16 ; H : 1,40 m BM : 7h29 ; H : 0,75 m PM : 12h58 ; H : 1,16 m BM : 19h28 ; H : 0,53 m</p>	
<p>Mbé Kouen 02/11/2016 Début d'après-midi</p>	<p>BM : 3h04 ; H : 0,30 m PM : 9h32 ; H : 1,53 m BM : 15h38 ; H : 0,57 m PM : 21h23 ; H : 1,39 m</p>	
<p>Mbé Kouen 14/04/2017</p>	<p>BM : 3h46 ; H : 0,53m PM : 9h40 ; H : 1,45 m BM : 15h53 ; H : 0,35 m PM : 22h17 ; H : 1,49 m</p>	

c. Le drone

Des photographies ont été acquises par drone dans l'objectif de réaliser des Modèles Numériques de Surfaces (MNS) à partir de traitements photogrammétriques. Deux missions « drone » ont été menées sur le temps du projet EMIL : le 02/11/2016 et le 05/07/2017 (Figure 34). Le tableau ci-dessous (Tableau 11) reprend l'ensemble des caractéristiques des drones, de l'appareil photographique utilisé et des prises de vues réalisées.

Tableau 11 : Caractéristiques des missions « drone » du projet EMIL

	Mission n°1	Mission n°2
Date	02/11/2016	05/07/2017
Opérateurs	Pascal Dumas et Emmanuel Schnieder	Pascal Dumas
Caractéristiques du drone		
Nom	Phantom 2	Phantom 4
Poids	1000 grammes	1380 grammes
Vitesse de vol maximale	15 m/s	20/m/s
Temps de vol	25 minutes	28 minutes
Caractéristiques de l'appareil photographique		
Nom	Go Pro Hero 4	DJI Osmo 4K
Type	Appareil embarqué	Appareil intégré
Résolution	8 mégapixels	12 mégapixels
Caractéristiques des prises de vue		
Hauteur	25 mètres	25 mètres
<i>Larégnère</i>		
Nombre total d'images	592	
Nombre d'images verticales	377 (Emmanuel Schnieder) 85 (Pascal Dumas)	
Nombre d'images obliques	130 (Pascal Dumas)	
<i>Mbé Koeun</i>		
Nombre total d'images	547	887
Nombre d'images verticales	321 (Emmanuel Schneider) 95 (Pascal Dumas)	205
Nombre d'images obliques	131 (Pascal Dumas)	682

Le vol de la première mission a été effectué en pilotage manuel. Lors de la seconde mission, un plan de vol a été au préalable établi, le drone a donc été piloté en mode automatique. Après chaque vol, les opérateurs terrain, munis d'un DGPS, relèvent les coordonnées du centre de la cibles (Figure 39) placées sur les îlots. Ces données serviront au géoréférencement des orthophotographies et des modèles.



Figure 39 : Exemple de cibles disposées sur l'îlot Larégnère lors de la mission du 02/11/2016 (image drone)



4.4. Des observations géomorphologiques complémentaires

En complément des données purement quantitatives acquises par le biais d'instruments de mesure, des observations naturalistes sont réalisées à chaque mission par les gardes nature de la province Sud et par le SGNC. Ces observations basées sur une approche naturaliste consiste à retranscrire sur des cahiers de terrain ou des fiches toutes les indices et marqueurs géomorphologiques et sédimentologiques présents sur le terrain (talus d'érosion, zone en accrétion, état de la végétation, état du stock sédimentaire, morphologies existantes, beachrock apparent, ...) Les modifications morphologiques des îlots repérées à l'œil nu sont photographiées et localisées à l'aide d'un GPS. La réalisation de ces observations successives à un pas de temps très court et de manière régulière permet de nous informer sur la tendance actuelle de l'évolution du littoral de l'îlot et de sa variabilité et de contextualiser les zones les plus mobiles. Ces informations apporteront des indications utiles et complémentaires à l'interprétation des données topographiques acquises par drone, DGSP ou cadre et permettront de valider et corroborer ces analyses en apportant une vérité terrain. Cette méthode, contrairement à celles évoquées ci-dessus, ne permet pas de quantifier les évolutions.

Ainsi, l'ensemble de données récolté précédemment à différentes échelles spatiales : mondiale, régionale, locale et *in situ*, vont nous permettre de connaître les évolutions des îlots, d'une part à moyen terme à travers l'analyse des données environnementales et des images aériennes et satellites des îlots, d'autre part, à court (voire très court) terme avec les données topographiques et océanographiques (Figure 40). Avant cela, la prochaine section reprend en détail la méthodologie que nous avons mise en œuvre pour acquérir les données topographiques ainsi que pour les traiter et obtenir des rendus permettant leur analyse et leur interprétation.

Des données à différentes échelles spatio-temporelles

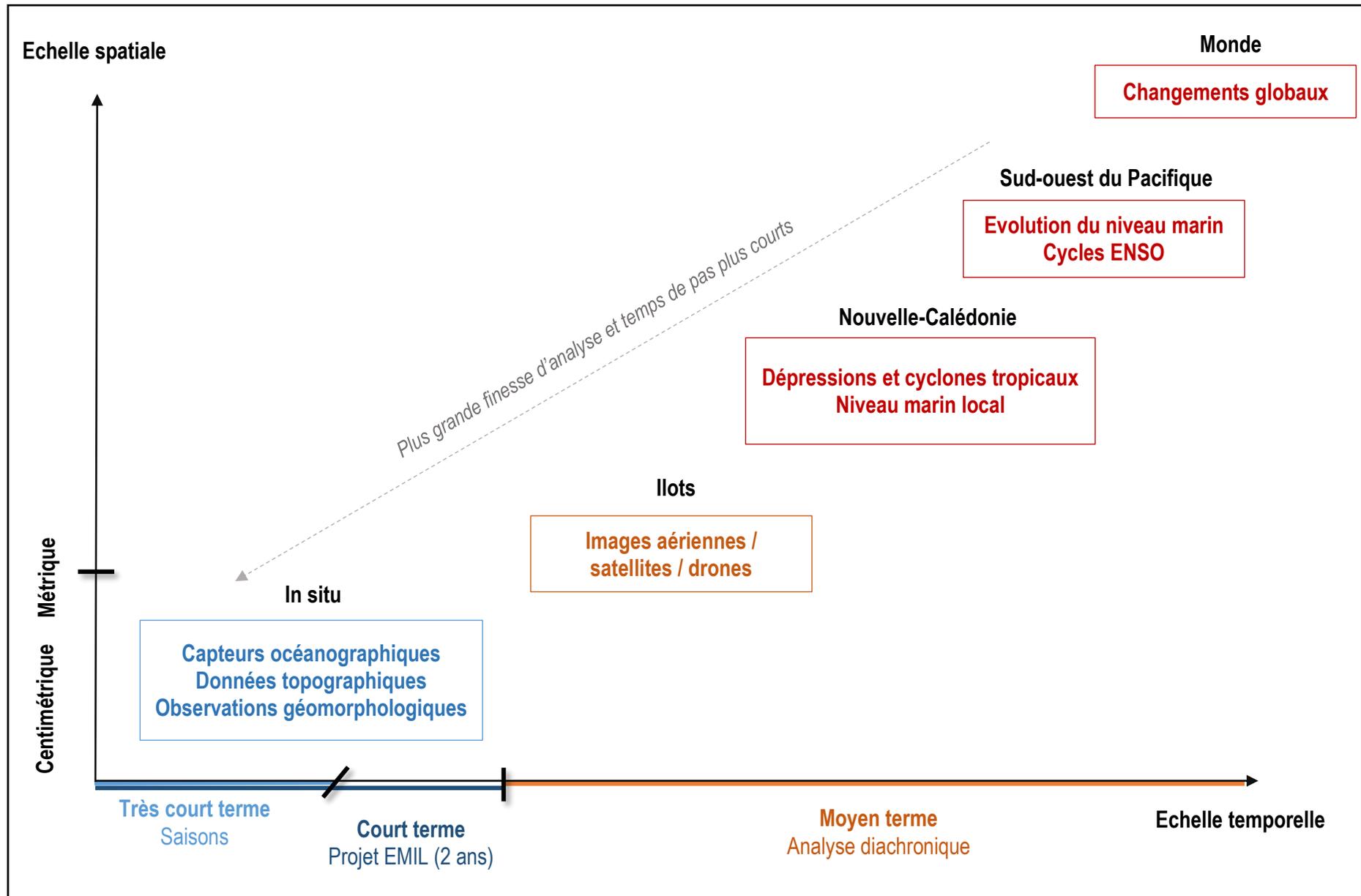


Figure 40 : Les données recueillies pour l'étude selon leur échelle spatiale d'utilisation en fonction de l'échelle temporelle

Section 2. Méthodes adoptées pour le traitement des données topographiques

1. La réalisation des profils de plage et leur comparaison

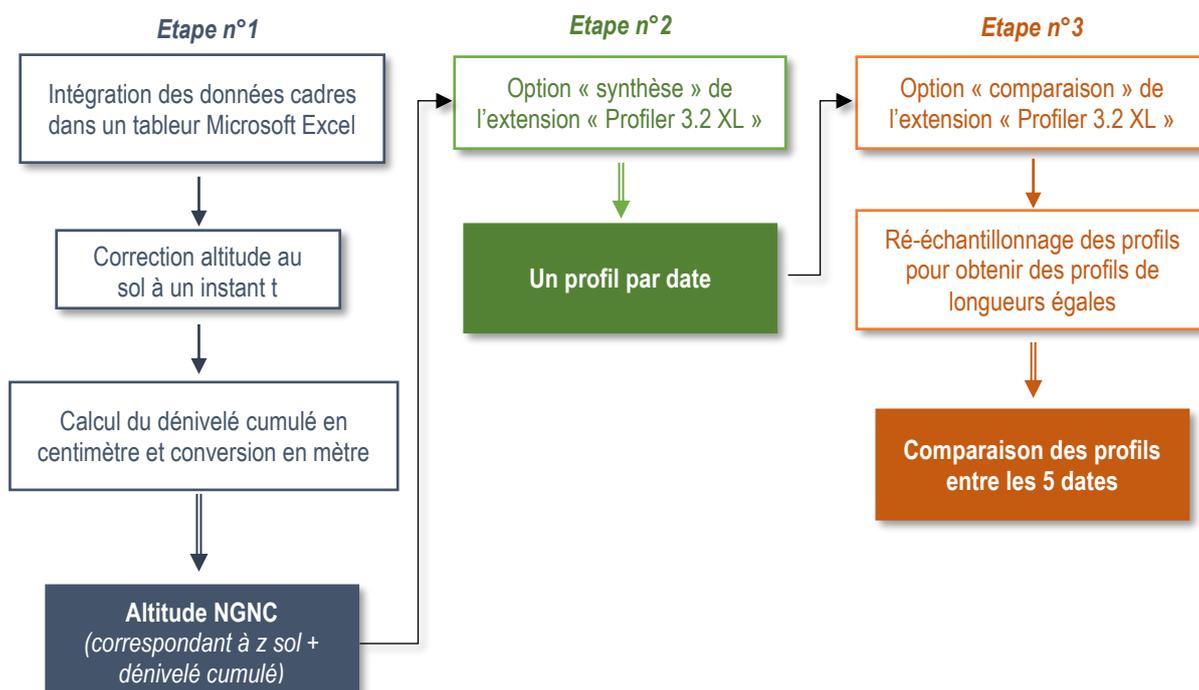


Figure 41 : les étapes du protocole de traitement appliqué pour la création des profils de plage et pour leur comparaison

Etape n°1 : réaliser un post-traitement des données

Une 1^{ère} étape de post-traitement des données est nécessaire pour la création des profils de plage. Après avoir intégré les données recueillies sur le terrain (prise de note à la main sur un tableau) dans un tableur Microsoft Excel, la correction de l'altitude au sol est réalisée pour Larégnère du fait de la prise de mesures au sommet des repères de référence. L'altitude du repère, notée $Z(\text{repère})$ en mètres dans le référentiel NGNC est précisément connue (mesurée par DGPS). Sur le terrain, les opérateurs mesurent à chaque mission la hauteur entre le sol et le sommet du repère (H). La soustraction de H à $Z(\text{repère})$ nous donne l'altitude du sol (notée $Z(\text{sol})$) à un moment t , qui peut varier s'il y a eu accumulation ou au contraire, arrachage de sable à la base du repère. Si on prend l'exemple du profil 1-a à la date du 02/11/2016, où $Z(\text{repère}) = 3,32$ m ; $H = 0,24$ m, on obtient $Z(\text{sol}) = 3,32 - 0,24$ soit $Z(\text{sol}) = 3,08$. Cette opération n'est pas à faire pour les données de Mbé Kouen, la tête de profil étant un clou dans une dalle de métal posée à même le sol (support d'un mât sur lequel on peut fixer un drapeau indiquant l'interdiction d'accès à l'îlot pendant la période de nidification des oiseaux marins) dont l'altitude est également connue et mesurée par DGPS.

On calcule le dénivelé cumulé le long du profil, d'abord en centimètre puis ces valeurs sont converties en mètre. Ensuite, elles sont ajoutées à la valeur $Z(\text{sol})$ corrigée pour Larégnère, connue pour Mbé Kouen sur l'ensemble du profil. On obtient alors l'altitude à chaque mètre (pas de mesure du cadre) en mètre NGNC.

Etape n°2 : concevoir les profils

La conception des profils a été réalisée à l'aide de l'extension Excel développée par Olivier Cohen³³ en 2014 **Profiler 3.2 XL**, une « suite en procédure Visual Basic pour la conception et l'analyse de profils topographiques sous Microsoft Excel® ». L'outil « synthèse » de l'extension permet une construction automatique des profils à partir des données de distance et d'altitude (Z). Profiler 3.2 XL propose aussi l'ajout du calcul du coefficient de détermination (r^2) permettant d'avoir une estimation de la qualité de l'alignement des points en plan et une visualisation de la marge d'erreur de mesure verticale sur les profils.

³³ Olivier COHEN : maître de conférences de géographie à l'Université de la Côte d'Opale, Dunkerque.

Étape n° 3 : comparer les profils

Profiler 3.2 XL offre la possibilité de comparer les profils à plus de deux dates successives. Nous allons donc comparer les 10 profils de l'étude à 5 dates différentes grâce à l'outil « Comparaison » de l'interface Profiler. C'est ce que l'on indique dans la première fenêtre de dialogue puis l'on saisit les données relatives à chaque profil (date, distance et altitude) dans une nouvelle feuille de calcul Excel. L'outil permet le calcul du différentiel entre les mesures à chaque date et localisées sur le même point du profil

Après le ré-échantillonnage des profils, c'est-à-dire la découpe des profils en sections d'égale longueur (ici, la valeur 1 mètre de distance pour le ré-échantillonnage est adoptée) on obtient une analyse statistique complète comprenant :

- Les moyennes, médianes, altitudes maximales et minimales (Z max et Z min), amplitudes, écart-type, coefficients de variation, taux d'évolution ;
- Les comparaisons de profils deux à deux avec les différences d'altitude et de volume ;
- Un graphique représentant les écarts-types et les coefficients de variations obtenus ;
- Un graphique représentant les moyennes, écarts-types, médianes, Z max et Z min et les taux d'évolutions ;
- Un graphique où est tracé l'ensemble des profils comparés.

L'ensemble des profils réalisés est consultable en annexe du rapport (Annexe n° 7 et 8)

2. La réalisation des Modèles Numériques de Terrain (MNT)

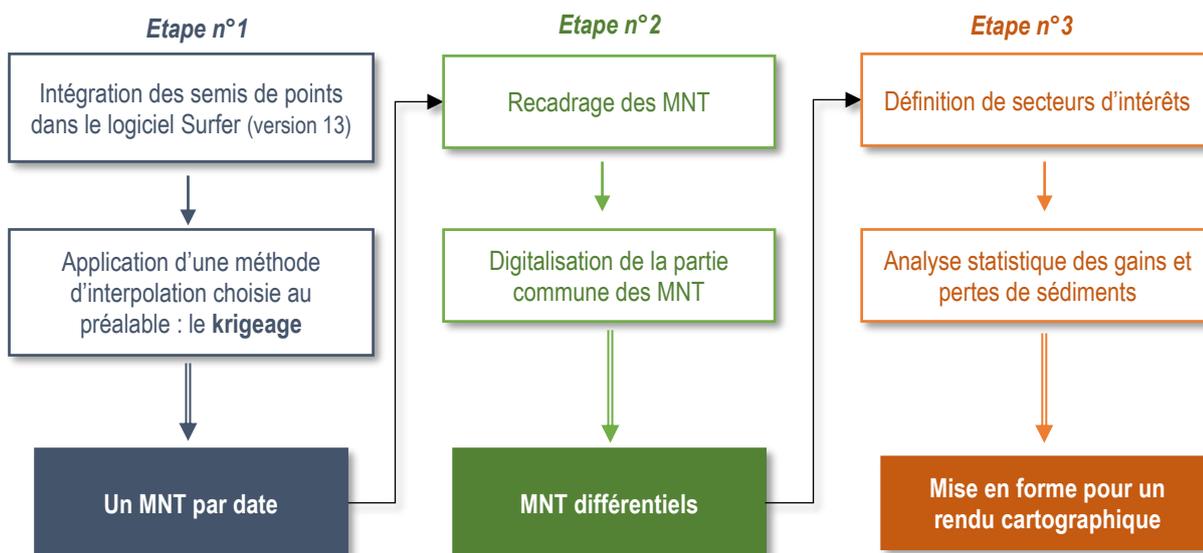


Figure 42 : les étapes du protocole de traitement appliqué pour la création des MNT

L'interpolation spatiale consiste à « estimer une fonction $F(x)$, où $x = (x,y)$, en un point $x(p)$ du plan à partir de valeurs connues de F en un certain nombre, m , de points environnementaux x_i :

$$F(x_p) = \sum_{i=1}^m W_i \cdot F(x_i) \quad \text{» }^{34}$$

Afin de choisir la pondération (W_i) de chacun des points environnants, plusieurs méthodes d'interpolation géostatistique sont possibles. Le logiciel Surfer propose différentes méthodes de calcul des grilles d'interpolation à partir des semis de points telles que l'interpolation linéaire en fonction de l'inverse à la distance, la méthode des splines cubiques (ajustement de polynômes cubiques), ou encore le **krigeage**, qui pondère les points à partir du degré de similarité entre les valeurs de F , c'est-à-dire à partir de la covariance entre les points en fonction de la distance entre ces points. Ainsi, ce dernier tient compte de la structure de

³⁴ GRATTON Y, 2002 : Le Krigeage : la méthode optimale d'interpolation spatiale, les articles de l'institut d'Analyse Géographique, Juin 2002, (source : www.iag.asso.fr)

dépendance spatiale des données par l'intermédiaire d'un variogramme³⁵. Il « prévoit la valeur de la variable régionalisée étudiée en un site non échantillonné par une combinaison linéaire de données ponctuelles adjacentes »³⁶.

Le krigeage (« Kriging ») est la méthode de modélisation statistique de données qui apparaît la plus optimale dans le cadre d'une interpolation de données spatiales (Gratton Y., 2002). C'est donc cette méthode d'interpolation que nous avons choisie d'appliquer pour la création de nos modèles.

Étape n° 1 : créer un MNT à partir du semi de points

Pour générer un MNT sous le logiciel surfer, on enregistre le tableur de données qui est, dans un premier temps, au format *Comma Separated Variables (*.csv)* contenant les coordonnées X,Y et Z du semi de points au format utilisé par le logiciel *BLN Golden Software Blanking (*.bln)*. Dans l'outil « Data » de l'onglet « Grid », une fenêtre permet de choisir la méthode (« *Gridding Method* ») et la résolution de la grille (taille d'un pixel ou « *spacing* ») pour notre interpolation. La taille de la maille sera de 5 mètres pour nos MNT.

Le logiciel effectue le calcul de la grille d'interpolation et génère un résumé du calcul réalisé, que l'on peut enregistrer. En ouvrant le nouveau fichier créé de type « *Surfer Grid* », on peut visualiser la grille obtenue (Figure 43 : Du semi de point (DGPS) à l'interpolation, exemple de la création d'un MNT (Larégnère, 18/03/2016)).

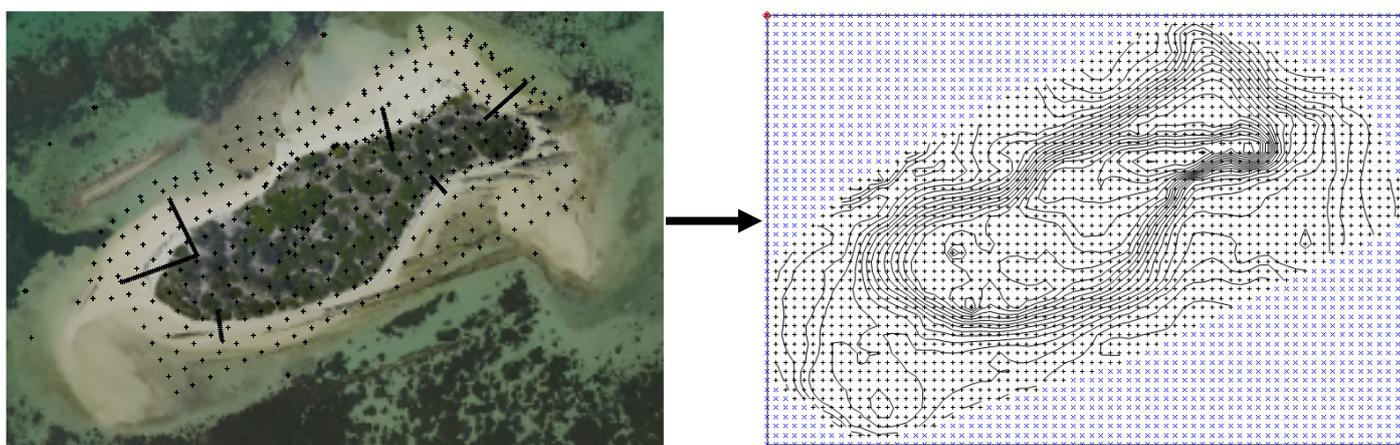


Figure 43 : Du semi de point (DGPS) à l'interpolation, exemple de la création d'un MNT (Larégnère, 18/03/2016)

L'onglet « Map » propose des outils permettant l'affichage de divers modes de représentation du MNT : « *Contour Map* » pour afficher les courbes de niveau, « *3D surface* » pour une représentation du modèle en 3 dimension, « *Post map* » pour afficher le semi de points initial ou encore « *Base map* » pour ajouter une image raster. Ainsi, nous pouvons mettre en forme les MNT obtenus pour chaque date.

Le calcul de profils de plage « interpolés » à partir des MNT par date où les profils réellement acquis au DGPS n'ont pas été incorporés au modèle a également été réalisés dans le but de les comparer aux profils « réels »

Étape n° 2 : comparer les MNT

Afin de comparer des MNT de différentes dates, nous allons réaliser des MNT différentiels. Pour ce faire, nous allons travailler sur la partie commune des MNT générés. Il est impératif que les MNT comparés aient la même résolution spatiale, c'est-à-dire, des pixels de même taille (ici 5 mètres).

L'outil « Math » dans l'onglet « Grid » nous permet, une fois les deux MNT redimensionnés selon leur partie commune, d'obtenir le différentiel. On soustrait alors le MNT le plus ancien au MNT le plus récent.

³⁵ Variogramme (notion en probabilités mathématiques) : fonction synthétisant des informations sur le comportement conjoint de variables aléatoires et permettant de décrire la continuité mathématique.

³⁶ BAILLARGEON S., 2005 : *Le Krigeage : revue de la théorie et application à l'interpolation spatiale de données de précipitations*, Mémoire de fin d'études, Faculté des Sciences et de Génie, Université de Laval, Québec.

On obtient alors, pour Larégnère :

- par soustraction du MNT recadré de mars 2016 à celui d'octobre 2016, le MNT différentiel entre mars et octobre 2016 (6 mois correspondants à l'hiver austral) ;
- par soustraction du MNT recadré d'octobre 2016 à celui d'avril 2017, le MNT différentiel entre octobre 2016 et avril 2017 (6 mois correspondants à l'été austral) ;
- par soustraction du MNT de mars 2016 à celui d'avril 2017, le MNT différentiel entre mars 2016 et avril 2017 (1 an).

Pour Mbé Kouen :

- par soustraction du MNT recadré de mars 2016 à celui de novembre 2016, le MNT différentiel entre mars et novembre 2016 (7 mois correspondants à l'hiver austral) ;
- par soustraction du MNT recadré de novembre 2016 à celui d'avril 2017, le MNT différentiel entre novembre 2016 et avril 2017 (5 mois correspondants à la saison « été austral ») ;
- par soustraction du MNT recadré d'avril 2016 à celui d'avril 2017, le MNT différentiel entre avril 2016 et avril de l'année suivante (1an).

Étape n°3 : définir des secteurs et calculer des volumes de gains/pertes de sédiments

A partir des MNT différentiels, on remarque que certaines parties des îlots vont apparaître plus mobiles que d'autres. On peut ainsi définir des secteurs pour faire une analyse plus fine des mouvements sédimentaires (pertes/gains) entre deux dates.

Il est possible de calculer des volumes avec *Surfer*, à partir des MNT par date. Ainsi, par le biais de la fonction « *Volume* » du logiciel dans l'onglet « *Grid* », on peut créer une surface de base (« *Lower surface* ») correspondant à une surface plane d'altitude $Z=0$. Cette surface représente donc une grille plane (d'altitude 0 mètre) qui s'étend sur l'ensemble de la surface du MNT. C'est à partir de cette grille virtuelle $Z=0$ que le logiciel calcule des volumes de sédiments qui se trouve au-dessus de 0 mètre, correspondant aux parties où le MNT est d'altitude $Z > 0$, et un volume dit négatif, correspondant au volume de l'ensemble des parties du MNT dont l'altitude $Z < 0$. Le tout donne le volume total du MNT à une date t .

Trois méthodes différentes sont utilisées par *Surfer* pour ce calcul :

- *Trapezoidal rule*
- *Simpson's rule*
- *Simpson's 3/8 rule*

On retiendra la première méthode des trapèzes (*trapezoidal rule*) car elle correspond à celle exploitée par le logiciel pour donner les volumes positifs et négatifs. Cet algorithme utilisé pour l'interpolation des volumes fait appel au polynôme de Lagrange de degré 1, alors que la loi polynomiale de degré 2 est employée par la règle de Simpson.

Les volumes calculés ont pour unité de mesure le m^3 , toutes nos valeurs d'altitude (Z) étant des mètres

Les MNT et les différentiels sont consultables dans les annexes du rapport (Annexes n°9, 10, 11 et 12)

3. La réalisation des Modèles Numériques de Surface (MNS)

A la différence d'un MNT, le MNS prend en compte les éléments du sol et ceux du « sursol », autrement dit, il représente le sommet de la végétation et du bâti (*Leclerc, 2015*), et dans, le cas de notre étude, l'eau de mer comme illustré sur la Figure 44 ci-dessous.

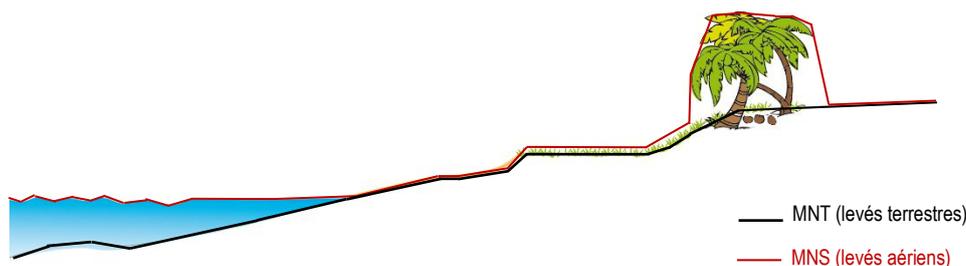


Figure 44 : schéma qui souligne la différence entre les éléments sols et bathymétries représentés sur un MNT réalisé à partir de levés terrestres (en noir) et les éléments du sursol représentés par un MNS (en rouge). Réalisation : Marianne BRICQUIR

a. Le protocole de traitement

Le logiciel Agisoft Photoscan, utilisé en photogrammétrie informatique, est basé sur la technologie moderne de reconstruction mutli-vues (*Manuel de l'utilisateur version 1.1, Agisoft Photoscan ; Harwin et Lucieer, 2012 ; Bhandari et al. 2015*). Il permet, à partir d'images acquises par un appareil photographique au sol ou embarqué sur une plateforme aéroportée (les drones, par exemple), de réaliser des représentations 3D surfaciques (Modèles Numériques de Surface ou MNS) très précises et de haute résolution. La modélisation est entièrement automatisée. Les différentes étapes du protocole à suivre par la création des MNT sont détaillées dans le schéma ci-dessous (Figure 45) :

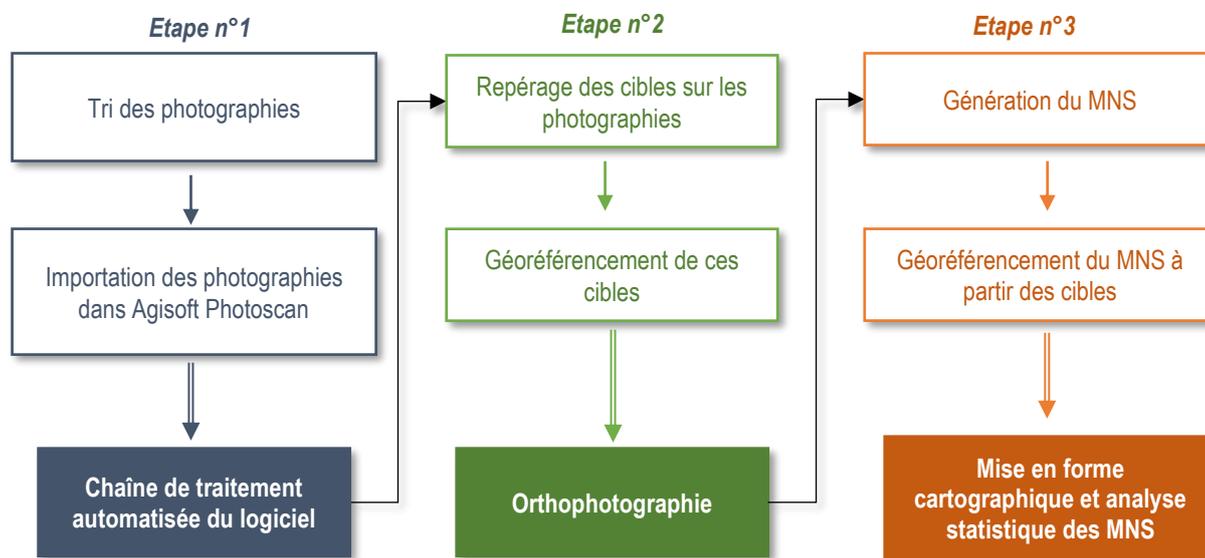


Figure 45 : les étapes du protocole de traitement appliqué pour la création des MNS

Les traitements photogrammétriques par le biais du logiciel Agisoft Photoscan sont utilisés dans divers domaines : archéologie (ex. *Verhoeven, 2011 ; Lo Brutto et Meli, 2012 ; Samann, 2016*), architecture (ex. *Achille et al., 2015*) ou encore cartographie des sols et/ou suivi de la végétation en agriculture (ex. *Gilliot, 2014 ; Prosdocimi et al., 2015*). L'utilisation du logiciel Agisoft Photoscan dans le traitement photogrammétrique à partir d'image drone pour le suivi de la frange côtière a été mis en œuvre dans quelques études, notamment sur la côte atlantique de France métropolitaine (*Long et al., 2016*) ; sur le littoral portugais par *Gonçalves et Henriques en 2015* ; enfin, en Nouvelle-Calédonie, sur l'atoll d'Ouvéa (*Cohen et al., 2015*).

Étape n°1 :

La première étape consiste à trier les photographies en supprimant celles qui se répètent ou qui possèdent les caractéristiques suivantes (figure ?), pouvant nuire à la bonne marche du traitement et au rendu final :

- reflets du soleil
- sans intérêt pour l'étude (trop de surface « mer » par exemple)
- pied du drone



Figure ? : à gauche, un exemple de photographie avec des reflets du soleil et trop de surface « mer » ; à droite, un exemple de photographie où l'on aperçoit le pied du drone.



Le Tableau 12 ci-dessous montre le nombre d'images rejetées lors du tri des photographies drones acquises pour chaque îlot et chaque mission.

Tableau 12 : Nombre d'images drones rejetées lors du tri des photographies

Site	Date	Type d'images	Nombre d'images acquises	Nombre d'images traitées	Nombre d'images rejetées
Larégnère	02/11/2016	verticales	377	354	23
Larégnère	02/11/2016	verticales et obliques	592	562	30
Mbé Kouen	02/11/2016	verticales	321	265	56
Mbé Kouen	02/11/2016	verticales et obliques	547	477	70
Mbé Kouen	05/07/2017	verticales	205	201	4
Mbé Kouen	05/07/2017	verticales et obliques	887	881	6

On importe ensuite les photographies dans Agisoft Photoscan. Si les images possèdent déjà des coordonnées géographiques (cas pour les prises de vue réalisées avec le drone « Phantom 4 »), il peut y avoir une confrontation dans les SCR qui entraîne des confusions et des erreurs de calages de pixels importantes. Le SCR de l'image est un EPSG 4326 WGS 84 (celui de l'appareil embarqué sur le Phantom 4) qui est en latitude longitude alors que les coordonnées du DGPS sont en EPSG 3163 Lambert NC, un système métrique. Il est donc nécessaire de "nettoyer" les images de leurs SCR avant de lancer les traitements (*sélection des photographie -> clique droit -> outil « nettoyer » : procédure permettant de supprimer le SCR EPSG 4326 WGS 84 des images drones*).

La chaîne de traitement (Figure 46) peut être appliquée étapes par étapes (manuellement) ou automatisée (traitement par lots). Nous avons opté pour une qualité « moyenne », qui permet notamment d'obtenir une RMS lors du géoréférencement des images plus faible qu'en qualité « faible » et les temps de traitements étant considérablement longs en « haute » qualité. La chaîne de traitement comporte alors 3 principales étapes :

- **l'alignement des photographies**, correspondant au traitement initial. Le logiciel cherche des points communs entre les photographies (des pixels communs) afin de les faire correspondre selon l'algorithme de SIFT³⁷. En sortie, nous avons un nuage de points clairsemé, représentant l'alignement des photographies.
- la **création d'un nuage de points dense**, permettant de densifier le nuage de points précédemment obtenu. Le programme crée un nuage de points dense à partir d'approximation de la position des photographies.
- la **création d'un maillage 3D**, qui correspond à la reconstruction d'un maillage polygonal 3D représentant la surface de l'objet basée sur le nuage de points dense. On peut ensuite éventuellement appliquer une texture au modèle 3D, notamment s'il l'on souhaite un meilleur rendu graphique pour des orthophotographies.

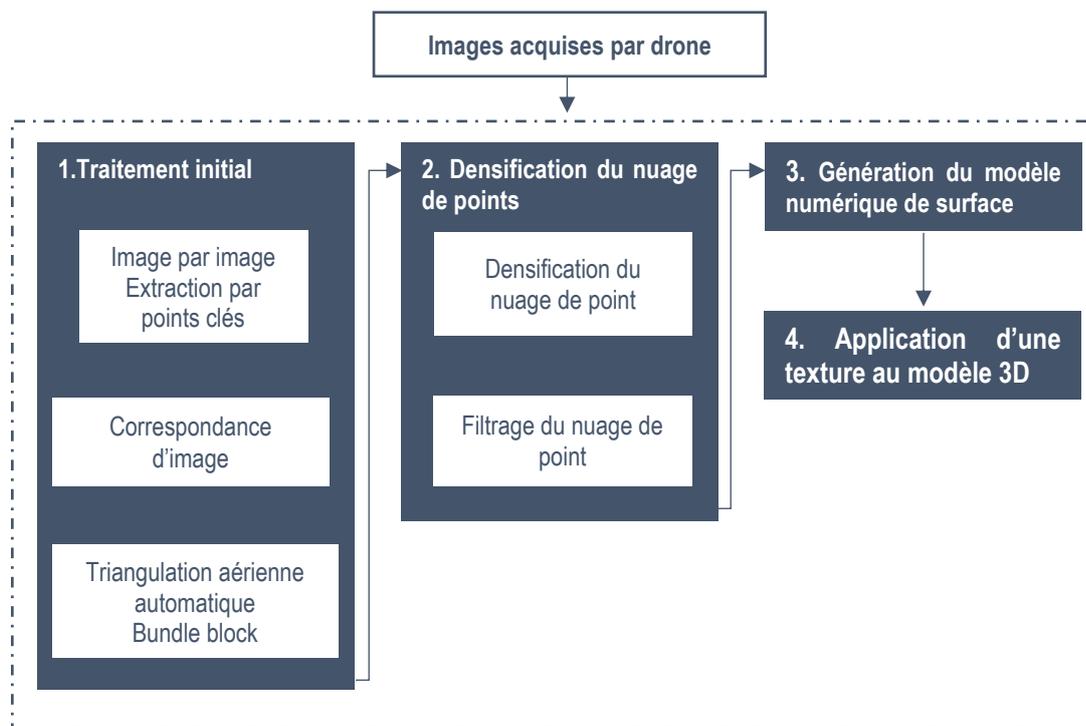


Figure 46 : Chaîne de traitement générale utilisée en vision par ordinateur (d'après Bhandari et al. 2015 « *Generation of High Resolution DSM Using UAV Images* »)

Dans notre étude, nous allons effectuer un traitement par lot pour un gain de temps.

Étape n°2 : géoréférencer les images du modèle pour créer des orthophotographies.

Nous allons créer des orthophotographies pour les intégrer à l'analyse diachronique de la mobilité des îlots à moyen terme, en utilisant les photographies verticales acquises par drone. Après avoir effectué l'étape précédente, une seconde consiste à géoréférencer les images en Lambert RGNC91-93.

Les repères (ou « markers ») sont les points qui permettent de lier les images, de les orienter et de les mettre à l'échelle. Dans notre cas, nous allons affecter manuellement des coordonnées RGNC aux cibles présentes sur les photographies afin de géoréférencer l'orthophotographie que l'on souhaite créer. Ces coordonnées ont été levées sur le terrain à l'aide d'un DGPS. On lance ensuite le traitement « construire une orthomosaique ». Le résultat obtenu à partir de cet assemblage d'images et orthorectifié peut être exporté aux formats suivants : TIFF (Tagged Image File Format), JPEG (Joint Photographic Expert Group) et PNG (Portable Network Graphic). Nous choisissons le format TIFF car il permet d'obtenir une image de bonne qualité et non compressée, que l'on peut ouvrir par la suite dans un logiciel SIG.

