

Évolution Morphologique des Îlots du Lagon sud calédonien : indicateur de l'impact du changement climatique - EMIL -

Rapport final
Décembre 2017



Évolution Morphologique des Îlots du Lagon sud calédonien : indicateur de l'impact du changement climatique

- EMIL -

Rapport final

Décembre 2017

SGNC-2017(03)

M.Vendé-Leclerc¹, M. Bricquir⁴, M. Garcin², J. Aucan³, P. Dumas⁴

Avec la collaboration de V. Machful⁵, F. Coulson⁵, M. Le Duff⁴, H. Muller², A. Nicolae Lerma²,
O.Cohen⁶, M. Allenbach⁴, T. Hoibian⁴, B. Robineau¹, M. Mengin¹

¹ DIMENC, Service de la Géologie de Nouvelle-Calédonie, 1 ter rue Unger, BP 465, 98845 Nouméa cedex Nouvelle-Calédonie

² BRGM, Unité Risques Côtiers et Changement Climatique, 3 Av. Claude Guillemin, BP6009, 45060 Orléans cedex France

³ IRD, LEGOS, Centre IRD de Nouméa, 101 Promenade Roger Laroque, BP A5, 98848 Nouméa cedex Nouvelle-Calédonie

⁴ UNC, Université de Nouvelle-Calédonie, BP R4 98851, Noumea Cedex New-Caledonia

⁵ Province sud, DENV/DFA, 9 route des Artifices, Baie de la Moselle, PB L1, 98849 Nouméa Cedex, Nouvelle-Calédonie,

⁶ Laboratoire d'Océanologie et de Géosciences (UMR CNRS 8187), Université du Littoral Côte d'Opale, 32 Avenue Foch, 62930 Wimereux, olivier.cohen@univ-littoral.fr

Vérificateur

Nom : Mengin Mathieu

Date : 22/12/2017

Signature :

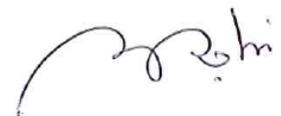


Approbateur

Nom : Bernard Robineau

Date : 22/12/2017

Signature :



Mots-Clés : Changement climatique, Nouvelle-Calédonie, îlots, récif, lagon, vagues, hydrodynamique, évènements extrêmes, variabilité interannuelle climatique, niveau marin, géomorphologie, érosion

En bibliographie, ce rapport sera cité de la façon suivante :

Vendé-Leclerc M., Bricquir M., Garcin M., Aucan J., Dumas P. (2017) – Évolution Morphologique des Îlots du Lagon sud calédonien : indicateur de l'impact du changement climatique (EMIL), Rapport final (SGNC-2017 (03).

Sommaire

Sommaire.....	5
Liste des figures.....	7
Liste des tableaux	13
Liste des acronymes	14
Introduction	15
1- Analyse pluri échelles de l'évolution récente et actuelle des îlots.....	19
1.1 Analyse du contexte local.....	19
1.1.1 La Nouvelle-Calédonie	19
1.1.2 Le lagon et les récifs coralliens de Nouvelle-Calédonie.....	19
1.1.3 Les caractéristiques physiques du lagon sud-ouest	20
1.1.4 Les îlots du lagon calédonien	21
1.1.5 Les caractéristiques des îlots étudiés	26
1.2 Evolution de la morphologie des îlots à moyen et court terme.....	31
1.2.1 L'évolution passée et récente des îlots.....	31
1.2.2 L'évolution actuelle des îlots.....	58
2- Caractérisation et analyse pluri-échelles des facteurs de forçages de l'évolution des îlots.....	93
2.2 Facteurs de forçages à l'échelle du sud-ouest de l'océan Pacifique.....	95
2.2.1 L'évolution du niveau marin régional	95
2.2.2 Les phénomènes de variations climatiques interannuelles	98
2.3 Facteurs de forçages à l'échelle de la Nouvelle-Calédonie	100
2.3.1 Le climat calédonien	100
2.3.2 Les événements météorologiques extrêmes	101

2.4	Facteurs de forçages à l'échelle du lagon calédonien	106
2.4.1	Les conditions hydrodynamiques du système « récif-lagon »	106
2.4.2	Le niveau marin local	109
2.5	Facteurs de forçages à l'échelle des îlots.....	111
2.5.1	Les climats de vents et de vagues locaux à proximité des îlots	111
2.6	Tentative de corrélation entre les évolutions de la géomorphologie des îlots et les facteurs de forçages.....	114
2.6.1	La mise en corrélation des évolutions passées et récentes avec les paramètres environnementaux régionaux et locaux	114
2.6.2	La typologie OBLIC appliquée aux 2 îlots étudiés	118
2.6.3	Une tentative de corrélation entre les évolutions actuelles et les climats de vagues locaux	119
3-	Spécification et mise en place d'un réseau de mesures pérenne	122
3.1	Spécification d'outils et de méthodes adaptés à l'étude de la mobilité des îlots	122
3.1.1	La description des outils et des méthodes.....	122
3.1.2	Les limites de l'analyse de l'évolution récente des îlots	127
3.1.3	La comparaison des méthodes d'analyse de l'évolution actuelle des îlots	128
3.2	Perspectives et préconisations pour la continuité du suivi des évolutions morphologiques de Larégnère et Mbé Kouen.....	137
	Conclusion.....	139
	Bibliographie	141

Liste des figures

Figure 1 : La Nouvelle-Calédonie et sa localisation dans le Pacifique Sud-Ouest	19
Figure 2 : Le lagon sud-ouest de la Nouvelle-Calédonie (altimétrie et bathymétrie)	21
Figure 3 : L'îlot Larégnère (août 2016)	22
Figure 4 : Plusieurs générations de beachrocks qui résultent de la fossilisation d'anciennes plages successives, Sud-Est de l'îlot Larégnère	23
Figure 5 : Les différents stades évolutifs des îlots calédoniens	25
Figure 6 : Localisation et contexte des deux îlots étudiés dans le cadre du programme EMIL	26
Figure 7 : Localisation de l'îlot Larégnère et de sa plate-forme récifale dans le lagon sud-ouest... ..	27
Figure 8 : Positionnement des beachrocks de l'îlot Larégnère	28
Figure 9 : Localisation de l'îlot Mbé Kouen et de sa plate-forme récifale dans le lagon sud-ouest. ..	29
Figure 10 : Bois de fer (Filao) et bois matelot de l'îlot Mbé Kouen : plantes pionnières qui colonisent les talus et les zones en accrétion. Installées sur les bordures, elles créent une ceinture en haut de plage. Ces espèces sont positionnées face au vent et résistent aux embruns	29
Figure 11 : Positionnement des beachrocks de l'îlot Mbé Kouen	30
Figure 12 : les étapes successives du protocole méthodologique appliqué dans le cadre de l'analyse diachronique de l'évolution des îlots	31
Figure 13 : Limites de végétation permanente numérisée pour 6 dates pour l'îlot Larégnère.	34
Figure 14 : Signification de la marge d'erreur calculée pour l'analyse diachronique des îlots	34
Figure 15 : Evolution de la surface de l'îlot Larégnère exprimée en m ²	35
Figure 16 : Transects équidistants de 10 m créés autour d'une ligne de base virtuelle, exemple îlot Larégnère.....	35
Figure 17 : Cartographie de la dynamique de la LVP sur la période 2004-2016 par secteur d'évolution homogène, îlot Larégnère.....	37
Figure 18 : Cartographie de la dynamique de la LVP sur la période 2009-2017 par secteur d'évolution homogène, îlot Mbé Kouen	38
Figure 19 : Evolution de la surface de l'îlot Larégnère de 2004 à 2016 (exprimée en m ²)	39
Figure 20 : Localisation des beachrocks de l'îlot Larégnère.....	40
Figure 21 : Plusieurs générations de beachrocks obliques par rapport à la plage actuelle et distants d'environ 40 m par rapport au rivage actuel (plage sud de l'îlot Larégnère)	40
Figure 22 : Localisation des transects qui ont permis de définir les secteurs d'évolution homogène, îlot Larégnère	41
Figure 23 : Définition des secteurs de comportement homogène, îlot Larégnère	41
Figure 24 : Vitesse moyenne d'évolution mesurée par secteur pour la période 2004 à 2016 (en m/an), îlot Larégnère.....	42
Figure 25 : Vitesse moyenne d'évolution mesurée par secteur et par période (en m/an), îlot Larégnère.....	42