³⁷ Algorithme de SIFT : Scale-Invariant Feature Transform ou transformation de caractéristiques visuelles invariante à l'échelle permet de détecter et d'identifier des éléments similaires entre différentes images numériques. Il se déroule en deux étapes, la première consistant à chercher des points d'intérêts (ou points-clés) définis par leurs coordonnées sur l'images (x,y) d'une part et par leur facteur d'échelle σ d'autre part. Une seconde étape de filtrage permet d'améliorer la précision de la localisation des points-clés et d'en éliminer une partie. Ces points sont ensuite associés à une orientation intrinsèque au facteur d'échelle considéré (ne dépendant que du contenu local de l'image autour du point-clé).

Étape n°3 : géoréférencer et créer le MNS

Le géoréférencement est également une étape à réaliser pour les modèles numériques composées des photographies verticales et obliques. Les photographies de références pour le placement des cibles restent les photographies verticales. Une fois cette étape réalisée, on lance le traitement « création du modèle ». Le modèle peut être ensuite être exporté en « geotiff » et intégré à un logiciel SIG ou à Surfer pour la création de cartographies et de différentiels.

Les MNS et les différentiels sont consultables dans les annexes du rapport (Annexes n°13, 14 et 15).

b. Des comparaisons

Pour déterminer le traitement photogrammétrique le plus optimal, nous avons effectué des comparaisons de méthodes. Dans un premier temps, il a fallu déterminer la meilleure « qualité » de traitement, le logiciel en proposant plusieurs (qualité « basse », « moyenne » et « haute »), différents sur la précision de l'alignement des photographies, du nuage de points dense et du maillage 3D. Pour cette première comparaison, nous avons pris l'exemple des photographies verticales prises sur Larégnère le 02/11/2016 (Tableau 12). On observe une différence très importante du nombre de points du nuage dense, beaucoup plus élevé pour le traitement de précision moyenne (22 492 641 points) que de précision basse (5 247 954 points). De même, lors de l'étape de géo-référencement de l'image, la qualité moyenne permet d'obtenir une RMS très nettement inférieure que pour le traitement de qualité basse (0,11 m contre 1,73 m), différence qui n'est pas négligeable. Le traitement de précision « haute » a également été testé, mais il est très chronophage et demande un ordinateur puissant, avec une importante mémoire. Ainsi, nous avons opté pour la précision « moyenne » pour l'ensemble des traitements photogrammétriques.

Tableau 13 : Caractéristiques du traitement photogrammétrique appliqué à chaque jeu d'images drones (par îlot et par date)

Site	Date	Type d'images	Précision du traitement	Nombre d'images	Nombre de points du nuage dense	Nombre de repères	XY erreur (m)	Z erreur (m)	RMS totale (en m)	Rendu
Larégnère	02/11/2016	verticales	basse	354	5 247 954	44	0,12	1,71	1,73	Orthophotographie
Larégnère	02/11/2016	verticales	moyenne	354	22 492 641	42	0,1	0,01	0,11	Orthophotographie
Larégnère	02/11/2016	verticales et obliques	moyenne	562	23 415 381	44	0,11	0,049	0,12	MNS
Mbé Kouen	02/11/2016	verticales	moyenne	265	5 563 891	35	0,07	0,08	0,11	Orthophotographie
Mbé Kouen	02/11/2016	verticales et obliques	moyenne	477	8 137 508	32	0,08	0,04	0,09	MNS
Mbé Kouen	05/07/2017	verticales	moyenne	201	8 372 270	49	0,16	0,03	0,16	Orthophotographie
Mbé Kouen	05/07/2017	verticales et obliques	moyenne	881	7 511 335	49	0,056	0,054	0,07	MNS

Nous avons également procédé à une comparaison entre un MNS réalisé à partir des seules photographies verticales et un MNS créé à partir de la combinaison des photographies verticales et obliques afin de savoir si une seule prise de vue verticale pouvait donner des résultats quant à la topographie de l'îlot aussi précis que la combinaison d'une prise de vue d'images verticales à celle d'images obliques.

Nous avons repris l'exemple de Larégnère et avons calculé sur Qgis différentiel (version 2.14) un MNS par le biais de l'outil « calculatrice raster » (Figure 47). On remarque que les différences des valeurs d'altitude (Z) sur le système plage sont comprises entre 0 et 0,25 m (de blanc à beige). Les valeurs considérées comme extrêmes (de plus de 0,50 m de différence) se retrouvent sur les endroits recouverts d'eau et au niveau de la végétation. Les éléments du sursol c'est-à-dire les parties en eau et la végétation seront donc tronquées des MNS finaux réalisés et nous obtiendrons alors des MNT « photogrammétriques ».

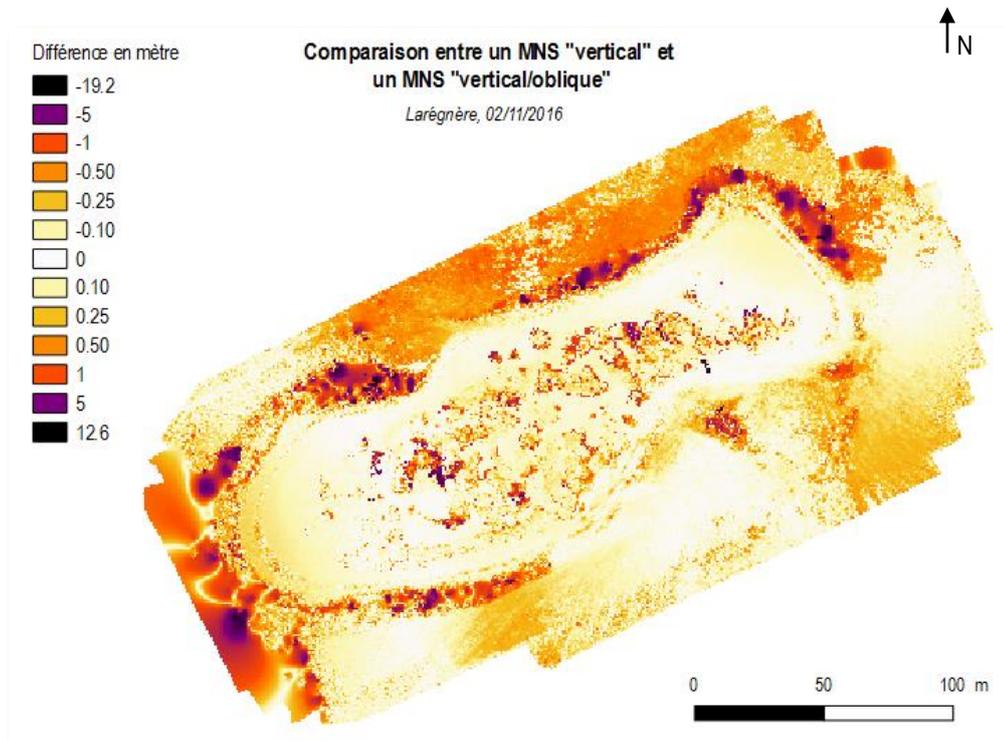


Figure 47 MNS différentiel vertical et vertical/oblique.

Les valeurs extrêmes sont représentées dans les tons jaune/orangé/violet pour qu'elles soient bien mises en avant. Les différences les plus faibles (< 0,25 m) sont représentées par un dégradé du blanc au beige pour qu'elles apparaissent aussi clairement. (Réalisation : Marianne Bricquir, le 10/08/2017).

Ainsi, les différences entre MNS « vertical » et MNS « vertical/oblique » sont d'ordre centimétrique sur notre zone d'intérêt, la plage car comprises principalement entre 0 et +/-0,25 m. L'intégration des photographies obliques pourraient permettre une interpolation de l'altitude d'un pixel se rapprochant de l'altitude réelle, contrairement à la seule utilisation d'images verticales.

On peut toutefois souligner que les différences centimétriques observées sont relativement significatives pour l'interprétation de nos résultats. Nous avons donc choisi de générer des MNS « verticaux /obliques » que nous considérons comme plus précis à partir des images drones acquises sur l'îlot Mbé Kouen (02/11/2016 et 05/06/2017). Au regard de ces différences, il apparaît nécessaire lors des prochaines missions d'effectuer un vol vertical et un vol oblique.

Chapitre 3. Interprétation des résultats : évolution de la morphologie des îlots à moyen et court termes

Ce chapitre va nous permettre de présenter l'ensemble des résultats obtenus. Une première partie est consacrée à l'analyse diachronique de l'évolution du trait de côte, que nous avons choisi dans notre étude de définir comme la limite permanente de végétation, sur un période d'environ une décennie. Une seconde partie présente l'analyse mais aussi l'interprétation des résultats issus des données topographiques acquises et traitées selon les différentes méthodes que nous venons de détailler. Enfin, ce chapitre nous donnera l'occasion de discuter ces résultats : d'une part, d'émettre des limites aux méthodes utilisées et d'autre part, proposer certaines perspectives pour la continuité du suivi des îlots du lagon calédonien.

Section 1. L'évolution récente des îlots

1. Larégnère

L'îlot Larégnère possède une superficie actuelle de 10 428 m² (02/11/2016)³⁸, calculée à partir de la digitalisation de la limite de végétation permanente utilisée comme trait de côte (Figure 48). En 2004 (10 842m²), sa surface atteignait 10 842 m². Il a, par conséquent, perdu 414 m² (34,5 m²/an) de sa superficie en 12 ans, soit une décroissance de **4 %** de sa superficie (Tableau 14). Cependant, son évolution récente (2004-2016 soit 12 ans) se caractérise par une alternance de phases érosives et de phases d'accumulation. En effet, en 2007, l'îlot a gagné **+ 3 %** de sa surface par rapport à 2004. Entre 2007 et 2012, il connaît une diminution de **7%**. Puis en 2015 et 2016 une légère augmentation de la surface est observée (**+ 2% chaque année**) mais qui ne compense pas la superficie perdue lors de la période précédente. Sur la période la plus récente (*mai 2016-novembre 2016*), la tendance semble être à l'érosion (**- 1%**).

Tableau 14 : Evolution de la surface de l'îlot Larégnère entre 2004 et 2016

Date	Surface (m ²)	Evolution depuis 2004	Evolution entre les périodes
08/09/2004	10842		
15/02/2007	11219	3%	3%
2011	10614	-2%	-5%
08/08/2012	10102	-7%	-5%
15/11/2015	10282	-5%	2%
30/05/2016	10518	-3%	2%
02/11/2016	10428	-4%	-1%

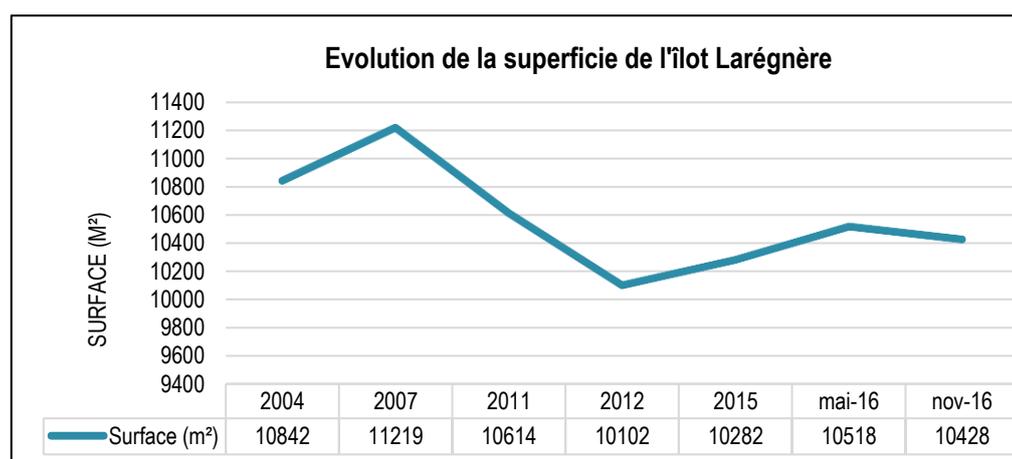


Figure 48 : Evolution de la surface de l'îlot Larégnère exprimée en m²

³⁸ Une description actuelle de l'îlot Larégnère est faite dans le premier chapitre du rapport de stage (Chapitre 1 – Section 2 p 29)

Plusieurs générations de beachrocks sont observables et les bancs sont parfois situés à plusieurs dizaines de mètres du rivage de l'îlot (Figure 49). Plusieurs successions importantes de bancs de beachrocks sont localisés au sud de l'îlot. Ils sont les marqueurs d'un îlot plus étendu par le passé, qui connaît aujourd'hui une phase de régression. Larégnère présente ainsi un caractère résiduel par rapport à sa morphologie passée.



Figure 49 : Les beachrocks de l'îlot Larégnère (Réalisation : Marianne BRICQUIR, 2017 source : province Sud)

L'analyse des paléorivages de Larégnères nous montre que par exemple, au sud, les différentes dalles successives de beachrocks indiquent la fossilisation de plusieurs générations de plages et le recul progressif de la plage sur cette zone sud.



Figure 50 : Photographie (d'orientation SE-NO) de plusieurs générations de beachrocks obliques par rapport à la plage actuelle et distants d'environ 40 mètres par rapport au rivage actuel (plage sud de l'îlot Larégnère, source : OBLIC)



Figure 51 : Photographie (d'orientation SE-NO) de plusieurs générations de beachrocks obliques par rapport à la plage actuelle (extrémité est de la plage sud de l'îlot Larégnère, source : OBLIC)

Cependant, la limite de l'utilisation des beachrocks comme marqueur de l'érosion réside dans le fait qu'ils ne sont pas datés, ce qui ne nous permet pas de calculer des vitesses de recul.

Pour mieux identifier et tenter de localiser les secteurs qui suivent la dynamique générale ou au contraire, qui ont connu lors de ces douze dernières années une évolution radicalement différente, nous allons nous pencher sur des secteurs particuliers de l'îlot qui ont été définis précédemment³⁹ (Figure 64).

Il faut tout de même souligner que les périodes étudiées sont hétérogènes. Ainsi, pour les périodes qui s'étalent sur plusieurs années, les données sont lissées. Pour la dernière période qui s'étale sur 6 mois seulement entre mai 2016 et novembre 2016, une dynamique saisonnière peut apparaître. Dans notre analyse, nous allons donc considérer la période allant de 2015 à novembre 2016 afin d'avoir une période suffisamment grande pour que nos interprétations soient cohérentes au regard des autres périodes.

Sur l'ensemble de la période étudiée (2004-2016), le **secteur de la « pointe nord-est » (S1)** connaît une avancée de la LVP relativement importante ($+3,40$ mètres sur les 12 ans, soit $0,28$ m/an). A l'extrémité nord de la pointe, correspondant au transect 43 (voir Figure 52 pour la localisation des transects), on note une progression de $+0,23$ m/an, au niveau du transect 1, de $+0,39$ m/an et du transect 2, de $+0,23$ m/an.

Si l'on s'attarde sur les différentes phases qui composent ces douze années, on constate une première phase d'accrétion au cours des années 2004 à 2007. La limite de végétation avance alors, mis à part un léger recul au niveau du transect 2 ($0,57$ m sur les 3 ans, soit $0,14$ m/an). L'extrémité nord (transect 43) a connu une phase de régression entre 2007 et 2011. Cette tendance à l'érosion est davantage marquée entre 2011 et 2012, où l'ensemble du secteur se trouve en recul, notamment au niveau de l'extrémité nord de la pointe, avec une régression de 2 m sur un an. Puis, entre 2012 et 2015, le secteur connaît un nouvel épisode d'avancée. Depuis 2016, cette zone semble connaître une nouvelle phase de recul.

³⁹ La méthode de caractérisation de secteurs aux évolutions homogènes est décrite dans le Chapitre 2, p42



Figure 52 : localisation des transects qui ont permis de définir les secteurs d'évolution homogène, regard porté sur la « pointe est », S1

Les observations de terrain, réalisées au cours du projet (2016-2017), témoignent de la stabilité voire de l'accrétion de cette zone sur les 12 ans, comme on peut le voir sur les photographie ci-dessous (Figure 53).

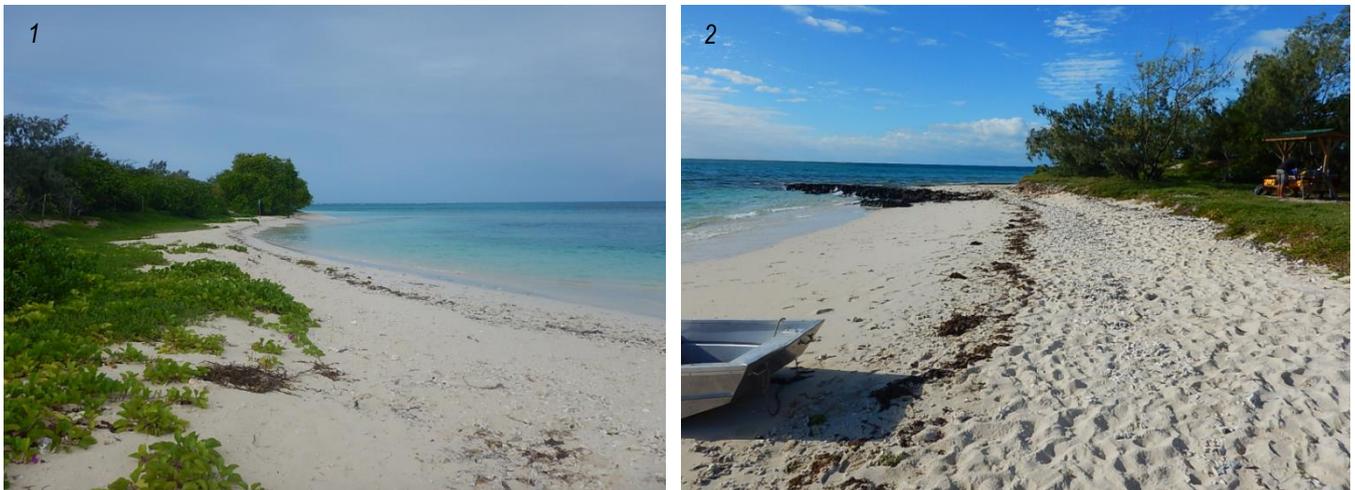


Figure 53 : 1) photographie du S1 de 2016 (d'orientation NO-SE) témoignant d'une zone en accrétion mais avec de légères traces d'érosion 2) photographie du S1 de 2017 (d'orientation NE-SO), source : OBLIC.

L'extrémité sud de la pointe nord-est (S2) a globalement reculée entre 2004 et 2016 ($-1,84 m$ sur les douze années, soit $-0,15 m/an$). Cependant, sa situation en érosion est à nuancer car la valeur de son recul est inférieure à la marge d'erreur. Au départ stable, elle connaît une phase de régression à partir de 2007 et jusqu'en 2015 ($- 1,62 m$) où l'érosion est toujours active, comme en témoigne la photographie prise au cours de missions OBLIC antérieures à notre projet (Figure 54). Après 2015, la tendance semble s'être inversée ($+ environ 0,70 m$ entre 2015 et novembre 2016).



Figure 54 : Talus d'érosion situé à la pointe sud-est (S2) témoin de la phase de recul de 2007 à 2015 (photographie 2015, OBLIC)

Entre 2004 et 2016, le **secteur « sud-est » (S3)** peut être qualifié de stable. Cette relative stabilité est à nuancer en fonction des périodes. Ainsi, avant 2007, le sud-est de l'îlot connaît une phase d'avancée, suivit d'une phase de recul entre 2007 et 2015 ($-1,62\text{ m}$ sur les 5 ans, soit $-0,32\text{ m/an}$), hormis le transect 9 (Cf. Figure 52, page précédente) dont la limite permanente de végétation avance de $+0,33\text{ m/an}$ entre 2012 et 2015). Puis la LVP regagne du terrain entre 2015 et 2016 ($+0,62\text{ m}$).

La phase d'érosion de 2007 à 2015 est toujours visible à travers les indices comme un talus d'érosion d'une hauteur de 1,20 m, observés encore aujourd'hui, sur la photographie ci-dessous (Figure 55). Une phase de recolonisation du secteur par la végétation rampante (pourpier) est relevée depuis 2016 mais qui s'est faite de manière éparse. En effet, on remarque encore de l'érosion active sur de courts linéaires (quelques mètres, visibles sur la Figure 56).



Figure 55 : Photographie (2016) du secteur 3 (sud-est) sur laquelle on peut observer une recolonisation par une végétation rampante (pourpier), source : Myriam Vendé-Leclerc



Figure 56 : Photographie (2017) du secteur 3 (sud-est) sur laquelle on peut observer le talus d'érosion de 1,20 mètre. Source : Myriam Vendé-Leclerc

Le **secteur sud (S4)** possède une tendance de régression ($-0,25\text{ m/an}$ entre 2004 et 2016). La période 2004-2007 se caractérise par une relative stabilité (Figure 57). Jusqu'en 2012, on observe une importante phase de recul de la LVP ($-0,7\text{ m/an}$ entre 2007 et 2011). Entre 2011 et 2012, l'îlot connaît son plus important épisode érosif : $-1,85\text{ m}$ sur une année. Lui succède alors une période de stabilité relative. Depuis 2015, le secteur sud de Larégnère voit sa LVP avancer : $+1,3\text{ m}$ jusqu'à novembre 2016.



Figure 57 : Photographie de 2014 qui témoigne de phase de stabilité du S4 (sud) entre 2007 et 2014. Source : OBLIC

Le secteur « milieu sud » (S5) se caractérise par le plus important recul de LVP entre la période 2004-2016 de l'îlot (-0,28m/an). Il connaît une alternance de période d'avancée (2004-2007 : + 0,6 m/an) et de recul. Sur la période 2007-2012, ce dernier est important : - 2,79 m, recul qui n'a pas ensuite été compensé par la légère avancée entre 2012 et 2015 (+ 1m), visible sur la photographie ci-dessous (Figure 58).



Figure 58 : Photographie récente (2016) du S5 qui illustre la légère phase d'accrétion entre 2012 et 2015. Source : OBLIC

Le secteur « sud-ouest » (S6) apparaît stable sur l'ensemble de la période 2004-2016. Toutefois, il connaît la même dynamique que le secteur précédent, à l'exception des épisodes d'érosion entre 2011 et 2012 (- 2,35 m) et d'accrétion entre 2012 et mai 2016 (+ 1,71 m) qui sont davantage prononcés (Figure 59).



Figure 59 : Photographie du S6 de 2015 qui illustre la phase d'accrétion entre 2012 et 2016. Source : OBLIC

La « **pointe ouest** » (**S7**) de l'îlot est également une zone caractérisée par une dynamique de recul ($-0,25\text{ m/an}$). Stable jusqu'en 2007, la LVP recule en moyenne de $-1,13\text{ m}$ entre 2007 et mai 2016. Elle apparaît stable sur la période la plus récente mais aussi la plus brève (mai 2016 - novembre 2016). Les observations de terrain nous renseignent davantage sur la dynamique réelle du S7 : le recul de la LVP (végétation rampante) observé entre 2007 et 2016 a pu être causé par une fréquentation humaine importante (zone de passage, présence d'un faré que l'arrière plage...) à l'origine d'un piétinement de cette végétation, expliquant le recul observé. Depuis 2016, une barrière a été installée et on observe une atténuation du recul de la LVP (Figure 60). La zone d'avant-plage semble avoir été stable sur toute la période (2004-2016).



Figure 60 : Photographie de 2016 qui témoigne de la stabilité du S7. A droite, on remarque la barrière de protection et une végétation rampante avancée. Source : DENV

Le **secteur « nord-ouest » (S8)** manifeste une stabilité relative sur ces douze années d'analyse. La LVP avance petit à petit de quelques centimètres ($+0,44\text{ m}$ entre 2004 et 2016, Figure 61). Contrairement au reste de l'îlot, la période 2011-2012 n'est pas caractérisée par une régression.



Figure 61 : Photographie de 2016 qui témoigne de la situation en engraissement du S8 sur la période 2004-2016. Source : DENV

Le **secteur « nord » (S9)** fait également parti des secteurs où sont observés les reculs les plus importants. Sur l'ensemble de la période, il connaît majoritairement des épisodes érosifs ($-0,25\text{ m/an}$) : entre 2004 et 2007 puis, après une légère avancée, une phase d'érosion importante entre 2011 et 2012 survient ($-1,86\text{ m/an}$). Cette tendance perdure jusqu'en mai 2016. Très récemment, la LVP a avancé ($+0,3\text{ m}$ sur 6 mois), mais cette situation peut être saisonnière. L'érosion active en 2014 et 2015 est visible sur les photographies prises au cours des missions OBLIC (Figure 62, 1 et 2). On y constate un talus d'érosion et un recul de la LVP. En 2016 (Figure 62, 3), on remarque une cicatrisation du talus avec une colonisation par la végétation pionnière.



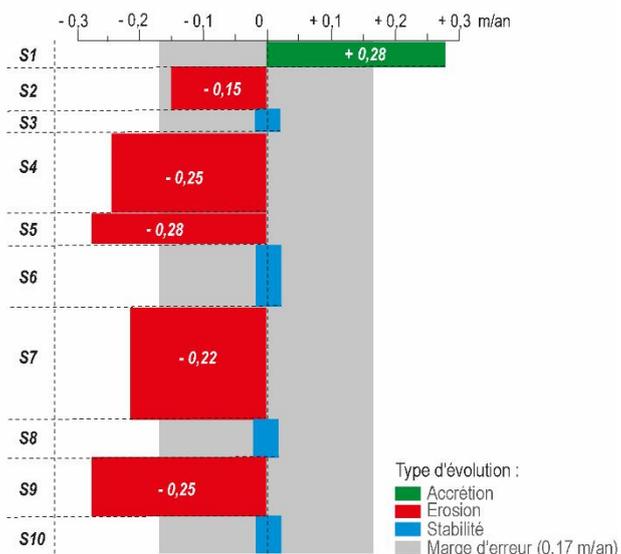
Figure 62 : 1et 2) photographies du S9 de 2014 (1) et 2015 (2) témoignant la phase d'érosion active. 3) photographie du S9 de 2016 qui montre la cicatrisation du talus et la recolonisation par la végétation pionnière (source : OBLIC, DENV)

Le secteur « nord-est » (S10) est quant à lui, un secteur qualifié de « stable ». Les périodes 2004-2007 (+ 0,5 m/an) et 2012-2015 (+0,57 m/an) sont caractérisées par une avancée de la LVP, tandis qu'on peut noter deux épisodes plus brefs de recul, le plus important ayant eu lieu entre 2011 et 2012 (- 1,25 m). Le récent recul (mai – novembre 2016) de - 0,82 m renseigne sur un épisode d'érosion en 2016 illustré sur la photographie (Figure 63) ci-dessous.



Figure 63 : photographie du S10 en 2016 (source : DENV), secteur stable ponctué de brefs épisode de recul.

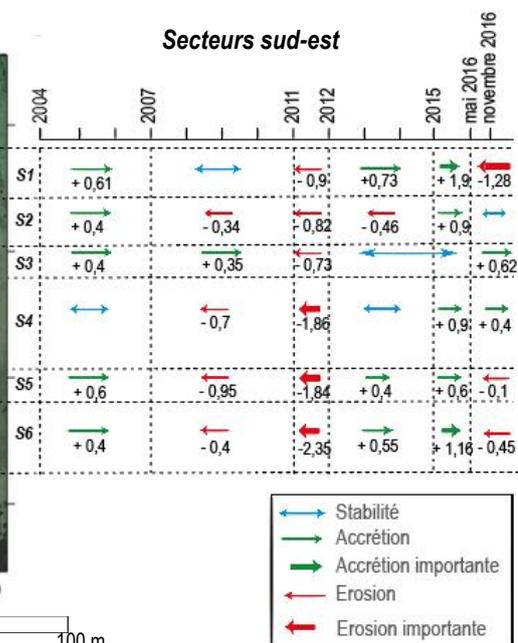
Vitesse moyenne d'évolution (m/an) de Larégnère sur la période 2004-2016



Vitesse moyenne d'évolution (m/an) des différents secteurs sur la période 2004-2016



Secteurs sud-est



Secteurs nord-est

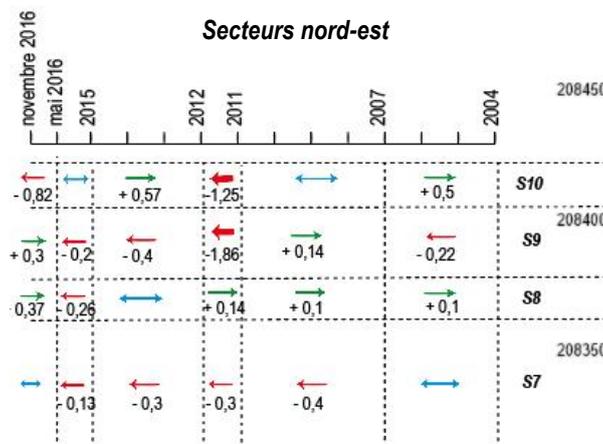


Figure 64 : Représentation des vitesses moyennes d'évolution (m/an) de Larégnère sur l'ensemble de la période (haut), et dans le détail par secteur (les deux figures du bas). Réalisation : Marianne BRICQUIR, 2017 ; source : orthographie de la province Sud, 2011

2. Mbé Kouen

L'îlot Mbé Kouen a gagné **16 %** de superficie entre 2009, où sa surface était de 1 759 m², à aujourd'hui, où il s'étend actuellement sur 2 038 m² (Figure 65)⁴⁰. Après avoir connu une première phase d'érosion au cours des trois premières années (- **3%**), sa superficie ne cesse de s'étendre rapidement à raison de + **10 %** entre 2013 et 2016 et + **8 %** entre 2016 et 2017 (Tableau 15).

Tableau 15 : Evolution de la surface de l'îlot Larégnère entre 2004 et 2016

Date	Surface de l'îlot (m ²)	Evolution depuis 2009	Evolution entre les périodes
29/11/2009	1759		
24/02/2013	1701	-3%	-3%
01/08/2016	1877	7%	10%
02/11/2016	1901	8%	1%
05/07/2017	2038	16%	7%

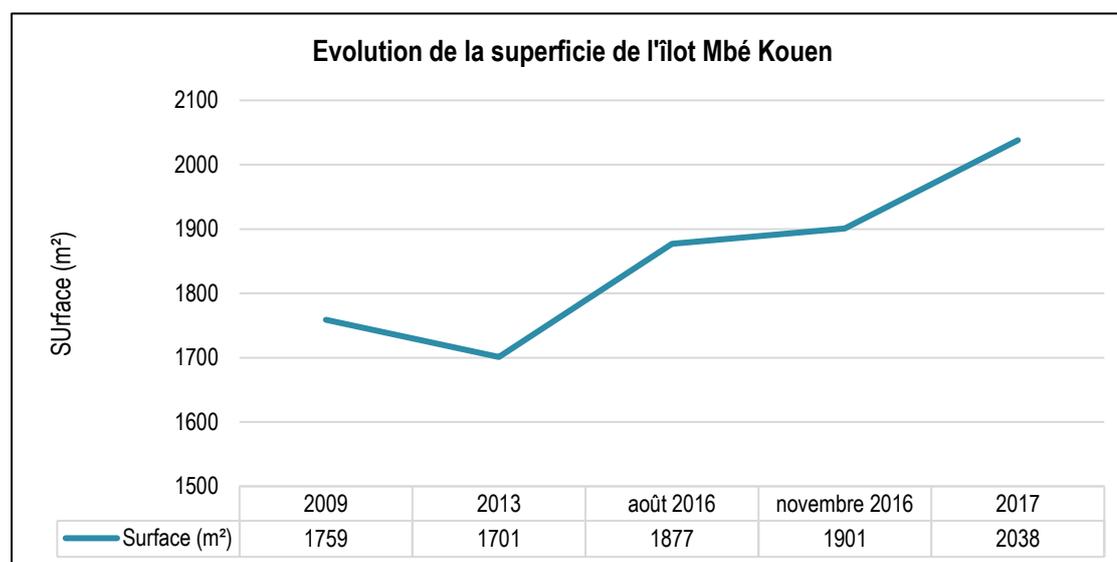


Figure 65 : Evolution de la surface de l'îlot Mbé Kouen exprimée en m²

Au même titre que Larégnère, nous avons divisé l'îlot en cinq secteurs aux évolutions homogènes dont deux sur la partie sud-est et trois au nord-ouest (Figure 73).

La LVP du **secteur « nord-est » (S1)** est constamment dans une dynamique d'avancement depuis 2009 (+ **4,48 m/8 ans soit + 0,56m/an**). L'épisode d'avancée le plus remarquable s'est déroulé entre 2013 et 2016 (+ **2,4 m/3 ans soit +0,80m/an**). Ce secteur correspond à la partie nord de la queue de comète, que l'on peut voir sur la photographie (Figure 66) acquise en 2016 lors d'une mission dans le cadre du projet.



Figure 66 : photographie du S1 de Mbé Kouen (2016) en accrétion depuis 2009. Source : OBLIC

⁴⁰ Comme pour Larégnère, une description plus détaillée de l'îlot est faite dans le Chapitre 1 - Section 2

Le secteur « pointe-est » (S2) constitue la partie de l'îlot qui s'est la plus étendue. En effet, on y observe une LVP qui a progressé de $+ 9,16 \text{ m}/8\text{ans}$, soit $+1,15 \text{ m/an}$, notamment au cours des trois premières années de l'analyse ($+ 10,95 \text{ m}/3 \text{ ans}$ soit $2,40 \text{ m/an}$). Cette évolution notable a tout de même été ponctuée d'une période de recul entre 2013 et 2016 ($- 0,7 \text{ m/an}$), illustré par la photographie, ci-dessous (Figure 67, 1), 2014). Plus récemment (2016-2017), ce secteur de l'îlot semble connaître un épisode de stabilité relative (Figure 67, 2).



Figure 67 : 1) Photographie du S1 de Mbé Kouen (2016) qui témoigne de la phase d'érosion de 2013-201. 2) Photographie du S1 (2017) qui illustre la stabilité observée actuellement. Source : OBLIC

Le secteur « sud-est » (S3) est également une zone en expansion constante, néanmoins moindre que le S2 plus au nord. Sur les périodes 2009-2013 et 2013-2016, la LVP a progressé de $+0,5\text{m/an}$ soit $1\text{m}/6 \text{ ans}$. Entre mai 2016 et 2017, la dynamique d'avancement a quelque peu ralenti : $+0,09 \text{ m/an}$ entre août et novembre 2016 ; $+ 0,26 \text{ m/an}$ entre novembre 2016 et juin 2017. Cette accrétion constante du S3 est confirmée par les observations terrain réalisées au cours du projet (Figure 68).



Figure 68 : Photographie du S3 de 2016, en phase d'accrétion (2009-2017). Source : Myriam Vendé-Leclerc

Le secteur « ouest » (S4) est caractérisé par un épisode d'important recul de la LVP entre 2009 et 2013 ($- 0,94 \text{ m/an}$). A partir de 2013, la dynamique s'inverse et on constate que la LVP gagne alors du terrain : $+ 0,70 \text{ m/an}$ entre 2013 et 2016 et $+ 0,84 \text{ m}$ entre août 2016 et juin 2017. La tendance générale du S4 sur les huit années de l'analyse est la stabilité (Figure 69).



Figure 69 : Photographie du S4 de 2017, stable sur l'ensemble de l'étude (2009-2017). Source : OBLIC

Le **secteur « nord-ouest » (S5)** connaît la même dynamique que la zone précédente (S4). Cependant, le passage d'une dynamique de recul ($-2,48$ entre 2009 et 2013 soit $-0,74$ m/an) à une dynamique d'avancée est plus tardif. La progression de la LVP ne s'observe qu'à partir de novembre 2016 (Figure 70, 1 et 2). Sur l'ensemble de la période concernée (2009-2017), la tendance est donc au recul ($-0,22$ m/an). Toutefois, cette érosion sur les 8 ans est à nuancer, la valeur du recul étant inférieure à la valeur de la marge d'erreur.



Figure 70 : 1) Photographie du S5 de Mbé Kouen (2014) en dynamique de recul. 2) Photographie du S5 (2017) avancée de la LVP qui s'observe au niveau du faux-tabac, par rapport à la photographie précédente. Source : OBLIC

L'ensemble des trois secteurs à l'est de l'îlot a connu une accrétion au cours des 8 dernières années tandis que les secteurs à l'ouest, notamment celui du nord-ouest, ont perdu du sable. On peut alors émettre l'hypothèse d'un transfert de sédiments du sud vers l'épandage sableux au nord-est (Figure 71). Un autre élément d'observation va dans le sens de cette hypothèse : des beachrocks situés au sud-ouest de Mbé Kouen observables sur les images satellites (Figure 72). Ainsi l'îlot connaît peut-être une migration de vers le nord-est au cours de son évolution récente.

Migration possible de Mbé Kouen vers le nord-est

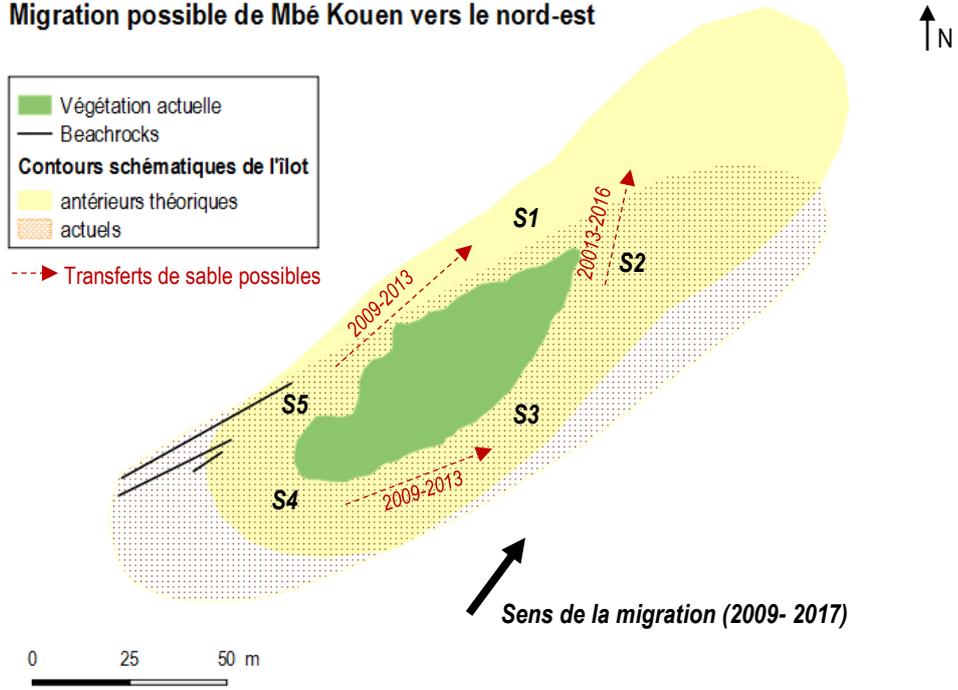
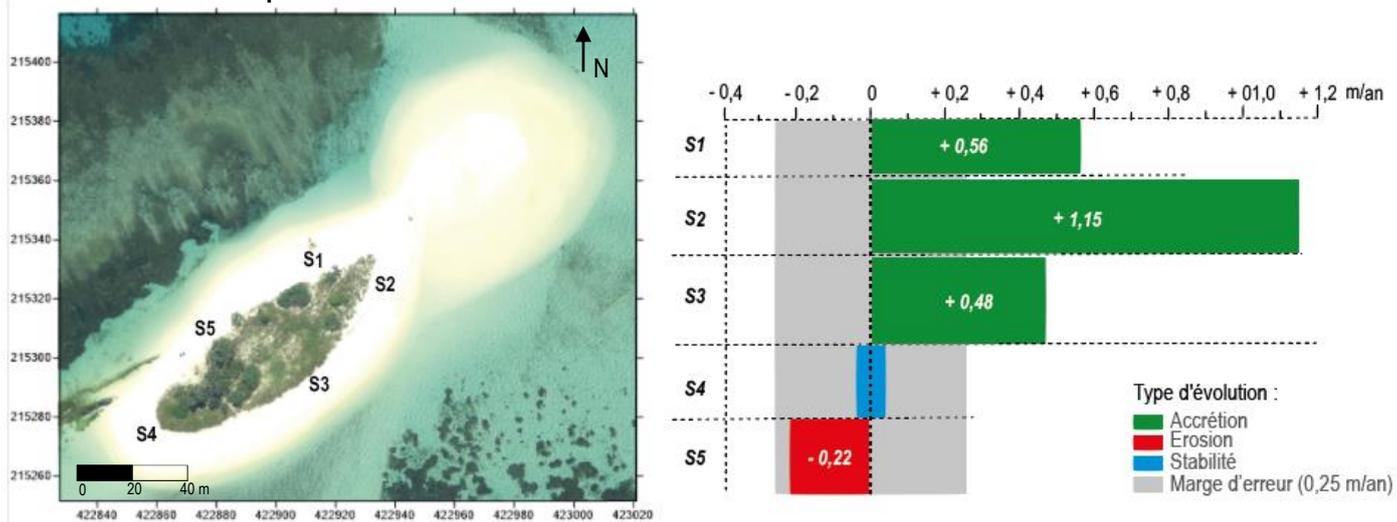


Figure 71 : Schématisation de la dynamique sur la période récente (2009-2017) de l'îlot Mbé Kouen (Réalisation Marianne BRCQUIR, 2017)

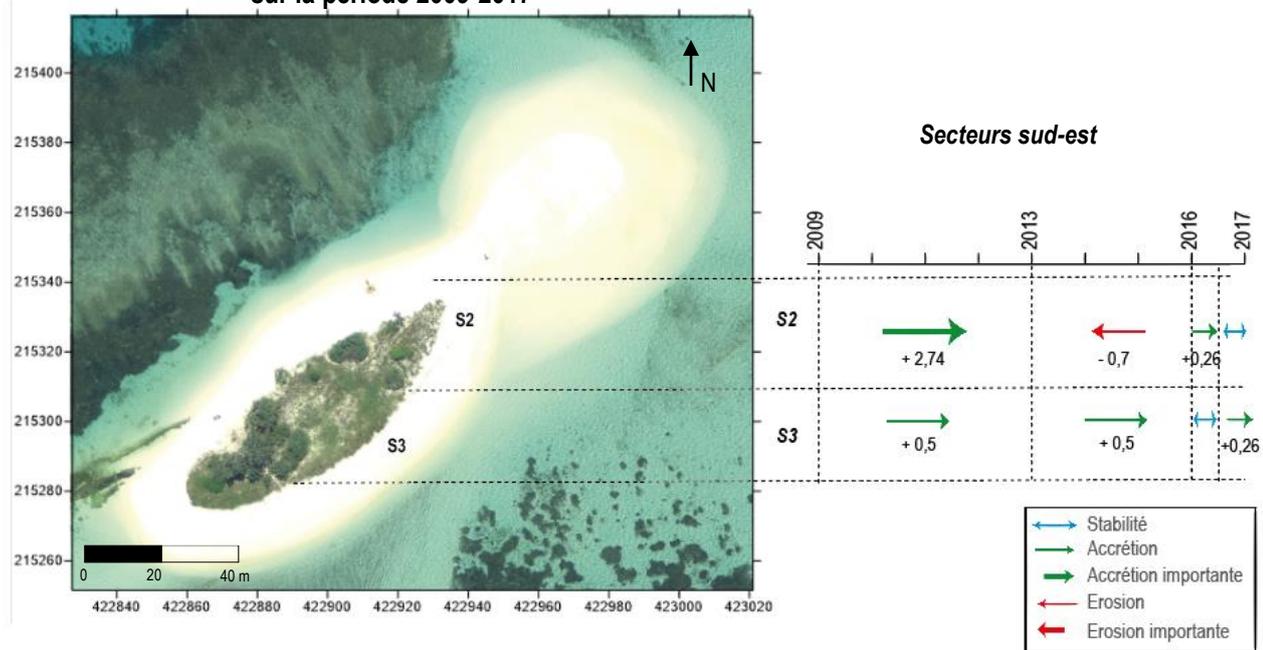


Figure 72 : Les beachrocks de l'îlot Mbé Kouen (Réalisation : Marianne BRICQUIR, 2017 source : GIE SERAIL)

Vitesse moyenne d'évolution (m/an) de Mbé Kouen sur la période 2004-2016



Vitesse moyenne d'évolution (m/an) par secteurs sur la période 2009-2017



Secteurs nord-est

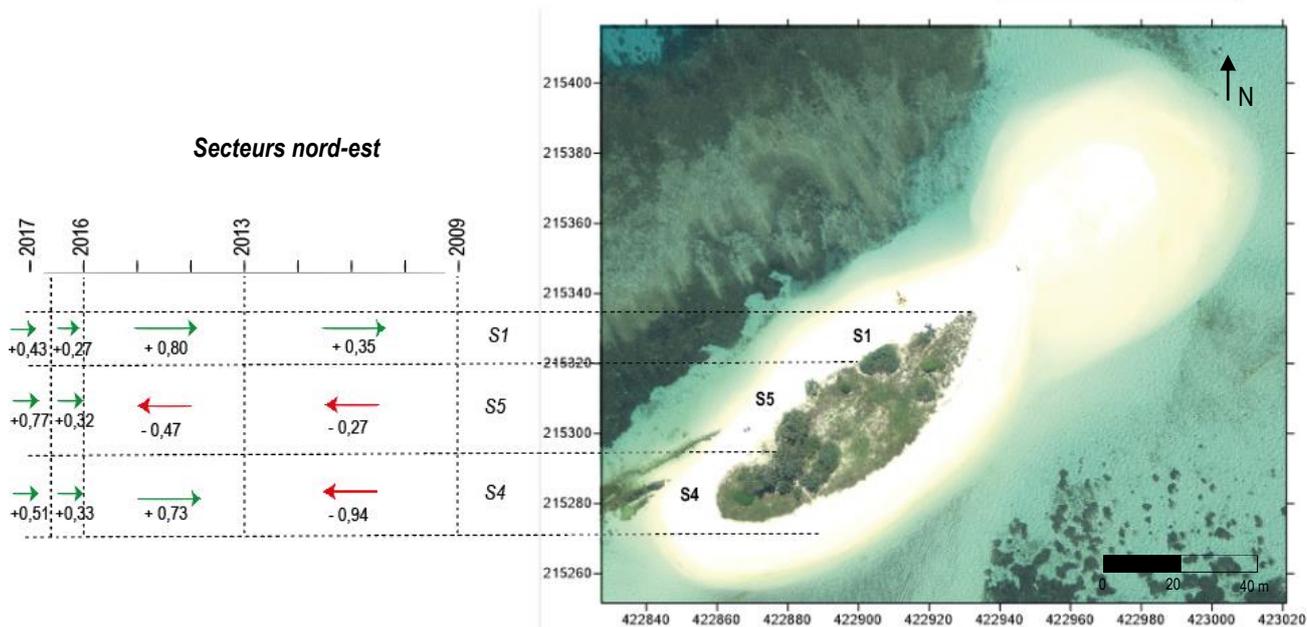
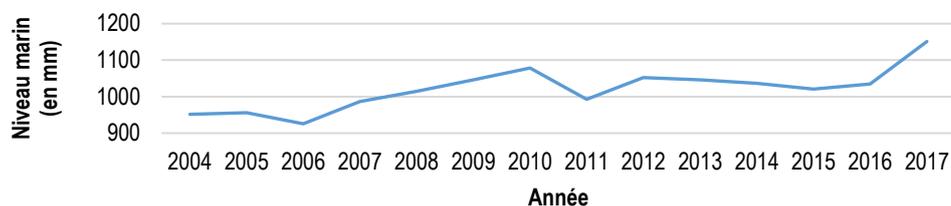


Figure 73 : Représentation des vitesses moyennes d'évolution (m/an) de Mbé Kouen sur l'ensemble de la période (haut), et dans le détail par secteur (les deux figures du bas). Réalisation : Marianne BRICQUIR, 2017 ; source : orthographie de GIE SERAIL, 2016

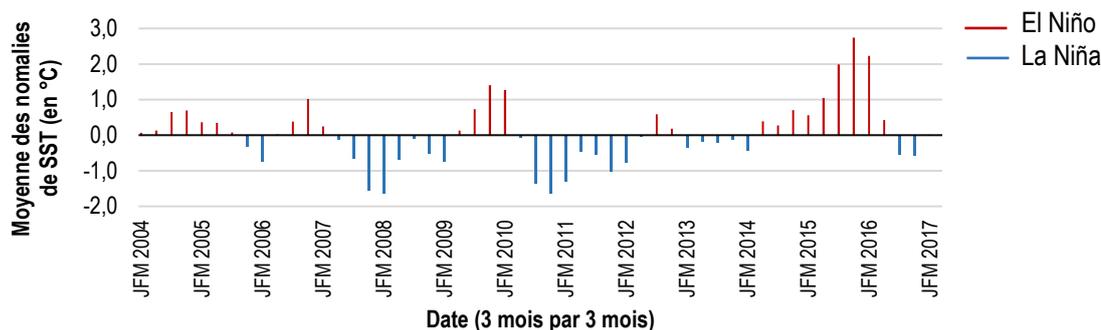
3. Mise en corrélation des évolutions récentes avec les paramètres environnementaux

Nous pouvons confronter l'analyse des évolutions récentes des îlots aux données environnementales précédemment recueillies. Les changements notables de la morphologie de Larégnère et Mbé Kouen pourraient être liés à ces facteurs de forçage.

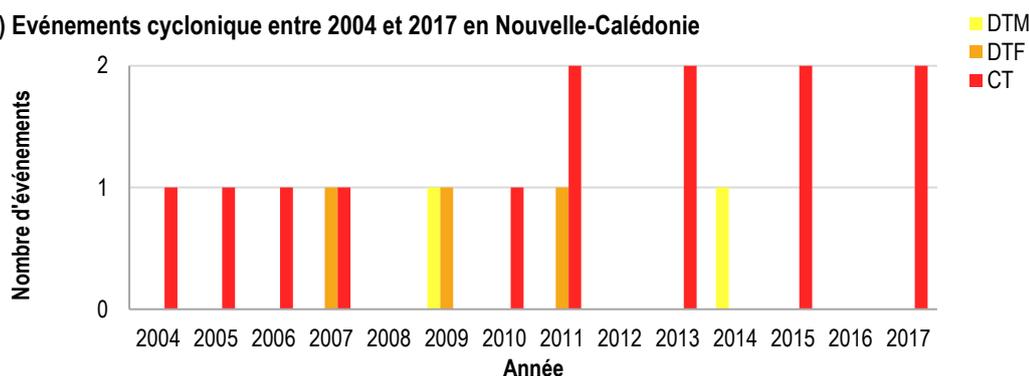
1) Niveau marin absolu (moyenné par année)



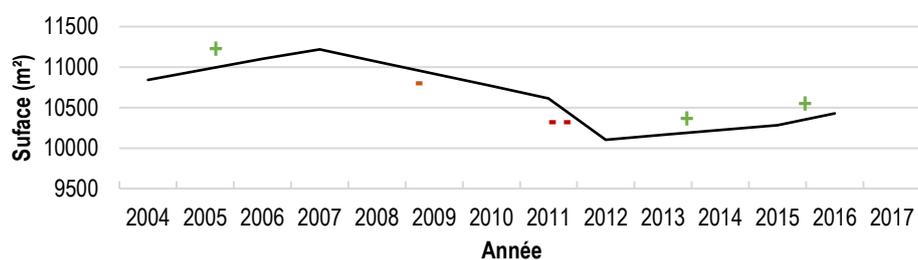
2) Oceanic Niño Index (2004-2017)



3) Événements cyclonique entre 2004 et 2017 en Nouvelle-Calédonie



4) Evolution de la superficie de Larégnère



5) Evolution de la superficie de Mbé Kouen

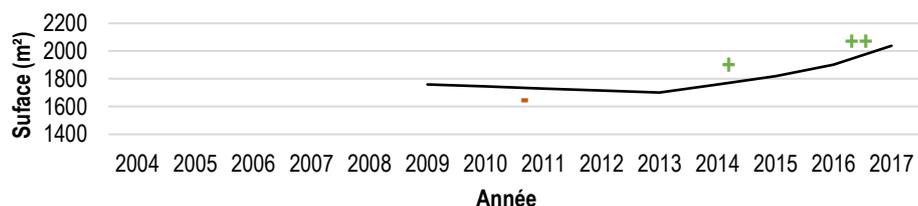


Figure 74 : 1) Niveau marin relatif (source : marégraphes de Chaleix et Numbo) ; 2) ONI (source : NOAA) ; 3) événements cycloniques (source : Météo France) ; 4) superficie de Larégnère ; 5) superficie de Kouen entre 2004 et 2017

Concernant Larégnère, on peut souligner trois phases d'évolution :

- **entre 2007 et 2011** : érosion sur la moitié des secteurs. La partie nord est plutôt stable, les secteurs est/sud/ouest connaissent un recul, sauf au niveau de l'extrémité de la pointe est ;
- **2011-2012** : érosion importante sur la quasi-totalité des secteurs, notamment sur les parties centrales de l'îlot et au niveau du sud-ouest ;
- **entre 2015 et 2016** : accrétion du sud de l'îlot ; érosion de la partie nord.

Tout d'abord, entre 2007 et 2011, Larégnère perd de sa superficie (Figure 74, 4). Parallèlement, une augmentation du niveau marin absolu (mesurée à partir du marégraphe de Numbo) est observable entre 2007 et 210 (Figure 74, 1). Les années 2007 à 2009 sont marquées par un événement La Niña (Figure 74, 2), phénomène qui, localement peut entraîner une élévation du niveau marin, des alizés plus forts et des précipitations plus importantes (Merrifield *et al.* 1999 ; Merrifield, 2011) et peut ainsi exposer le littoral à une érosion généralement plus forte, les vagues déferlant à une altitude plus élevée sur les rivages et les transports sédimentaires générés par les vagues d'alizés sont eux aussi plus forts (Garcin et Vendé-Leclerc, 2017). Ainsi, l'élévation du niveau marin à laquelle se superpose une phase La Niña de l'oscillation ENSO peuvent être responsables d'une amplification des phénomènes d'érosion observés sur l'îlot. On note au cours de cette période, huit événements cycloniques (Figure 74, 3) dont une dépression tropicale modérée (DTM) trois dépressions tropicales fortes (DTF) et trois cyclones tropicaux (CT) qui peuvent eux aussi être responsables d'épisodes d'érosion ponctuels.

Entre 2011 et 2012 l'îlot Larégnère voit sa superficie diminuer (Figure 74, 4), le niveau marin augmente (Figure 74, 1) et nous nous trouvons en phase négative du phénomène ENSO (La Niña, Figure 74, 3). Ces deux éléments environnementaux pourraient être à l'origine des épisodes de recul de la LVP observé sur l'îlot. L'année 2011 est aussi marquée par deux événements météorologiques notables (Figure 74, 3) : le cyclone Vania début janvier 2011 et le cyclone tropical Wilma à la fin de ce même mois de janvier. L'érosion importante observée sur l'îlot pourrait être également due à ces événements ponctuels.

Entre 2012 et 2016, le niveau marin est relativement stable (légère baisse observée entre 2012 et 2015, puis légère hausse qui s'accroît entre 2016 et 2017) et on note la présence d'une phase négative de l'oscillation ENSO en début de période (2012-2014) et une phase d'El Niño entre la fin d'année 2014 et la fin d'année 2016 (Figure 74, 1 et 2). On dénombre cinq événements météorologiques importants (Figure 74, 4) dont une DTM et quatre cyclone. L'ensemble de ces paramètres pourraient être responsable de l'érosion observée sur la partie nord de l'îlot. Les événements cycloniques ainsi qu'un passage à une phase positive ENSO et donc à une diminution des alizés et des précipitations pourraient également avoir permis, d'une part, un rechargement en sédiment de l'îlot par du matériel coralliens arraché au moment du passage des cyclones et d'autre part une diminution des phénomènes érosifs. Cela permettrait d'expliquer la période de ré-engraissement générale de l'îlot.

Pour Mbé Kouen, on a mis en avant deux phases principales (Figure 74, 5) :

- **entre 2009 et 2013** : phase d'érosion concernant le sud-ouest de l'îlot ;
- **2013-2017** : accrétion de la quasi-totalité de l'îlot.

La période 2009-2013 est marquée par une alternance de phases négatives et positives du phénomène ENSO (Figure 74, 2), avec un phénomène La Niña plus fort entre 2010 et 2012. On observe sur cette même période de nombreux événements météorologiques ayant affectés le sud-ouest de la Nouvelle-Calédonie : cinq cyclones (2010, 2011 et 2013), deux dépressions tropicales fortes et deux faibles. Le sud-ouest de l'îlot semble avoir été impacté par ces paramètres environnementaux qui ont pu entraîner des reculs ponctuels de la LVP.

La période 2013-2017 est principalement placée sous l'influence d'une phase positive de l'ENSO (El Niño) (Figure 74, 2) et a connu quatre événements cycloniques, dont deux en 2015 et deux en 2017 (Figure 74, 3). On peut émettre l'hypothèse que l'influence d'El Niño (fin 2014-fin 2016) a permis une diminution de l'érosion (diminution des alizés et des fortes précipitations, facteurs morphogènes) et qu'un apport en sédiments originaires de la barrière de corail après le passage des cyclones sur cette période ont conduit à une augmentation de la superficie de Mbé Kouen sur cette dernière période (Figure 74, 5).

4. La typologie OBLIC appliquée aux deux îlots étudiés

La typologie OBLIC a été exposée dans le premier chapitre du rapport. Elle comporte cinq stades, de la nucléation, en passant par les phases de croissance, maturité, décroissance, jusqu'à la relique et la disparition de l'îlot. Les analyses des évolutions historiques ont permis de classer ces deux îlots selon cette typologie des évolutions des îlots. A noter que ces évolutions peuvent différer des comportements actuels des îlots.

Nous avons vu que, de manière générale, l'îlot Larégnère voit sa surface diminuer entre 2004 et 2016. Cette érosion est observable par la présence de divers indices (talus, souches déchaussées et arbres déracinées...) et par l'étude des paléo

rivages matérialisés par les beachrocks qui nous montre un retrait de l'îlot par rapports à ces anciennes limites. Ces observations avaient déjà été faites en 2014 et Larégnère avait ainsi été classé au stade de « décroissance » dans le rapport OBLIC de 2015. La décroissance, définie dans le chapitre 1 – section 2, débute quand le bilan sédimentaire de l'îlot devient négatif, c'est-à-dire quand il se produit plus de perte que d'apport de sédiments. L'îlot perd alors plus ou moins rapidement de sa surface. L'analyse plus récente réalisée jusqu'à 2016 confirme que l'îlot est bel et bien en train de perdre de sa surface et que par conséquent, il appartient toujours à cette classe (Tableau 16).

Mbé Kouen est quant à lui en phase de « migration » appartenant au stade « maturité » (Cf. Chapitre 1 – section 2, p), avec une migration vers le nord-est s'accompagnant d'une érosion importante au sud-ouest et d'une accrétion au nord-est, contrairement à ce qui avait été défini précédemment, où sur la période 2009-2013 l'îlot semblait être au stade de « décroissance » (Tableau 16). La migration a été définie comme une forme d'adaptation de l'îlot aux contraintes et aux forçages environnementaux. Ainsi, alors que le rivage sud-ouest est en érosion, le rivage nord-est est en accrétion (panache sableux). Nous avons précédemment émis l'hypothèse d'une migration dans la direction nord-est qui pourrait être due à des processus autophages c'est-à-dire que la bande sableuse serait nourrie par les sédiments en provenance du sud-est, comme, pour reprendre l'expression de Garcin et Vendé-Leclerc, 2016, « un tapis roulant sédimentaire ». Cet apport en sédiment pourrait aussi être extérieur et dû à un rechargement de la plate-forme récifale en débris coralliens à la suite d'événements cycloniques amenant à une production de sable.

Cette nouvelle analyse de l'évolution récente des îlots Larégnère et Mbé Kouen permet de valider l'approche et la typologie proposée par l'OBLIC en 2016 (Garcin et al., 2016).

Tableau 16 : Stade d'évolution des îlots Larégnère et Mbé Kouen

Ilot	Evolution récente (en %)	Surface actuelle	Stade attribué par l'OBLIC en 2014	Stade défini à l'issu de notre étude	Tendance d'évolution récente
Larégnère	- 4 %	10 428 m ² (02/11/2016)	Décroissance	Décroissance	Réduction de surface
Mbé Kouen	+ 16 %	2 038 m ² (05/06/2017)	Décroissance	Mature migrant	Gain de surface et déplacement

Section 2. L'évolution actuelle des îlots

L'expression « évolution actuelle » des îlots renvoie à l'évolution des îlots sur ce que nous avons défini comme le court terme, c'est-à-dire la période du projet EMIL qui s'étend entre mars 2016 et juin 2017. L'évolution mise en avant sera alors saisonnière, compte tenu des différentes missions menées sur le terrain pour l'acquisition de données topographiques *in situ*⁴¹ (Figure 34, p 50).

1. Larégnère

A première vue, les MNT différentiels entre mars et octobre 2016 (hiver austral) et entre octobre 2016 et avril 2017 (été austral) montrent une certaine saisonnalité entre accrétion et érosion sur des zones données, notamment au niveau des deux pointes (nord-est et sud-ouest) de l'îlot (Figure 75).

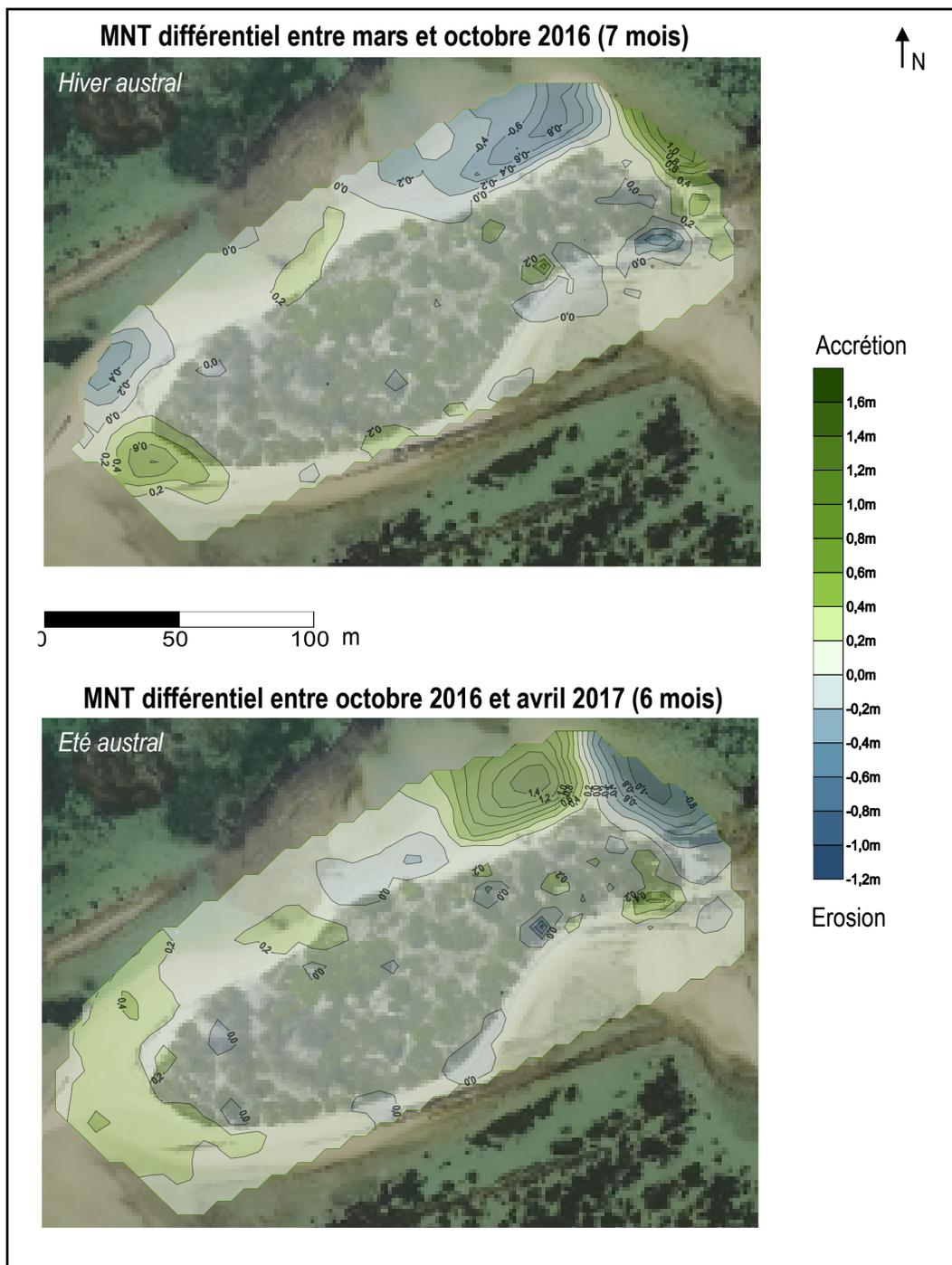


Figure 75 : MNT différentiels d'une résolution de 5 mètres et interpolés par krigeage (logiciel Surfer version 13) réalisés à partir de semis de points levés au DGPS

⁴¹ Pour revenir sur les méthodes d'acquisition des données topographique, consultez le second chapitre du rapport

Pour mieux qualifier et quantifier ces évolutions actuelles qui semblent saisonnières, nous avons défini des secteurs (Figure 76) : le secteur 1 (S1) correspond à la partie occidentale de la pointe est ; le secteur 2 (S2) à la partie orientale de cette même pointe ; le secteur 3 (S3) à la partie nord de la pointe ouest exposée aux vagues d'orientation SSO, les australes et aux vents d'ouest (« coup d'ouest »). Enfin nous avons choisi d'analyser un autre secteur, le secteur 4 (S4) qui se trouve sur la côte au vent de l'îlot et exposée aux alizées (vagues d'orientation SSE). Le profil 1-b situé sur ce dernier secteur indique la présence d'un talus d'érosion d'une hauteur de 1,5 m environ. Nous avons calculé des volumes de pertes et de gain de sédiments pour chacun des secteurs (Tableau 17 et Tableau 18).

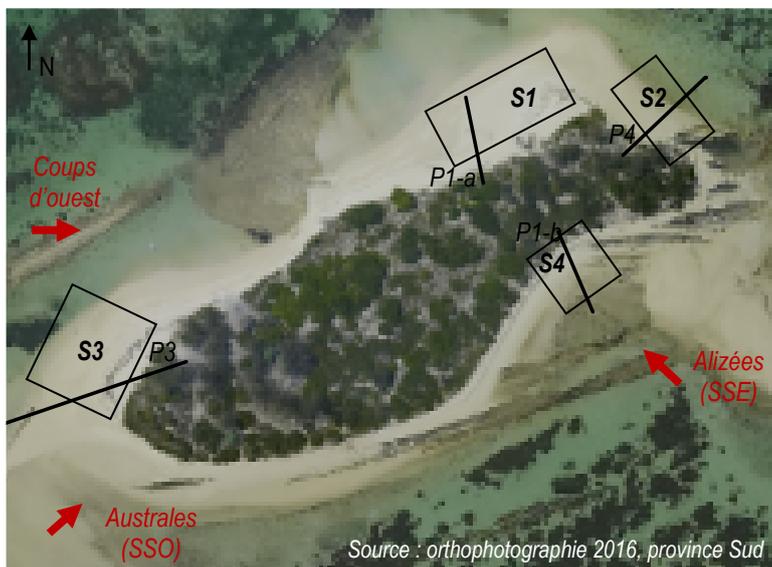


Figure 76 : emplacement schématique des différents secteurs et des profils de plage utilisés pour l'analyse des évolutions actuelles et exposition de l'îlot aux différentes vagues (Réalisation : Marianne BRICQUIR, 2017)

L'ensemble de l'îlot a un bilan sédimentaire positif sur l'ensemble de l'année (+ 12,56 %). Ainsi, contrairement à la tendance observée sur la période récente dans l'analyse précédente, l'îlot semble être dans un épisode de ré-engraissement sur la période 2016-2017.

Le **secteur 1 (S1)**, d'une superficie de 1 100 m², possède un bilan sédimentaire négatif entre mars et octobre 2016 (hiver) correspondant à -15,6 % du volume comptabilisé en mars sur ce secteur. Le MNT différentiel correspondant à cette même période montre une érosion jusqu'à -0,8 m de hauteur de sédiments (Figure 75). Au cours de l'été (octobre 2016-avril 2017), il gagne + 50 % en volume de sédiments par rapport à la quantité disponible en octobre et on observe sur le MNT « été austral » (Figure 77) une accrétion jusqu'à + 1,4m (hauteur de sédiments). Sur l'ensemble de l'année, le secteur 1 présente un bilan sédimentaire positif (+ 26,6 % correspondant à 292 m³ de sable). L'observation à différentes dates du **profil de plage 1-a** (Figure 77) localisé à l'est de ce secteur permet de préciser l'évolution de cette zone, à une résolution plus fine que celle des MNT (mesures réalisées tous les mètres).

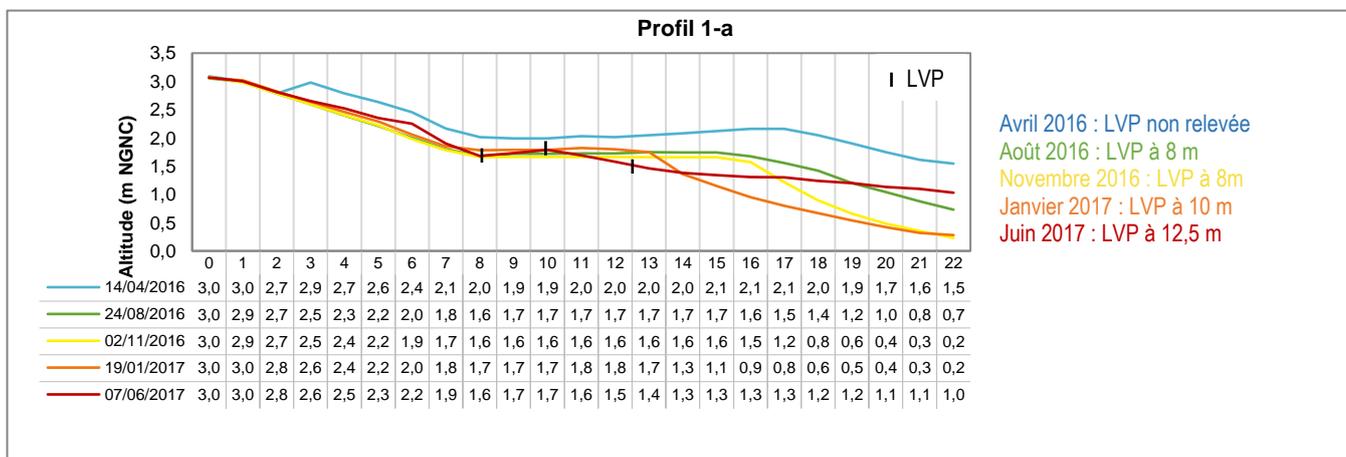


Figure 77 : Profil 1-a à 5 dates (14/04/2016 ; 08/08/2016 ; 02/11/2016 ; 19/01/2017 ; 07/06/2017), Larégnère

Entre avril et août 2016, on observe un amaigrissement significatif de la plage relatif à la perte en sédiments calculée pour la période hivernale. Le haut d'un talus (- 0,50 m par rapport au mois d'avril) est relevé sur le terrain à 18 mètres. Au début de la période estivale (novembre 2016), on note le recul du talus : le bas de talus est maintenant à 18 mètres. La LVP recule également de - 3 m entre août et novembre 2016. En janvier, ce talus se situe entre les 13^{ème} et 15^{ème} mètres sur le profil (Figure 78, Figure 79). Au mois de juin, on observe son aplanissement avec un engraissement surtout en bas de plage (+ 0,50 m à 22 mètres de distance). Cet engraissement correspond au bilan sédimentaire positif calculé précédemment pour la période « été austral ».



Figure 78 : le 19/01/2017, apparition d'un talus de haut de plage d'une hauteur de 60 cm situé entre 13 et 15 m sur le profil de plage. Source : DENV



Figure 79 : le 07/05/2017, aplanissement du profil en haut de plage et disparition du talus. Source : DENV

Tableau 17 : Volumes de sédiments calculés par secteur (îlot Larégnère)

Site	MNT	Secteur	Superficie du MNT (m ²)	Volume positif (m ³)	Volume négatif (m ³)	Volume net (m ³)	Volume total (m ³)
Larégnère	mars-16	îlot	22000	29 168,20	879,77	28 288,43	30 047,97
Larégnère	oct-16	îlot	22000	30 615,33	1 242,06	29 373,27	31 857,39
Larégnère	avr-17	îlot	22000	33 459,07	364,18	33 094,89	33 823,25
Larégnère	mars-16	Secteur 1	1100	927,01	168,39	758,62	1 095,40
Larégnère	oct-16	Secteur 1	1100	426,47	497,93	-71,46	924,40
Larégnère	avr-17	Secteur 1	1100	1 364,41	22,66	1 341,75	1 387,08
Larégnère	mars-16	Secteur 2	1000	466,80	247,83	218,97	714,64
Larégnère	oct-16	Secteur 2	1000	1 053,74	25,17	1 028,57	1 078,92
Larégnère	avr-17	Secteur 2	1000	440,00	66,92	373,08	506,92
Larégnère	mars-16	Secteur 3	1250	865,03	220,58	644,45	1 085,61
Larégnère	oct-16	Secteur 3	1250	706,21	224,68	481,53	930,89
Larégnère	avr-17	Secteur 3	1250	974,59	35,62	938,98	1 010,21
Larégnère	mars-16	Secteur 4	490	447,53	5,84	441,69	453,37
Larégnère	oct-16	Secteur 4	490	444,89	3,29	441,60	448,19
Larégnère	avr-17	Secteur 4	490	526,52	0,00	526,52	526,52

Tableau 18 : Pertes et gains en sédiments par période et par secteur (îlot Larégnère)

Site	MNT	Secteur	Superficie du MNT (m ²)	Gain/perte (m ³) depuis mars 216	Taux d'évolution (en %) depuis mars 2016	Gain/Perte (m ³) entre chaque date	Taux d'évolution (en %) entre chaque date
Larégnère	Entre mars et octobre 2016	îlot	22000	1 809,42	6,02	1 809,42	6,02
Larégnère	Entre octobre 2016 et avril 2017	îlot	22000			1 965,85	6,17
Larégnère	Entre mars 2016 et avril 2017	îlot	22000	3 775,27	12,56	3 775,27	12,56
Larégnère	Entre mars et octobre 2016	Secteur 1	1100	-171,00	-15,61	-171,00	-15,61
Larégnère	Entre octobre 2016 et avril 2017	Secteur 1	1100			462,67	50,05
Larégnère	Entre mars 2016 et avril 2017	Secteur 1	1100	291,67	26,63	291,67	26,63
Larégnère	Entre mars et octobre 2016	Secteur 2	1000	364,28	50,97	364,28	50,97
Larégnère	Entre octobre 2016 et avril 2017	Secteur 2	1000			-572,00	-53,02
Larégnère	Entre mars 2016 et avril 2017	Secteur 2	1000	-207,72	-29,07	-207,72	-29,07
Larégnère	Entre mars et octobre 2016	Secteur 3	1250	-154,72	-14,25	-154,72	-14,25
Larégnère	Entre octobre 2016 et avril 2017	Secteur 3	1250			79,32	8,52
Larégnère	Entre mars 2016 et avril 2017	Secteur 3	1250	-75,40	-6,95	-75,40	-6,95
Larégnère	Entre mars et octobre 2016	Secteur 4	490	-5,19	-1,14	-5,19	-1,14
Larégnère	Entre octobre 2016 et avril 2017	Secteur 4	490			78,34	17,48
Larégnère	Entre mars 2016 et avril 2017	Secteur 4	490	73,15	16,13	73,15	16,13

Toutefois, on note un recul de la LVP en haut de plage (- 2 m entre janvier et juin). Ainsi, on peut supposer que le talus formé en août 2016 et accentué à la fin de l'hiver-début de l'été austral, a contribué au rechargement en sédiment du bas de plage observé en juin 2017.

On peut donc souligner à travers cet exemple, l'importance des profils de plage pour, d'une part, observer les évolutions actuelles à une résolution spatiale plus fine que celle proposée par les MNT et d'autre part, étudier les dynamiques en haut et bas de plage.

Le **secteur 2 (S2)**, d'une superficie de 1 000 m² présente un bilan sédimentaire négatif de - 200 m³ environ sur l'ensemble de l'année 2016-2017, soit - 30% entre mars 2016 et avril 2017. En s'intéressant à la saisonnalité observée sur les MNT différentiels, on remarque que durant l'hiver austral, la zone connaît une accrétion jusqu'à + 1 m (Figure 75). Le bilan sédimentaire du S2 est alors positif (+ 365 m³ soit 50 % de sédiment supplémentaire entre mars et octobre 2016). Au cours de la saison estivale, la zone perd du volume de sédiments (- 572 m³ soit - 53 % du volume d'octobre), correspondant à une érosion atteignant - 0,8 m (Figure 75, Figure 80).