Figure 26 : 1) zone en accrétion avec de légères traces d'érosion d'ancienne sur le S1 (photo avril 2016) 2) recul de la LVP du S1 (photo juin 2017)	43
Figure 27 : Talus d'érosion situé à la pointe sud-est du S2, témoin de la phase de recul entre 2007 à 2015 (photo 2015)	44
Figure 28 : Arbres déchaussés et talus vif témoins de la réactivation de l'érosion du S2 en 2017 (photo 17/10/2017).....	44
Figure 29: Recolonisation du talus par une végétation rampante (pourpier) du S3 (photo 2016)..	45
Figure 30 : Talus d'érosion de 1,20 m de hauteur encore actif sur le S3 (photo 2017)	45
Figure 31 : Processus érosif réactivé sur le S3 (sud-est) en 2017 (photo 17/10/2017) avec un talus actif et impacts sur la végétation	46
Figure 32 : Zone stable du S4 (sud) (photo 17/10/2017)	46
Figure 33 : Secteur 5 en situation d'accrétion entre 2012 et 2016 (photo 2016).....	47
Figure 34 : Stabilité voire accrétion du S6 (photo 2015).....	47
Figure 35: Zone stable du S7, en haut de plage, on observe une barrière de protection au niveau de la végétation rampante (photo 2016).....	48
Figure 36 : Photographie de 2016 qui témoigne de la situation en engraissement du S8 sur la période 2004-2016	48
Figure 37 : 1 et 2) photographies du S9 de 2014 (1) et 2015 (2) témoignant de la phase d'érosion active. 3) photographie du S9 en 2016 qui montre la cicatrisation du talus et la recolonisation par la végétation pionnière	49
Figure 38 : Photographie du S10 en 2016, secteur stable ponctué de brefs épisodes de recul.	50
Figure 39 : Evolution de la surface de l'îlot Mbé Kouen de 2009 à 2017 (exprimée en m ²)	50
Figure 40 : Localisation des transects qui ont permis de définir les secteurs d'évolution homogène, îlot Mbé Kouen	52
Figure 41 : Définition des secteurs de comportement homogène, îlot Mbé Kouen	52
Figure 42 : Vitesse moyenne d'évolution mesurée par secteur pour la période 2009 à 2017 (en m/an), îlot Mbé Kouen	53
Figure 43 : Vitesse moyenne d'évolution mesurée par secteur et par période (en m/an), îlot Mbé Kouen	53
Figure 44 : Photographie du S1 de Mbé Kouen (2016) en accrétion depuis 2009.....	54
Figure 45 : 1) Photographie du S1 de Mbé Kouen (2016) qui témoigne de la phase d'érosion de 2013-2016. 2) Photographie du S1 (2017) qui illustre la stabilité observée actuellement.....	54
Figure 46 : Secteur 3 en situation d'accrétion en 2016.....	55
Figure 47 : Stabilité du S4 en 2017	55
Figure 48 : 1) LVP du S5 en situation de recul en 2014 2) En 2017 avancée de la LVP qui s'observe au niveau du faux-tabac.....	56
Figure 49 : Schématisation de la dynamique sur la période récente (2009-2017) de l'îlot Mbé Kouen	56
Figure 50 : Localisation des beachrocks de l'îlot Mbé Kouen	57

Figure 51 : Détail chronologique des différentes missions terrain réalisées dans la cadre du projet EMIL.....	58
Figure 52 : Mise en pratique de l’outil par les gardes nature de la province Sud lors de la mission du 17/10/2017, îlot Larégnère	59
Figure 53 :.....	60
Figure 54 : Méthode pour le levé de profil débutant au sommet du repère.....	61
Figure 55 : Les 6 profils de plage de l’îlot Larégnère	62
Figure 56 : Les 4 profils de plage de l’îlot Mbé Kouen	62
Figure 57 : Exemple de cibles disposées sur l’îlot Larégnère lors de la mission du 02/11/2016 (image drone).....	66
Figure 58 : Observations géomorphologiques réalisées sur le terrain (Ilot Larégnère, 2016).....	67
Figure 59 : Les étapes successives du protocole de traitement appliqué pour la création des profils de plage et pour leur comparaison	68
Figure 60 : Comparaison des 5 profils 6-a (Mbé Kouen).....	69
Figure 61 : Comparaison des profils 6-a (Mbé Kouen) du 24/08/2016 et 02/11/2016 après ré-échantillonnage.....	70
Figure 62 : Les étapes successives du protocole de traitement appliqué pour la création des MNT71	
Figure 63 : Du semi de point (DGPS) à l'interpolation, exemple de la création d'un MNT (Larégnère).....	72
Figure 64 : Exemple de création d'un MNT différentiel (entre mars 2016 et avril 2017, Larégnère)73	
Figure 65 : Les étapes successives du protocole de traitement appliqué pour la création des MNS74	
Figure 66 : Chaîne de traitement générale utilisée en vision par ordinateur (d'après Bhandari et al. 2015 « Generation of High Resolution DSM Using UAV Images »).....	75
Figure 67 : MNT différentiels d’une résolution de 5 m et interpolés par krigeage à partir de semis de points levés au DGPS, îlot Larégnère.....	77
Figure 68 : Localisation des différents secteurs et des profils de plage utilisés pour l’analyse des évolutions actuelles et exposition de l’îlot aux différentes conditions de vagues, îlot Larégnère ..	78
Figure 69 : Profil 1-a mesuré à 5 dates (14/04/2016 ; 08/08/2016 ; 02/11/2016 ; 19/01/2017 ; 07/06/2017), îlot Larégnère	80
Figure 70 : Apparition d’un talus de haut de plage d’une hauteur de 60 cm situé à 13 m sur le profil de plage 1-a (19/01/2017)	80
Figure 71 : Aplanissement du profil 1-a en haut de plage et disparition du talus (07/06/2017).....	81
Figure 72 : Profil 4 mesuré à 5 dates (14/04/2016 ; 08/08/2016 ; 02/11/2016 ; 19/01/2017 ; 07/06/2017), îlot Larégnère	81
Figure 73 : Formation d’un talus de 40 cm de hauteur situé en haut de plage (07/05/2017)	82
Figure 74 : Profil 3 mesuré à 5 dates (14/04/2016 ; 08/08/2016 ; 02/11/2016 ; 19/01/2017 ; 07/06/2017), îlot Larégnère	83
Figure 75 : A gauche 19/01/2017 et à droite 07/05/2017 : avancée de la limite de végétation rampante mesurée à partir du panneau d’information de la province Sud	83

Figure 76 : Profil 1-b mesuré à 5 dates (14/04/2016 ; 08/08/2016 ; 02/11/2016 ; 19/01/2017 ; 07/06/2017), îlot Larégnère	84
Figure 77 : A gauche 02/11/2016 et à droite 19/01/2017 : recul du talus de 1 m environ	84
Figure 78 : MNT différentiels d'une résolution de 5 m et interpolés par krigeage à partir de semis de points levés au DGPS, îlot Mbé Kouen	85
Figure 79 : Localisation des différents secteurs et des profils de plage utilisés pour l'analyse des évolutions actuelles et exposition de l'îlot aux différentes conditions de vagues, îlot Mbé Kouen	86
Figure 80 : Profil 5-a mesuré à 5 dates (14/04/2016 ; 08/08/2016 ; 02/11/2016 ; 19/01/2017 ; 07/06/2017), îlot Mbé Kouen.....	88
Figure 81 : A gauche 14/04/2016 et à droite 07/05/2017 : avancée de la LVP	89
Figure 82 : Profil 6-a mesuré à 5 dates (14/04/2016 ; 08/08/2016 ; 02/11/2016 ; 19/01/2017 ; 07/06/2017), îlot Mbé Kouen.....	89
Figure 83 : A gauche 02/11/2016 et à droite 19/01/2017 : engraissement du bas de plage entre ces deux dates	90
Figure 84: Profil 5-b mesuré à 5 dates (14/04/2016 ; 08/08/2016 ; 02/11/2016 ; 19/01/2017 ; 07/06/2017), îlot Mbé Kouen.....	91
Figure 85 : Formation d'un talus d'érosion sur le S3 bien visible sur le profil 5b (photographie 24/08/2016)	91
Figure 86 : Talus d'érosion toujours actif (photographies 05/06/2017).....	92
Figure 87 : Echelles spatio-temporelles des changements du littoral (d'après Suanez S., 2009, adapté de S. Fenster et al., 1993).....	94
Figure 88 : Les facteurs de forçage de l'évolution des îlots à différentes échelles spatiales.....	95
Figure 89 : Niveau marin global obtenu à partir des marégraphes entre 1900 et 2001 (sources : Church et al. 2004 ; Jevrejeva et al. 2006, d'après Cazenave et al., 2010)	96
Figure 90 : Niveau moyen marin 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).....	96
Figure 91 : Vitesse d'élévation du niveau marin sur la période altimétrique 1992-2012 (en mm/an) (Becker et al., 2012)	97
Figure 92 : Vitesse d'élévation du niveau marin de l'Océan Pacifique Ouest sur la période altimétrique 1993-2017 (en mm/an) (Aucan, 2017).....	97
Figure 93 : A gauche niveau marin annuel de 1968 à 2012. A droite : vue détaillée de la période 2002 à 2012 avec une élévation accélérée du niveau de la mer. Les lignes noires pointillées montrent des tendances linéaires (SHOM, www.Sonel.org , www.psmsl.org) (Garcin et al., 2016)	98
Figure 94 : Représentation de l'indice OIN entre 1982 et 2017 (NOAA, www.cpc.ncep.noaa.gov , juin 2017).....	99
Figure 95 : Cartographie de la trajectoire des événements cycloniques ayant impactés la Nouvelle-Calédonie entre 2000 et 2017 (source : NOAA)	103
Figure 96 : A gauche : creusement du talus de la plage nord-est ; à droite : beachrocks de la plage sud-ouest recouvert par le sable (apport de sédiments) (Source : DENV, 23 décembre 2016)	105

Figure 97 : A gauche : talus d'érosion, végétation rampante arrachée, arbres déracinés sur la plage sud de Larégnère (10/02/2017) à droite : talus d'érosion sur la plage sud-ouest de Mbé Kouen (13/02/2017) (Source : DENV).....	105
Figure 98 : En haut à gauche : Nombreux débris coralliens au-delà de la limite de végétation ; en haut à droite : talus d'érosion sur la partie est de l'îlot Larégnère (le 13/02/2017, après le passage du cyclone Cook) ; en bas à gauche : talus d'érosion, arbres déracinés et débris coralliens à l'est de Larégnère ; en bas à droite : falaisage en haut de plage.....	106
Figure 99 : Circulation de l'eau dans un système côtier "récif-lagon" (source : Lowe et Falter, 2015).....	107
Figure 100 : 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)	108
Figure 101 : Niveau moyen de la mer à Nouméa en m (15/12/2016)	110
Figure 102 : Vitesse d'évolution du niveau moyen de la mer à Nouméa calculé sur 40 ans (en mm/an).....	110
Figure 103 : 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... ..	110
Figure 104 : Localisation des capteurs de pression à proximité des îlots, Mbé Kouen en haut et Larégnère en bas	111
Figure 105 : Localisation du point d'extraction du modèle de vague Wave Watch III	112
Figure 106 : Des données environnementales recueillies à différentes échelles spatiales corrélées à l'évolution des îlots caractérisées à différentes échelles temporelles.....	114
Figure 107 : Mise en corrélation des facteurs de forçage avec les évolutions des superficies des îlots Larégnère et Mbé Kouen	115
Figure 108 : Interprétation des relations entre les familles de vagues et les bilans sédimentaires saisonniers par secteur, îlot Larégnère	120
Figure 109 : Interprétation des relations entre les familles de vagues et les bilans sédimentaires saisonniers par secteur, îlot Mbé Kouen.....	121
Figure 110 : Talus d'érosion photographié à Larégnère le 24/08/2016 lors d'une mission d'observation de terrain.....	124
Figure 111 : Plan et principe du cadre d'Emery, technique utilisée dans la réalisation de profils de plage (SGNC d'après Troadec, 2012).....	125
Figure 112 : Repère fixe et base du DGPS installée lors du levé terrain du 05/07/2017 sur l'îlot Mbé Kouen	126
Figure 113 : Levé d'un profil de plage au cadre et au DGPS en simultané (02/11/2016)	128
Figure 114 : 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... ..	129
Figure 115 : 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.....	130
Figure 116 : 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 : MNT (courbe noire en pointillés) et MNS (courbe rouge en pointillés).....	131

Figure 117 : MNT différentiel représentant la différence d'élévation (Z) entre un MNT issu de données DGPS (5 m de résolution) et un MNT issu de traitements photogrammétriques à partir d'images acquises par drone (1,7 cm de résolution) 132

Figure 118 : 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) 133

Figure 119 : 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. 134

Liste des tableaux

Tableau 1: Eléments morphologiques caractéristiques des plates-formes récifales et des îlots Larégnère et Mbé Kouen.....	30
Tableau 2 : Les images aériennes et satellites récoltées pour l'analyse diachronique de l'évolution des îlots et leurs paramètres.....	32
Tableau 3 : Exemple de secteurs d'évolution homogène entre 2004 et 2016 définis pour l'îlot Larégnère.....	36
Tableau 4 : Exemple de secteurs d'évolution homogène entre 2009 et 2017 définis pour l'îlot Mbé Kouen	36
Tableau 5 : Typologie des tendances évolutives en fonction de leur vitesse d'évolution (m/an)...	37
Tableau 6 : Evolution de la surface de l'îlot Larégnère entre 2004 et 2016	39
Tableau 7 : Evolution de la surface de l'îlot Mbé Kouen entre 2009 et 2017	50
Tableau 8 : Les caractéristiques des 10 profils de plage implantés sur les îlots	61
Tableau 9 : Caractéristiques des semis de points levés au DGPS.....	63
Tableau 10 : Caractéristiques des missions drone	65
Tableau 11 : Bilans volumétriques de sédiments calculés par secteur, îlot Larégnère	78
Tableau 12 : Pertes et gains en sédiments calculés par période et par secteur, îlot Larégnère.....	79
Tableau 13 : Bilans volumétriques de sédiments calculés par secteur, îlot Mbé Kouen	87
Tableau 14 : Pertes et gains en sédiments calculés par période et par secteur, îlot Mbé Kouen ...	87
Tableau 15 : Caractérisation des périodes de ONI de 1950 à 2016 (NOAA, juin 2017)	99
Tableau 16 : Classification des événements cycloniques (source : Météo NC)	101
Tableau 17 : Evénements cycloniques depuis 2002 à aujourd'hui (source : Météo NC).....	102
Tableau 18 : Recensement des événements météorologiques notables ayant impactés le sud-ouest de la Nouvelle-Calédonie et les îlots étudiés (colonnes grisées évènements ayant un impact fort sur les 2 îlots) (recensement SGNC et bulletins météorologiques Météo NC - janvier 2016 à juin 2017).....	104
Tableau 19 : Stade actuel des îlots Larégnère et Mbé Kouen selon la typologie d'évolution des îlots (Garcin et al., 2016).....	118
Tableau 20 : Avantages et inconvénients des méthodes d'acquisition et de traitement de données topographiques testées au cours de l'étude.....	135

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 : Evolution Morphologique des Ilots du Lagon sud calédonien
DENV : Direction de l'Environnement de la province Sud
DFA : Direction du Foncier et de l'Aménagement de la province Sud
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
MOM : Ministère des Outre-mer
NGNC : Nivellement Général de la Nouvelle-Calédonie
OBLIC : Observatoire du Littoral de Nouvelle-Calédonie
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

Des questions récurrentes sont posées par les populations, les collectivités locales et les organismes gouvernementaux concernant la vulnérabilité des côtes calédoniennes face au changement climatique et leur comportement futur et leur avenir. Afin de répondre à ces interrogations et de prévenir les effets du changement climatique, il est indispensable que la Nouvelle-Calédonie bénéficie d'une connaissance et d'une compréhension des phénomènes et processus qui peuvent affecter l'évolution et la dynamique de ses littoraux. En effet, le préalable à une gestion efficace et intégrée de l'espace littoral est bien une connaissance approfondie de ses mécanismes d'évolution.

Afin de répondre à ce besoin, il semble nécessaire de fédérer les acteurs locaux et de mettre en place une gestion des données et des informations disponibles sur le sujet. C'est pourquoi le Service de la Géologie de la Nouvelle-Calédonie (SGNC) et le Bureau de Recherche Géologique et Minière (BRGM) ont créé en 2013 l'Observatoire du Littoral de Nouvelle-Calédonie (OBLIC). Ce centre de ressource, de connaissance et d'expertise sur le littoral a pour objectifs de centraliser, pérenniser, valoriser et diffuser les méthodes, les données et les informations issues des projets de recherche et des études techniques ayant trait au domaine maritime et littoral et de rassembler les acteurs locaux au sein d'un réseau.

Au-delà de la compilation et mise à disposition des données et de la fédération des acteurs, une recherche ayant pour finalité l'amélioration et l'enrichissement de la connaissance scientifique sur les impacts du changement climatique sur le littoral calédonien doit être menée avec la mise en place de programmes de recherche pluridisciplinaires.

C'est dans ce sens que le projet **EMIL (Évolution Morphologique des Îlots du Lagon sud calédonien : indicateur de l'impact du changement climatique)** a été proposé en 2015 dans le cadre de l'appel à projet recherche du Ministère des Outre-mer (MOM). Ce programme de recherche s'inscrit dans un contexte de développement de projets et d'études concernant l'acquisition de données et de connaissances sur l'environnement littoral et les risques côtiers en Nouvelle-Calédonie, comme :

- l'étude menée par le SGNC et le BRGM sur « l'évolution récente et future des systèmes côtiers de Nouvelle-Calédonie »,
- le projet MOM Litto : « Mise en place d'un réseau participatif de suivi du rivage : expérimentation des Iles Loyauté en Nouvelle-Calédonie » coordonné par l'UNC,
- la thèse de doctorat en géographie de Matthieu Le Duff de l'UNC « 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 »,
- le projet MOUVEA (GOPS 2013) : surveillance des vagues et du niveau marin dans le lagon d'Ouvéa.

Le lagon et les récifs coralliens de Nouvelle-Calédonie hébergent des écosystèmes spécifiques et riches, caractérisés par une diversité exceptionnelle d'espèces de coraux, de structures récifales, de poissons et d'habitats. En 2008, une grande partie du lagon de la Nouvelle-Calédonie a été ajoutée à la liste du Patrimoine Mondial de l'UNESCO. Cette inscription devrait favoriser la mise en place d'une gestion adaptée et intégrée du lagon.

De nombreux îlots sont présents dans le lagon calédonien ; le grand lagon sud compte à lui seul presque 150 îlots. Ces îlots de sable sont des structures géomorphologiques singulières reposant sur des plates-

formes récifales lagunaires ou sur le récif barrière et sont constituées des matériaux provenant des constructions coralliennes (sables bioclastiques ou biodétritiques).