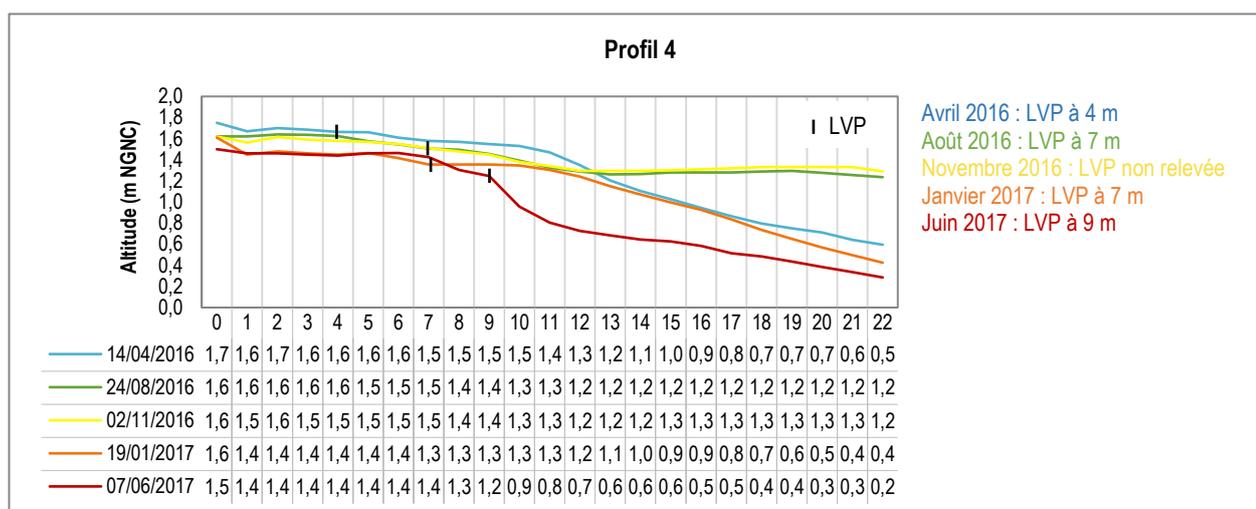


Figure 80 : Profil 4 à 5 dates (14/04/2016 ; 08/08/2016 ; 02/11/2016 ; 19/01/2017 ; 07/06/2017), Larégnère

Le **profil 4** (Figure 80) situé à peu près au centre du S2 nous permet de décrire davantage les évolutions qui ont lieu du haut au bas de plage. Ainsi, on observe, à partir d'avril et jusqu'à novembre (hiver austral) un engraissement de + 30 à 70 cm à partir du 13^{ème} mètre du profil jusqu'en bas de plage. La LVP avance également continuellement de + 3 à 5 m entre avril 2016 et juin 2017. Entre novembre 2016 et janvier 2017, on observe une nette érosion dans les mêmes ordres de grandeur que l'épisode d'érosion précédent (jusqu'à 70 cm en bas de plage). Enfin, en juin 2017, on note l'apparition d'un talus (entre les 9 et 10^{ème} mètres du secteur) d'une hauteur de 40 à 50 cm (Figure 81). Ce dernier épisode d'érosion pourrait être due aux événements météorologiques observés durant cette période : la dépression tropicale de février 2017, les cyclones Cook et Donna en avril et mai 2017 (Cf. Tableau 4 p 33)



Figure 81 : le 07/05/2017, formation d'un talus de 40 cm en haut de plage. Source : DENY

Ces observations effectuées sur les secteurs 1 et 2 nous permettent de formuler l'hypothèse suivante : au cours de l'hiver austral, le S1 est en érosion tandis que le S2 est en accrétion et inversement au cours de la saison estivale qui suit. Il pourrait donc y avoir transfert des sédiments du côté occidental de la pointe est de Larégnère vers le côté oriental de cette pointe en hiver et le phénomène inverse lors de l'été austral. Ce transfert de sédiments au cours de l'hiver pourrait être attribué aux vagues d'alizées (houle dominante sur l'ensemble de l'année). Cependant, une partie du sable transférée au cours de l'été (octobre-avril) serait parti au large, peut-être à cause d'événements météorologiques successifs importants qui sont survenus tels que la dépression tropicale de février ou les cyclones Cook en avril 2017 et Donna en mai de cette même année.

Le **secteur 3 (S3)**, s'étend sur une superficie de 1 250 m³. Sur l'ensemble de la période d'étude (2016-2017), il possède un bilan sédimentaire déficitaire : - 75 m³ soit - 7% entre mars 2016 et avril 2017. Au cours de la période hivernale, il perd près de 155 m³, ce qui correspond à une érosion atteignant - 0,4 m visible sur le MNT différentiel « hiver austral ». Entre octobre 2016 et avril 2017 (été), il regagne + 80 m³ (Figure 75). Ce phénomène d'érosion pourrait être due à son exposition aux australes et vents d'ouest.

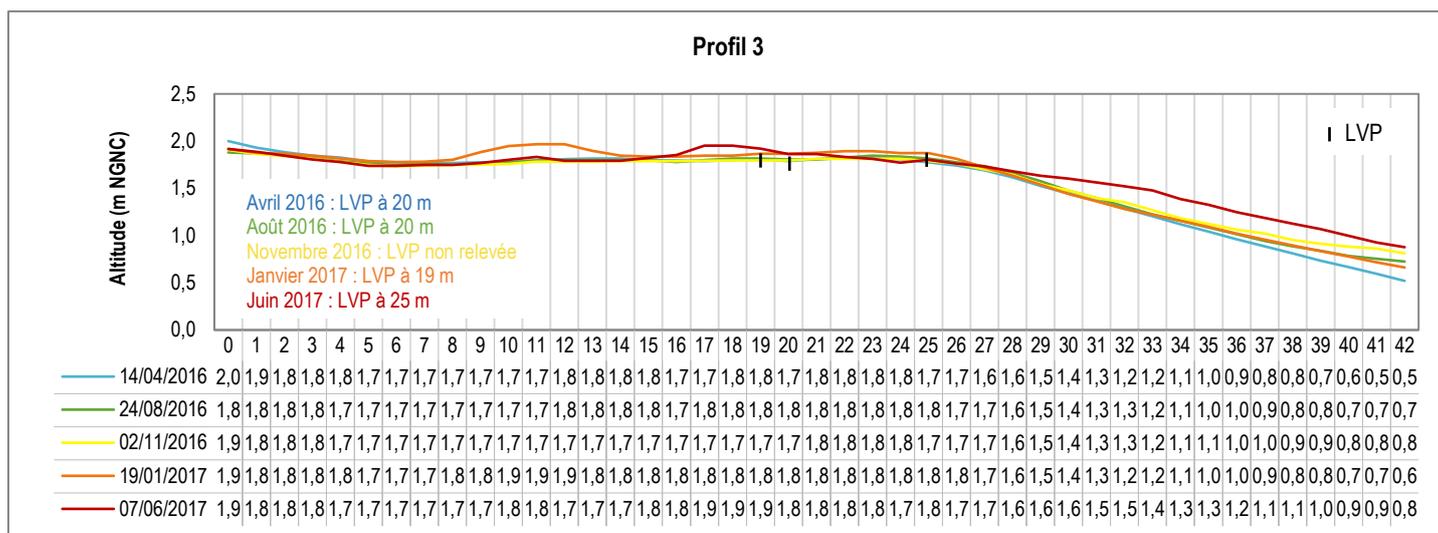


Figure 82 : Profil 3 à 5 dates (14/04/2016 ; 08/08/2016 ; 02/11/2016 ; 19/01/2017 ; 07/06/2017), Larégnère

Le **profil 3** (Figure 82) qui se situe au sud du S3 apparaît relativement stable jusqu'au 28^{ème} mètre du profil, on observe alors des variations topographiques. Tout d'abord, entre avril et novembre 2016 (hiver austral), on remarque une accrétion en bas de plage (à partir du 35^{ème} mètre du profil) d'une dizaine de centimètres. Puis, entre novembre et janvier, une légère érosion et enfin, de janvier à juin 2017, une note une nouvelle phase d'accrétion sur ce même tronçon du profil de + 0,10 à 0,30 m (élévation maximale observée au 32^{ème} mètre du profil). La LVP a également avancée d'environ + 6 m entre janvier et juin 2017 (été) (Figure 83). Si l'alternance d'épisodes d'accrétion et d'érosion est observable sur le S3 et le long du profil 3, leur saisonnalité reste éventuelle et à démontrer avec davantage d'observations.



Figure 83 : A gauche 19/01/2017 et à droite 07/05/2017 : avancée de la limite de végétation rampante mesurée à partir du panneau, Source : DENV

Le **secteur 4** n'apparaît pas particulièrement mobile à travers l'observation des MNT différentiels. Il possède un bilan sédimentaire positif sur l'année 2016-2017 (+ 75 m³ soit + 16 % entre mars 2016 et avril 2017). Cependant, le profil 1-b situé au centre du S4 (Figure 76) montre un important talus dont le haut se situe au 2^{ème} mètre le long du profil.

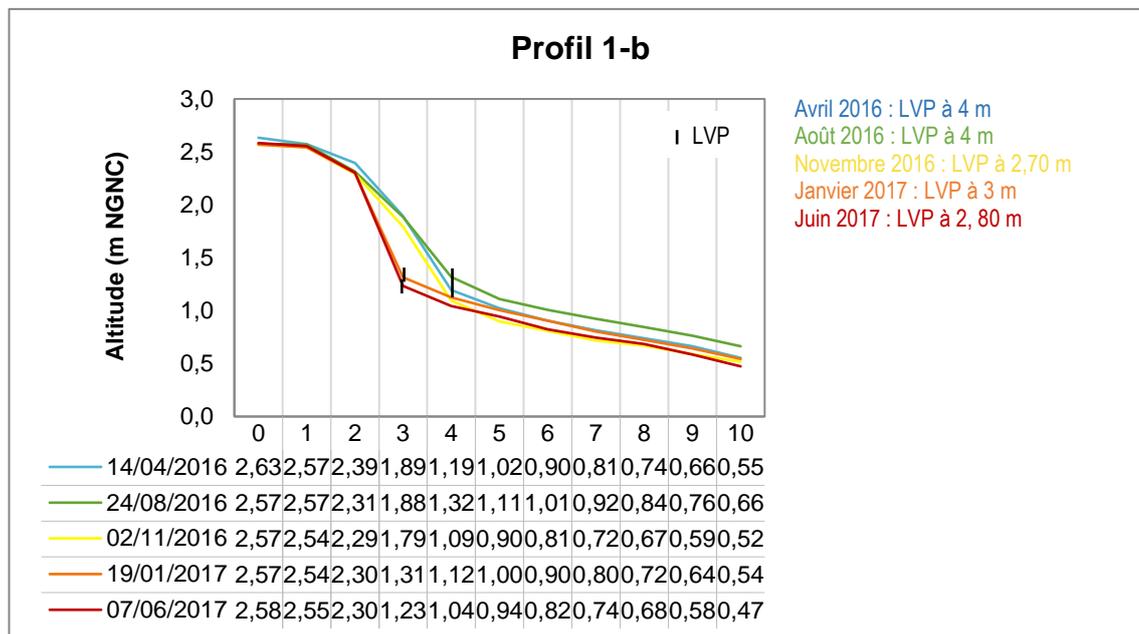


Figure 84 : Profil 1-b à 5 dates (14/04/2016 ; 08/08/2016 ; 02/11/2016 ; 19/01/2017 ; 07/06/2017), Larégnère

Ce talus a reculé entre novembre 2016 et janvier 2017, d'environ 1 mètre et un deuxième talus localisé entre les 4^{ème} et 5^{ème} mètres du profil (Figure 84), en bas de plage, a également été observé sur le terrain (Figure 85). Cet épisode d'érosion pourrait être due aux événements pluvieux qui ont impacté le sud-ouest de la Nouvelle-Calédonie au cours des mois de novembre et décembre 2016 (Cf. Tableau 4, p 33) :

- entre le 19 et le 22 novembre : événement pluvieux important entraînant des glissements de terrain sur la côte est de la Grande-Terre à l'origine de pertes humaines à Houailou. Des impacts morphologiques ont été observés sur la côte ouest par les opérateurs de l'OBLIC ;
- le 16 décembre : épisode de fort vent combiné à un coefficient de marée important. Des impacts morphologiques ont été observés sur Larégnère par les gardes nature.

Ainsi, ce talus est la marque d'une érosion ancienne, qui ne connaît que de rares phases de recul sur la période 2016-2017.



Figure 85 : A gauche 02/11/2016 et à droite 19/01/2017 : recul du talus de 1 m environ. Source : DENV

2. Mbé Kouen

Les MNT différentiels de Mbé Kouen nous montrent que plusieurs parties de l'îlot sont mobiles, et cela davantage durant l'été que durant l'hiver austral (Figure 86) où érosion et accrétion semblent moins marquées. La côte au vent (sud-est) est en érosion sur la période 2016-2017, tandis que la côte sous le vent (nord-ouest) apparaît stable.

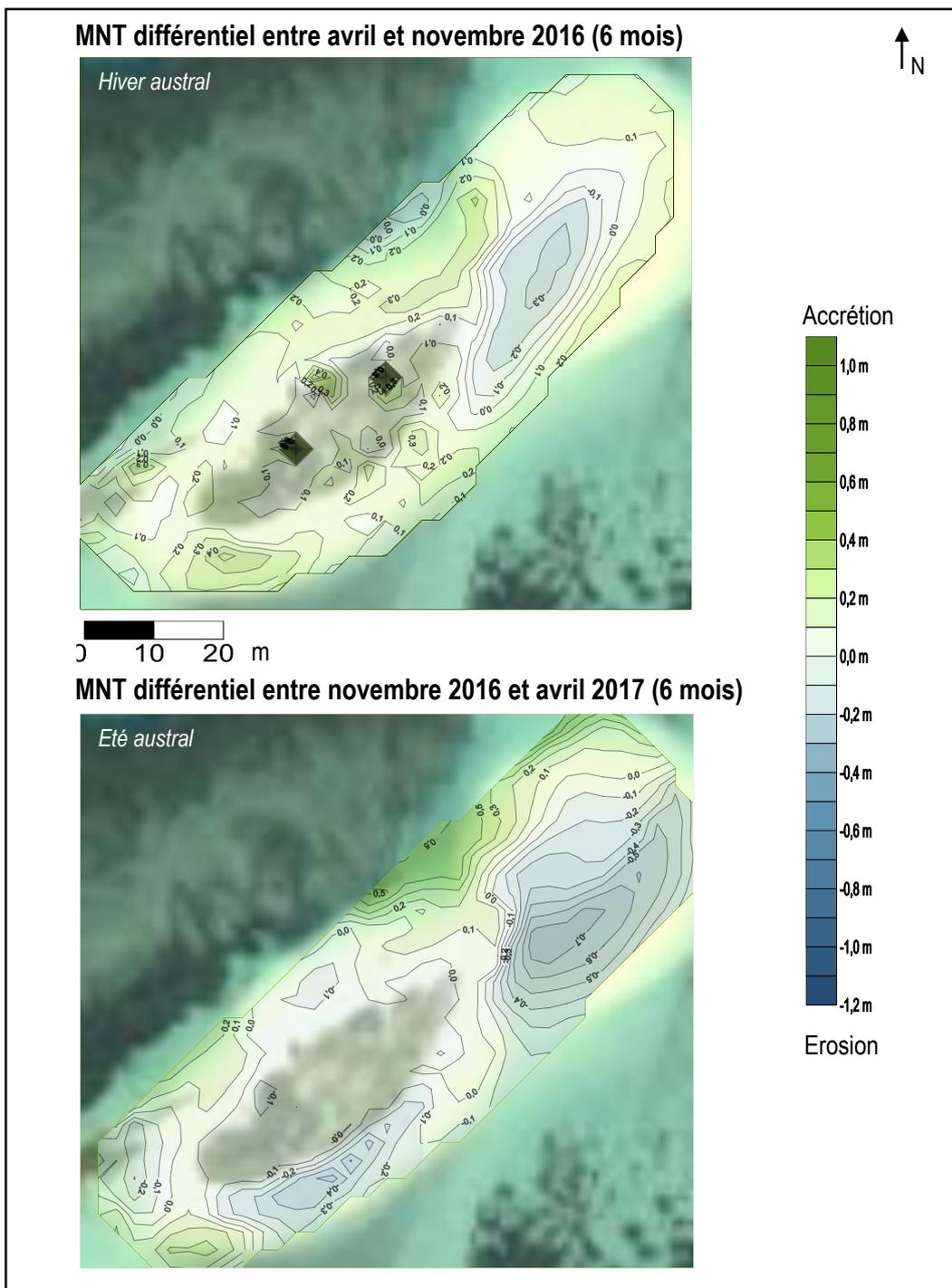


Figure 86 : MNT différentiels d'une résolution de 5 mètres et interpolés par krigeage, réalisés à partir de semis de points levés au DGPS (Surfer version 13)

Pour mieux identifier les dynamiques de l'îlot pour chaque saison et sur l'ensemble de l'année nous avons découpé Mbé Kouen en 3 secteurs (Figure 87). Le premier secteur (S1) correspond à la partie de l'îlot exposée à l'influence directe des vents du sud-est, les alizés et des vagues d'orientation SSE. Les MNT différentiels montrent que le S1 connaît une certaine phase d'accrétion entre avril et novembre 2016 (hiver) et qu'il est davantage dans une dynamique d'érosion au cours de la saison suivante, pouvant être causée par des alizées plus soutenues en saison estivale. Le second secteur (S2), situé au sud-ouest de l'îlot, apparaît plutôt stable au cours de la période avril-novembre 2016. Sur l'ensemble de l'année, il a un bilan sédimentaire globalement déficitaire.

Enfin, le secteur 3 (S3) se rapporte à l'épandage sableux (pointe nord-est de l'îlot). Nous avons choisi de ne pas nous attarder à la côte sous le vent, visiblement moins mobile.

A partir de ces trois secteurs, nous avons calculé des volumes de gains et pertes en sédiments afin de quantifier les évolutions préalablement observées et de formuler des hypothèses relatives aux dynamiques sédimentaires actuelles de l'îlot (Tableau 19, Tableau 20).

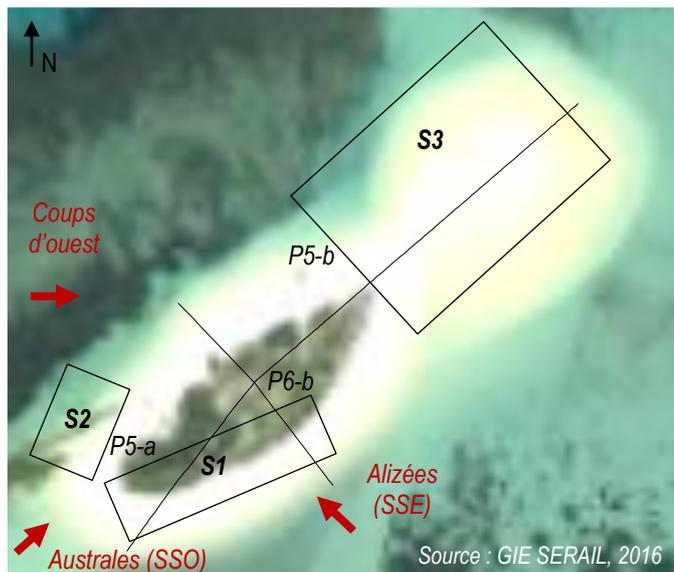


Figure 87 : emplacement schématique des différents secteurs et des profils de plage utilisés pour l'analyse des évolutions actuelles de Mbé Kouen et exposition de l'îlot aux différentes vagues

L'ensemble de l'îlot possède un bilan sédimentaire positif sur l'ensemble de l'année 2016-2017. Saisonnièrement, on observe deux tendances : une tendance à l'accrétion en hiver (+ 1 132,3 m³ soit + 10 %) ; une tendance à l'érosion au cours de l'été austral (- 730 m³ soit - 6 %), Tableau 20. Le bilan sédimentaire sur l'ensemble de l'année 2016-2017 est tout de même positif (+ 402 m³ soit + 3,65 %) ce qui est en adéquation avec l'analyse à moyen terme menée précédemment. Mbé Kouen continue donc d'être en accrétion sur cette dernière année, mais de manière moins considérable que ce que nous avons observé pour l'îlot Larégnère.

Le **secteur 1 (S1)** semble être en phase d'accrétion au cours de l'hiver, l'élévation la plus importante relevée sur le MNT différentiel étant de + 0,4 m au sud-ouest du secteur entre avril et novembre 2016. En été, on observe une courbe de niveau minimale à - 0,4 m vers le centre du secteur (Figure 86). Le calcul des volumes confirme que le S1 présente un gain de sédiments en hiver (+ 304 m³ soit + 24,5 %) et une perte de - 212 m³ (-13,8 %) qui est moindre. Le bilan sédimentaire global est donc positif avec un gain de + 91 m³ mesuré sur l'année (Tableau 20).

Les **profils 5-a et 6-b** sont situés respectivement à l'ouest et à l'est du S1. Leur analyse permet de considérer les dynamiques sur l'ensemble du système plage. Le **profil 5-a** (Figure 88) nous renseigne sur l'avancée de la LVP : au niveau du 40^{ème} mètre sur le profil en avril 2016, elle se retrouve au 43^{ème} mètre en juin 2017, ce qui revient à une avancée de + 3 m (Figure 89). Entre ces deux mêmes dates, on observe une accrétion continue sur l'ensemble de la longueur du profil. L'engraissement de la plage est davantage marqué en bas de plage, où les différences d'élévation mesurées peuvent être de près de + 1 m.

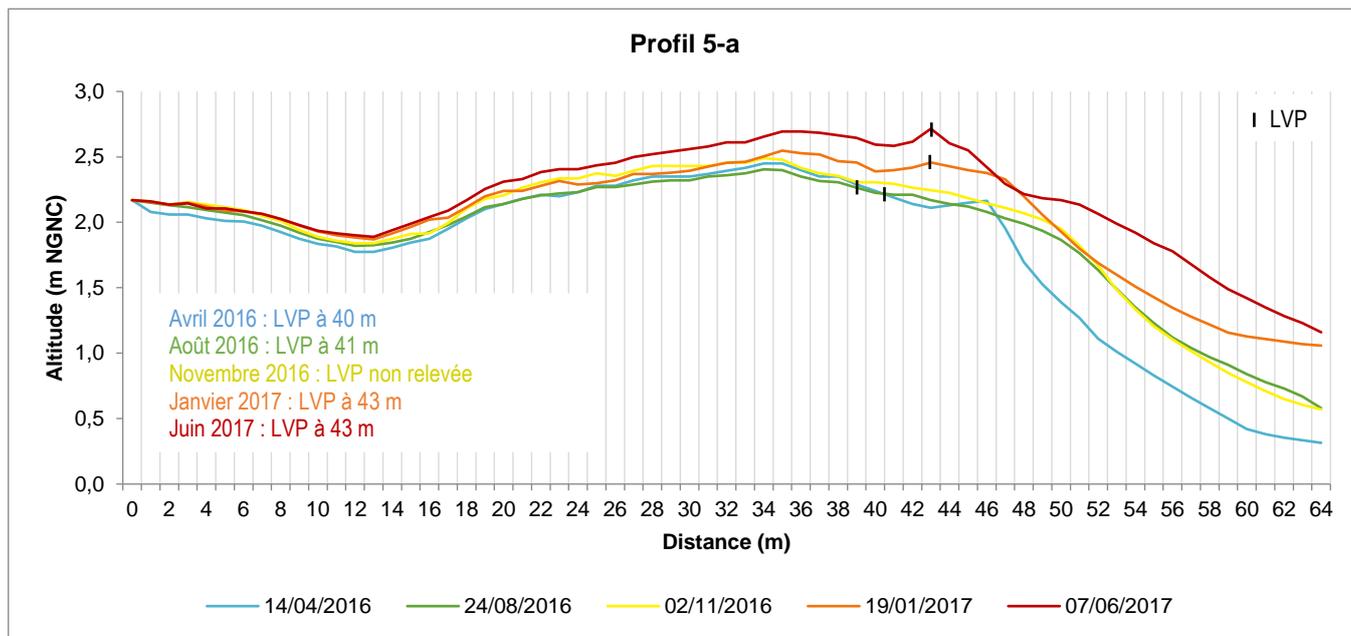


Figure 88 : Profil 5-a à 5 dates (14/04/2016 ; 08/08/2016 ; 02/11/2016 ; 19/01/2017 ; 07/06/2017), Mbé Kouen



Figure 89 : A gauche 14/04/2016 et à droite 07/05/2017 : avancée de la LVP. Source : DENV

Tableau 19 : Volumes de sédiments calculés par secteur (îlot Mbé Kouen)

Site	MNT	Secteur	Superficie du MNT (m ²)	Volume positif (en m ³)	Volume négatif (en m ³)	Volume net	Volume total
Mbé Kouen	avr-16	Ilot	10 000	10 810,23	202,28	10 607,94	11 012,51
Mbé Kouen	nov-16	Ilot	10 000	12 008,60	136,26	11 872,34	12 144,86
Mbé Kouen	avr-17	Ilot	10 000	11 375,84	38,91	11 336,92	11 414,75
Mbé Kouen	avr-16	Secteur 1	1 000	1 240,64	0,17	1 240,46	1 240,81
Mbé Kouen	nov-16	Secteur 1	1 000	1 544,54	0,00	1 544,54	1 544,54
Mbé Kouen	avr-17	Secteur 1	1 000	1 331,89	0,00	1 331,89	1 331,89
Mbé Kouen	avr-16	Secteur 2	325	362,67	0,00	362,67	362,67
Mbé Kouen	nov-16	Secteur 2	325	424,90	0,00	424,90	424,90
Mbé Kouen	avr-17	Secteur 2	325	391,14	0,00	391,14	391,14
Mbé Kouen	avr-16	Secteur 3	4 300	3 048,12	182,89	2 865,22	3 231,01
Mbé Kouen	nov-16	Secteur 3	4 300	3 163,58	137,57	3 026,01	3 301,14
Mbé Kouen	avr-17	Secteur 3	4 300	2 606,75	34,74	2 572,02	2 641,49

Tableau 20 : Pertes et gains en sédiments par période et par secteur (îlot Mbé Kouen)

Site	MNT	Secteur	Superficie du MNT (m ²)	Gain/Perte (en m ³) depuis avril 2016	Taux d'évolution (en %) depuis avril 2016	Gain/Perte (en m ³) entre chaque date	Taux d'évolution (en %) entre chaque date
Mbé Kouen	Entre avril et novembre 2016	Ilot	10000	1 132,35	10,28	1 132,35	10,28
Mbé Kouen	Entre novembre 2016 et avril 2017	Ilot	10000			-730,11	-6,01
Mbé Kouen	Entre avril 2016 et avril 2017	Ilot	10000	402,24	3,65	402,24	3,65
Mbé Kouen	Entre avril et novembre 2016	Secteur 1	1000	303,73	24,48	303,73	24,48
Mbé Kouen	Entre novembre 2016 et avril 2017	Secteur 1	1000			-212,65	-13,77
Mbé Kouen	Entre avril 2016 et avril 2017	Secteur 1	1000	91,08	7,34	91,08	7,34
Mbé Kouen	Entre avril et novembre 2016	Secteur 2	325	62,23	17,16	62,23	17,16
Mbé Kouen	Entre novembre 2016 et avril 2017	Secteur 2	325			-33,76	-7,95
Mbé Kouen	Entre avril 2016 et avril 2017	Secteur 2	325	28,46	7,85	28,46	7,85
Mbé Kouen	Entre avril et novembre 2016	Secteur 3	4300	70,13	2,17	70,13	2,17
Mbé Kouen	Entre novembre 2016 et avril 2017	Secteur 3	4300			-659,65	-19,98
Mbé Kouen	Entre avril 2016 et avril 2017	Secteur 3	4300	-589,52	-18,25	-589,52	-18,25

Le **profil 6-b** (Figure 90) montre une phase d'accrétion le long du profil entre avril et novembre 2016, c'est-à-dire durant l'hiver austral, suivie par une phase d'érosion durant la saison estivale. Cette alternance accrétion/érosion n'est pas marquée au niveau de la LVP qui connaît même une avancée de $+2\text{ m}$ entre avril 2016 et juin 2017 (située respectivement au niveau du 17^{ème} mètre en avril, au 19^{ème} mètre en juin de l'année suivante). L'observation du bas de plage souligne également une autre dynamique. En effet, on note une redistribution et un transfert des sédiments du haut vers le bas de plage (au niveau du 35^{ème} mètre) entre novembre 2016 et janvier 2017 (Figure 91).

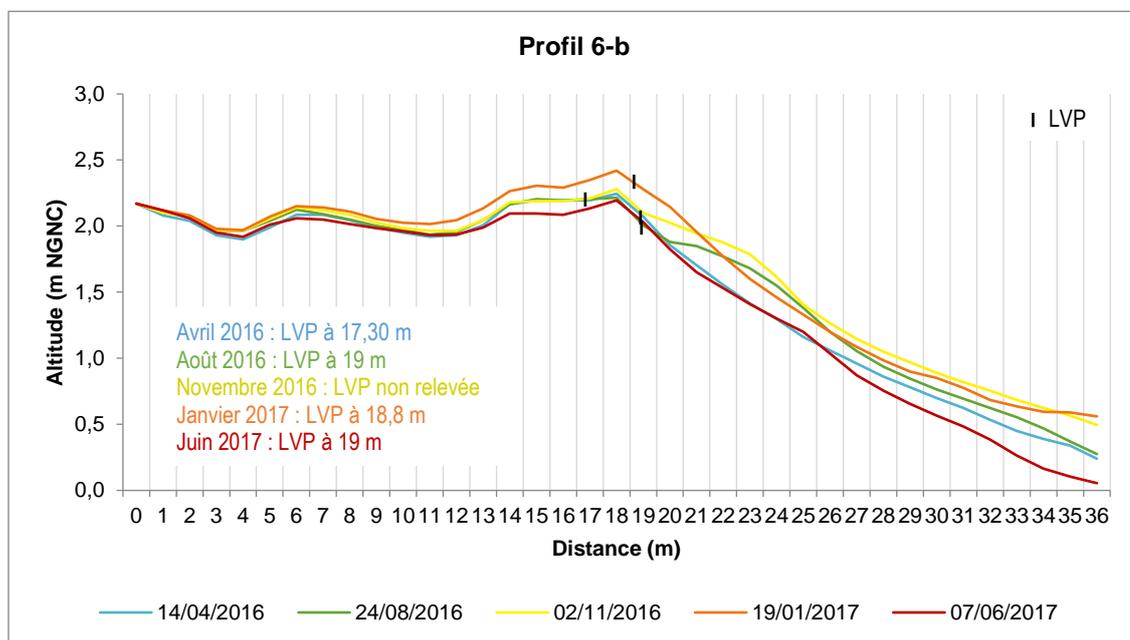


Figure 90 : Profil 6-a à 5 dates (14/04/2016 ; 08/08/2016 ; 02/11/2016 ; 19/01/2017 ; 07/06/2017), Mbé Kouen



Figure 91 : A gauche 02/11/2016 et à droite 19/01/2017 : engraissement du bas de plage entre ces deux dates. Source : DENV

L'étude de ces deux profils de plage situés de part et d'autre du S1 confirme la dynamique décrite lors de l'analyse des MNT et des calculs de volumes de pertes et de gains en sédiments. Ainsi, la dynamique saisonnière impacte de manière plus prononcée la partie centrale du S1 tandis que sa partie sud apparaît plus stable.

Le **secteur 2 (S2)** présente une légère accrétion sur l'ensemble de l'année 2016-2017 ($+28\text{ m}^3$ soit $+7,9\%$ entre avril 2016 et avril 2017). On peut constater une première phase d'accrétion en hiver ($+62\text{ m}^3$) suivie d'une phase d'érosion (-33 m^3) et, par conséquent, une dynamique semblable au secteur précédemment étudié (Tableau 20). La partie sud de l'îlot a donc un bilan sédimentaire excédentaire sur la période actuelle.

Le **secteur 3 (S3)**, qui correspond au panache sableux situé sur la partie nord de Mbé Kouen, présente un bilan sédimentaire négatif sur l'année, -589 m^3 soit $-18,25\%$ entre avril 2016 et avril 2017. Au cours de la période hivernale, on note un gain de sédiments se rapportant à $+70\text{ m}^3$ soit $+2,2\%$ sur 6 mois. En été, la perte du volume de l'étendue sableuse est considérable : -

659,7 m³ soit - 20% du volume présent en avril 2016. Sur le MNT différentiel « été austral », on observe une courbe de niveau minimale d'une valeur de - 0,7 m localisée au sud du S3 (Tableau 20). Cependant, en bordure nord du secteur, on observe sur ce même MNT une accréction maximale de l'ordre de + 0,5 m (Figure 86).

Nous avons comparé le profil 5-b sur une distance de 120 mètres par rapport à la tête de profil (Figure 92). Tout d'abord, le haut de plage est marqué par un premier talus, situé au 38^{ème} mètre en avril 2016 au même niveau que la LVP. Puis, on note un comblement de ce talus entre avril et août 2016. Cependant, un nouveau talus se forme 5 mètres plus loin (Figure 93). Il est visible sur le profil pour les trois dates suivantes. On peut cependant souligner un creusement de ce talus entre août 2016 et juin 2017. Au niveau du 57^{ème} mètre, un troisième talus est bien identifiable. Il est apparu au cours de la saison hivernale (entre avril et août 2016). Puis, ce talus recul d'1 mètre entre août et novembre 2016. Il est ensuite comblé en janvier 2017. Enfin, on observe un nouveau talus au même endroit en juin 2017 (Figure 94).

Le bas de plage connaît un engraissement entre avril et novembre 2016. Les sédiments arrachés lors de la formation du premier talus sont vraisemblablement transférés en bas de plage au niveau du 86^{ème} mètre, soit une quarantaine de mètres en avant du profil. On note entre novembre 2016 et janvier 2017 un aplanissement de l'ensemble du profil. Les sédiments présents en bas de plage ont pu être remobilisés et transférés plus en amont du profil vers le domaine subtidal ou vers des zones adjacentes. Enfin, entre janvier et juin 2017, c'est-à-dire au cours de l'hiver, on note une nouvelle phase d'amaigrissement du bas de plage égale à - 0,60 m au niveau du 120^{ème} mètre.

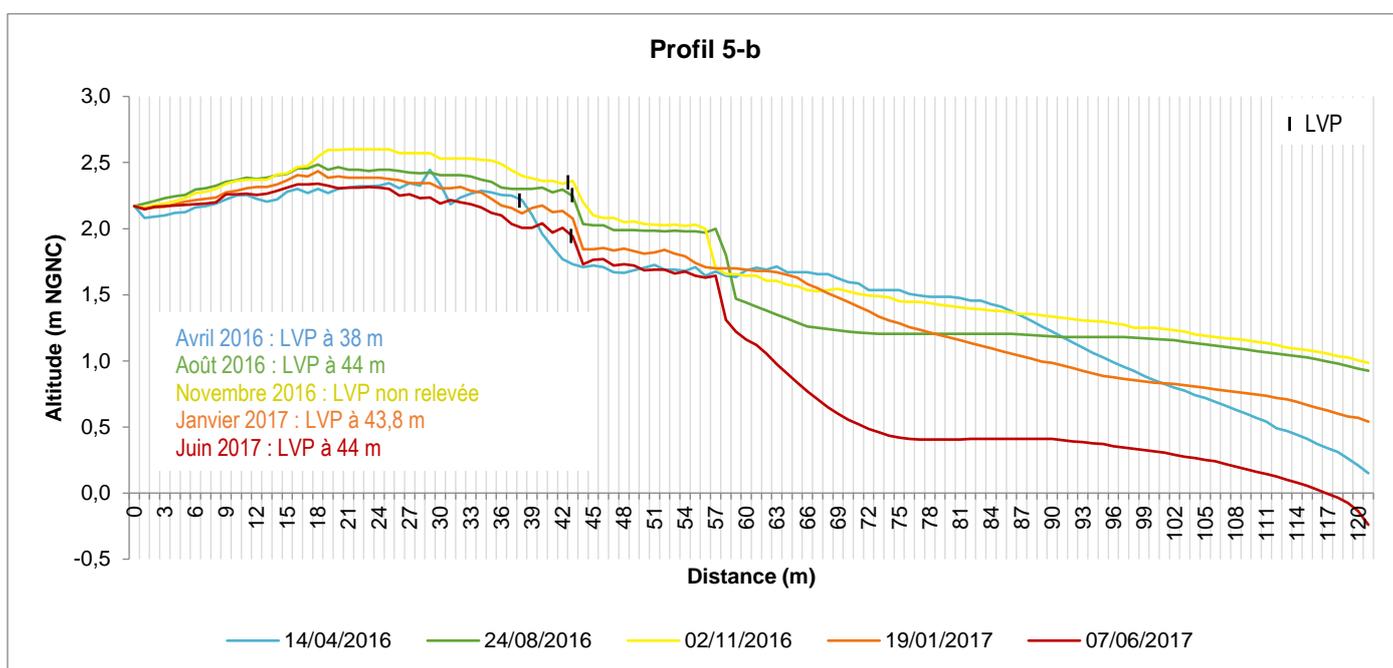


Figure 92 : Profil 5-b à 5 dates (14/04/2016 ; 08/08/2016 ; 02/11/2016 ; 19/01/2017 ; 07/06/2017), Mbé Kouen



Figure 93 : le 24/08/2016, formation d'un talus sur le profil 5b bien visible sur le profil. Source : DENV



Figure 94 : le 05/06/2017, talus d'érosion toujours actif. Source : OBLIC

A travers l'analyse de ces trois secteurs, nous pouvons formuler certaines hypothèses quant à des redistributions de sédiments qui pourraient avoir lieu au sein du système fermé « îlot-plateforme récifale ». Ainsi, nous avons montré que le S3 connaissait une érosion importante durant la période estivale excepté en bordure nord. Ainsi, un certain volume perdu au sud de l'étendue sableuse pourrait être transféré vers le nord-est et alimenter la bordure actuelle. Du sable pourrait se trouver davantage au nord, ce que nous ne pouvons vérifier au regard des limites géographiques de nos MNT.

Une seconde hypothèse relative à l'origine des sédiments qui alimenteraient la bordure nord de l'étendue sableuse serait la suivante : le volume perdu en été au niveau du S2 serait transféré par l'énergie de vagues en provenance du SSO (les australes) vers le nord.