Ils jouent un rôle majeur dans les écosystèmes ; ce sont des sites de nidification pour les tortues, les oiseaux marins, les serpents tricots rayés, etc. Certains bénéficient de mesures de protection environnementale grâce à un classement en réserve provinciale voire gouvernementale pour les îles éloignées.

Ils ont également une grande importance dans la culture et le mode de vie calédonien. Une économie y a été développée autour d'activités spécifiques comme le sport et le tourisme ; des installations et services touristiques sont proposés autour de ces thèmes.

Ces îlots sont vulnérables et soumis à une mobilité et pour beaucoup à une érosion plus ou moins importante (Garcin et Vendé-Leclerc, 2014 et 2015 ; Allenbach, 1998). En effet, au cours de ces études, il a été démontré que certains îlots avaient atteint une situation critique pouvant mener à leur disparition à plus ou moins court terme. Leur évolution étant conditionnée par un grand nombre de paramètres et de facteurs qui interagissent entre eux, ceux-ci doivent être analysés afin de comprendre leurs liens potentiels avec le comportement des îlots et ainsi anticiper leur évolution plausible.

Les îlots ont une aptitude très rapide à réagir face aux facteurs météo-marins et aux évolutions climatiques ; les impacts de ces facteurs sur la dynamique côtière y sont donc plus directs et plus facilement détectables. De plus, ils ne sont pas affectés, contrairement aux zones côtières de la Grande Terre, par les processus continentaux et sont peu ou pas soumis à une pression anthropique (activité minière, prélèvement, urbanisation, aménagement,...) ; leur étude permet donc de se soustraire aux éventuelles conséquences que peut engendrer une activité humaine sur le littoral. Le nombre de facteurs jouant un rôle dans l'évolution des rivages y est ainsi plus réduit. La compréhension de ces processus au niveau des îlots permet alors d'acquérir une meilleure connaissance des phénomènes à l'échelle de la Nouvelle-Calédonie mais également à l'échelle du Pacifique Sud.

En raison de leur sensibilité par rapport aux facteurs hydro-météorologiques et climatiques les îlots du lagon constituent des indicateurs des changements environnementaux.

Le programme de recherche EMIL vise donc à caractériser les évolutions récentes et futures des îlots en replaçant celles-ci dans le contexte des changements environnementaux et des événements extrêmes qui conduisent à leurs évolutions.

Ce projet, pluridisciplinaire et pluri-institutionnel, allie géosciences, géographie, océanographie. Il consiste à caractériser pour deux îlots leur évolution à court terme (sur les deux années que dure le projet soit à l'échelle d'une année ou d'une saison) ainsi que leur dynamique passée et récente à moyen terme (sur une décennie). Différentes méthodes d'acquisition et d'analyse sont spécifiées, testées puis comparées. Ensuite les résultats sont corrélés aux facteurs de forçage qui influent de façon directe ou indirecte sur l'évolution des côtes de la Nouvelle-Calédonie à différentes échelles spatiales et temporelles.

Ce programme est coordonné par le SGNC et regroupe les équipes du BRGM (Unité Risques Côtiers et Changement Climatique), de l'UNC (Université de Nouvelle-Calédonie), de l'IRD (Institut de Recherche pour le Développement) et de deux directions de la province Sud (DENV - Direction de l'Environnement et DFA - Direction du Foncier et de l'Aménagement). Il bénéficie de la transversalité et de la

complémentarité des différents profils des participants et s'intègre dans les actions et les études menées par l'Observatoire du Littoral de Nouvelle-Calédonie (OBLIC).

Les travaux réalisés dans le cadre de ce projet ont été distingués selon trois tâches principales :

- 1- Analyse pluri échelles de l'évolution passée et récente des îlots : analyses géomorphologique, géologique et sédimentaire.
- 2- Caractérisation et analyse des facteurs de forçages de l'évolution des îlots : analyse des variabilités climatiques et du niveau marin, des évènements extrêmes et évaluation des climats de vagues et des hauteurs d'eau et de leurs impacts et incidences sur l'évolution géomorphologique des îlots.
- 3- Spécification et mise en place d'un réseau de mesures pérenne : définition de protocoles et d'outils de suivi du trait de côte adaptés aux îlots et mise en place d'un réseau de suivi participatif.

Le choix des deux îlots pilotes du projet EMIL s'est porté sur les îlots Larégnère et Mbé Kouen situés dans le lagon Sud-Ouest de la Nouvelle-Calédonie.

Ce programme s'est déroulé sur une période allant de décembre 2015 à décembre 2017, soit sur une durée de deux ans. Les quatre phases de recherche ont été réparties sur la durée du projet comme suit :

	2015	2016				2017			
	T4	T1	T2	T3	T4	T1	T2	T3	T4
Phase 1 : Etat des lieux, récoltes de données exogènes	Réunion n°1				Réunion n°2				
Phase 2 : Acquisition de données et mission de terrain*		Mars	Avril et juin	Août	Oct et nov	Janvier	Avril et juin		Oct
Phase 3 : Analyses et synthèses des résultats									
Phase 4 : Valorisation et diffusion des résultats									

* : détail chronologique des différentes missions de terrain réalisées dans le cadre du projet EMIL

Les premières actions du projet EMIL ont démarré dès janvier 2016. Depuis cette date, le programme a permis d'organiser plusieurs missions visant à acquérir des données sur le terrain. Le déroulé des principales missions est rappelé ci-dessous :

Levés topographiques :

- Levé de référence (état initial) : 18/03/16 Larégnère et 14/04/16 Mbé Kouen
- Levé de suivi 1 : 25/10/16 Larégnère et 02/11/16 Mbé Kouen
- Levé de suivi 2 : 13 et 14/04/16

Levés des profils de plage cadre EMERY et DGPS :

- Implantation des profils : 18/03/16 Larégnère et 14/04/16 Mbé Kouen
- Profils DGPS : 18/03 Larégnère et 14/04 Mbé Kouen et 02/11/16
- Profils Cadre EMERY : 14/04/16, 24/08/16, 02/11/16, 19/01/17, 07/06/17 et 17/10/17
- Missions conjointes afin de réaliser les profils de plage au cadre et au DGPS en simultané pour comparer les 2 méthodes : 14/04 et 02/11/16

Levés photogrammétriques aéroportés avec drone :

- Levé drone : 02/11/16 et 05/07/17 Mbé Kouen
- Missions conjointes afin de réaliser les levés topographiques au DGPS et par drone en simultané pour comparer les 2 méthodes : 02/11/16

Observations géomorphologiques : 18/03/16, 14/04/16, 26/06/16, 24/08/16, 02/11/16, 19/01/17, 07/06/17, 05/07/17 et 17/10/17

Capteurs de pression :

- Autorisation installation : 06/06/16 et occupation DPM : 26/07/16
- Installation des instruments : 26/06/16
- Relevé n°1 : 10/11/16

Formation des gardes-nature aux observations naturalistes : 13/04/16 (présentation) et 14/04/16 (mission de terrain)

Réalisation d'un guide méthodologique et d'une présentation pour les observations : avril 16

Réunions : lancement : 07/03/2016 et avancement Année 1 : 07/12/16

Ce rapport de synthèse présente les données et résultats scientifiques produits par l'ensemble des partenaires. Il fournit un condensé des principaux résultats obtenus au regard des travaux accomplis dans les trois tâches définies ci-dessus. Il est donc organisé en trois parties :

- 1- Analyse pluri échelles de l'évolution passée et récente des îlots : analyses géomorphologique, géologique et sédimentaire.
- 2- Caractérisation et analyse des facteurs de forçages de l'évolution des îlots : analyse des variabilités climatiques et du niveau marin, des événements extrêmes et évaluation des climats de vagues et des hauteurs d'eau et de leurs impacts et incidences sur l'évolution géomorphologique des îlots.
- 3- Spécification et mise en place d'un réseau de mesures pérenne : définition de protocoles et d'outils de suivi du trait de côte adaptés aux îlots et mise en place d'un réseau de suivi participatif.

1- Analyse pluri échelles de l'évolution récente et actuelle des îlots

1.1 Analyse du contexte local

1.1.1 La Nouvelle-Calédonie

La Nouvelle-Calédonie se situe à 1 500 km 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 km de long et d'îles secondaires, de l'archipel des Iles Loyauté à l'Est (Maré, Tiga, Lifou et Ouvéa), de l'Île des Pins au Sud et des Iles Bélep au Nord (Figure 1). 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 m d'altitude.



Figure 1 : La Nouvelle-Calédonie et sa localisation dans le Pacifique Sud-Ouest

1.1.2 Le lagon et les récifs coralliens de Nouvelle-Calédonie

Les systèmes coralliens et le lagon de Nouvelle-Calédonie 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 australienne. Dès les années 1960, Avias étudie les 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 scientifiques 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 recherches s'attachent dans les années 2000 à comprendre l'évolution géologique de la Nouvelle-Calédonie et de ses paléo-environnements (Lafoy, 2000 et Lagabriele, 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 un vif intérêt par 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 ; Ouillon et al., 2004 ; Jouon et al, 2006 ; Le Gendre et al, 2008 ; Faure et al., 2010 ; Chevalier, 2015). Ces conditions environnementales sont à l'origine d'une activité biologique particulière (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 activités 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 ; Gonson, 2017).

Les îlots étudiés dans le cadre de ce projet sont situés dans le lagon qui borde le rivage sud-ouest de la Grande Terre et qui s'étend de la passe de Saint-Vincent au Nord à la Corne Sud.

1.1.3 Les caractéristiques physiques du lagon sud-ouest

Le lagon sud-ouest calédonien possède une superficie de 2 000 km² et une profondeur moyenne de 17,5 m. Cette portion du lagon calédonien est la résultante d'une superposition de constructions récifales qui se sont développées depuis une centaine de milliers d'années en réponse à la subsidence des marges de la Nouvelle-Calédonie, aux variations du niveau marin d'origine glacio-eustatiques qui ont eu lieu au cours de l'Holocène, ainsi qu'à la tectonique récente (Chevillotte et al., 2005).

Composé de canyons sous-marins, de zone de dépressions et de rides, ce lagon doit sa géomorphologie actuelle (Figure 2) aux phases de transgression et régression marines qui se sont succédées au 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 (Figure 2).

Sept passes, permettant des échanges entre l'océan et le lagon sud-ouest, découpent le récif barrière, 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, la passe de Uatio et enfin la passe Koko à la pointe sud du lagon (Figure 2). Son extrémité au sud de l'île Ouen, est caractérisée par une large ouverture sur l'océan où

s'engouffrent directement les eaux océaniques. C'est donc un lagon qualifié de semi-clos (Jouon et al., 2007) (Figure 2).

La rivière de Dumbéa dont le bassin versant représente 172km², la rivière de La Coulée qui draine une aire de 43 km² et enfin, la rivière des Pirogues qui comporte un bassin versant de 104 km², constituent les trois principales sources d'entrée d'eau douce dans la partie sud du lagon. Dans la partie nord du lagon les rivières de la Tontouta et de la Ouenghi avec des bassins versant d'une surface totale de 384 km² ou la première et 238 pour la deuxième, figurent parmi les principales rivières (Figure 2).

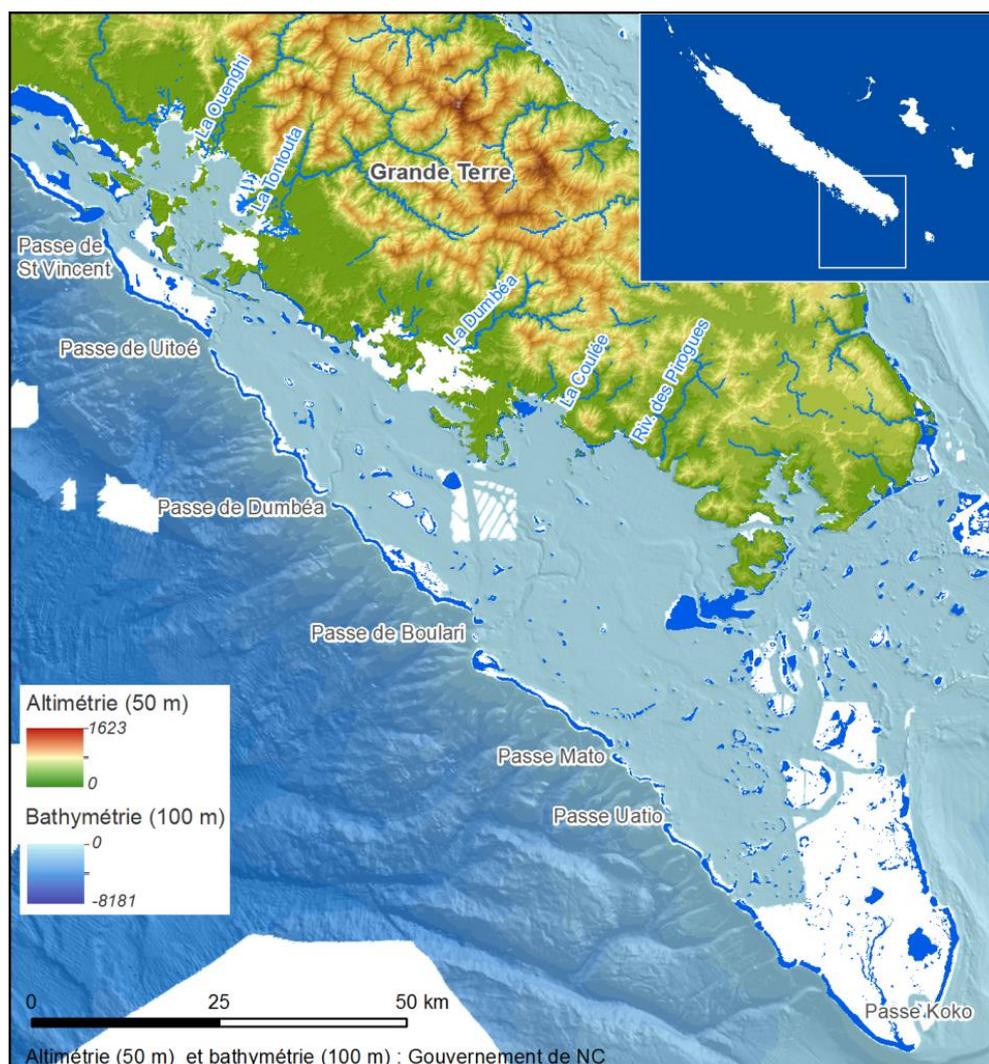


Figure 2 : Le lagon sud-ouest de la Nouvelle-Calédonie (altimétrie et bathymétrie)

1.1.4 Les îlots du lagon calédonien

De nombreux îlots coralliens, de tailles diverses, allant de quelques mètres carrés à plusieurs hectares sont présents dans le lagon calédonien. Ces accumulations sableuses plus ou moins végétalisées, aussi nommées cayes, reposent sur de larges plates-formes récifales ou sur le récif barrière. Ces îlots sont le résultat d'une accumulation de sédiments biodétritiques ou bioclastiques issus du démantèlement des édifices coralliens sous l'action des houles et des tempêtes (Duvat, 2005) (Figure 3).



Figure 3 : L'îlot Larègnère (août 2016)

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 foraminifères extraits ont pu être datés afin de reconstituer l'évolution d'îlots sur les derniers 4 000 à 5 000 ans et ainsi déterminer leurs âges. La formation de l'îlot Mba, situé dans le lagon sud-ouest, a été identifiée à 4 460 ans cal BP (datation des dépôts les plus anciens).

En 2014 et 2015, le BRGM et le Service de la Géologie de Nouvelle-Calédonie étudient une vingtaine d'îlots répartis dans le lagon ouest, le lagon de la côte est et au sud de l'île des Pins. Cette étude a permis d'identifier les caractéristiques géomorphologiques de chaque îlot, les processus morpho-sédimentaires actifs et dominants affectant leur côte (érosion, accrétion, stabilité), les évolutions historiques des îlots et les trajectoires évolutives à moyen et long terme (à l'échelle de quelques années à des décennies) pour finalement comparer les îlots entre eux, voire les classer (Garcin et al., 2016). Cette analyse a conduit à proposer un schéma du cycle de vie des îlots dans lequel chaque îlot est replacé. Ce schéma définit différents stades d'évolution qui sont contrôlés par différents paramètres environnementaux tels que les conditions hydrodynamiques locales, la variation des climats de vents et de vagues au cours du temps, la configuration de la plate-forme récifale qui porte chaque îlot ainsi que l'évolution du récif et du niveau marin relatif. Six stades sont détaillés ci-dessous : la nucléation, la croissance, la maturité, la décroissance, la relique et la disparition (Figure 5).

- Stade n°1 : Nucléation

Il correspond à la phase d'apparition d'un banc de sable issu de l'arrachement de bioclastes du récif lors d'événements marins et/ou météorologiques importants.

Cette accumulation de sédiments est rendue possible par la conjonction :

- d'événements hydro-météorologiques énergétiques capables d'arracher des sédiments bioclastiques du récif ;
- associé à 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, avec des variations annuelles ou interannuelles mais la zone d'accumulation reste la même.

- Stade n°2 : Croissance

Il correspond à la phase de stabilisation d'une partie du banc de sable. Un accroissement de sa surface par un apport de sédiments bioclastiques est observé au cours de cette phase ainsi qu'une colonisation par la végétation de ces nouvelles surfaces. Le bilan sédimentaire de l'îlot est alors positif : il y a plus d'apport de sédiments que de perte.

- Stade 3 : Maturité

Ce stade se décompose en trois variantes possibles qui peuvent évoluer de l'une à l'autre :

- La stabilité (3a) correspond à une période durant laquelle l'équilibre entre érosion et accrétion est maintenu. Les beachrocks (ou grès de plage) sont des roches sédimentaires formées au niveau de la zone intertidale par cimentation carbonatée des sables de plage et des débris bioclastiques et biodétritiques. Cette induration précoce se produit uniquement pendant les périodes de stabilité des plages donc au cours du présent stade « Mature-Stable ». Ces beachrocks vont ainsi, au cours du temps, fossiliser les lignes de rivage des îlots indiquant la position, l'orientation et la forme des anciennes plages ainsi que la paléo-morphologie de l'îlot (Figure 4). Ils permettent ainsi d'évaluer la surface passée de l'îlot, de détecter les secteurs où des reculs du trait de côte se sont produits et donnent ainsi des indications précieuses sur l'évolution de l'îlot dans le temps.