Une alimentation en sédiments de la partie nord de la queue de comète très importante au cours de l'été, quelle provienne du sud du S3 ou bien du S2, suggérerait un déplacement de l'îlot vers le nord-ouest. La réelle dynamique de Mbé Kouen ne pourra être identifiée que par des données acquises ultérieurement qui viendraient étayer les observations actuelles et confirmer ou infirmer ces hypothèses.

3. Tentative de corrélation entre les observations géomorphologiques et les données issus des capteurs océanographiques.

Nous venons d'analyser et de présenter certains éléments d'interprétation relatifs à l'évolution des îlots entre début 2016 et juin 2017. Les capteurs océanographiques nous renseignent sur les régimes de vagues observés au large et à proximité des îlots. Ainsi, nous pouvons tenter de corréler nos observations et interprétations géomorphologiques avec ces données.

Entre mai 2016 et juin 2017, les capteurs ont enregistré en continue des données. Les vents dominants qui surviennent tout au long de l'année, les alizés, génèrent une houle locale d'orientation SSE, à l'origine de vagues haute fréquence/courte période. Les australes (d'orientation SSO), correspondrait à une houle au large générant des vagues basse fréquence/longue période dans le lagon.

La côte de Larégnère exposée aux alizés (S2) possède un bilan sédimentaire négatif sur l'année, alors que la côte nord-est (S1) est quant à elle excédentaire. Nous supposons qu'un transfert de sédiments saisonnier existe. Au cours de la période hivernale, l'énergie des vagues générées par les alizées (haute fréquence/courte période) serait à l'origine d'un transfert vers le nord-ouest. En saison estivale, l'énergie de la houle générée par les coups d'ouest, arrivant directement sur la côte nord-est (S1) provoquerait un transfert de sédiments vers l'ouest.

Le secteur 3 (côte sud-ouest de l'îlot) a un bilan sédimentaire négatif sur l'année. Il est exposé aux houles d'australes et perd davantage de sédiments en hiver qu'en été. L'énergie combinée des vagues basse fréquence/haute période et des vagues infragravitaires pourrait être responsable de cette perte de sédiments bien que cette énergie soit atténuée en arrivant sur le récif frangeant de la plate-forme récifal (frottement sur le platier et faible profondeur). Les données issues des capteurs nous apprennent que l'énergie de ces vagues reste importante en arrivant sur l'îlot car ce dernier se trouve dans l'axe de la passe de Uitoé, contrairement à Mbé Kouen.

Le déplacement vers le nord-est de l'îlot Mbé Kouen pourrait être dû à l'énergie combinée des trois régimes de vagues (alizées, australes et vagues infra gravitaires). Nous avons souligné que le déplacement de l'îlot est plus important durant la saison estivale, ainsi, les vagues basse fréquence/courte période pourraient avoir une influence plus importante.

Section 3. Discussion des résultats

1. Une analyse de l'évolution récente des îlots limitée

L'analyse diachronique de l'évolution des îlots Larégnère et Mbé Kouen à partir des LVP à plusieurs dates nous a permis de réaliser une quantification de l'érosion du système côtier « îlot ». Cependant, cette analyse est limitée dans le temps et couvre à peine une décennie (12 ans pour le cas de Larégnère, 8 ans pour le cas de Mbé Kouen), contrairement à des études similaires que l'on retrouve dans la littérature scientifique qui s'étalent sur plusieurs décennies et jusqu'à plus d'un siècle. Nous citons quelques exemples ci-dessous :

- « **Evolution historique du littoral basque français** » (Aubié et al. 2011), est une étude menée dans le cadre de travaux du BRGM, qui s'appuie sur diverses sources de données et s'étale de 1871 à 2000 (anciennes cartes, cartes postales, images aériennes, satellites), ce qui équivaut à un laps de temps de 171 ans.

- « **Évolution récente de la ligne de rivage en baie d'Audierne : de Penhors à la pointe de la Torche** » (2007) est une étude menée par Faye et al. sur une période couvrant 1781 (carte des ingénieurs géographes) à 2004 (levés topographiques) ;

- « **Evolution du trait de côte de Tabarka Bouterfess, nord-ouest de la Tunisie** » (Halouani et al., 2007) concerne quant à elle une période de quarante ans, de 1963 à 2001 ;

- « **Etude diachronique et historique de l'évolution du trait de côte de la baie de Tanger (Maroc)** » (Abdellaoui et al., 2007) s'appuie principalement sur des missions de photographies aériennes sur une période de 25 ans et sur d'autres documents iconographiques couvrant plus de 150 ans ;

- « **Dynamique du trait de côte sur les littoraux sableux de la Mauritanie à la Guinée-Bisseau** » (Faye, 2010) analyse aux échelles régionales et locale la mobilité des littoraux d'Afrique de l'Ouest à partir de cartes anciennes, de photographies aériennes et satellites sur la période 1927-2005 ;

- enfin, « **Evolution mi-séculaire des côtes sédimentaires du département du Finistère** » (Blaise et al., 2014) présente une analyse diachronique de la ligne de rivage du département sur une soixantaine d'années (1959-2009).

La faible couverture par des photos aériennes et images satellites explique que nous n'ayons pas pu remonter plus loin dans le temps. Les missions de vol pour les acquisitions de photos couvrent la terre et peu le lagon calédonien. Sans prétendre mener une étude diachronique approfondie, notre travail s'est vu limité par un premier obstacle, seules trois sources d'images (aériennes et satellites) existent : la Province Sud, l'entreprise GIE SERAIL et les images satellites Digitale Globe (Google Earth). Outre ces sources de données limitées, le nombre d'images récoltées est également faible car peu d'images sont disponibles sur les îlots du lagon sud calédonien.

Ce manque de données a conduit à un deuxième frein à notre analyse. Effectivement, la prise en compte des facteurs de forçages physiques tels les variations du niveau marin ou les événements météorologiques notables est incomplète. Il aurait fallu par exemple pouvoir disposer d'images avant et après le passage d'un événement extrême, par exemple afin de pouvoir lui attribuer telle ou telles conséquences aux changements morphologiques observés sur les îlots.

Une troisième entrave est à prendre en compte dans l'interprétation des résultats que nous avons obtenus : la marge d'erreur, définie dans le chapitre précédent (chapitre 2 – section 2). Elle est égale à 2m sur 12 ans ou 8 ans ce qui équivaut à des valeurs de 0,17 m/an pour Larégnère et 0,25 m/an pour Mbé Kouen. Ainsi, elle apparaît dans la représentation des résultats (Figure 64 et Figure 73 p75 - 80). Nous l'avons donc prise en compte seulement à l'échelle temporelle de l'ensemble de la période étudiée. Confrontés à cette même interrogation quant à la prise en compte dans l'interprétation des résultats de la marge d'erreur, dans leur étude portant sur des littoraux à faible évolution en métropole (le delta du Golo en Corse et Le Touquet dans le Nord-Pas-de-Calais), Gaillot et Chaverot (2001) ont choisi de définir un troisième type d'évolution des secteurs côtiers, dont les valeurs d'avancée ou de recul sont inférieures à la marge d'erreur : une évolution « indéterminée ».

Seuls deux des secteurs de notre étude possèdent un recul dont la valeur est inférieure à la marge d'erreur calculée :

- le secteur 2 de Larégnère (-0,15m/ans sur la période 2004-2016) ;

- le secteur 5 de Mbé Kouen (-0,22 m/an sur la période 2009-2017).

Leur situation qui tend à l'érosion est donc à nuancer et peut être qualifiée d'indéterminée.

Un dernier point de notre méthodologie appliquée semble être à discuter. En effet, nous avons choisi pour analyser et cartographier les évolutions récentes des îlots de réaliser une ligne de base à l'intérieur de l'îlot et de la découper en transects perpendiculaires tous les 10 mètres manuellement. Deux outils pour l'études des côtes sont utilisés : l'extension ArcGIS DSAS et

le logiciel d'analyse de la Mobilité du Trait de Côte développée par le Centre d'Etudes Techniques et d'Equipeement (CETE) Méditerranée (Mallet et Michot, BRGM, 2012), dont nous nous sommes inspiré pour la définition de notre méthode. Ces outils permettent une analyse automatique de l'évolution de longs linéaires côtiers comme ceux que l'on retrouve sur la côte aquitaine par exemple (Aubié et al, 2011). Nous n'avons pas pu utiliser ces logiciels, le littoral des îlots étant de forme arrondie donc non rectiligne. De plus, la méthode manuelle appliquée n'a pas été spécialement chronophage, les îlots étant de petite surface.

2. Une analyse de l'évolution actuelle des îlots selon plusieurs méthodes comparables

2.1. Les profils de plages : entre profils cadres, DGPS et issus des modèles

Les profils de plage que nous avons analysés proviennent de données acquises par l'outil cadre d'Emery. Méthode manuelle mise en œuvre par plusieurs opérateurs du projet, elle peut comporter des biais. Nous allons, dans un premier temps, comparer les résultats alors obtenus avec des profils de plage créés à partir de levés DGPS. Nous verrons ensuite les différences que l'on peut relever entre des profils de plage issus de données topographiques « réelles » directement levées sur les îlots et les profils issus de données interpolées d'un modèle MNT ou MNS.

Profils cadres / profils DGPS : l'exemple des profils 1-a (Larégnière) et 5-b (Mbé Kouen) du 02/11/2016

Au cours des missions, nous avons levé des profils simultanément au cadre et au DGPS selon ma méthode suivante : la perche du DGPS était placée à l'emplacement exact de la mire du cadre juste après le passage du cadre sur le point.

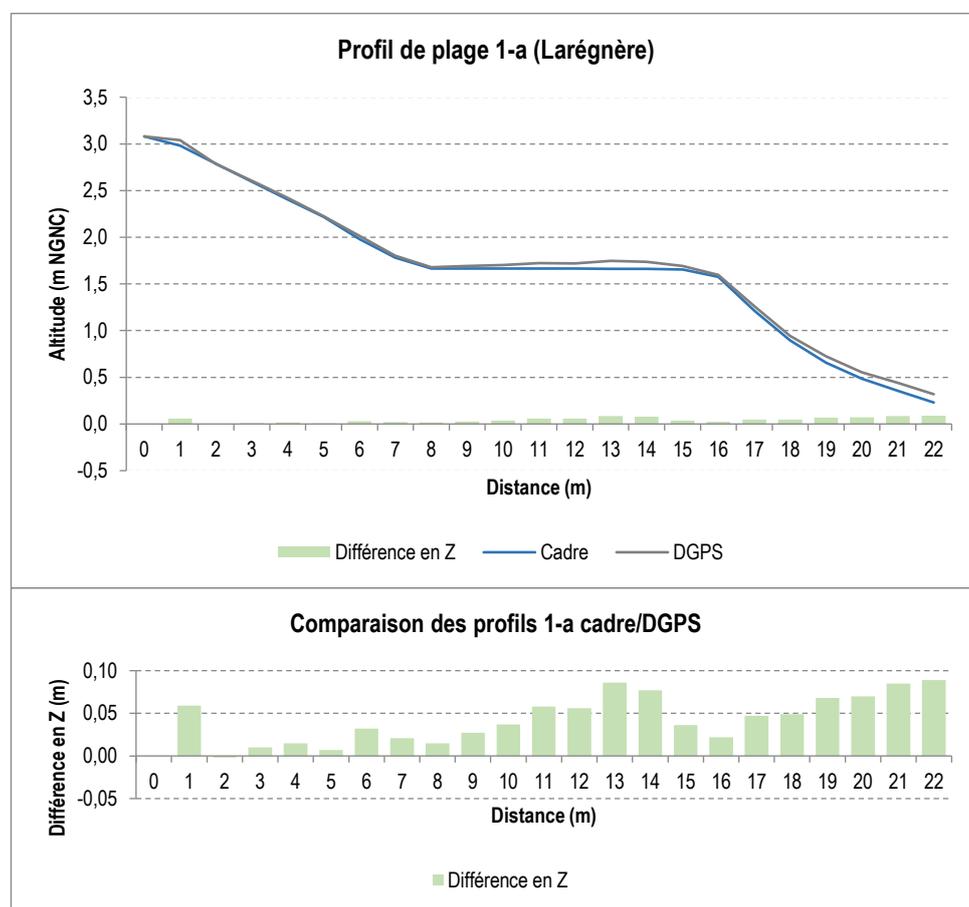


Figure 95 : représentations du profil 1-a de Larégnière réalisées avec les données acquises au cadre d'Emery (courbe bleue) et les données acquises au DGPS (courbe grise) le 02/11/2016.

La différence de la valeur topographique mesurée tous les mètres le long du profil apparaît en vert pastel. Le second graphique est un agrandissement de la représentation de cette différence observée en Z.

Les différences observées entre le profil « cadre » (courbe bleue) et le profil « DGPS » (courbe grise) sur le profil 1-a de Larégnière (Figure 95) sont toujours inférieures à 0,10 mètres. Elles apparaissent donc relativement faibles. La différence en Z la plus importante se retrouve au niveau du dernier mètre du profil (point n°22) et est de 0,09 m. La précision du DGPS est évaluée à 3 cm par les géomètres de la province Sud, ainsi, on peut considérer que les valeurs topographiques levées au cadre le long du profil 1-a sont validées.

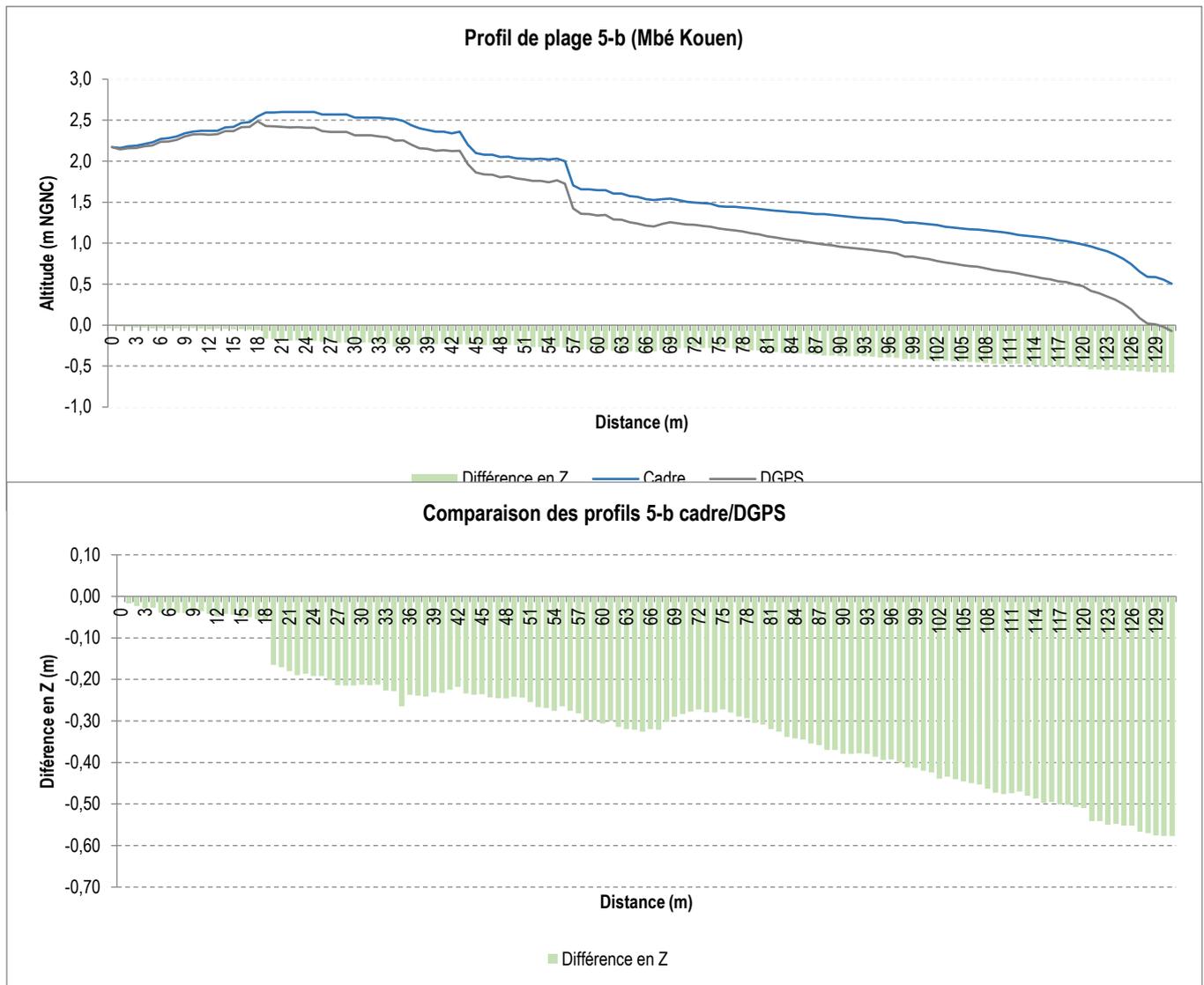


Figure 96 : représentations du profil 5-b de Mbé Kouen réalisées à partir des données acquises au cadre d'Emery (courbe bleue) et des données acquises au DGPS (courbe grise) le 02/11/2016.

La différence de la valeur topographique mesurée tous les mètres le long du profil apparaît en vert pastel. Le second graphique est un agrandissement de la représentation de cette différence observée en Z.

Le long de ce profil (5-b), les différences en Z entre profils « cadre » (courbe bleue) et « DGPS » (courbe grise) sur la Figure 96 sont nettement supérieures à celles constatées sur le profil de plage précédent (1-a). Du 1^{er} mètre au point n°18 du profil, cette différence est inférieure à 0,10 mètres. A partir du point n°19 et jusqu'au bout du profil, on note une différence en Z d'une valeur comprise entre 0,10 et 0,60 mètres. Le dernier point du profil (n°131) est également là où on relève la différence la plus grande.

La pente du profil selon les deux méthodes est toutefois semblable. En effet, on observe deux talus sur les deux profils. Le premier haut de talus se situe au point n°43 à une altitude NGNC de 2,36 m levée au cadre, 2,13 m levée au DGPS. Le second talus se trouve au point n°56 et à une altitude NGNC de 2 m levée au cadre, 1,72 m levée au DGPS.

Cette différence en Z met en lumière des erreurs humaines qui peuvent survenir lors de levés au cadre d'Emery. Elles peuvent arriver lors du levé terrain en lui-même (mauvaise lecture du repère ou erreur dans la prise de note de la valeur énoncée par l'opérateur) ou au cours de la retranscription des valeurs topographiques inscrites sur la feuille de terrain dans un classeur Excel.

Ainsi, des différences en Z entre les deux méthodes de levé de terrain peuvent exister. Elles sont variables d'un levé à l'autre car elles dépendent fortement des opérateurs terrain. Le cadre reste une méthode fiable si les levés sont réalisés avec rigueur.

Profils « réels » / profils « interpolés » : l'exemple du profil 5-b (Mbé Kouen) du 02/11/2016

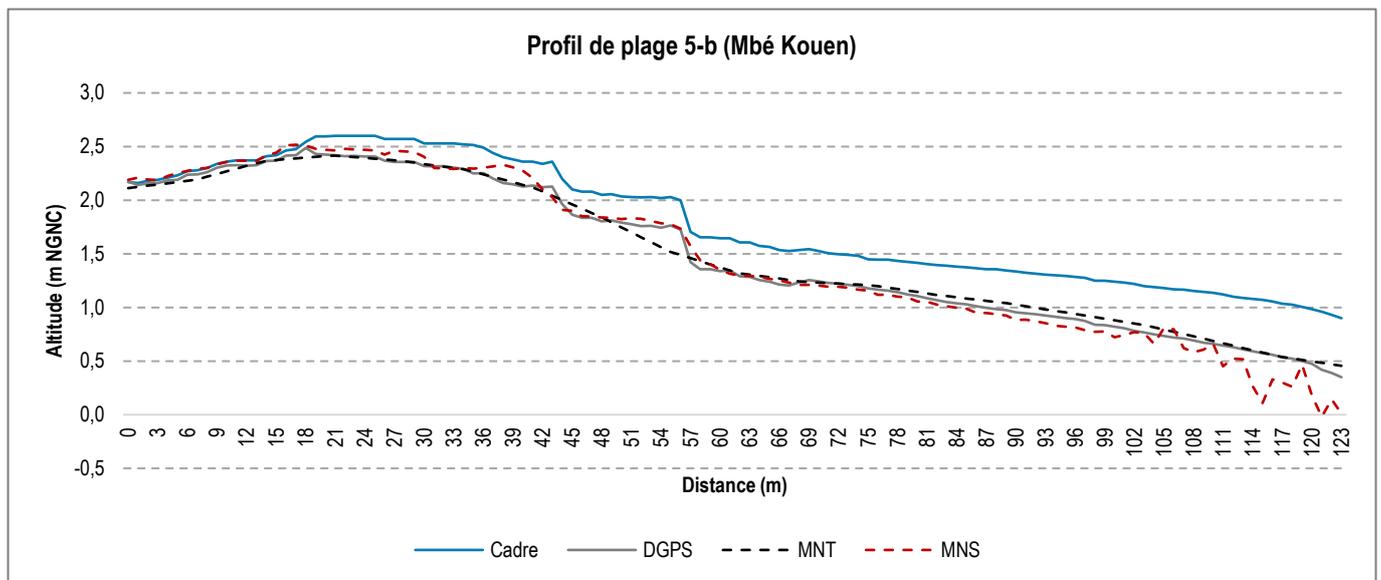


Figure 97 : représentations du profil 5-b de Mbé Kouen du 02/11/2016 réalisées à partir des données acquises au cadre d'Emery (courbe bleue en trait plein), au DGPS (courbe grise en trait plein) et à partir de modèles interpolés : d'un MNT (courbe noire en pointillés et d'un MNS issu d'un traitement photogrammétrique (courbe rouge en pointillés).

Les profils « réels » (cadre et DGPS représentés par des courbes en trait plein) et les profils « interpolés » à partir d'un MNT et d'un MNS (représentés par des courbes en pointillés) générés pour le premier à partir de levés terrestres au DGPS et à partir d'orthophotographies levées par drone pour le deuxième présentent des différences notables (Figure 97)

Tout d'abord, le profil issu du MNT du 02/11/2016 de Mbé Kouen réalisé à partir d'une grille de points à maille carrée (10 x 10 mètres) et d'une résolution de 5 mètres présente une pente lissée, assez éloignée de ce que l'on observe sur les profils « réels » ou sur celui issu du MNS. On n'y détecte pas les ruptures de pentes tels que les talus par exemple ainsi que tous les changements de morphologie dont les objets mesurent moins de 5m.

Le profil issu du MNS du 02/11/2016 de Mbé Kouen réalisé à partir d'images acquises par drone qui ont ensuite subi un traitement photogrammétrique, présente une pente proche de celle obtenue avec les mesures DGPS. Les ruptures de pentes sont bien visibles. On note cependant un décalage pour le haut de talus localisé au niveau du point n°43 sur les profils « réels » qui est alors situé 2 mètres avant au niveau du point n°41. Le profil issu du MNS présente une autre anomalie ; en bas de plage, la présence d'eau peu déformer les valeurs en Z, c'est pourquoi nous observons de nombreuses ruptures de pentes qui n'existent pas sur les profils « réels » entre les points n°103 et 123 du profil.

De ce fait, les profils « interpolés » issus des MNT « semi de points » sont difficilement interprétables leur résolution étant trop faible pour rendre compte des ruptures de pentes. Les profils « interpolés » issus des MNT « photogrammétriques » sont quant à eux plus précis et permettent de bien identifier ces ruptures dans la topographie du terrain hormis en bas de plage à partir de la limite entre le sable et l'eau de mer. L'avantage du MNT par rapport au MNS est l'acquisition des données au niveau de l'eau, ce qui permet de déceler les variations et la mobilité des zones sableuses situées sous l'eau.

Les modèles : quelles différences de précision entre MNT et MNS ?

Pour rappel, un Modèle Numérique de Terrain (MNT) est une représentation en trois dimensions (x,y,z) de la surface d'un terrain qui ne prend pas en compte les objets présents à sa surface tels que la végétation ou les bâtiments contrairement au Modèle Numérique de Surface (MNS) qui prend en compte à la fois le relief du sol et les éléments du sursol c'est-à-dire les arbres et le bâti.⁴² Pour l'analyse du système-plage des îlots, on a ainsi masqué la végétation et l'eau de mer afin d'obtenir un MNT de la zone intertidale.

⁴² Cf. Chapitre 2 – section 2

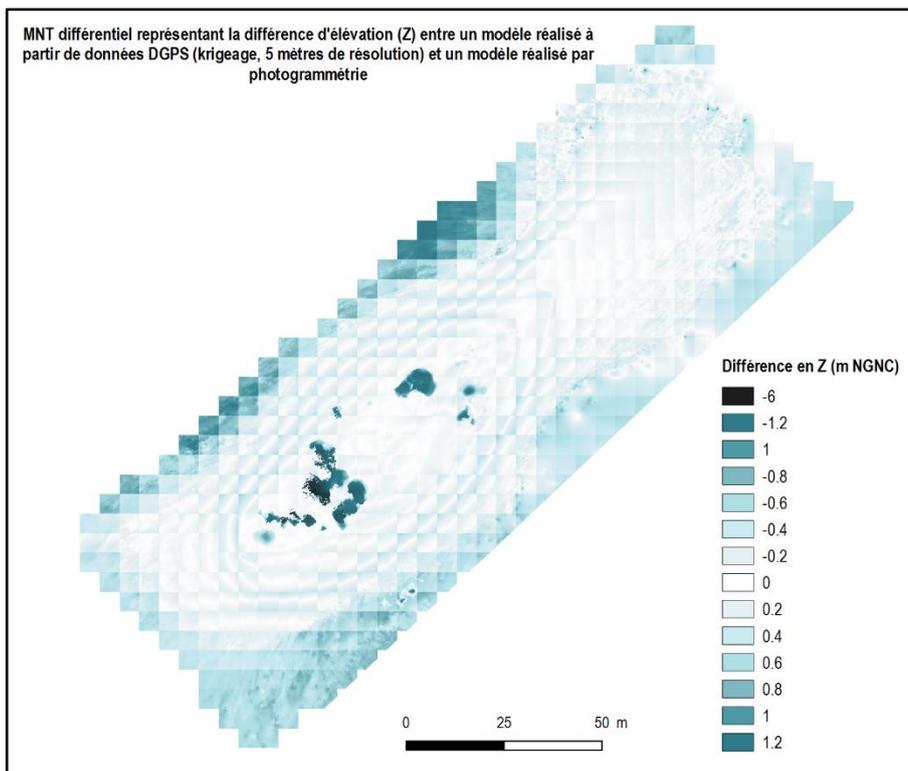


Figure 98 : Représentation de la différence d'élévation (Z) entre un MNT (krigeage, 5 mètres de résolution) et un MNT issu de traitements photogrammétriques (résolution de 1,7 cm)

On observe les plus grandes différences en Z (bleu foncé) au niveau de la végétation et de l'eau de mer (Figure 98), mais ces zones ne sont pas prises en compte dans l'analyse des MNT « photogrammétriques ». Les différences en Z au niveau de la zone intertidale, comprise entre le haut de plage délimité par la LVP et la ligne de rivage, sont incluses entre -0,6 et 0,6 m. On a donc une différence maximale de 60 cm, observée en bordure des pixels notamment. Cette différence au niveau du pourtour des pixels est peut-être due à des résolutions foncièrement différentes (de 5 m pour l'un, de 1,7 cm pour l'autre). La grande hétérogénéité des méthodes d'acquisition des données (levés terrestres pour le MNT « semi de point », aériennes pour le MNT « photogrammétrique ») et de génération des deux MNT limite à fortiori notre interprétation de ce différentiel.

L'analyse d'un profil de plage (le profil 5-b – Mbé Kouen) que nous avons introduit précédemment peut nous permettre de mieux saisir les écarts entre MNT issus des mesures DGPS et MNT de traitements photogrammétriques. La Figure 99 ci-dessous montre des représentations du profil 5-b de Mbé Kouen à la date du 02/11/2016 réalisées à partir d'un MNT « semi de points » (courbe noire en pointillés) et d'un MNT « photogrammétrique » (courbe rouge en pointillés).

Le long du profil, on remarque une différence en Z maximale de 0,5 m (point n°121). Cette valeur confirme ce que l'on pressentait à la lecture du différentiel (Figure 98). Les deux profils présentent la même pente. Ils diffèrent cependant dans la représentation des ruptures de pente, comme nous l'avons expliqué antérieurement : le MNT « semi de points » expose un profil « lissé » tandis que le MNT « photogrammétrique » propose un profil qui rend compte des ruptures de pentes telles que les talus. C'est d'ailleurs au niveau des deux talus du profil qu'on observe les plus importantes différences en Z (entre 0,3 et -0,2 m), si l'on fait abstraction du bas de plage pour les raisons évoquées plus haut.

Enfin, une troisième figure nous permet de comparer MNT « semi de points » et MNT « photogrammétrique ». La Figure 100 affiche ainsi deux MNT différentiels entre novembre 2016 et avril 2017 pour le premier, entre novembre 2016 et juin 2017 pour le second. Ils correspondent tous deux à la même période de l'année : l'été austral durant laquelle nous avons vu que les phénomènes d'érosion et d'accrétion sont particulièrement prononcés. On y observe les mêmes tendances au niveau des secteurs analysés dans la section précédente. Cependant, les courbes de niveau du MNT différentiel « photogrammétrique » sont plus denses, plus précises aussi et permettent ainsi, comme le long des profils de plage, de souligner les ruptures dans la topographie du système-plage de l'îlot.

On peut donc souligner que les MNT « photogrammétriques », grâce à leur résolution centimétrique, sont les modèles qui mettent le mieux en lumière les détails de la topographie de la zone intertidale de l'îlot. Les MNT « semi de points », de moindre résolution, présentent tout de même l'avantage d'étendre la représentation des valeurs topographiques au-

delà de la LVP en haut de plage et au-delà de la ligne de rivage, dans la zone subtidale, dont l'analyse peut révéler des dynamiques sédimentaires particulières alors indétectables à la lecture d'un MNT « photogrammétrique ».

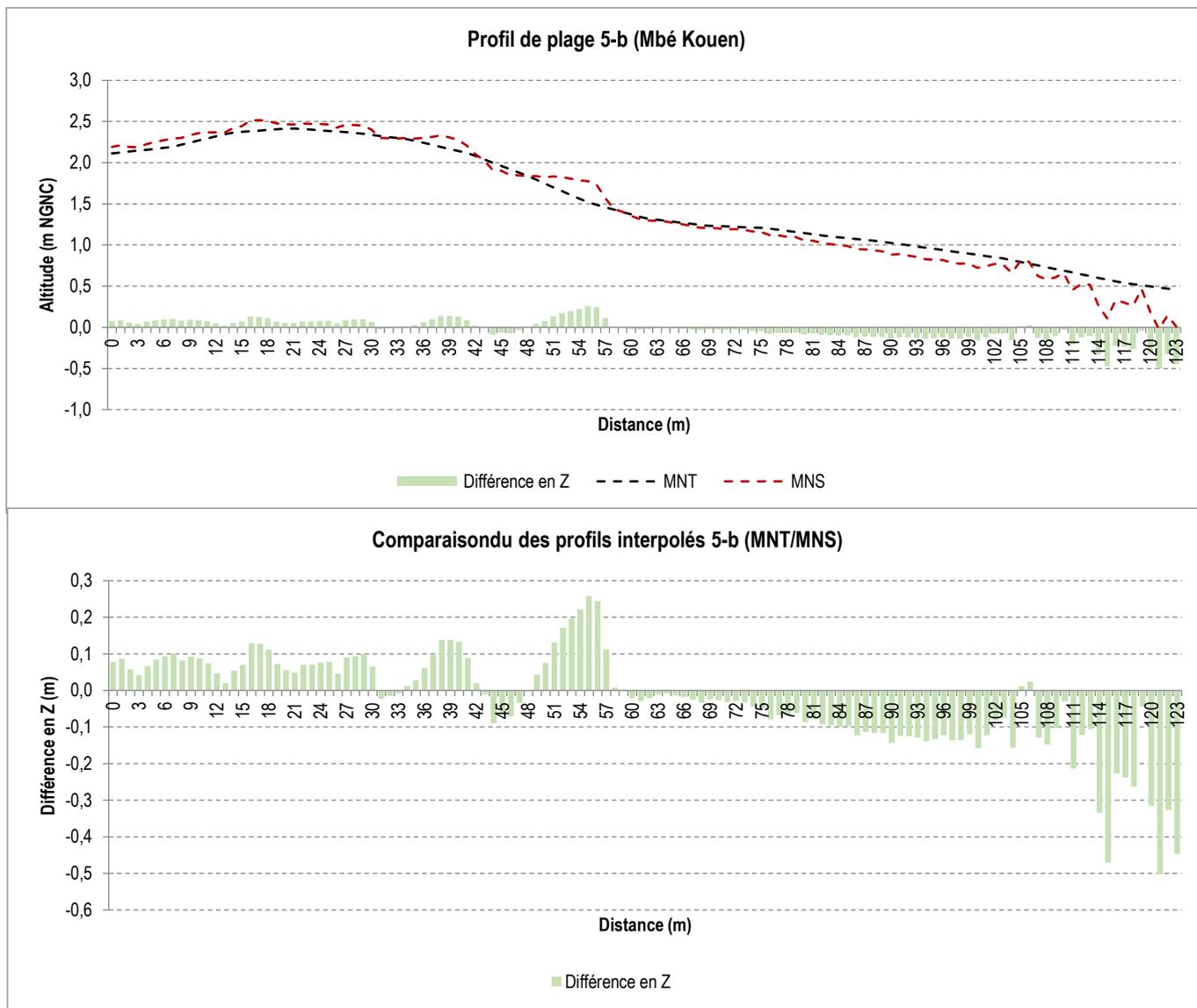


Figure 99 : représentations du profil 5-b de Mbé Kouen à la date du 02/11/2016 réalisées à partir d'un MNT « semi de points » (courbe noire en pointillés) et d'un MNT « photogrammétrique » (courbe rouge en pointillés).

La différence de la valeur topographique mesurée tous mètres le long du profil apparaît en vert pastel. Le second graphique est un agrandissement de la représentation de cette différence observée en Z.

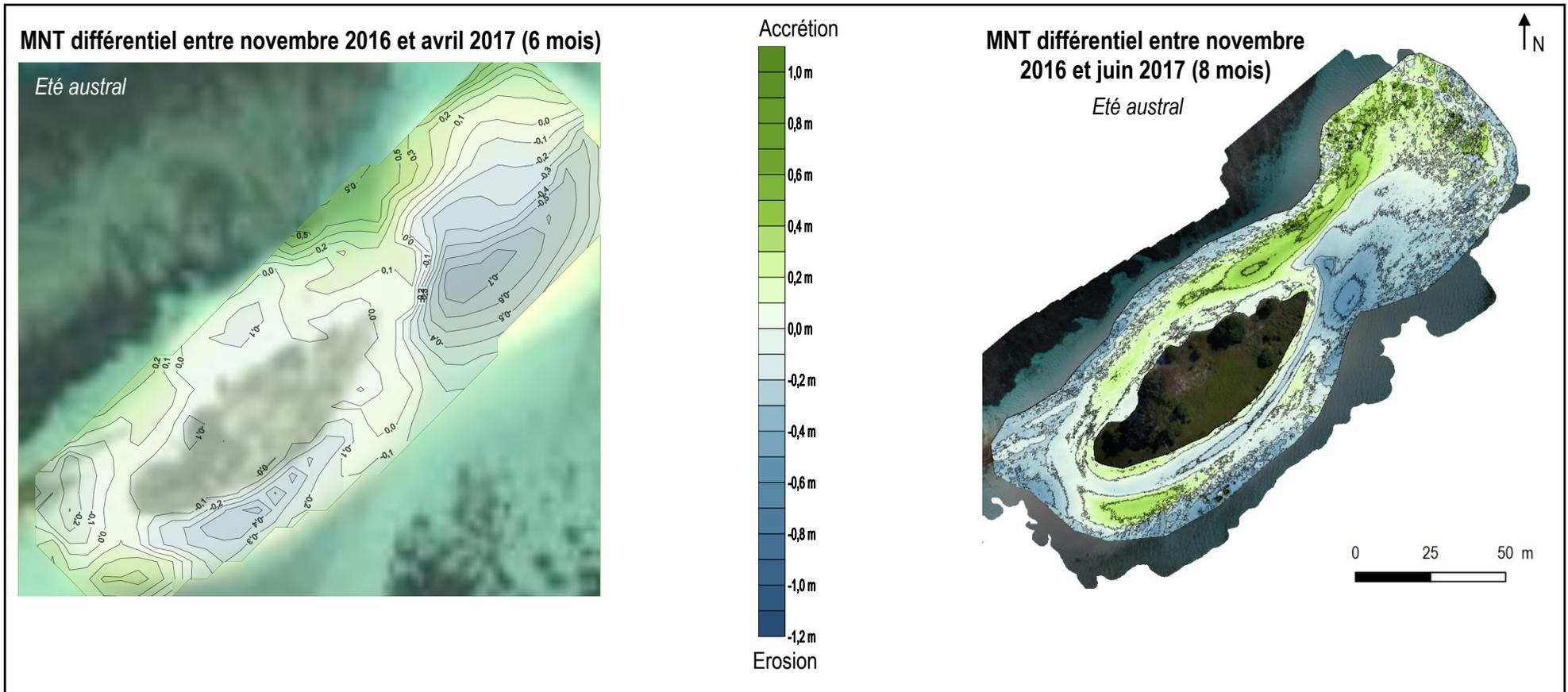


Figure 100 : A gauche, MNT différentiel de l'îlot Mbé Kouen entre novembre 2016 et avril 2017, qualifié de MNT différentiel « semi de points » car réalisés à partir de mesures DGPS acquises sur le terrain. A droite, un MNT différentiel de l'îlot Mbé Kouen entre novembre 2016 et juin 2017, qualifié de MNT différentiel « photogrammétrique » car issu du traitement par photogrammétrie d'images acquises par drone.

Avantages et inconvénients de chaque méthode

Nous venons de comparer l'ensemble des méthodes de levés de mesures topographiques mis en œuvre lors des missions terrain sur les îlots ainsi que la représentation des résultats. Le Tableau 21 ci-dessous présente les différents avantages et inconvénients de chaque méthode testée selon trois critères principaux : l'acquisition des données, leurs traitements et enfin, les rendus obtenus servant à leur analyse et interprétation.