Figure 4 : Plusieurs générations de beachrocks qui résultent de la fossilisation d'anciennes plages successives, Sud-Est de l'îlot Larégnère

- La migration (3b) est une forme d'adaptation de l'îlot aux contraintes et aux forçages environnementaux. Alors que certains rivages subissent une érosion, d'autres sont en situation d'accrétion ; ce processus entraîne une migration progressive de l'îlot. Ce phénomène peut être généré par des processus autophages : ainsi, la côte en accrétion est nourrie par les sédiments produits par la face de l'îlot qui subit l'érosion, tel une sorte de « tapis roulant sédimentaire ». La migration se trouve toutefois limitée par l'extension de la plateforme récifale. En effet, si l'îlot se situe en bord de plateforme, les sédiments sont alors transférés vers les zones plus profondes du lagon (puits sédimentaires). Il passe alors au stade n° 4 « décroissance ».

- L'adaptation (3c) apparaît quand se produit un changement de géométrie de l'îlot, induit par les modifications des contraintes et des forçages environnementaux sans pour autant qu'il y ait migration, perte ou gain de surface. Les processus conjoints d'érosion et d'accrétion conduisent à une évolution de la forme de l'îlot. Ce peut être par exemple une évolution des pointes de l'îlot qui change de forme et de position.

- Stade n°4 : Décroissance

Cette phase est déclenchée 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 sa surface. D'importantes zones d'érosion sont repérables, dont les indices peuvent être un retrait par rapport aux limites antérieures indiquées par les beachrocks ou la présence de souches et d'arbres morts sur la plage ou en avant-plage.

- Stade n°5 : Relique

L'îlot relique possède une géométrie très éloignée de celle de la phase mature indiquée par les bancs de beachrocks, desquels il peut être très excentré. Sa surface a largement diminué, son bilan sédimentaire est négatif et de nombreuses souches d'arbres sont observables en mer à l'ancien emplacement de l'îlot. L'îlot présente ainsi un caractère résiduel et son avenir est compromis si le déficit d'apport perdure et que les conditions hydrodynamiques restent identiques. 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'îlot transportés par les courants. Il peut constituer un indice de ce stade 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 les beachrocks qui l'encadraient auparavant. Ce stade n'est pas irrémédiable car si des conditions environnementales favorables réapparaissent, un nouvel îlot peut se reconstruire à la place de l'ancien.

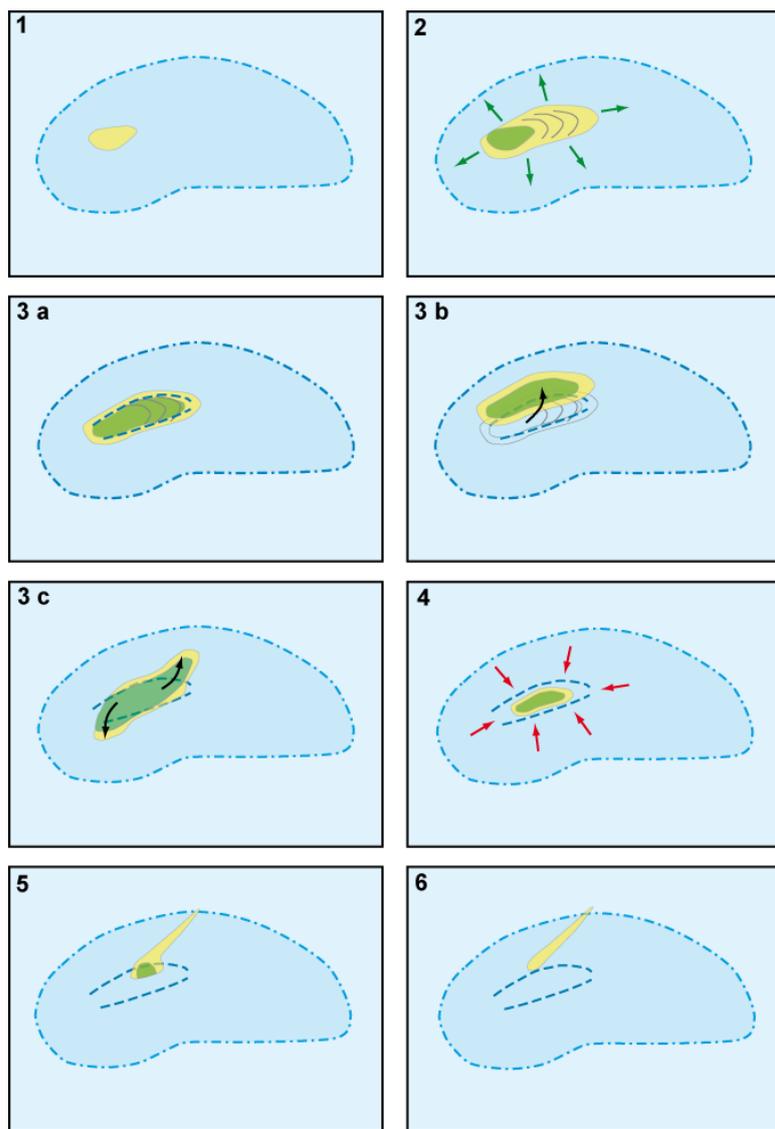


Figure 5 : Les différents stades évolutifs des îlots calédoniens

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), lagon (bleu clair), limite de la plateforme récifale (tiret-point), beachrocks (tiret), mobilité (flèche noire), érosion (flèche rouge), accrétion (flèche verte)

A partir de cette classification, et compte tenu des connaissances actuelles sur l'évolution possible des paramètres environnementaux y compris la remontée du niveau marin due au changement climatique, les tendances futures plausibles de l'évolution de chaque type d'îlots ont été déterminées. Ces tendances sont définies selon un indice d'espérance de vie classé sur une échelle de 1 à 5, de la situation la plus stable à la situation la plus critique.

Retracer l'évolution récente et actuelle des deux îlots étudiés dans le cadre de ce projet permettra de déterminer leur stade d'évolution et leur devenir. De plus, il s'agira de valider cette approche et la typologie voire de l'affiner.

1.1.5 Les caractéristiques des îlots étudiés

Le choix des deux îlots pilotes du projet EMIL s'est porté sur les îlots Larégnère et Mbé Kouen, tous les deux localisés dans le lagon Sud-Ouest de la Nouvelle-Calédonie (Figure 6).

Ils sont situés dans des contextes variés notamment au regard de leur position par rapport à la barrière récifale et aux passes, à leur exposition (Figure 6). Leurs particularités géomorphologiques sont également différentes (altitude, surface,...) ainsi que leur stade d'évolution. Cette variété de caractéristiques permettra d'estimer leur part d'implication dans l'évolution des îlots.

Ces deux îlots n'ont pas été modifiés par des actions humaines de type aménagement visant à lutter contre l'érosion du rivage (ré-ensablement, modification des profils de plage, édification de mur en sacs de sable, etc.). Ces actions, même si elles ne modifient pas la tendance naturelle à l'érosion, jouent sur les processus hydro-sédimentaires et donc altèrent les morphologies des îlots, ce qui ne permet plus une analyse géomorphologique et une compréhension de liens entre les facteurs de forçage (vents, vagues, niveau d'eau, etc.) et leur évolution.

Le choix de ces deux îlots a également été opéré en fonction de critère logistique. En effet, leur distance à la côte reste raisonnable, facilitant ainsi les déplacements sur le terrain.

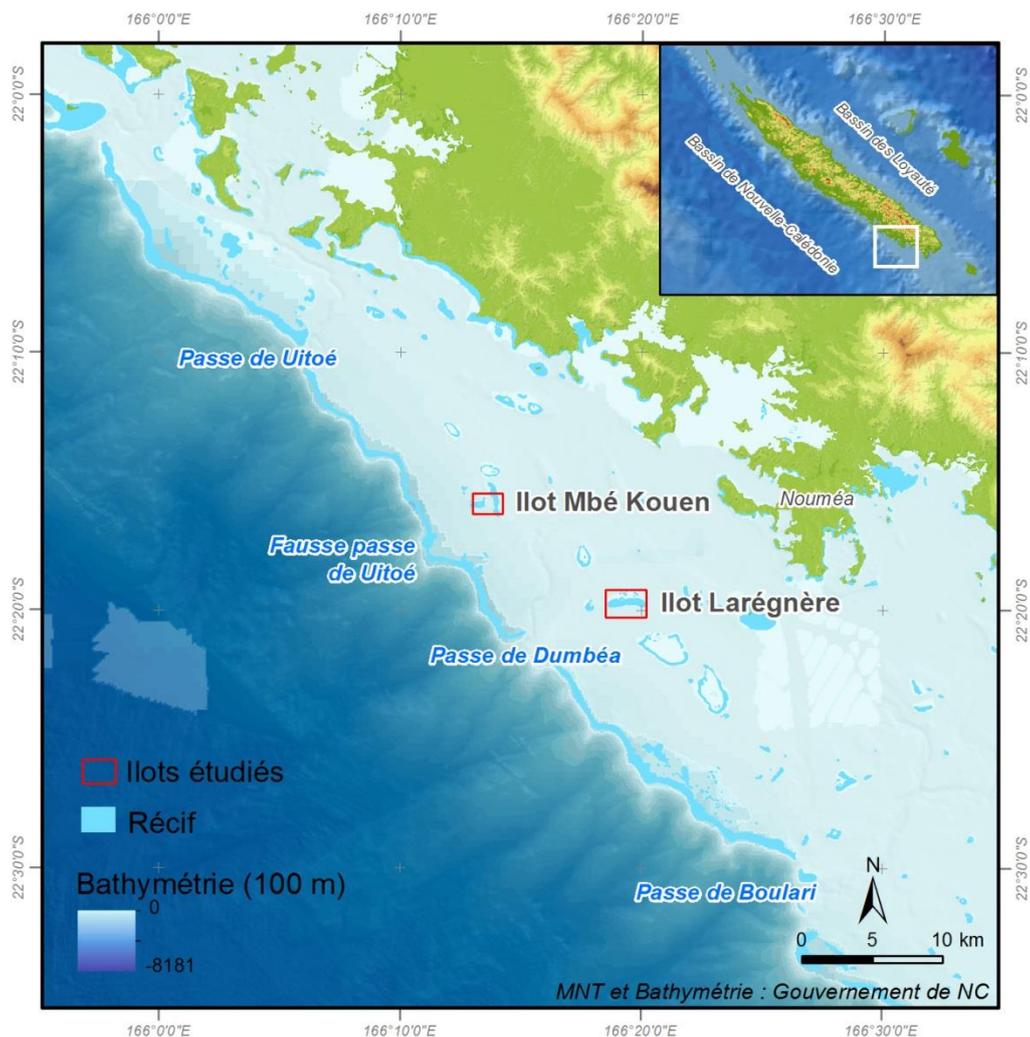


Figure 6 : Localisation et contexte des deux îlots étudiés dans le cadre du programme EMIL

1.1.5.1 L'îlot Larégnère

L'îlot Larégnère se situe à environ 15 km au Sud-Ouest de Nouméa et est éloigné de 6,5 km de la barrière de corail. La passe la plus proche est celle de Dumbéa. Distante de 7,8 km de l'îlot, cette passe profonde de plus de 30 m se trouve dans l'axe de l'îlot (ENE).

Cet îlot surplombe un édifice récifal oblong de 3 km de long par 0,6 km de large, orienté est-ouest. Cette structure récifale est continue sur ses flancs ouest, sud et est et discontinue au Nord. Elle est moins large au Nord et s'agrandit vers le Sud avec une largeur maximale est de 0,6 km (Garcin et Vendé-Leclerc, 2015) (Figure 7).

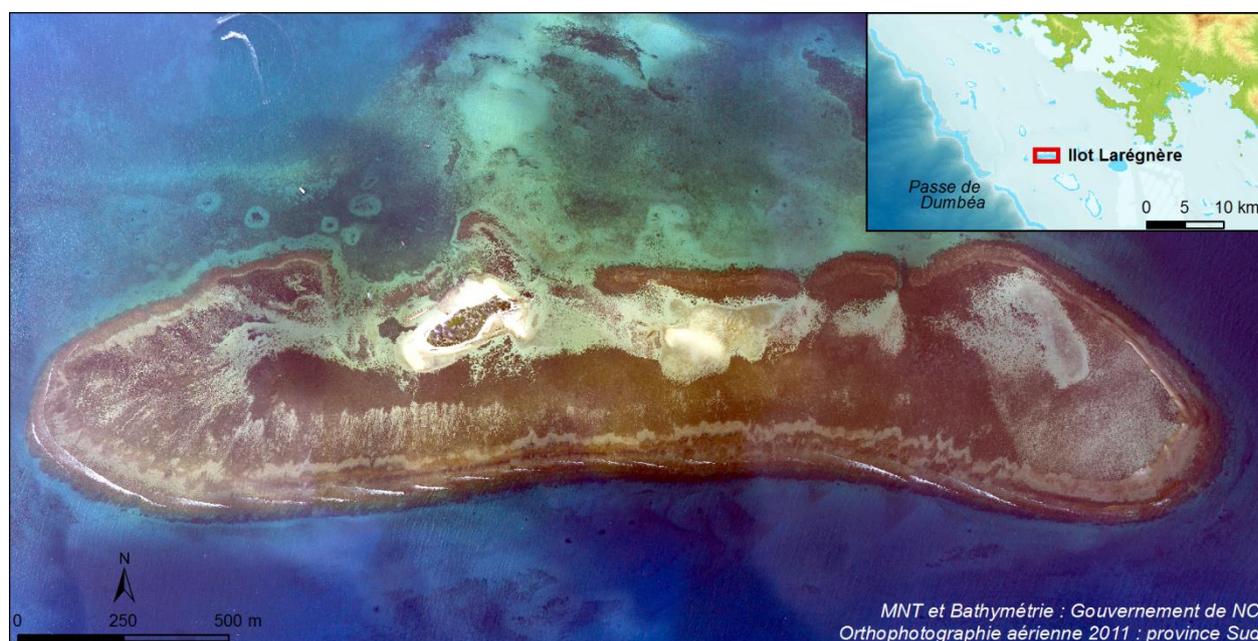


Figure 7 : Localisation de l'îlot Larégnère et de sa plate-forme récifale dans le lagon sud-ouest

C'est un petit îlot de 220 m de long par 70 m de large, orienté SW-NE dont la surface est en 2016 de l'ordre 10 428 m² et son point culminant s'élève à 3,2 m (d'après les mesures de terrain acquises en avril 2017 par le Service Topographique et Foncier de la province Sud).

L'un des intérêts de cet îlot est l'abondance des bancs de beachrock qui résultent de la fossilisation d'anciennes plages successives qui peuvent être distants du rivage actuel (jusqu'à une cinquantaine de mètres pour la plage nord) et avoir des directions très obliques par rapport à celle de la plage actuelle. La présence de ces beachrocks éloignés de la plage ou obliques indiquent que la surface de l'îlot a diminué de façon significative depuis l'époque de leur formation (Figure 8).



Figure 8 : Positionnement des beachrocks de l'îlot Larégnère

Larégnère se compose principalement de sable bioturbé. Il possède une végétation arbustive et rampante en haut de plage et arborée en son centre.

Cet îlot est doté d'une certaine attractivité touristique. Sa fréquentation, pour des usages récréatifs principalement, par les calédoniens mais aussi par les touristes, n'a cessé de croître ces dernières années. Il est un des îlots les plus fréquentés du lagon sud avec environ 50 000 personnes par an (source province Sud/DENV, 2017). Fréquenté principalement pendant la saison estivale et les week-ends, il connaît une pression humaine non négligeable avec des dommages déjà constatés, notamment sur la végétation. Il possède des équipements tels que des toilettes sèches, des farés et des aires aménagées pour barbecue.

1.1.1.1. L'îlot Mbé Kouen

Au nord de l'îlot Larégnère, l'îlot Mbé Kouen se situe à 4,2 km du récif barrière et est positionné entre la passe de Uitoé au Nord et celle de Dumbéa au Sud. Il est également localisé à proximité de la Fausse passe de Uitoé. Cette dernière est située au sud-ouest de l'îlot à environ 4 km (Garcin et Vendé-Leclerc, 2015) (Figure 9). Cet îlot, positionné près d'une barrière récifale discontinue possède donc des conditions et un contexte différents de ceux de l'îlot Larégnère.

Cet îlot, orienté SW-NE, repose sur la limite nord de sa plate-forme récifale, elle-même orientée SW-NE (Figure 9).



Figure 9 : Localisation de l'îlot Mbé Kouen et de sa plate-forme récifale dans le lagon sud-ouest

Petit îlot de très faible altitude, son point le plus haut s'élève à seulement 2,4 m d'après les mesures de terrain acquises en avril 2017 par les agents du Service Topographique et Foncier de la province Sud. En 2017, il possède une superficie de 2 038 m² et a pour dimensions 90 m de long sur 30 m de large environ. Mbé Kouen est composé de sable fin et de débris bioclastique moyens de taille décimétrique. La géométrie actuelle des bancs de beachrocks indique d'une part que l'îlot était plus étendu par le passé et d'autre part que son ancienne position était au Sud-Ouest de l'actuelle et qu'il a migré vers le Nord-Est. De même, de gros épandages sableux sous-marins progradants vers le Nord-Est qui correspondent aux sédiments érodés préalablement attestent de cette migration de l'îlot vers le Nord-Est (Figure 11).

Peu végétalisé, on y trouve principalement une végétation rampante et herbacée à l'exception de quelques arbres (faux figuier, bois matelot, bois de fer et faux tabac). Moins fréquenté que l'îlot Larégnère, il est vierge de toute installation anthropique.