Tableau 21 : Avantages et inconvénients des méthodes d'acquisition et de traitement de données topographiques testées dans notre étude

	Cadre	DGPS	Drone
Acquisition			
Coût du matériel	Faible	Elevé	Elevé. Nécessité de posséder un DGPS afin de lever les coordonnées des cibles qui serviront au géoréférencement du modèle.
Eléments logistiques à prendre en compte	Facile à transporter et peut s'utiliser quel que soit les conditions météorologiques. L'implémentation de profil de plage nécessite de déterminer des stations de références (têtes de profil) stables, visibles et pérennes qui sont soit des repères fixes existants (piquets, bornes géodésiques, poteaux,) soit des stations créées (piquet bétonnés à la base ou clou topographique par exemple) Les levés de profil de plage au cadre nécessitent de relever précisément la position et l'altitude au DGPS des stations de référence.	Relativement facile à transporter : deux mallettes renfermant d'une part le récepteur GPS (la base) et d'autre part, le GPS mobile ainsi que le pied pour la base.	Un peu plus difficile à transporter , car il doit s'accompagner d'un DGPS. Il ne peut pas être utilisé si les conditions météorologiques ne sont pas optimales, comme lors de vents forts supérieurs à 15 nœuds ou en cas de pluie (limites météorologiques).
Ressources humaines nécessaires à la mise en œuvre sur le terrain	Les levés topographiques au cadre peuvent se réaliser à deux opérateurs . L'apprentissage de la méthode est rapide.	Les opérateurs doivent être formés à la maîtrise de l'outil. Faire appel à des professionnels (topographes ou géomètres) peut s'avérer nécessaire. Sur le terrain, les levés se font à deux opérateurs.	Le vol d'un drone est réglementé , l'opérateur doit posséder une habilitation (manuel d'activité professionnel déposé auprès de l'Aviation civile, brevet de pilote avec la théorie du brevet de pilote d'ULM). Une assurance de responsabilité civile est également demandée. Sur le terrain, une personne se charge du levé, et 1 à 2 personnes installent et effectuent les mesures des coordonnées des cibles.
Temps d'acquisition	D'une à plusieurs heures selon le nombre et la taille des profils.	D'une demi-journée (Mbé Kouen) à une journée (pour Larégnère) à deux opérateurs afin de quadriller l'ensemble de l'îlot selon la méthode d'acquisition grille de points à maille carrée de dimension 10 x 10 mètres. L'installation de la base du DGPS au départ prend environ 30 minutes .	Rapide , la durée de vol est d'environ 20 minutes pour chaque îlot. Un premier vol vertical est effectué en 10 minutes, puis un second du même temps pour acquérir des images obliques. L'installation de la base DGPS (pour le levé des coordonnées des cibles), l'installation des cibles et les levés DGPS peuvent prendre 1 à 2 heures supplémentaires .
Traitements			

Coût du matériel/logiciels nécessaires	Faible. Un ordinateur et un tableur suffisent. L'extension Profiler du tableur <i>Excel</i> (Microsoft Office) peut être un plus pour la création et la comparaison des profils de plage.	Faible coût du matériel, les données peuvent être traitées sous logiciels SIG libres ou en open source comme <i>Qgis</i> . L'utilisation du logiciel Surfer, spécialisé dans le traitement de données topographiques, nécessite d'investir dans une licence.	Le coût du matériel nécessaire aux traitements qui se révèlent lourds peut être élevé . L'ordinateur doit posséder une rame suffisante pour traiter un grand nombre d'images drones. Les logiciels de traitements photogrammétriques sont pour la plupart sous licence . C'est le cas d'Agisoft Photoscan.
Temps de traitement	Rapide	Relativement rapide	Temps de traitement relativement long , variables selon la qualité (basse, moyenne ou haute) choisie et le nombre d'images à traiter.
Formation	Prise en main de l'extension Profiler facile et rapide	Les opérateurs doivent maîtriser les logiciels SIG ou spécialisés et choisir les méthodes et résolutions d'interpolation appropriées.	La maîtrise des logiciels de photogrammétrie demande un certain temps.
Rendus			
Type	Graphes représentant l'altitude (en m NGNC) en fonction de la distance le long du profil. Une analyse statistique de la comparaison entre plusieurs profils à des dates différentes est possible.	Modèle Numérique de Terrain (MNT). La méthode d'interpolation sélectionnée pour notre étude est le krigeage.	Modèle Numérique de Surface (MNS) dans un premier temps. L'application d'un masque sur la végétation et l'eau de mer nous permet d'obtenir un MNT de la zone intertidale des îlots.
Résolution	Fine	Faible (5 mètres, dû à la méthode d'acquisition du nuage de points selon une maille carrée de dimension 10 x 10 mètres). Une résolution plus fine (1 m par exemple) peut engendrer une interpolation trop importante et par conséquent, une perte d'informations.	Très fine , de niveau centimétrique (comprise entre 1 et 2 centimètres).
Aspects positifs	Permet d'observer les dynamiques sédimentaires à une échelle très fine tout au long de la plage	Permet d'observer les mouvements d'érosion ou d'accrétion , le calcul de MNT différentiels entre deux dates, des calculs de volumes de sédiments (gains et pertes). L'ensemble de l'îlot et couvert	Permet d' observer finement la topographie de la zone intertidale des îlots, le calcul de MNT différentiels entre deux dates et des calculs de volumes .
Limites	Des erreurs de levé peuvent poser problème car l'erreur se répète tout au long du profil (mesures cumulées). Il faut également toujours garder le même azimut pour éviter toute erreur d'une mission à l'autre. Il ne permet pas de repérer des changements de morphologie à moins d'un 1 m. Nécessité de réaliser des levés en aller-retour pour effectuer un contrôle des mesures pour le moment, levés « en antenne »	De résolution trop faible, les MNT générés ne permettent pas d'observer les ruptures de topographie. Une évolution dans la méthode d'acquisition des données avec l'acquisition de nombreux points au niveau des ruptures de pentes observées sur le terrain pourraient améliorer la fiabilité des modèles générés	Les MNT générés ne couvrent pas l'ensemble de l'îlot, mais seulement la partie située entre la LVP et la limite sable/eau. Des données intéressantes sur les dynamiques qui se déroulent en haut de plage ou dans la zone subtidale ne peuvent pas être analysées.

Les trois méthodes employées sont complémentaires. Elles ont permis une analyse fine des dynamiques sédimentaires observées à des pas de temps saisonniers. D'un côté, les profils de plage générés à partir des levés au cadre permettent d'observer des portions de plages avec une très fine précision et offrent ainsi la possibilité d'analyser les dynamiques sédimentaires à une très petite échelle, tout comme les MNT « photogrammétriques ». D'un autre côté, les MNT « semis de points » comportent l'avantage de modéliser la topographie de l'îlot dans son ensemble. Un ajustement de cette dernière méthode pourrait permettre d'affiner la précision des données, notamment une densification de la prise de points au niveau des ruptures de pentes.

3. Perspectives pour la continuité du suivi des évolutions morphologiques de Larégnère et Mbé Kouen

L'étude présentée dans ce rapport pose les fondements pour une analyse quantitative et qualitative des évolutions morphologiques des îlots Larégnère et Mbé Kouen. Ainsi, nous avons testé sur les objets géographiques singuliers que sont les îlots du lagon calédonien différentes méthodes d'acquisition puis de traitement des données. Cette méthodologie pourra être appliquée à d'autres îlots mais également aux autres littoraux calédoniens en fonction de leur type dans le cadre de futurs travaux menés par l'OBLIC.

Les éléments issus d'une analyse à court terme sur plus d'une année (2016-2017) réalisée au cours de ce stage permettent l'identification et la définition de certaines dynamiques saisonnières. Afin de poursuivre ce premier travail d'interprétation, de confirmer les hypothèses émises et d'avoir plusieurs années de recul sur ces premières observations, il sera nécessaire de poursuivre les acquisitions de données et mesures *in situ* à une fréquence importante et de les capitaliser. Par rapport aux fréquences d'acquisition fixées (3/4 mois pour les profils au cadre et les observations, 6 mois pour les semis de points et profils au DGPS, 6 mois pour les levés au drone⁴³), si nous voulons valider la thèse de la variabilité saisonnière il faut poursuivre des levés tous les 6 mois. De même, si l'on veut des chroniques à haute résolution des évolutions, il faut poursuivre les levés tous les 3 mois. Ainsi, nous proposons une continuité des suivis saisonniers (DGPS et drone), mensuels (cadre et observations) ainsi qu'événementiels (après l'occurrence d'un événement météorologique possiblement morphogène, *Garcin et Vendé Leclerc, 2016*).

Le travail de caractérisation des régimes de vents et de vagues à proximité des îlots, dont une campagne d'acquisition s'est déroulée entre juin 2016 et mai 2017 constitue également un travail nécessaire à une meilleure compréhension des dynamiques sédimentaires observées. Il est donc primordial là aussi de pérenniser ce suivi en maintenant les instruments (capteurs de pression) en place afin de disposer d'un recul temporel nécessaire à de telles interprétations.

Eclairés par notre expérience de terrain, nous sommes à présent en mesure de formuler des préconisations sur la mise en place de nouveaux capteurs océanographiques, en bordure nord de la plate-forme récifale notamment. La mise en place de nouveaux profils serait également à envisager sur des secteurs qui se révèlent mobiles d'après les résultats de notre étude, tout en gardant les anciens en place dans un souci de comparaison.

La continuité de cette étude repose sur un partenariat entre la province Sud et les organismes de recherche qui doit se poursuivre sur plusieurs années afin de répondre au besoin de connaissance sur le comportement des îlots du lagon afin d'anticiper au mieux leurs évolutions futures.

⁴³ Cf. Chapitre 2. Section 1, p49

Conclusion

Dans le contexte actuel de changements environnementaux, la communauté scientifique tente d'apporter des éléments de compréhension et de réponse quant à l'évolution de différents compartiments terrestres : océan, atmosphère et lithosphère. Les littoraux, espaces terre-mer à l'interface de ces trois composantes de la planète, constituent des territoires d'études privilégiés de l'impact de ces changements.

L'étude que nous avons menée à l'échelle locale des îlots du lagon calédonien s'inscrit dans cette démarche d'acquisition de connaissance en vue d'une meilleure prise en compte des changements actuels globaux dans la gestion et la protection de ces petites îles basses aux enjeux environnementaux importants pour la biodiversité du lagon (zone de nidification pour les oiseaux et les tortues par exemple), ou encore culturels et touristiques. Ces îlots ont été posés en introduction comme des « laboratoires » pour la mise en place de méthodes de suivi à deux pas de temps : à l'échelle de la saison et à l'échelle d'une décennie.

Une première partie de l'étude proposait de rassembler les données disponibles à plusieurs échelles spatiales : du Pacifique au grain de sable de l'îlot. Les premières données correspondaient à des éléments climatiques et météo-marins qui se déroulent à large échelle (régionale et du sud-ouest Pacifique) tels que l'élévation du niveau marin dans le Pacifique sud-ouest, les cycles de variabilités climatiques comme l'ENSO ou encore les événements cycloniques impactant la Nouvelle-Calédonie. Le second type de données récoltées pour une analyse des îlots était constitué d'images aériennes et satellites en vue d'une analyse à moyen terme des évolutions morphologiques des îlots. Enfin, une très grande partie de l'étude repose sur les données *in situ*, c'est-à-dire acquises sur le terrain, relatives à la topographie des îlots et de leurs plages afin de caractériser les changements morphologiques à une échelle plus fine.

Trois type de levés topographiques ont été mis en œuvre : deux levés terrestres (cadre d'Emery et DGPS) et un levé aérien (drone) pour la représentation de profils de plage et de modèles numériques du terrain des îlots. Les méthodes de traitement de ces données ont également fait l'objet d'une présentation détaillée. La comparaison des méthodes d'acquisition et de traitement a permis de mettre en lumière les limites de l'utilisation de chaque outil. La mise en œuvre des trois techniques sur le terrain est complémentaire et correspond aux besoins de l'étude. En effet, les profils de plages et les modèles nous ont permis de révéler certaines dynamiques saisonnières sur Larégnère et Mbé Kouen.

La difficulté de l'analyse des changements géomorphologiques aux deux échelles de temps de notre étude réside dans une imbrication des échelles d'analyse. Nous avons pu faire correspondre les tendances évolutives à moyen terme avec les données acquises à grande échelle. Par exemple, nous avons pu souligner l'influence des phénomènes La Niña (phase négative de l'oscillation ENSO) avec des périodes de diminution de la superficie des îlots. Au contraire, l'analyse des évolutions actuelles des îlots entre 2016 et 2017 a pu permettre davantage la corrélation des forçages météo-marins tels les vents et houles dominantes (alizés, australes, coup d'ouest) ainsi que les événements météorologiques ponctuels et changement de la morphologie des plages des îlots. Ces changements constatés par le biais de l'analyse des données ont été appuyés par des observations terrains. Cependant, il reste à mieux caractériser les régimes de vagues au large et à proximité des îlots pour confirmer les hypothèses exposées relatives aux dynamiques saisonnières. C'est pourquoi nous encourageons d'une part à une pérennisation du suivi des îlots pour acquérir le recul nécessaire pour définir plus précisément les dynamiques géomorphologiques et d'autre part, nous incitons à une exploitation plus détaillée des données océanographiques.

Bibliographie et webographie

- Aagaard T, Davidson-Arnott R, Greenwood B, and Nielsen J** 2004 Sediment supply from shoreface to dunes: linking sediment transport measurements and long-term morphological evolution. *Geomorphology* 60 205-224
- Ablain M, Cazenave A, Valladeau G, and Guinehut S** 2009 A new assessment of global mean sea level from altimeters highlights a reduction of global trend from 2005 to 2008. *Ocean Science Discussions* 6 31
- Achille C, Adami A, Chiarini S, Cremonesi S, Fassi F, Fregonese L, and Taffurelli L** 2015 UAV-based photogrammetry and integrated technologies for architectural applications—Methodological strategies for the after-quake survey of vertical structures in Mantua (Italy). *Sensors* 15 15520-15539
- Andréfouët S, Cabioch G, Flamand B, and Pelletier B** 2009 A reappraisal of the diversity of geomorphological and genetic processes of New Caledonian coral reefs: a synthesis from optical remote sensing, coring and acoustic multibeam observations. *Coral Reefs* 28 691-707
- Andréfouët S, Torres-Pulliza D, Dosdane M, Kranenburg C, and Murch B** 2004 Atlas des récifs coralliens de Nouvelle-Calédonie. *IFRECOR Nouvelle-Calédonie, IRD, Nouméa* 26
- Aubié S, Genna A, Petijean J, avec la collaboration de C. Mallet et J.P Capdeville** 2005 Evolution historique du littoral basque français, Rapport BRGM/RP-53454-FR
- Aucan J Merrifield M.A, and Pouvreau N** 2017 Historical sea level in the South Pacific from recued archives, geodetic measurements, and satellite altimetry. *Pure and Applied Geophysics*. In press.
- Aucan J, Vendé-Leclerc M, Bricquie M, Dumas P** Wave forcing and morphological changes of the New Caledonia islets. *Comptes Rendus Geosciences*. En soumission
- Avias J** 1959 Les récifs coralliens de la Nouvelle-Calédonie et quelques-uns de leurs problèmes. *Bull Soc géol Fr* 7 424-430
- Avias J, and Coudray J** 1967 Premiers enseignements apportés par un forage réalisé dans le récif barrière de la côte sud-ouest de Nouvelle-Calédonie. *CR Acad Sci Paris D* 265 1867-1869
- Beaugrand G, and Goberville E** 2010 Conséquences des changements climatiques en milieu océanique. [VertigO] *La revue électronique en sciences de l'environnement*
- Becker M, Meyssignac B, Letetrel C, Llovel W, Cazenave A, and Delcroix T** 2012 Sea level variations at tropical Pacific islands since 1950. *Global and Planetary Change* 80 85-98
- Bhandari B, Oli U, Pudasaini U, and Panta N** Generation of High Resolution DSM Using UAV Images. 17-21
- Bird ECF** 1987 The modern prevalence of beach erosion. *Marine Pollution Bulletin* 18 151-157
- Blaise E, Suanez S, Schroetter J-M, and Palvadeau E** Evolution mi-séculaire des côtes sédimentaires du département du Finistère. Le Centre Français du Littoral, pp-237
- Bouchard C, Marrou L, Plante S, Payet R, and Duchemin E** 2011 Les petits états et territoires insulaires face aux changements climatiques: vulnérabilité, adaptation et développement. *VertigO-La revue électronique en sciences de l'environnement* 10
- Bousquet B** 1990 Définition et identification du littoral contemporain. *Revue juridique de l'environnement* 15 451-468
- Bowen AJ, and Inman DL** 1966 Budget of littoral sands in the vicinity of Point Arguello, California. *USACE Technical Memorandum* 19
- Brutto ML, and Meli P** 2012 Computer vision tools for 3D modelling in archaeology. *International Journal of Heritage in the Digital Era* 1 1-6
- Cabioch G** 2003 Postglacial reef development in the South-West Pacific: case studies from New Caledonia and Vanuatu. *Sedimentary Geology* 159 43-59
- Cabioch G, Recy J, Jouannic C, and Turpin L** 1996 Contrôle climatique et tectonique de l'édification récifale en Nouvelle-Calédonie au cours du Quaternaire terminal. *Bulletin de la Société géologique de France*
- Cabioch G, Wirmann D, Sémah A-M, Corrège T, and Le Cornec F** 2008 Évolution des paléoenvironnements dans le Pacifique lors de la dernière déglaciation: exemples en Nouvelle-Calédonie et au Vanuatu. *Journal de la Société des Océanistes* 25-40
- Caires S, Sterl A, Komen G, and Swail V** 2005 The KNMI/ERA-40 Wave Atlas derived from 45-years of ECMWF reanalysis data.
- Carassou L, Le Borgne R, Rolland E, and Ponton D** 2010 Spatial and temporal distribution of zooplankton related to the environmental conditions in the coral reef lagoon of New Caledonia, Southwest Pacific. *Marine pollution bulletin* 61 367-374
- Cassou C, and Guilyardi É** 2007 Modes de variabilité et changement climatique: Synthèse du quatrième rapport

d'évaluation du Giec.

- Cavarero V, Peltier A, Aubail X, Leroy A, Dubuisson B, Jourdain S, Ganachaud A, Gibelin A-L, Lefèvre J, and Menkes C** 2012 Les évolutions passées et futures du climat de la Nouvelle-Calédonie.
- Cazenave A, Henry O, Munier S, Delcroix T, Gordon AL, Meyssignac B, Llovel W, Palanisamy H, and Becker M** 2012 Estimating ENSO influence on the global mean sea level, 1993–2010. *Marine Geodesy* 35 82-97
- Cazenave A, and Llovel W** 2010 Contemporary sea level rise. *Annual review of marine science* 2 145-173
- Cazes-Duvat V** Les archipels de l'ouest de l'océan indien face à l'érosion côtière (Mascareignes, Seychelles, Maldives). Armand Colin, 342-361
- Chaumillon E, Wöppelmann G, Karpytchev M, and Bertin X** 2011 Mesures et modélisations des évolutions du niveau marin, des vagues, des tempêtes et des évolutions des littoraux pour une gestion durable des littoraux. *VertigO-la revue électronique en sciences de l'environnement*
- Chevalier C, Sous D, Devenon J-L, Pagano M, Rougier G, and Blanchot J** 2015 Impact of cross-reef water fluxes on lagoon dynamics: a simple parameterization for coral lagoon circulation model, with application to the Ouano Lagoon, New Caledonia. *Ocean Dynamics* 65 1509-1534
- Chevillotte V, Douillet P, Cabioch G, Lafoy Y, Lagabrielle Y, and Maurizot P** 2005 Evolution géomorphologique de l'avant-pays du Sud-Ouest de la Nouvelle-Calédonie durant les derniers cycles glaciaires. *Comptes Rendus Geoscience* 337 695-701
- Church JA, and White NJ** 2006 A 20th century acceleration in global sea-level rise. *Geophysical research letters* 33
- Church JA, White NJ, and Hunter JR** 2006 Sea-level rise at tropical Pacific and Indian Ocean islands. *Global and Planetary Change* 53 155-168
- Cohen O, Dolique F, Anthony EJ, and Héquette A** 2002 L'approche morphodynamique en géomorphologie littorale. *Le littoral, regards, pratiques et savoirs, sous la direction de N Baron-Yellès, L Goeldner-Gianella et S Velut, Éditions delarued'Ulm* 191-214
- Cohen O, and Gardel A** De l'analyse des cartes anciennes à l'altimétrie laser aéroportée: l'évolution des techniques de suivi du trait de côte. Exemples sur la Côte d'Opale.
- Colberg F, and McInnes KL** 2012 The impact of future changes in weather patterns on extreme sea levels over southern Australia. *Journal of Geophysical Research: Oceans* 117
- Collins M, An S-I, Cai W, Ganachaud A, Guilyardi E, Jin F-F, Jochum M, Lengaigne M, Power S, and Timmermann A** 2010 The impact of global warming on the tropical Pacific Ocean and El Niño. *Nature Geoscience* 3 391
- Corlay JP** 1995 Géographie sociale, géographie du littoral. *Norois* 165 247-265
- Cowell PJ, and Thom BG** 1994 *Morphodynamics of coastal evolution*, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA
- Debenay J-P** 1987 Sedimentology in the southwestern lagoon of New Caledonia, SW Pacific. *Journal of coastal research* 77-91
- Dewez TJB, Rohmer J, and Closset L** Laser survey and mechanical modelling of chalky sea cliff collapse in Normandy, France. 281-288
- De'ath G, Fabricius KE, Sweatman H, and Puotinen M** 2012 The 27-year decline of coral cover on the Great Barrier Reef and its causes. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 109 17995-17999
- Douillet P** 1998 Tidal dynamics of the south-west lagoon of New Caledonia: observations and 2D numerical modelling. *Oceanologica Acta* 21 69-79
- Douillet P, Ouillon S, and Cordier E** 2001 A numerical model for fine suspended sediment transport in the southwest lagoon of New Caledonia. *Coral Reefs* 20 361-372
- Duce RA, LaRoche J, Altieri K, Arrigo KR, Baker AR, Capone DG, Cornell S, Dentener F, Galloway J, and Ganeshram RS** 2008 Impacts of atmospheric anthropogenic nitrogen on the open ocean. *science* 320 893-897
- Dugas F, and Debenay JP** Carte sédimentologique et carte annexe du lagon de Nouvelle-Calédonie.
- Dugas F, Ville P, and Coudray J** 1980 Etude sismique du lagon sud-ouest de la Nouvelle-Calédonie (Sud-Ouest Pacifique): paléomorphologies successives et comportement au Quaternaire supérieur, du littoral de l'île. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences Série D: Sciences Naturelles* 290 963-966
- Dumas P** 2009 La gestion du littoral. *De la Nouvelle-Calédonie au Pacifique: éléments de recherches en lettres, langues et sciences humaines* 8 53
- Durand P** 1998 Cinématique d'un littoral sableux à partir de photographies aériennes et de cartes topographiques. Exemple du littoral d'Argelès-Plage à Saint-Cyprien (Roussillon, France)/Kinematics of a sandy shoreline

- deduced from the analysis of aerial photographs and topographic maps. Example of the beach extending from Argelès-Plage to Saint-Cyprien (Roussillon, France). *Géomorphologie: relief, processus, environnement* 4 155-166
- Duvat V** Peut-on prévoir les effets du changement climatique sur les littoraux coralliens? in : F. BART (coord. – *Les natures tropicales : enjeux actuels et perspectives*, Presses Universitaires de Bordeaux, Collection Espaces Tropicaux, XII^e Journées de Géographies Tropicales, Bordeaux, 1618 octobre 2008, pp 465-479)
- Duvat V, Magnan A, and Pouget F** 2013 Exposure of atoll population to coastal erosion and flooding: a South Tarawa assessment, Kiribati. *Sustainability science* 8 423-440
- Duvat VKE, and Pillet V** 2017 Shoreline changes in reef islands of the Central Pacific: Takapoto Atoll, Northern Tuamotu, French Polynesia. *Geomorphology* 282 96-118
- Eddine J, El Abdellaoui JE, and Ozer A** 2017 ÉTUDE DIACHRONIQUE ET HISTORIQUE DE L'ÉVOLUTION DU TRAIT DE CÔTE DE LA BAIE DE TANGER (MAROC)
- Emery KO** 1961 A simple method of measuring beach profiles. *Limnology and oceanography* 6 90-93
- Fabricius KE, Cooper TF, Humphrey C, Uthicke S, De'ath G, Davidson J, LeGrand H, Thompson A, and Schaffelke B** 2012 A bioindicator system for water quality on inshore coral reefs of the Great Barrier Reef. *Marine Pollution Bulletin* 65 320-332
- Faure V, Pinazo C, Torréton J-P, and Jacquet S** 2010 Modelling the spatial and temporal variability of the SW lagoon of New Caledonia I: A new biogeochemical model based on microbial loop recycling. *Marine pollution bulletin* 61 465-479
- Faye I** 2010 Dynamique du trait de côte sur les littoraux sableux de la Mauritanie à la Guinée-Bissau (Afrique de l'Ouest): Approches régionale et locale par photo-interprétation, traitement d'images et analyse de cartes anciennes.
- Fichez R, Breau L, Chevillon C, Chifflet S, Douillet P, Faure V, Fernandez JM, Gérard P, Hédouin L, and Lapetite A** 2008 Origine, transport et devenir des apports naturels et anthropiques dans le lagon sud-ouest de Nouvelle-Calédonie. *Le Journal de la Société des Océanistes* 41-58
- Ford M** 2011 Shoreline changes on an urban atoll in the central Pacific Ocean: Majuro Atoll, Marshall Islands. *Journal of Coastal Research* 28 11-22
- Gaillot S, and Chaverot S** 2001 Méthode d'étude des littoraux à faible évolution. Cas du delta du Golo (Corse) et du littoral du Touquet (Pas-de-Calais) en France/Analysing the kinematics of low-mobility coastlines: methodology and results for the Golo delta (Corsica) and the Touquet coast (Pas-de-Calais) in France. *Géomorphologie: relief, processus, environnement* 7 47-54
- Garcin M, Le Cozannet** 2013 The driving factors of coastal evolution : toward a systemic approach. Climate change and sea level rise : coastal vulnerability and societal impacts, Jun 2013, Collège de France – Paris, France.
- Garcin M, Vendé-Leclerc M.**, 2014 Observatoire du Littoral de Nouvelle-Calédonie – Rapport préliminaire : observation, état des lieux et constats. Rapport BRGM/RP-63235-FR
- Garcin M, Vendé-Leclerc M.**, 2015 Observatoire du Littoral de Nouvelle-Calédonie – Bilan des activités 2014. BRGM/RP-64824-FR
- Garcin M, Vendé-Leclerc M.**, 2016 Observatoire du Littoral de Nouvelle-Calédonie –. Bilan des activités 2015, Typologie, methods et suivi des sites pilotes. BRGM/RP-65637-FR
- Garcin M, Vendé-Leclerc M.**, 2017 Observatoire du Littoral de Nouvelle-Calédonie –. Bilan des activités 2016. BRGM, en soumission.
- Garcin M, Vendé-Leclerc M, Maurizot P, Le Cozannet G, Robineau B, and Nicolae-Lerma A** 2016 Lagoon islets as indicators of recent environmental changes in the South Pacific–The New Caledonian example. *Continental Shelf Research* 122 120-140
- Genest C.G.**, 2000 Dictionnaire de géomorphologie, société de géographie de la Mauricie, édition 2000, page 144.
- Gilliot J-M, Vaudour E, Michelin J, and Houot S** Estimation des teneurs en carbone organique des sols agricoles par télédétection par drone. 2-p
- Goder K**, 2016 Caractérisation du risque cyclonique en Nouvelle-Calédonie : analyse géohistorique de l'endommagement et des phénomènes tropicaux du 19^{ème} au 20^{ème} siècle
- Godfrey JS, Houze RA, Johnson RH, Lukas R, Redelsperger JL, Sumi A, and Weller R** 1998 Coupled Ocean-Atmosphere Response Experiment (COARE): An interim report. *Journal of Geophysical Research: Oceans* 103 14395-14450
- Gonçalves JA, and Henriques R** 2015 UAV photogrammetry for topographic monitoring of coastal areas. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 104 101-111

- Gourlay MR, and Colleter G** 2005 Wave-generated flow on coral reefs—an analysis for two-dimensional horizontal reef-tops with steep faces. *Coastal Engineering* 52 353-387
- Gratton Y** 2002 Le krigeage: la méthode optimale d'interpolation spatiale. *Les articles de l'Institut d'Analyse Géographique* 1
- Guilcher A** 1965 *Grand Récif Sud: Récifs et Lagon de Tuo*, Lahure
- Guillemot N, Chabanet P, and Le Pape O** 2010 Cyclone effects on coral reef habitats in New Caledonia (South Pacific). *Coral Reefs* 29 445-453
- Halouani N, Sabatier F, Gueddari M, and Fleury J** 2007 Évolution du trait de côte de Tabarka-Bouterfess, nord-ouest de la Tunisie. *Méditerranée Revue géographique des pays méditerranéens/Journal of Mediterranean geography* 131-137
- Harper B, Hardy T, Mason L, and Fryar R** 2009 Developments in storm tide modelling and risk assessment in the Australian region. *Natural hazards* 51 225-238
- Harvey N, and Woodroffe CD** 2008 Australian approaches to coastal vulnerability assessment. *Sustainability Science* 3 67-87
- Harwin S, and Lucieer A** 2012 Assessing the accuracy of georeferenced point clouds produced via multi-view stereopsis from unmanned aerial vehicle (UAV) imagery. *Remote Sensing* 4 1573-1599
- Himmelstoss EA** 2009 DSAS 4.0 installation instructions and user guide. *Thieler, ER, Himmelstoss, EA, Zichichi, JL, and Ergul, Ayhan* 2008-1278
- Hofmann GE, Smith JE, Johnson KS, Send U, Levin LA, Micheli F, Paytan A, Price NN, Peterson B, and Takeshita Y** 2011 High-frequency dynamics of ocean pH: a multi-ecosystem comparison. *PLoS one* 6 e28983
- Hénaff A, Meur-Férec C, and Lageat Y** 2013 Changement climatique et dynamique géomorphologique des côtes bretonnes. Leçons pour une gestion responsable de l'imbrication des échelles spatio-temporelles. *Cybergeo: European Journal of Geography*
- Jabbar M, Hénaff A, and Deschamps A** 2015 Dynamiques et évolutions morpho-sédimentaires de l'avant-plage du secteur littoral de Combril-Île-Tudy entre le XIXe et le XXIe siècle. *Géomorphologie: relief, processus, environnement* 21 45-56
- Jarrige F, Radok R, Krause G, and Rual P** 1975 Currents in the lagoon off Noumea.
- Jevrejeva S, Grinsted A, Moore JC, and Holgate S** 2006 Nonlinear trends and multiyear cycles in sea level records. *Journal of Geophysical Research: Oceans* 111
- Jollit I** 2010 Spatialisation des activités humaines et aide à la décision pour une gestion durable des écosystèmes coralliens: la pêche plaisancière dans le lagon sud-ouest de la Nouvelle-Calédonie.
- Jouon A** 2007 Hydrodynamique et transport de particules en suspension dans le lagon sud-ouest de Nouvelle-Calédonie.
- Jouon A, Douillet P, Ouillon S, and Fraunié P** 2006 Calculations of hydrodynamic time parameters in a semi-opened coastal zone using a 3D hydrodynamic model. *Continental Shelf Research* 26 1395-1415
- Lafoy Y, Auzende J-M, Smith R, and Labails C** 2000 Évolution géologique post-Pléistocène moyen du domaine lagonaire Néo-Calédonien méridional. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences-Series IIA-Earth and Planetary Science* 330 265-272
- Lagabrielle Y, Maurizot P, Lafoy Y, Cabioch G, Pelletier B, Régnier M, Wabete I, and Calmant S** 2005 Post-Eocene extensional tectonics in Southern New Caledonia (SW Pacific): Insights from onshore fault analysis and offshore seismic data. *Tectonophysics* 403 1-28
- Launay J** 1970 Etude des sédiments de la baie de la Dumbéa, Nouvelle-Calédonie: résultats préliminaires.
- Le Cozannet G, Cazenave A, Garcin M, Becker M, Donato V, Rogel P, y Melia DS, Walker P, Wöppelmann G, and Yates M** 2011 L'élévation récente du niveau marin et l'érosion côtière: le cas d'îles océaniques du Pacifique. *Geosciences* 92-99
- Le Cozannet G, Cazenave A, y Méliá DS, Wöppelmann G, Donato V, Walker P, Rogel P, Yates M, and Garcin M** L'élévation du niveau marin récente et l'érosion côtière: le cas d'îles océaniques du Pacifique.
- Le Duff M, Dumas P, Cohen O, and Allenbach M** 2017 Coastal Erosion Monitoring on Ouvea Island (New Caledonia): Involving the Local Community in Climate Change Adaptation. *Climate Change Adaptation in Pacific Countries* Springer, 255-268
- Le Roy P, Cabioch G, Monod B, Lagabrielle Y, Pelletier B, and Flamand B** 2008 Late Quaternary history of the Nouméa lagoon (New Caledonia, South West Pacific) as depicted by seismic stratigraphy and multibeam bathymetry: A modern model of tropical rimmed shelf. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 270 29-45
- Leclerc A** 2015 Analyse multiéchelles à haute résolution de la topographie restituée par photogrammétrie spatiale,

aérienne et mesures au sol.

- Lefèvre J, Marchesiello P, Jourdain NC, Menkes C, and Leroy A** 2010 Weather regimes and orographic circulation around New Caledonia. *Marine pollution bulletin* 61 413-431
- Leroy A, and Céron J-P** 2007 Un défi de la prévision saisonnière: la descente d'échelle-La Nouvelle-Calédonie, un exemple à suivre.
- Letortu P, Costa S, Maquaire O, Delacourt C, Augereau E, Davidson R, and Suanez S** 2015 Taux d'ablation des falaises crayeuses haut-normandes: l'apport du scanner laser terrestre. *Géomorphologie: relief, processus, environnement* 21 73-82
- Lima FP, and Wethey DS** 2012 Three decades of high-resolution coastal sea surface temperatures reveal more than warming. *Nature communications* 3 704
- Llovel W, Becker M, Cazenave A, Jevrejeva S, Alkama R, Decharme B, Douville H, Ablain M, and Beckley B** 2011 Terrestrial waters and sea level variations on interannual time scale. *Global and Planetary Change* 75 76-82
- Llovel W, Guinehut S, and Cazenave A** 2010 Regional and interannual variability in sea level over 2002–2009 based on satellite altimetry, Argo float data and GRACE ocean mass. *Ocean Dynamics* 60 1193-1204
- Lombard A** 2007 Les variations actuelles du niveau de la mer: observations et causes climatiques. *La Météorologie* 59 13-21
- Long N, Millescamps B, Guillot B, Pouget F, and Bertin X** 2016 Monitoring the topography of a dynamic tidal inlet using UAV imagery. *Remote Sensing* 8 387
- Maller C, Michot A, avec la collaboration de De La Torre Y, Lafon V, Robin M et Prevoteaux B** 2012 Synthèse de référence des techniques de suivi du trait de côte – Rapport BRGM/RP-606116-FR
- Mantua N** The Pacific Decadal Oscillation and Pacific Salmon Production. University of Hawaii at Manoa Honolulu,, HA, USA, 1-4
- Mantua NJ, and Hare SR** 2002 The Pacific decadal oscillation. *Journal of oceanography* 58 35-44
- Merle J** 2006 *Océan et climat*, IRD éditions
- Merrifield M, Kilonsky B, and Nakahara S** 1999 Interannual sea level changes in the tropical Pacific associated with ENSO. *Geophysical Research Letters* 26 3317-3320
- Merrifield MA, and Maltrud ME** 2011 Regional sea level trends due to a Pacific trade wind intensification. *Geophysical Research Letters* 38
- Meur-Ferec C** 2006 De la dynamique naturelle à la gestion intégrée de l'espace littoral: un itinéraire de géographe.
- Mimura N** 1999 Vulnerability of island countries in the South Pacific to sea level rise and climate change. *Climate research* 12 137-143
- Mirault É, and David G** 2009 Fonctions et logiques d'interface des récifs coralliens sur le littoral de la Réunion. Communication présentée aux Xle Journées de Géographie tropicale, «Les interfaces. Ruptures, transitions et mutations», 7-10 novembre 2005, et actualisée en décembre 2009. *Les Cahiers d'Outre-Mer Revue de géographie de Bordeaux* 62 571-588
- Morlière A** 1985 Assainissement de Nouméa. *Mesures de courant ORSTOM, Noumea*
- Morlière A, and Crémoux J-L** 1981 Observations de courant dans le lagon, de Février à Août 1981.
- Olivier C, Dumas P, Le Duff M, and Allenbach M** 2015 *Using UAV and very high resolution photogrammetry to assess shoreline evolution. Example in Ouvea, Loyalty Island, New-Caledonia*
- Orr JC, Fabry VJ, Aumont O, Bopp L, Doney SC, Feely RA, Gnanadesikan A, Gruber N, Ishida A, and Joos F** 2005 Anthropogenic ocean acidification over the twenty-first century and its impact on calcifying organisms. *Nature* 437 681-686
- Ouillon S, Douillet P, and Andréfouët S** 2004 Coupling satellite data with in situ measurements and numerical modeling to study fine suspended-sediment transport: a study for the lagoon of New Caledonia. *Coral Reefs* 23 109-122
- Ouillon S, Douillet P, Lefebvre J-P, Le Gendre R, Jouon A, Bonneton P, Fernandez J-M, Chevillon C, Magand O, and Lefèvre J** 2010 Circulation and suspended sediment transport in a coral reef lagoon: The south-west lagoon of New Caledonia. *Marine pollution bulletin* 61 269-296
- Paskoff R** Conséquences possibles sur les milieux littoraux de l'élévation du niveau de la mer prévue pour les prochaines décennies. *JSTOR*, 233-248
- Paskoff R, and Clus-Auby C** 2007 *L'érosion des plages: les causes, les remèdes*, Institut océanographique
- Paskoff R, Hurst H, and Rakob F** 1985 Position du niveau de la mer et déplacement de la ligne de rivage à Carthage (Tunisie) dans l'Antiquité. *Comptes-rendus des séances de l'Académie des sciences Série 2, Mécanique-physique, chimie, sciences de l'univers, sciences de la terre* 300 613-618
- Peltier WR** 2001 Global glacial isostatic adjustment and modern instrumental records of relative sea level history.

- Perry CT, and Smithers SG** 2011 Cycles of coral reef 'turn-on', rapid growth and 'turn-off' over the past 8500 years: a context for understanding modern ecological states and trajectories. *Global Change Biology* 17 76-86
- Pian S** 2010 Analyse multiscalaire et multifactorielle de l'évolution et du comportement géomorphologique des systèmes côtiers sud bretons.
- Pillet R, and Pelletier B** 2004 Tectonique active, tsunamis et sismicité en Nouvelle-Calédonie. *Notes Techniques, Sciences de la Terre, Géologie-Géophysique, IRD Noumea* 28 19
- Prosdocimi M, Calligaro S, Sofia G, Dalla Fontana G, and Tarolli P** 2015 Bank erosion in agricultural drainage networks: new challenges from structure-from-motion photogrammetry for post-event analysis. *Earth Surface Processes and Landforms* 40 1891-1906
- Roques C, Bengoubou Valerius M, Le Cozannet G, Bourdon E, Mompelat JM, and Oliveros C** 2010 Evolution et dynamique du trait de côte de l'archipel Guadeloupéen; Etude de 1956 à 2004. BRGM/RP-58750-FR,
- Rosu A-M, Assenbaum M, De la Torre Y, and Pierrot-Deseilligny M** 2015 Coastal digital surface model on low contrast images. *The International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* 40 307
- Rougerie F** Le lagon sud-ouest de Nouvelle-Calédonie: circulation, spécificité hydrologique et productivité. 17-22
- Régnier M, Van de Beuque S, Baldassari C, and Laspiere GT** 1999 La sismicité du Sud de la Nouvelle-Calédonie: implications structurales. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences-Series IIA-Earth and Planetary Science* 329 143-148
- Sadio M, Dussouillez P, Fleury J, Diaw AT, Anthony EJ, Laïbi R, Oyede LM, Ndour A, Dioh P, and Sane T** 2015 NOTE TECHNIQUE: APPORT DE LA PHOTOGRAMMÉTRIE AU SUIVI TOPOGRAPHIQUE DE LA FLÈCHE LITTORALE DE JOAL (SÉNÉGAL). *Photo Interprétation* 51 37
- Samaan M** 2016 La photogrammétrie rapprochée au service de l'archéologie préventive.
- Schroeder WW** 2000 Disturbances: their role in shaping coastal environments. *Environmental Studies* 431-440
- Sinane K, David G, Pennober G, and Troadec R** 2010 Fragilisation et modification des formations littorales meubles sur l'île d'Anjouan (Comores): Quand l'érosion d'origine anthropique se conjugue au changement climatique. *[Vertigo] La revue électronique en sciences de l'environnement* 10
- Sinane K** 2013 Les littoraux des Comores, dynamique d'un système anthropisé: le cas de l'île d'Anjouan.
- Spennemann DHR** 1996 Nontraditional settlement patterns and typhoon hazard on contemporary Majuro Atoll, Republic of the Marshall Islands. *Environmental Management* 20 337-348
- Suanez S** 2009 La question du bilan sédimentaire des côtes d'accumulation. Rôle des forçages naturels et anthropiques dans les processus morphodynamiques analysés à partir de quelques exemples pris en Méditerranée et en Bretagne.
- Thiebot J, Le Cozannet G, Garcin M, Pedreros R, Desramaut N, Delvalée E, De La Torre Y, Blangy A, and Oliveros C** 2010 Caractérisation des états de mer extrêmes dans les environnements soumis à plusieurs régimes de vagues. *Actes-Xième Journées Nationales Génie Côtier-Génie* 155 137-146
- Thieler ER, Himmelstoss EA, Zichichi JL, and Ergul A** 2009 The Digital Shoreline Analysis System (DSAS) version 4.0-an ArcGIS extension for calculating shoreline change. US Geological Survey,
- Touré B, Affian K, Collet C, Kouamé KF, and Biemi J** 2011 Estimation des changements de la ligne de rivage sur un littoral sableux par l'imagerie Corona et Spot-5: cas de la région d'Abidjan (sud de la Côte d'Ivoire). *Photo Interprétation* 47 13
- Trenberth KE** 1997 The definition of el nino. *Bulletin of the American Meteorological Society* 78 2771-2777
- Troadec** 2012 Fiches pédagogiques de la Réserve naturelle Nationale Marine de La Réunion – vie océane – Rectorat de la Réunion
- Verhoeven G** 2011 Taking computer vision aloft—archaeological three-dimensional reconstructions from aerial photographs with photostan. *Archaeological Prospection* 18 67-73
- Walsh KJE, McInnes KL, and McBride JL** 2012 Climate change impacts on tropical cyclones and extreme sea levels in the South Pacific—a regional assessment. *Global and Planetary Change* 80 149-164
- Wang C, and Picaut J** 2004 Understanding ENSO physics—A review. *Earth's Climate* 21-48
- Webb AP, and Kench PS** 2010 The dynamic response of reef islands to sea-level rise: evidence from multi-decadal analysis of island change in the Central Pacific. *Global and Planetary Change* 72 234-246
- Weisberg RH, and Wang C** 1997 A western Pacific oscillator paradigm for the El Niño-Southern Oscillation. *Geophysical research letters* 24 779-782
- Wright LD, and Short AD** 1984 Morphodynamic variability of surf zones and beaches: a synthesis. *Marine geology* 56 93-118

- Yamano H, Cabioch G, Chevillon C, and Join J-L** 2014 Late Holocene sea-level change and reef-island evolution in New Caledonia. *Geomorphology* 222 39-45
- Yamano H, Kayanne H, Yamaguchi T, Kuwahara Y, Yokoki H, Shimazaki H, and Chikamori M** 2007 Atoll island vulnerability to flooding and inundation revealed by historical reconstruction: Fongafale Islet, Funafuti Atoll, Tuvalu. *Global and Planetary Change* 57 407-416
- Yates ML, Le Cozannet G, Garcin M, Salaï E, and Walker P** 2013 Multidecadal atoll shoreline change on Manihi and Manuae, French Polynesia. *Journal of Coastal Research* 29 870-882
- Young IR** 1999 Seasonal variability of the global ocean wind and wave climate. *International Journal of Climatology* 19 931-950

Webographie :

- Site internet de la COP 23 Fidji : <https://cop23.com.fj/>
- Site internet de la Direction de l'Industrie, de Mines et de l'Energie (Gouvernement de la Nouvelle-Calédonie) : <https://dimenc.gouv.nc/>
- ArcGis : <http://desktop.arcgis.com/fr/arcmap/10.3/manage-data/raster-and-images/fundamentals-for-georeferencing-a-raster-dataset.htm> ;
- QGis : https://docs.qgis.org/2.0/fr/docs/user_manual/plugins/plugins_georeferencer.html
- Pour la consultation du document suivant : https://dimenc.gouv.nc/sites/default/files/presentation_ifremer.pdf
- Atlas climatique de la Nouvelle Calédonie (Météo France) : <http://www.meteo.nc/en-savoir-plus/comprendre-la-meteo/publications>
- Bulletins climatiques mensuels de la Nouvelle-Calédonie, disponibles sur le site de Météo France : <http://www.meteo.nc/en-savoir-plus/comprendre-la-meteo/publications/atlas-climatique-de-la-nouvelle-caledonie-generalites>
- Site internet du NOAA : <http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/precip/CWlink/MJO/enso.shtml>
- Site internet du Centre Canadien de Télédétection : <http://www.ccrs.nrcan.gc.ca>
- Site internet Universalis : <http://www.universalis.fr/dictionnaire/lithification/>
- Agisoft PhotoScan Manuel de l'utilisateur : Professional Edition, Version 1.1, 2015 (consulté au format PDF le 10/05/2017) disponible sur le lien suivant : http://www.agisoft.com/pdf/manuals_other/pscan_pro_fr_1_1.pdf

Médias :

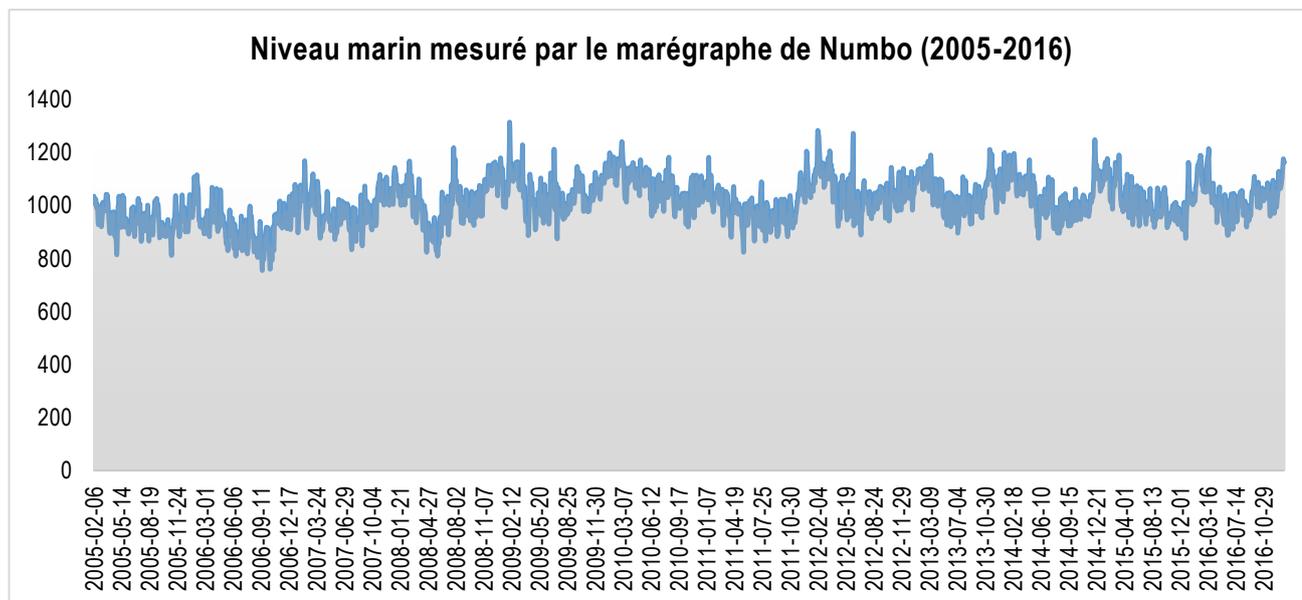
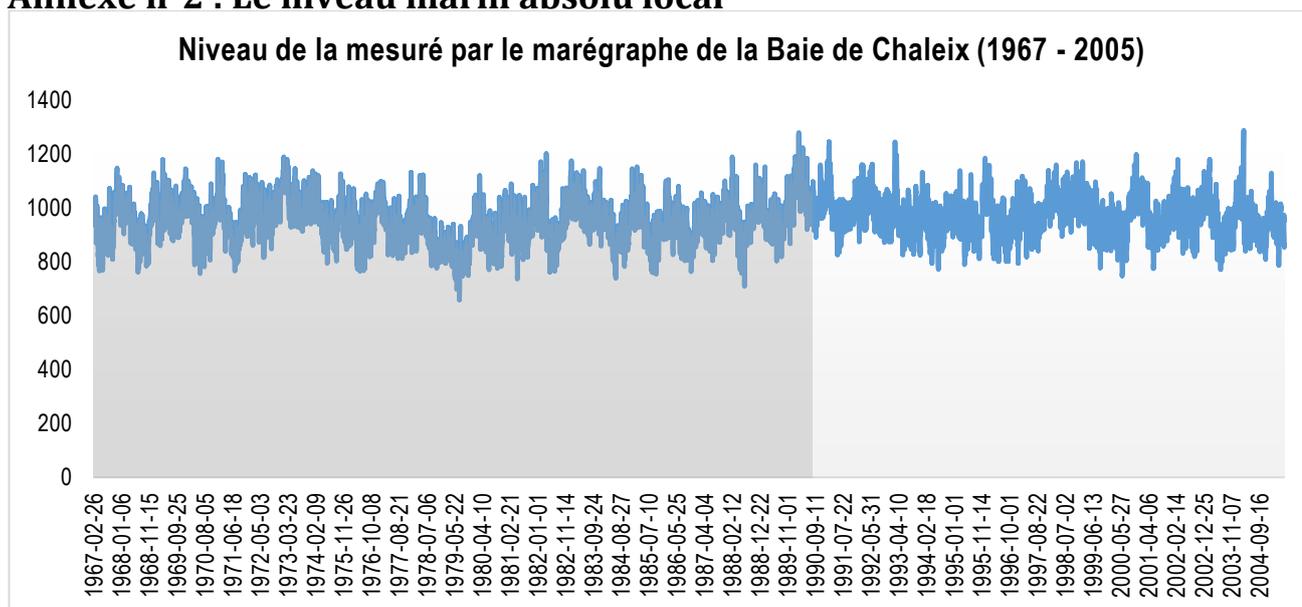
- « *Les îles Kiribati : enfer et paradis* », Angela Bolis, 19/09/2015, journal *Le Monde* : http://www.lemonde.fr/planete/visuel/2015/09/19/les-iles-kiribati-enfer-et-paradis_4753156_3244.html#zWVpg45RrCrQP3uQ.99, Angela Bolis
- « *Voyage en Outre-Mer* », Anne Pastor, France Inter, émission diffusée le 09/07/2017

Annexes

Rétroplanning

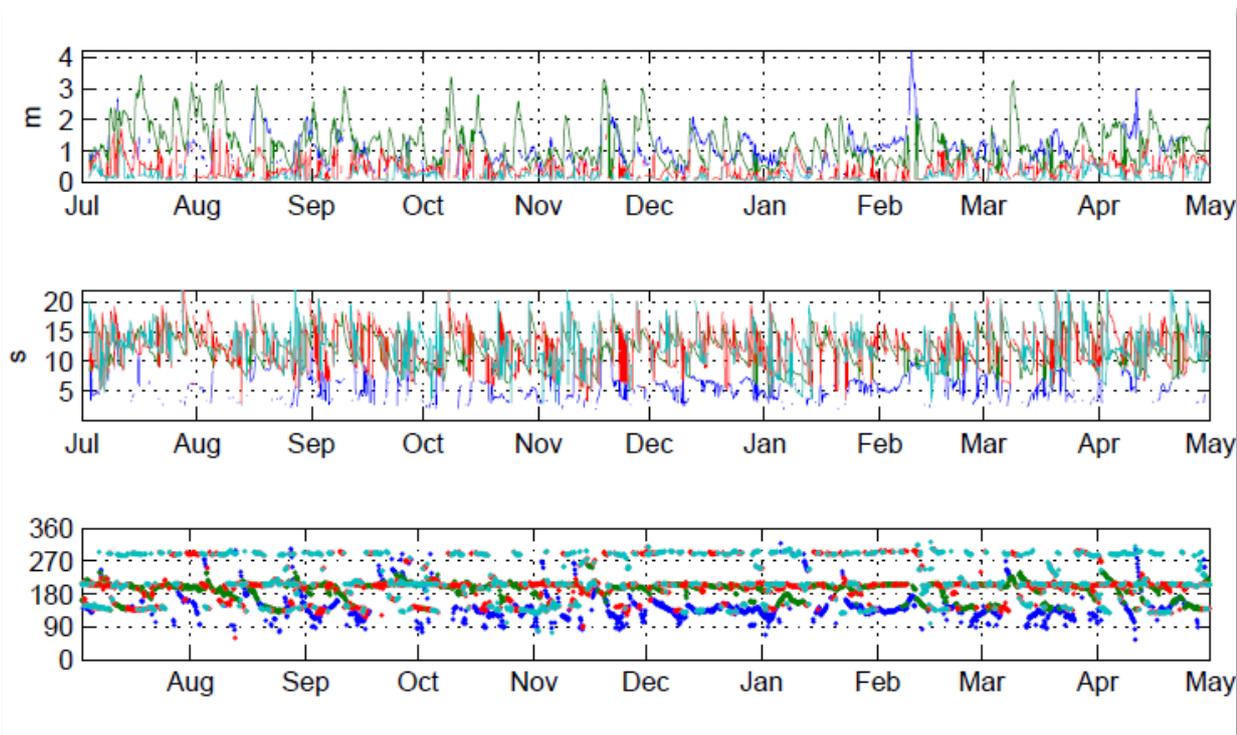
Annexe n°1	Mars				Avril				Mai				Juin				Juillet				Août		
	06-12	13-19	20-27	27 - 02	03-09	10-16	17-23	24-30	01-07	08-14	15-21	22-28	29-05	12-18	19-25	26-02	03-09	10-16	17-23	24-30	31-06	07-14	21-25
Phase 1 : bibliographie, récoltes des données et proposition de plan																							
Bibliographie thématique et technique																							
Contexte du projet EMIL																							
Variabilité climatique globale et régionale : Pacifique - Sud Ouest du Pacifique (IPO et ENSO)																							
Climat local et événements météorologiques en Nouvelle-Calédonie																							
Géomorphologie des littoraux tropicaux																							
Contexte géologique et géomorphologique local (Nouvelle-Calédonie)																							
Méthodologies (mesures <i>in situ</i> et traitements)																							
Etudes couplage analyses géomorphologiques/environnementales																							
Récolte des données																							
Auprès de Myriam VENDE-LECLERC		Lundi 13																					
Auprès de Jérôme AUCUN		Mardi 14																					
Données plus anciennes ou plus récentes (photographies aériennes, images satellites...) Données sur le niveau marin Données sur les événements météorologiques extrêmes (cyclones - stage de l'an passé)																							
Rédaction 1ère partie (contexte)																							
Construction cadre																							
Phase 2 : traitement des données																							

Annexe n°2 : Le niveau marin absolu local



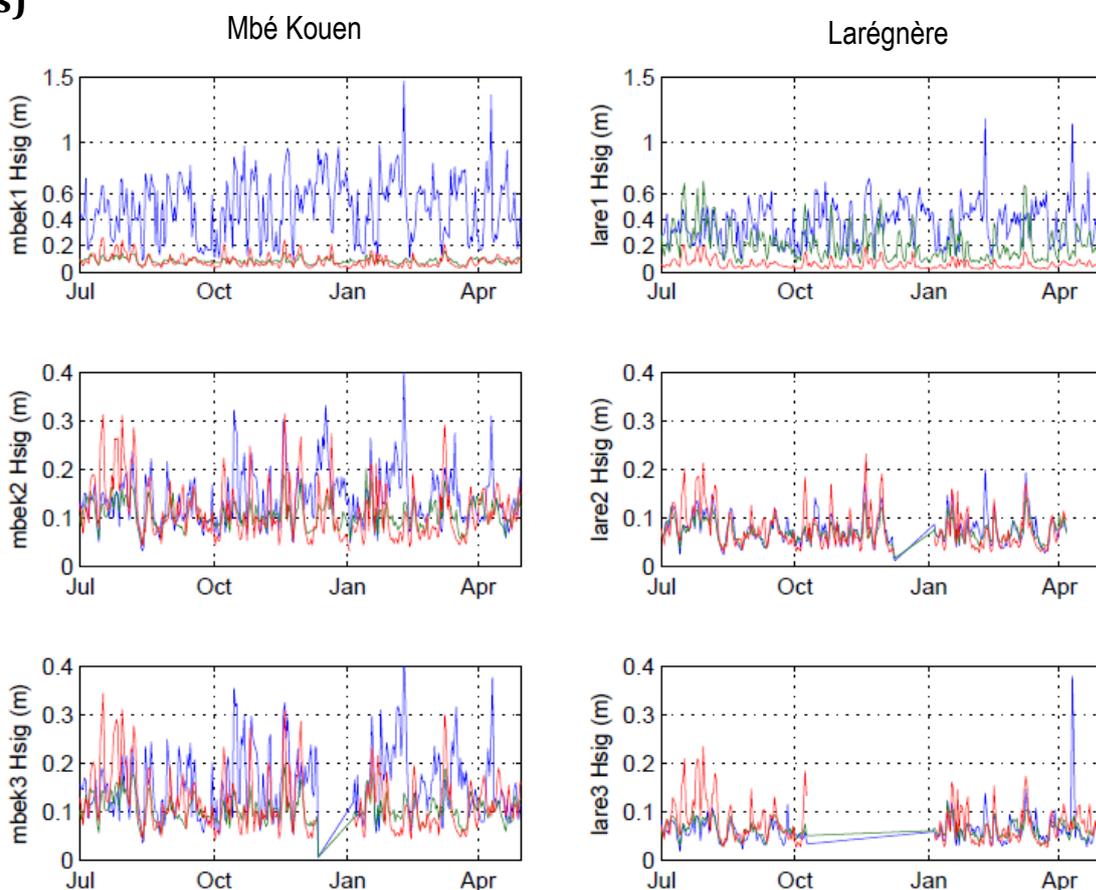
Source : SONEL (<https://www.sonel.fr>)

Annexe n°3 : Les données issues du modèle de vagues Wave Watch III



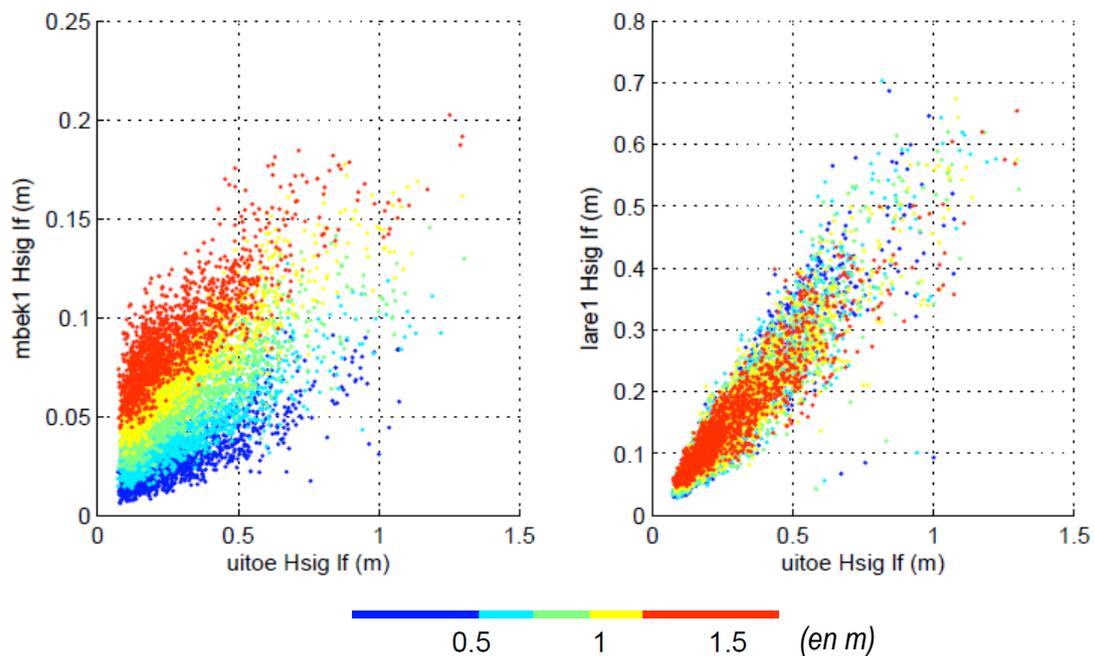
De haut en bas : hauteurs significatives des vagues (m), leur période (s), leur direction (°)

Annexe n°4 : Les données issues des capteurs (hauteur significative des vagues)



Les houles haute fréquence sont en bleu, basse fréquence en vert et infragravitaires en rouge

Annexe n° 5 : La hauteur significative des vagues basse fréquence à Mbé Kouen (mbek1) et Larégnère (lare1) en fonction des hauteurs observées à la passe de Uitoe



Les couleurs correspondent à la hauteur d'eau liée à la marée

Les levés au cadre d'Emery

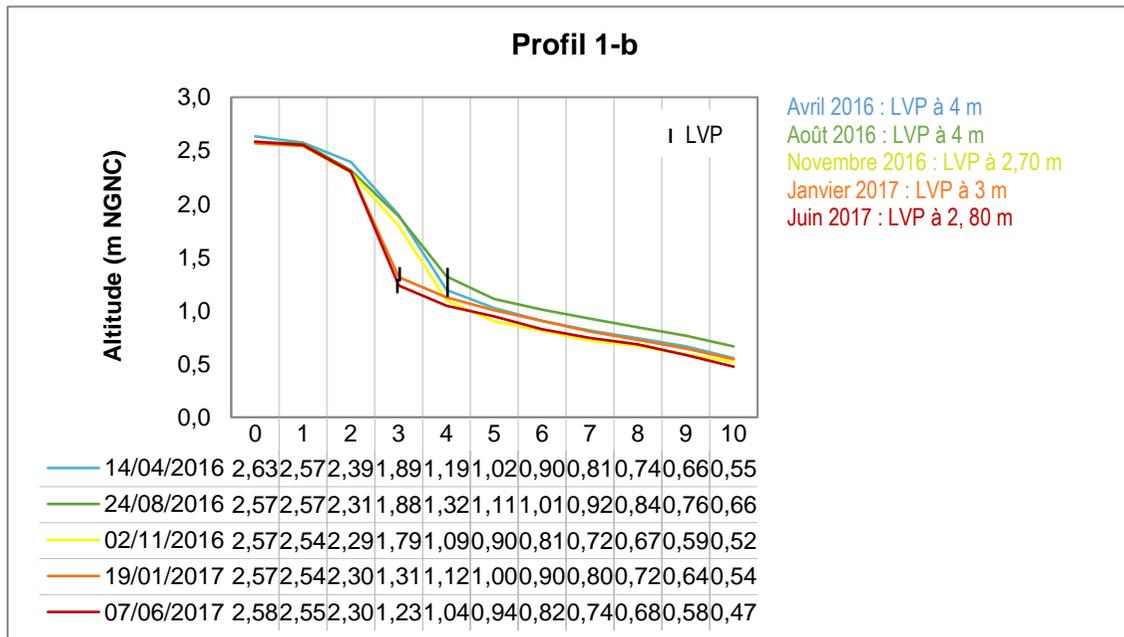
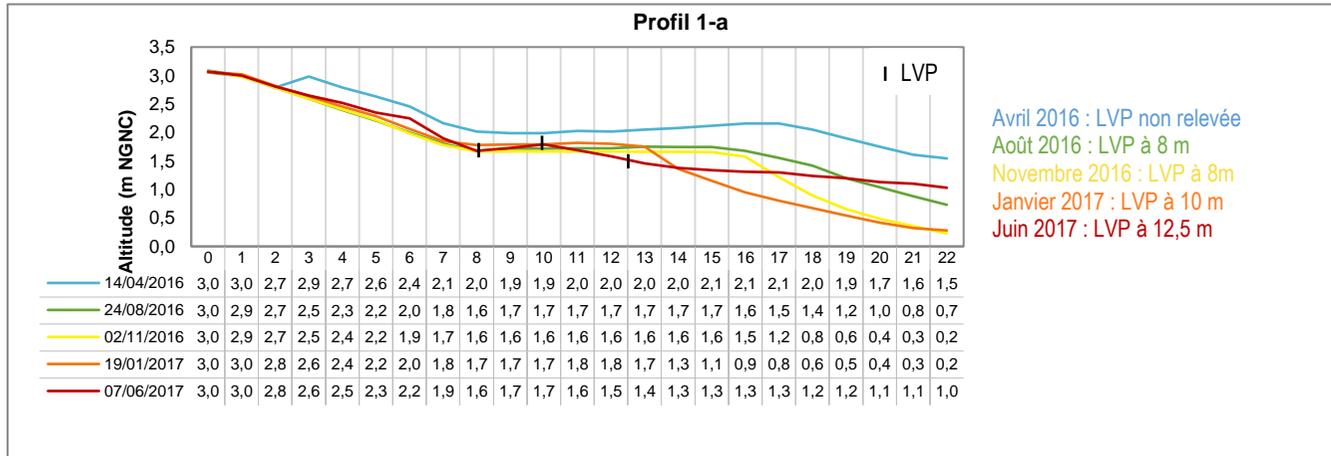
Annexe n°6 : Informations relatives à la marée des jours de mission terrain de levé au cadre

	P1-a			P1-b			P2-a			P2-b			P3			P4		
	Levé	horaires marées	marnage (m)															
14/04/2016	Entre 14h et 16h	PM : 1h16	1,4	Entre 14h et 16h	PM : 1h16	1,4	Entre 14h et 16h	PM : 1h16	1,4	Entre 14h et 16h	PM : 1h16	1,4	Entre 14h et 16h	PM : 1h16	1,4	Entre 14h et 16h	PM : 1h16	1,4
		BM : 7h29	0,75															
		PM : 12h58	1,16															
		BM : 19h28	0,53															
24/08/2016	10h30	BM : 6h04	0,36	11h58	BM : 6h04	0,36	11h19	BM : 6h04	0,36	11h47	BM : 6h04	0,36	11h32	BM : 6h04	0,36	10h45	BM : 6h04	0,36
		PM : 12h17	1,34															
		BM : 18h15	0,54															
02/11/2016	11h	BM : 3h04	0,3	10h15	BM : 3h04	0,3	9h	BM : 3h04	0,3	10h	BM : 3h04	0,3	9h30	BM : 3h04	0,3	10h35	BM : 3h04	0,3
		PM : 9h32	1,53															
		BM : 15h38	0,57															
		PM : 21h23	1,39															
19/01/2017	8h54	PM : 00h17	1,29	8h24	PM : 00h17	1,29	7h48	PM : 00h17	1,29	8h05	PM : 00h17	1,29	7h27	PM : 00h17	1,29	8h49	PM : 00h17	1,29
		BM : 6h14	0,62															
		PM : 12h43	1,48															
		BM : 19h12	0,63															
07/06/2017	Entre 12h20 et 13h10	BM : 00h26	0,64	Entre 12h20 et 13h10	BM : 00h26	0,64	Entre 12h20 et 13h10	BM : 00h26	0,64	Entre 12h20 et 13h10	BM : 00h26	0,64	Entre 12h20 et 13h10	BM : 00h26	0,64	Entre 12h20 et 13h10	BM : 00h26	0,64
		PM : 6h15	1,33															
		BM : 12h42	0,37															
		PM : 19h17	1,39															

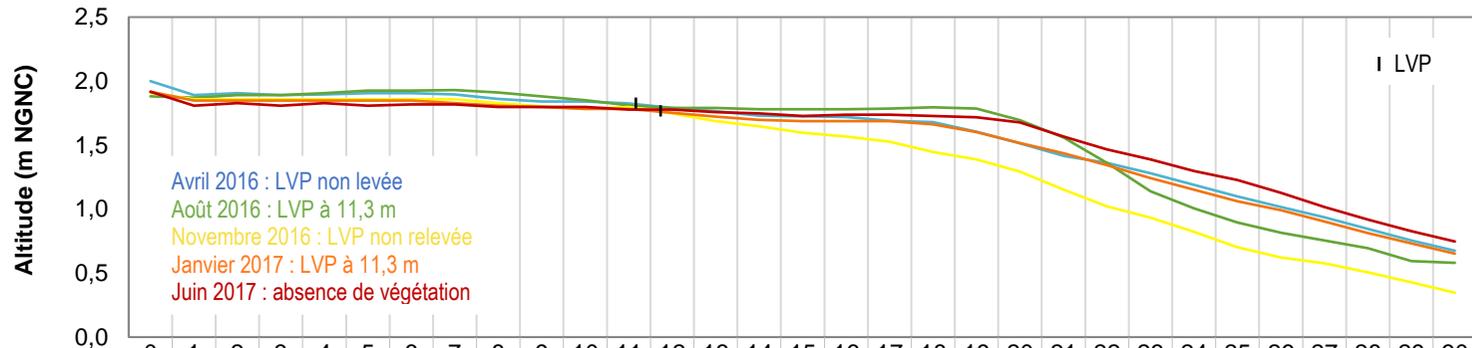
	P5-a			P5-b			P6-a			P6-b		
	Levé	horaires marées	marnage (m)									
14/04/2016	Entre 7h30 et 11h	PM : 1h16	1,4	Entre 7h30 et 11h	PM : 1h16	1,4	Entre 7h30 et 11h	PM : 1h16	1,4	Entre 7h30 et 11h	PM : 1h16	1,4
		BM : 7h29	0,75									
		PM : 12h58	1,16									
		BM : 19h28	0,53									
24/08/2016		BM : 6h04	0,36									
		PM : 12h17	1,34									
		BM : 18h15	0,54									
02/11/2016	12h45	BM : 3h04	0,3	13h30	BM : 3h04	0,3	15h	BM : 3h04	0,3		BM : 3h04	0,3
		PM : 9h32	1,53									
BM : 15h38		0,57	BM : 15h38		0,57	BM : 15h38		0,57	BM : 15h38		0,57	
PM : 21h23		1,39	PM : 21h23		1,39	PM : 21h23		1,39	PM : 21h23		1,39	
02/11/2016												
19/01/2017	10h10	PM : 00h17	1,29	7h55	PM : 00h17	1,29	9h20	PM : 00h17	1,29		PM : 00h17	1,29
		BM : 6h14	0,62									
		PM : 12h43	1,48									
		BM : 19h12	0,63									
07/06/2017	10h35	BM : 00h26	0,64									
		PM : 6h15	1,33									
		BM : 12h42	0,37									
		PM : 19h17	1,39									

Ensemble des résultats obtenus

Annexe n° 7: Profils de plages de Larégnère

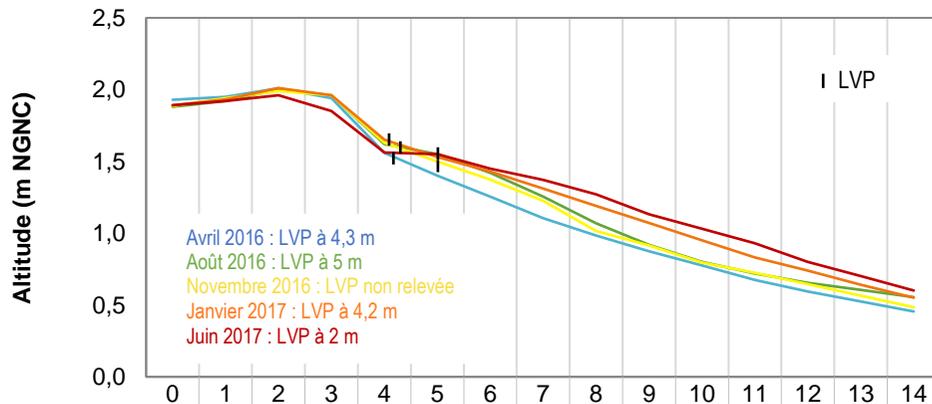


Profil 2-a



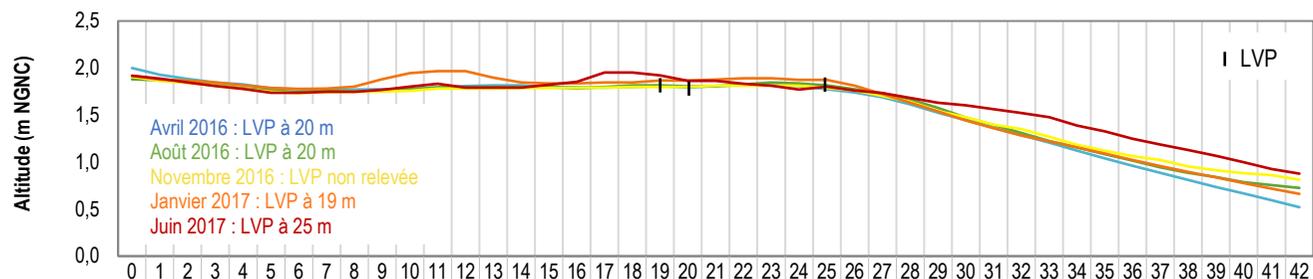
14/04/2016	2,0	1,8	1,9	1,8	1,8	1,9	1,9	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7	1,6	1,6	1,6	1,5	1,4	1,3	1,2	1,1	1,1	1,0	0,9	0,8	0,7	0,6
24/08/2016	1,8	1,8	1,8	1,8	1,9	1,9	1,9	1,9	1,9	1,8	1,8	1,8	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7	1,6	1,5	1,3	1,1	1,0	0,8	0,8	0,7	0,6	0,5	0,5
02/11/2016	1,9	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8	1,7	1,7	1,7	1,6	1,6	1,5	1,5	1,5	1,4	1,3	1,2	1,1	1,0	0,9	0,8	0,7	0,6	0,5	0,5	0,4	0,3
19/01/2017	1,9	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	1,5	1,4	1,3	1,2	1,1	1,0	0,9	0,9	0,8	0,7	0,6
07/06/2017	1,9	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7	1,6	1,5	1,4	1,3	1,2	1,2	1,1	1,0	0,9	0,8	0,7

Profil 2-b



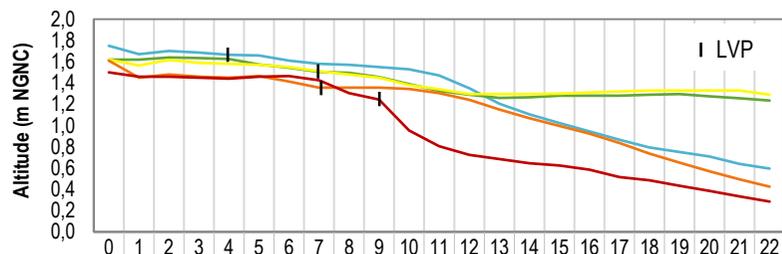
14/04/2016	1,93	1,95	2,01	1,94	1,56	1,40	1,25	1,10	0,98	0,87	0,77	0,67	0,59	0,52	0,45
24/08/2016	1,88	1,92	2,00	1,96	1,62	1,55	1,42	1,25	1,07	0,92	0,80	0,72	0,65	0,60	0,55
02/11/2016	1,88	1,94	1,99	1,96	1,63	1,50	1,37	1,22	1,01	0,91	0,79	0,72	0,64	0,56	0,48
19/01/2017	1,89	1,93	2,01	1,96	1,65	1,53	1,43	1,31	1,19	1,07	0,95	0,83	0,74	0,64	0,55
07/06/2017	1,89	1,92	1,96	1,85	1,56	1,55	1,45	1,37	1,27	1,13	1,03	0,93	0,80	0,70	0,60

Profil 3



14/04/2016	2,0	1,9	1,8	1,8	1,8	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7	1,8	1,8	1,8	1,8	1,7	1,7	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8	1,7	1,7	1,6	1,6	1,5	1,4	1,3	1,2	1,2	1,1	1,0	0,9	0,8	0,8	0,7	0,6	0,5	0,5	
24/08/2016	1,8	1,8	1,8	1,8	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7	1,8	1,8	1,8	1,8	1,7	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8	1,7	1,7	1,6	1,5	1,4	1,3	1,3	1,2	1,1	1,1	1,0	1,0	0,9	0,8	0,8	0,7	0,7	0,7
02/11/2016	1,9	1,8	1,8	1,8	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7	1,8	1,8	1,8	1,8	1,7	1,7	1,7	1,6	1,5	1,4	1,3	1,3	1,2	1,1	1,1	1,0	1,0	0,9	0,9	0,8	0,8	0,8	
19/01/2017	1,9	1,8	1,8	1,8	1,8	1,7	1,7	1,7	1,8	1,8	1,9	1,9	1,9	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8	1,7	1,6	1,5	1,4	1,3	1,2	1,2	1,1	1,0	1,0	0,9	0,8	0,8	0,7	0,7	0,6
07/06/2017	1,9	1,8	1,8	1,8	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7	1,8	1,8	1,7	1,7	1,7	1,8	1,8	1,9	1,9	1,9	1,8	1,8	1,8	1,8	1,7	1,8	1,7	1,7	1,6	1,6	1,5	1,5	1,4	1,3	1,3	1,2	1,1	1,1	1,0	0,9	0,9	0,8		

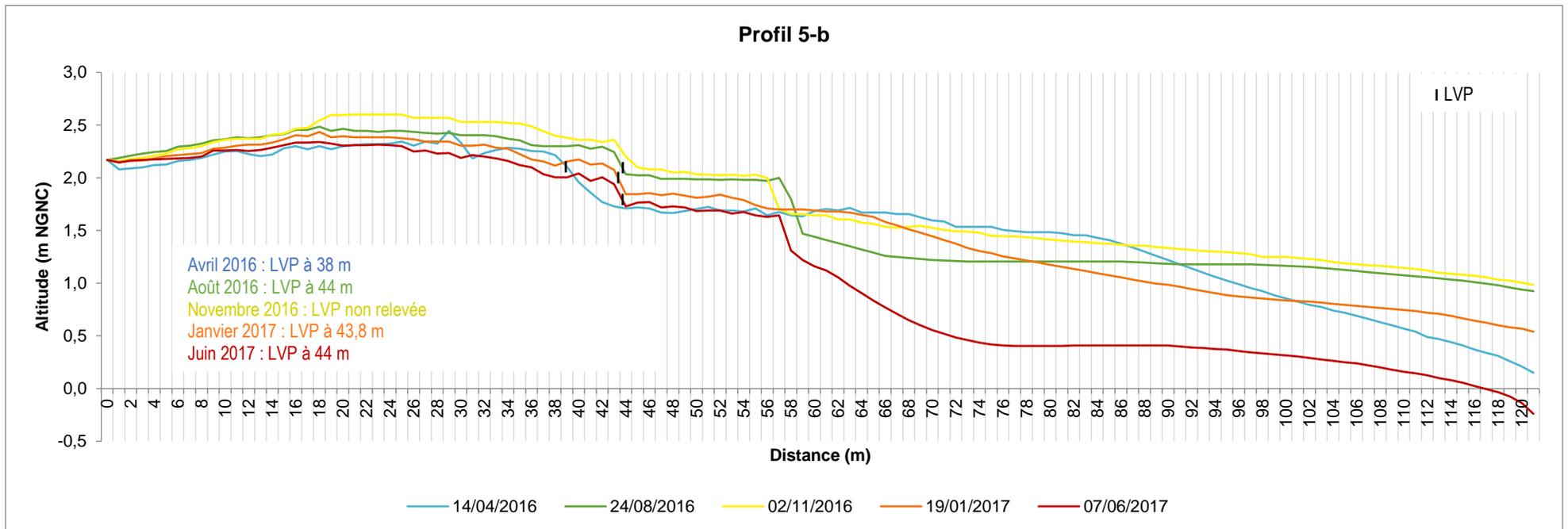
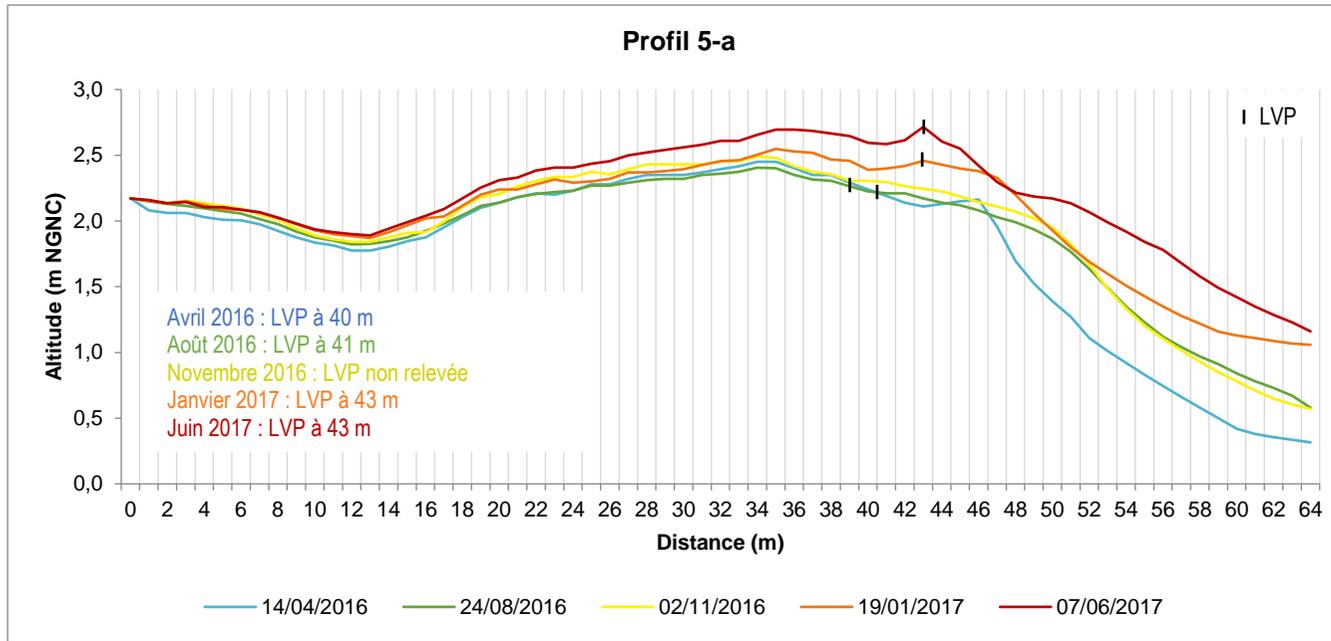
Profil 4

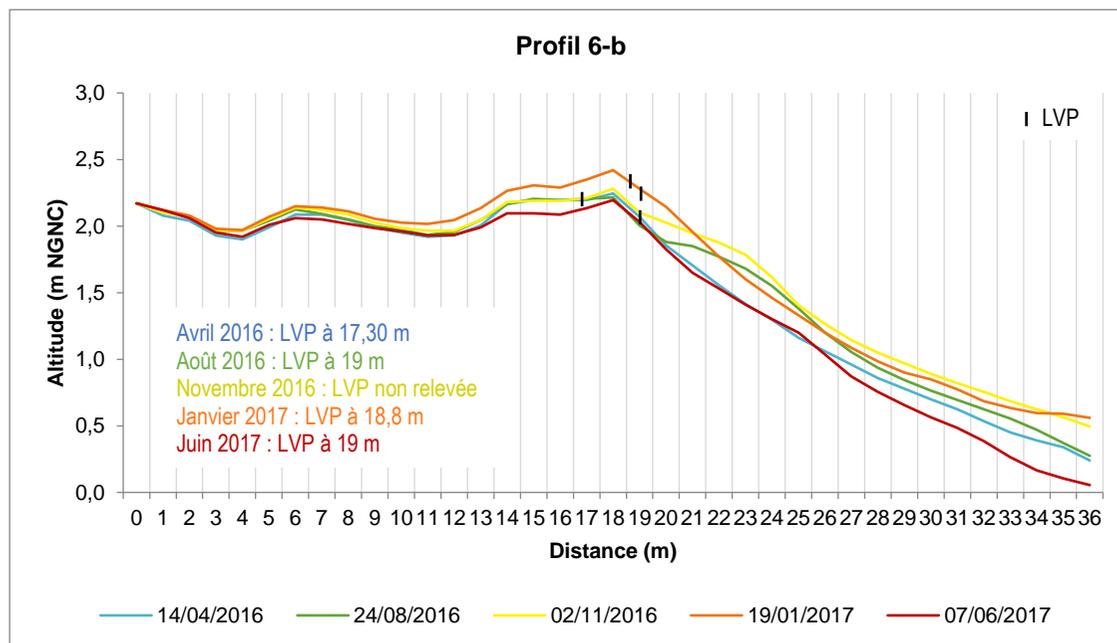
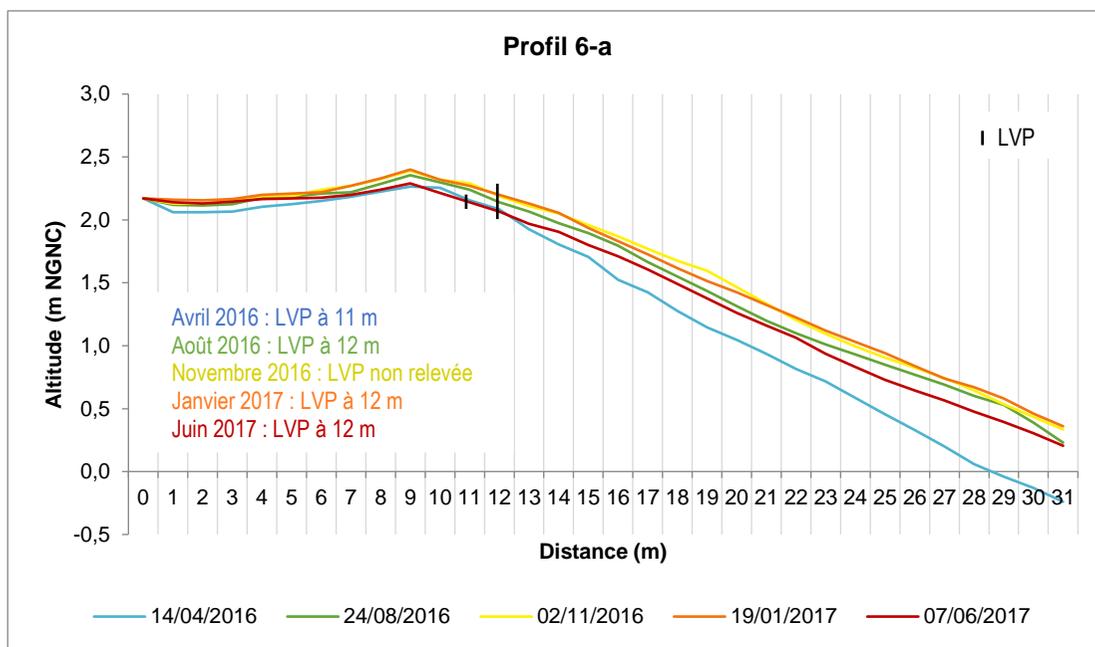


Avril 2016 : LVP à 4 m
 Août 2016 : LVP à 7 m
 Novembre 2016 : LVP non relevée
 Janvier 2017 : LVP à 7 m
 Juin 2017 : LVP à 9 m

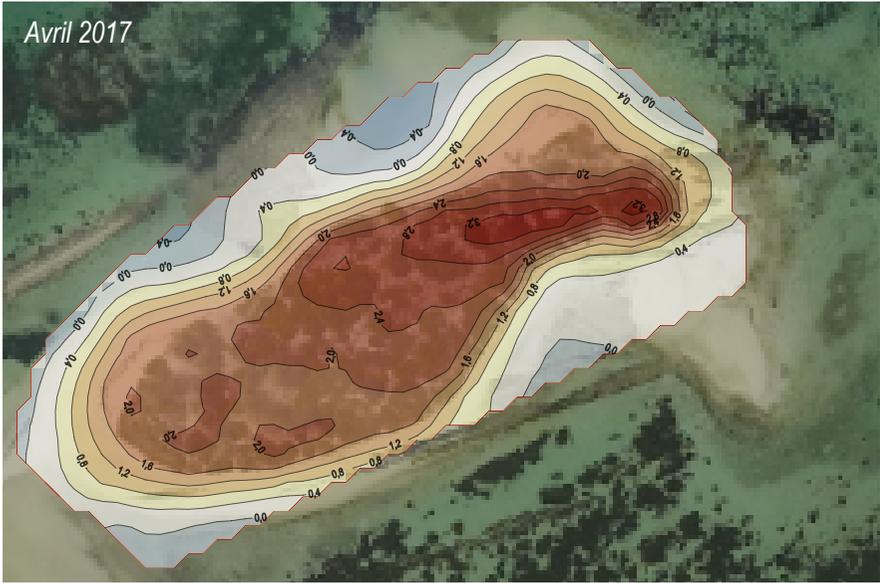
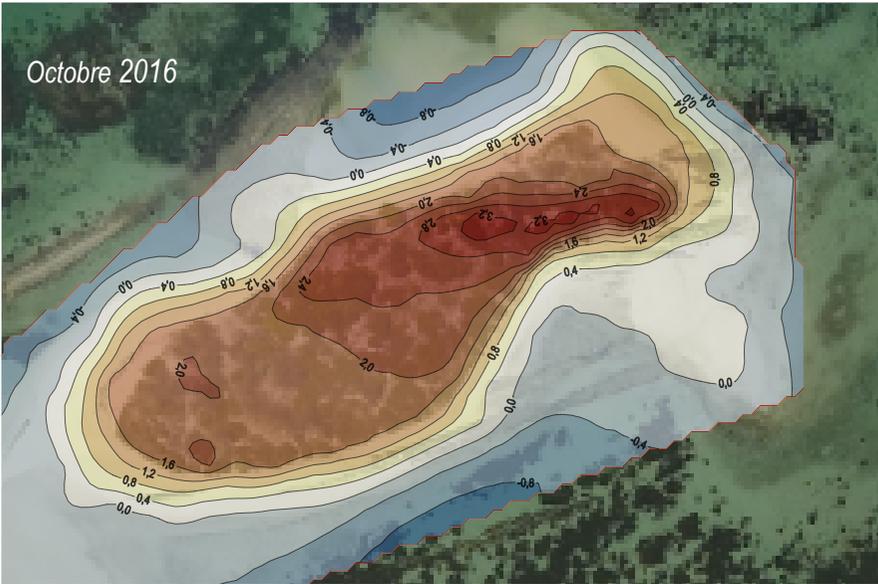
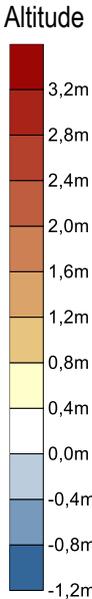
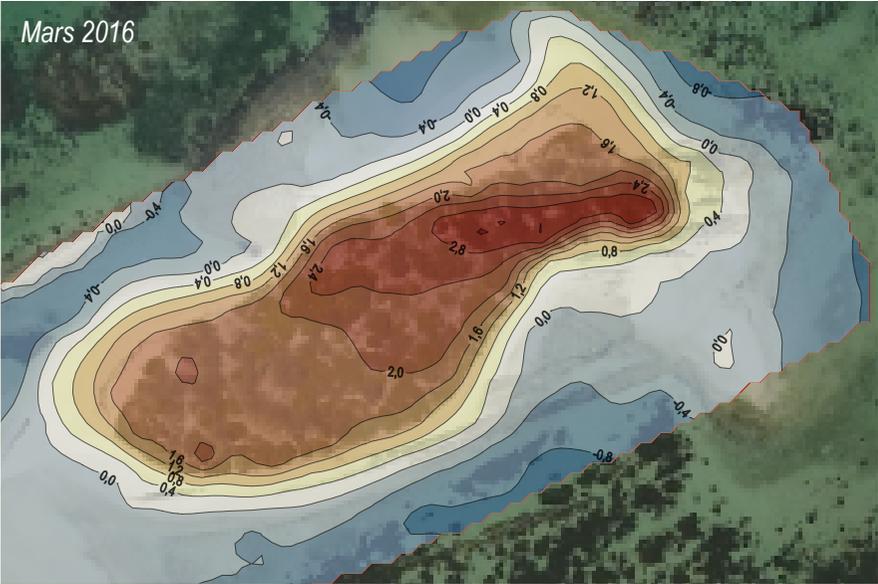
14/04/2016	1,7	1,6	1,7	1,6	1,6	1,6	1,6	1,5	1,5	1,5	1,5	1,4	1,3	1,2	1,1	1,0	0,9	0,8	0,7	0,7	0,7	0,6	0,5
24/08/2016	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	1,5	1,5	1,5	1,4	1,4	1,3	1,3	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2
02/11/2016	1,6	1,5	1,6	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,4	1,4	1,3	1,3	1,2	1,2	1,2	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,2
19/01/2017	1,6	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,2	1,1	1,0	0,9	0,9	0,8	0,7	0,6	0,5	0,4	0,4	
07/06/2017	1,5	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,3	1,2	0,9	0,8	0,7	0,6	0,6	0,6	0,5	0,5	0,4	0,4	0,3	0,3	0,2	

Annexe n° 8 : Profils de plages de Mbé Kouen





Annexe n° 9 : MNT Larégnère



Annexe n° 10 : MNT différentiels Larégnère



MNT différentiel entre mars 2016 et avril 2017 (1 an)



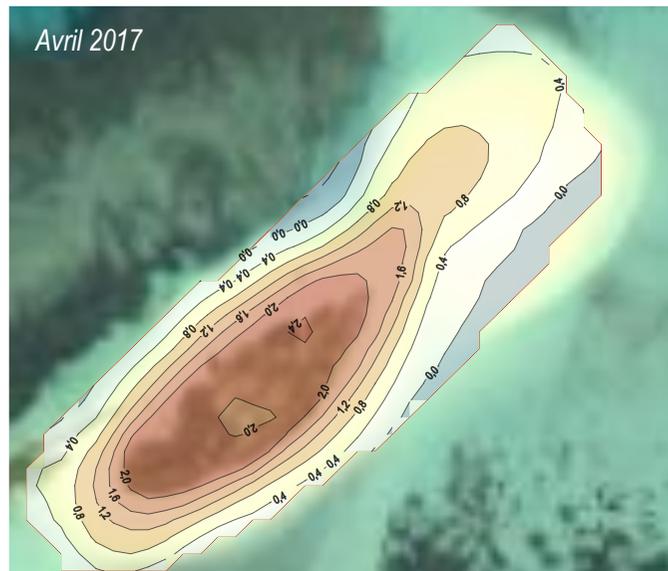
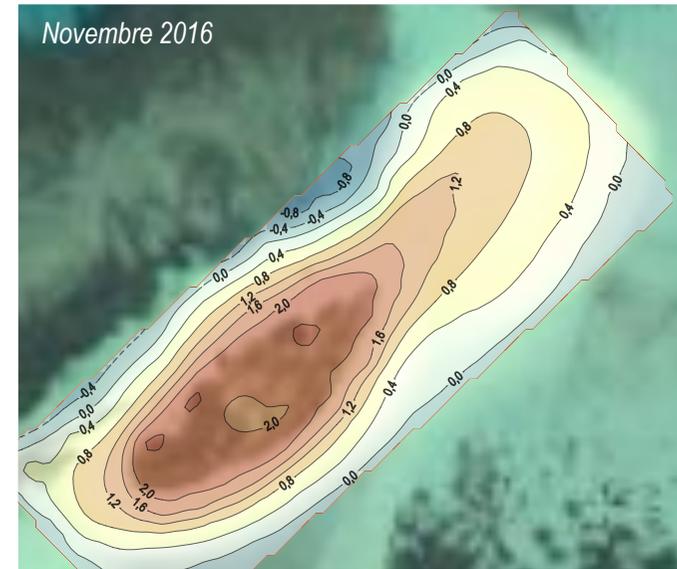
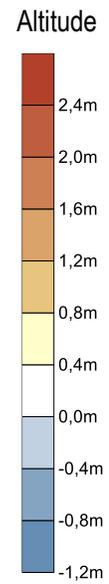
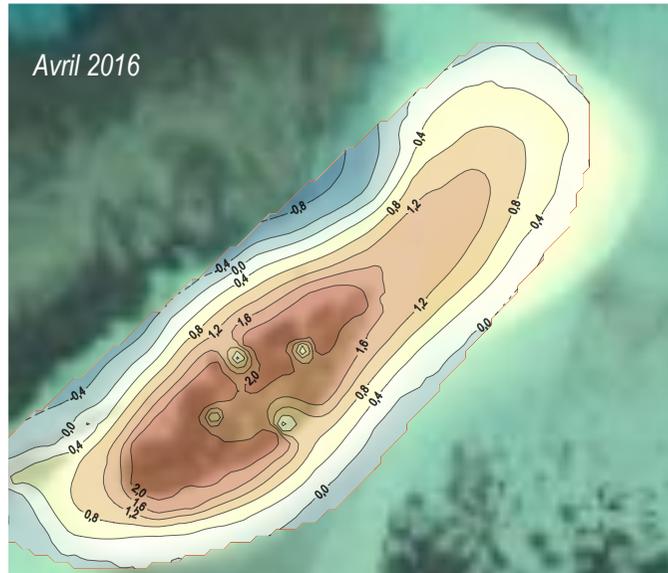
MNT différentiel entre mars et octobre 2016 (7 mois)



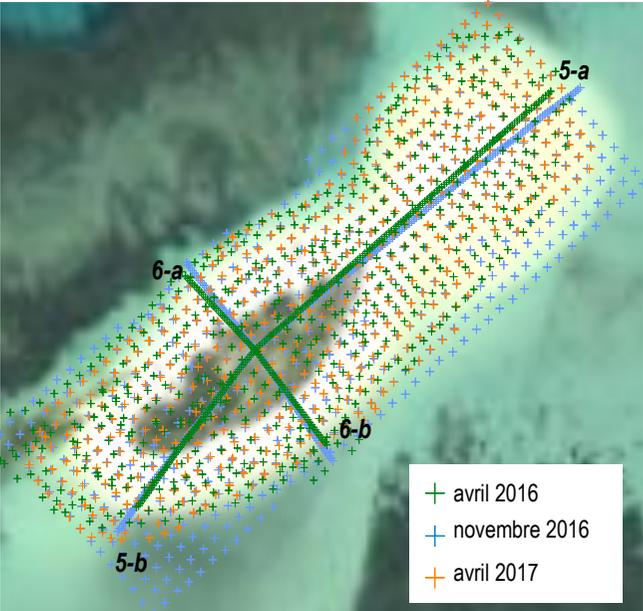
MNT différentiel entre octobre 2016 et avril 2017 (6 mois)



Annexe n° 11 : MNT Mbé Kouen



Annexe n° 12 : MNT différentiels Mbé Kouen



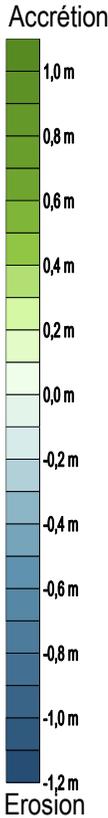
MNT différentiel entre avril et novembre 2016 (6 mois)



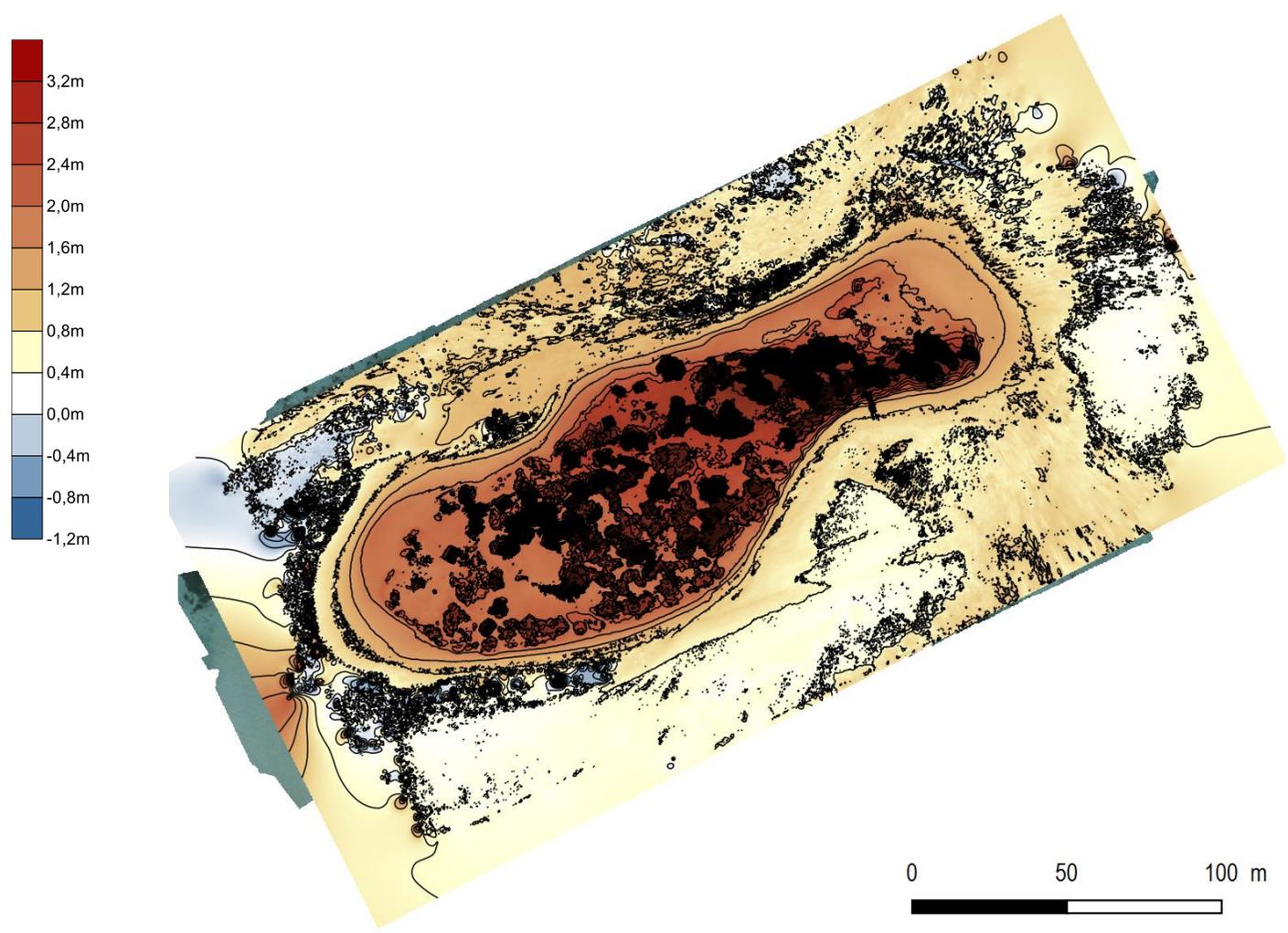
MNT différentiel entre avril 2016 et avril 2017 (1 an)



MNT différentiel entre novembre 2016 et avril 2017 (6 mois)

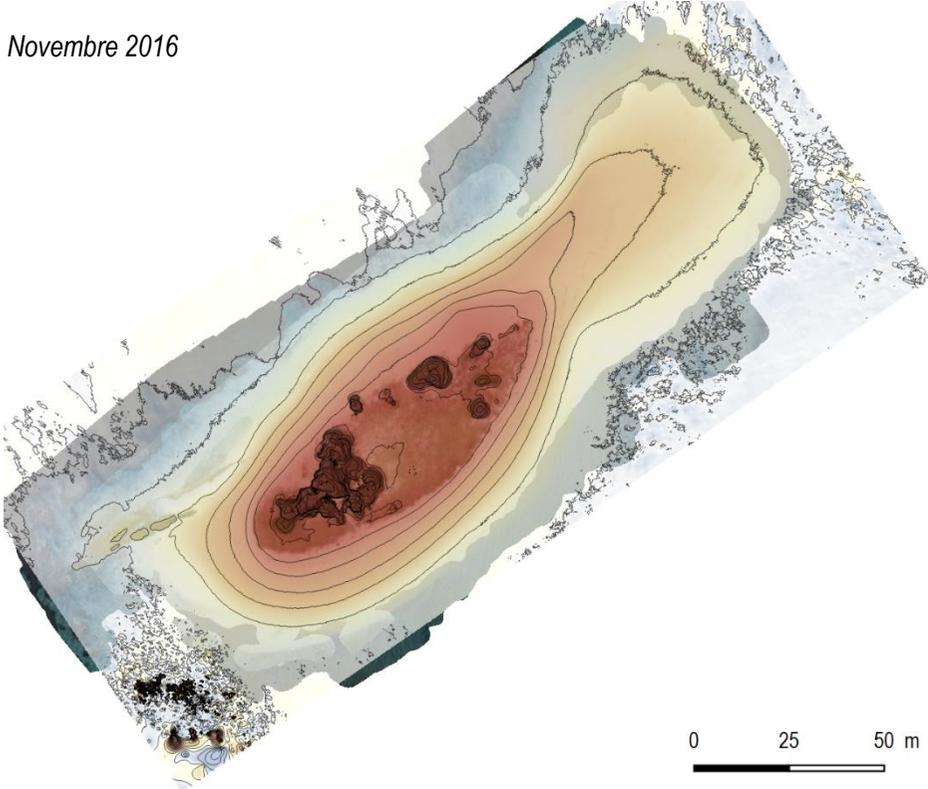


Annexe n° 13 : MNS Larégnère (02/11/2016)

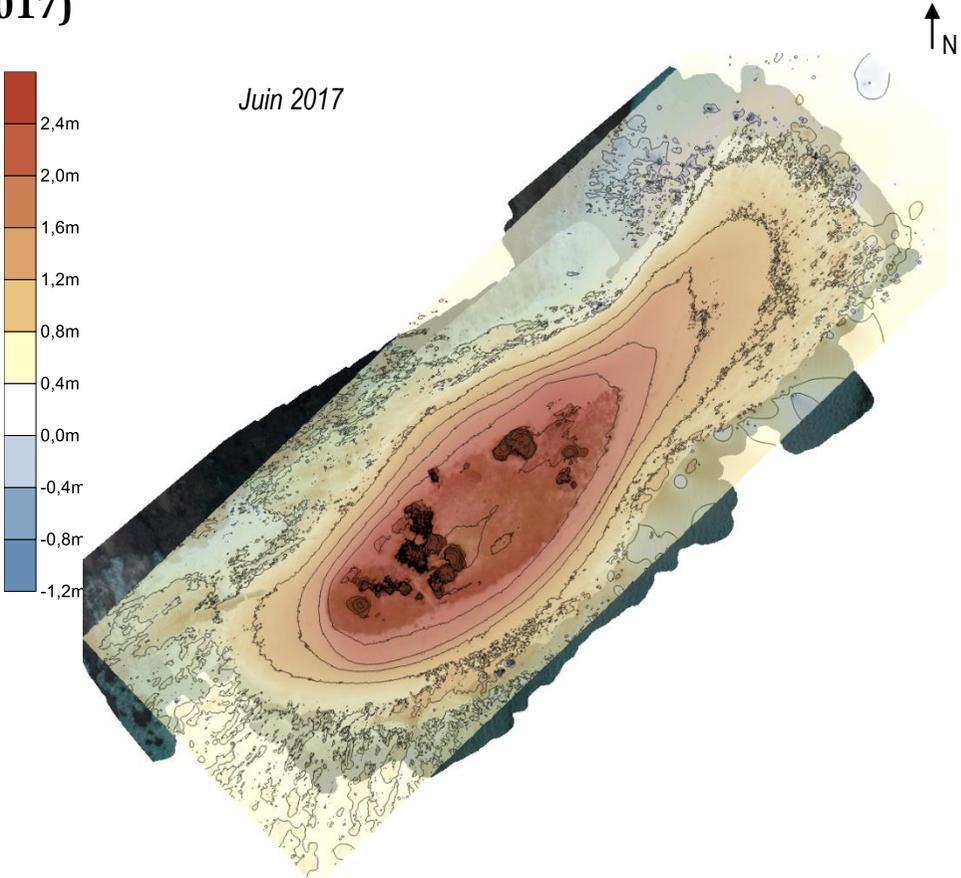


Annexe n° 14 : MNS Mbé Kouen (novembre 2016 et juin 2017)

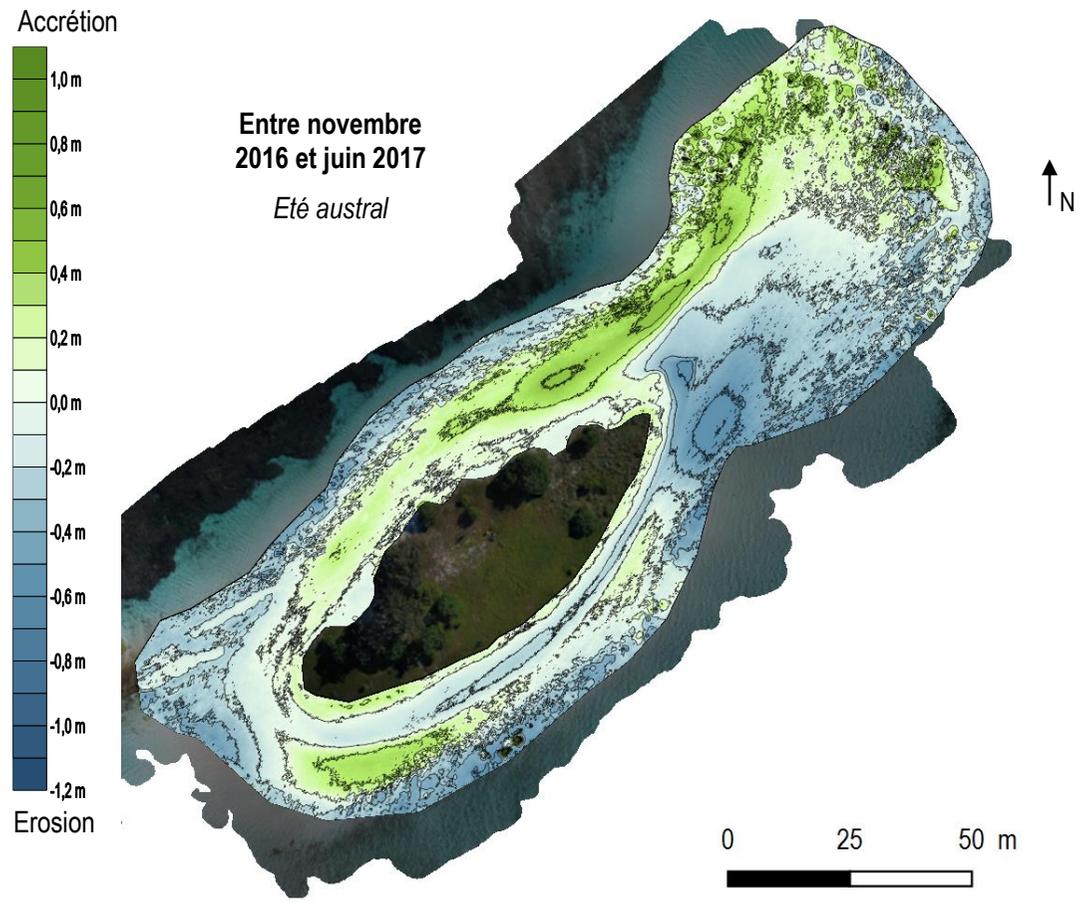
Novembre 2016



Juin 2017



Annexe n° 15 : MNT « photogrammétrique » différentiel Mbé Kouen



	<p>Diplôme : Master de Sciences de la Mer et du Littoral</p> <p>Mention : Expertise et gestion de l'environnement littoral</p> <p>Année : <input type="checkbox"/> M1 <input checked="" type="checkbox"/> M2</p> <p>Enseignant référent : Alain Hénaff</p>
<p>Auteur(s) : Marianne Bricquir</p> <p>Date de naissance : 15/11/1994</p>	<p>Organisme d'accueil : Université de la Nouvelle-Calédonie</p>
<p>Nb pages : 115 Annexe(s) : 15 (20 p.) pages</p>	<p>Adresse : Avenue James Cook, 98851 Nouméa, Nouvelle-Calédonie</p>
<p>Année de soutenance : 2017</p>	<p>Maître de stage : Pascal Dumas</p>
<p>Titre : Les îlots du lagon calédonien : mise en place de méthodes pour le suivi et l'analyse de leurs évolutions géomorphologiques. Application aux îlots Larégnère et Mbé Kouen</p> <p><i>Title : Caledonian lagoon islets : implementation of monitoring and analysis methods of their geomorphological evolutions. Application to Larégnère and Mbé Kouen islets</i></p>	
<p>Résumé (1600 caractères maximum) :</p> <p>Les îlots du lagon calédonien, aussi nommés cayes, sont situés sur des plates-formes récifales ou sur la barrière de corail. Ils sont le résultat d'une accumulation de sédiments bioclastiques et ils jouent un rôle majeur dans l'écosystème du lagon. L'étude s'inscrit dans le cadre d'un projet de recherche (EMIL : Evolution Morphologique des Ilots du Lagon calédonien) accordé par le Ministère des Outre-Mers, regroupe des organismes de recherche et les autorités locales. Elle a pour objectif de caractériser les évolutions à moyen (évolutions récentes) et court (évolutions actuelles) termes des îlots dans un contexte de changements environnementaux. Les changements passés sont identifiés à travers une analyse diachronique à partir de la photo-interprétation du trait de côte sur d'images aériennes et satellites. Les tendances actuelles sont caractérisées par le biais d'une série de données topographiques acquises sur le terrain selon plusieurs techniques. Les différentes méthodes d'acquisition et de traitement des données sont testées et comparées. Les résultats observés sont mis en corrélation avec quelques paramètres environnementaux (niveau marin, El Nino Southern Oscillation, événements cycloniques, exposition aux vents et aux vagues...).</p>	
<p>Abstract (maximum 1600 characters) :</p> <p>Sandy islets (cayes) from New Caledonian lagoon lie on lagoonal reef platforms or on the reef barrier. They result from accumulation of bioclastic sediments and and play a major role in the reef-lagoon ecosystem. This study is part of a research project (EMIL), granted by the French Overseas Ministry, regroups research organizations and local authorities. It aims at characterize medium (recent evolutions) and short (current evolutions) evolutions of islets in the context of environmental changes. Past changes are identified through a diachronic analysis from the photo-interpretation of the coastline on aerial and satellite images. Past changes are identified through a diachronic analysis from the photo-interpretation of the coastline on aerial and satellite images. Current trends are characterized by a series of topographic data acquired in the field using several techniques. The different data acquisition and processing methods are tested and compared. The observed results are correlated with some environmental parameters (sea level, El Nino Southern Oscillation, cyclonic events, exposure to winds and waves, etc.).</p>	
<p>Mots-clés : îlots lagunaires, changement climatique, suivi côtier, évolutions géomorphologiques, mesures topographiques.</p> <p><i>Keywords : lagoon islets, climate change, coastal monitoring, geomorphological evolution, topographic measurements</i></p>	