Figure 10 : Bois de fer (Filao) et bois matelot de l'îlot Mbé Kouen : plantes pionnières qui colonisent les talus et les zones d'accrétion. Installées sur les bordures, elles créent une ceinture en haut de plage. Ces espèces sont positionnées face au vent et résistent aux embruns



Figure 11 : Positionnement des beachrocks de l'îlot Mbé Kouen

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

Tableau 1: Eléments morphologiques caractéristiques des plates-formes récifales et des îlots Larégnère et Mbé Kouen

	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 km de large	Environ 145 ha	Bordure nord-ouest	SO-NE	1,0428 m ² (2016)	3,2 ha (2017)	6,5 km	7,8 km de la passe de Dumbéa dans son axe
Mbé Kouen	SO-NE	Triangulaire arrondie	0,7 km de long sur 0,8 km de large	Environ 30 ha	Bordure nord-ouest	SO-NE	2089 m ² (2017)	2,038 ha (2017)	4,2 km	11 km au nord de la passe de Dumbéa, à 17 km au sud de la passe de Uitoé et à 4 km au SO de la fausse passe de Uitoé

La description de ces différents éléments constitutifs du lagon et des îlots est essentielle pour une analyse de l'évolution des îlots. Elle permet de replacer le contexte plus global du système récif-lagon dans lequel les 2 îlots évoluent.

1.2 Evolution de la morphologie des îlots à moyen et court terme

La compréhension des évolutions des îlots exige une étape de recueil et d'exploitation de données géomorphologiques à différentes échelles temporelles.

D'une part, l'analyse des images aériennes et satellites anciennes sera nécessaire afin de préciser les évolutions passées à moyen terme (échelles décennales à annuelles), et d'autre part, l'interprétation des données topographiques acquises sur le terrain au cours du projet (2016-2017) permettront de définir les tendances actuelles à court voire très court terme (2 ans). A partir de ces travaux, il sera possible de retracer les trajectoires évolutives anciennes et actuelles des îlots mais également de définir des états de référence qui autoriseront, dans le futur, la caractérisation des évolutions.

1.2.1 L'évolution passée et récente des îlots

1.2.1.1 Des images aériennes et satellites pour une analyse diachronique

Pour réaliser l'étude diachronique de l'évolution des îlots à partir de photographies aériennes et d'images satellites anciennes, une première étape de récolte des images disponibles, ciblées sur les deux îlots, est nécessaire. S'en suit une étape de géoréférencement des images puis de digitalisation du trait de côte afin de produire une analyse spatiale et statistique de l'évolution des rivages des îlots. Enfin, une représentation cartographique de cette évolution récente est élaborée. Ces 2 principales étapes sont schématisées sur la Figure 12 ci-dessous.

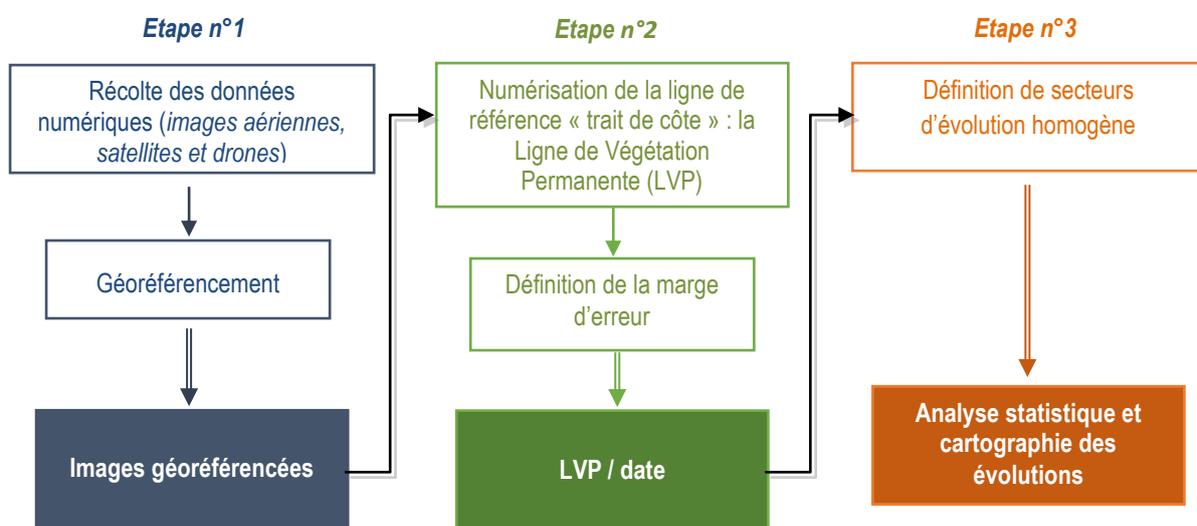


Figure 12 : les étapes successives du protocole méthodologique appliqué dans le cadre de l'analyse diachronique de l'évolution des îlots

Étape n° 1 : récolter et géoréférencer les données numériques

Les photographies aériennes et les images satellites pour les périodes récentes récoltées au cours de cette première étape sont de 2 types :

- les orthophotographies (photographies géoréférencées et orthoréctifiées) comme celles de la province Sud (Larégnère 2011), du GIE SERAIL (Mbé Kouen 2016) ou encore les images acquises par photogrammétrie aéroportée à l'aide d'un drone au cours du projet (Larégnère 02/11/2016, Mbé Kouen 02/11/2016 et 05/07/2017) ;

- les images satellites issues de Google Earth qui nécessitent un calage par géoréférencement manuel (Tableau 2).

L'éloignement des îlots par rapport à la Grande Terre explique la faible quantité d'images disponibles et recueillies. A noter que la banque de photographies aériennes historiques conservée par le service cartographique de la DITTT (Direction des Infrastructures, de la Topographie et des Transports Terrestres du gouvernement de la Nouvelle-Calédonie) ne compte pas de photographie des 2 îlots car situés hors de portée des campagnes de levés aériens.

Tableau 2 : Les images aériennes et satellites récoltées pour l'analyse diachronique de l'évolution des îlots et leurs paramètres

	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	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 SERAIL NC	Levé aéroportée	0,5 m
	02/11/2016	Orthophotographie	Drone	1,2 cm
	05/07/2017	Orthophotographie	Drone	1,7 cm

Pour l'îlot Larégnère, 5 images satellites issues de Google Earth ont été extraites directement du logiciel de visualisation de Google (l'opérateur satellitaire est Digital Globe, une société privée utilisant les satellites World-View 1, 2 et 3). Pour compléter ce jeu données, une orthophotographie datant de 2011 a été mise à disposition par les services de la province Sud.

Pour Mbé Kouen, les images satellitaires sont plus rares du fait de l'éloignement de l'îlot par rapport à la zone littoral de la Grande Terre. Seulement 2 ont pu être récoltées sur Google Earth. Une orthophotographie aérienne de l'îlot acquise par le GIE SERAIL en 2016 a été intégrée à la chronique pour cette étude diachronique.

Pour compléter cette collection limitée à des images datant au mieux du début des années 2000, les orthophotographies, issues des images acquises par drone au cours du projet lors de deux missions de terrain (02/11/2016 et 05/07/2017), ont été ajoutées.

La durée couverte par les reconstitutions de chaque îlot est variable en fonction de la disponibilité des supports : une période de 12 ans pour l'îlot Larégnère (2004 à 2016) et de 8 ans pour Mbé Kouen (2009 à 2017).

Suite à ce travail de collecte, le géoréférencement de ces données numériques dépourvues de références spatiales (issues des capteurs WorldView 1, 2 et 3) a constitué une étape intermédiaire primordiale.

La difficulté du géoréférencement sur les îlots est que peu de points de référence (points remarquables ou amers) sont exploitables pour le calage des images. En effet, les seules amers utilisables sont les bâtiments abritant des toilettes sur Larégnère, les beachrocks, lorsqu'ils ne sont pas recouverts par le sable, ou encore les « patates » de corail (ou pinacles).

En conséquence, la marge d'erreur appelée RMS (Root-Mean-Square error) est variable et augmente l'imprécision du calage. Le RMS est calculé et est donné 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 2 points est appelée « distance résiduelle ». Plus cette erreur est proche de zéro, plus l'ajustement est bon. Dans le cadre de ce travail, pour un géoréférencement optimal, il a été déterminé que l'erreur totale ne doit pas être supérieure à 3 pixels. Les erreurs de géoréférencement obtenues sont donc comprises entre 0,6 m et 1,03 m (Annexe 1).

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. 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 cette étude, une méthode classique consistant à utiliser la Limite de Végétation Permanente (LVP) comme ligne de référence et indicateur de la mobilité du trait de côte des îlots a été adoptée (Garcin et al., 2016, Yates et al, 2013). Ce choix a été fondé sur différents critères et arguments venant étayer cette approche, dont la qualité des données numériques disponibles qui permet de distinguer nettement par photo-interprétation la LVP et très difficilement les autres indicateurs comme la ligne des plus hautes eaux. De plus, sur le terrain, l'état de la végétation est un indice pertinent de l'évolution de l'îlot. En effet, les mouvements de la LVP, tels que son avancée ou son recul, donnent des informations sur les changements de morphologie qu'ont connus les îlots des dernières années. S'il y a un phénomène d'érosion, on assiste alors à une disparition de la végétation, donc à un recul de la LVP, alors que la ligne de pleines eaux peut, quant à elle, rester stable (Garcin et Vendé-Leclerc, 2016). La LVP offre un dernier avantage qui est l'absence de nécessité de prendre en compte la marée et la surcote à l'heure de la prise de vue, information non disponible pour un grand nombre d'images récoltées.

A partir des orthophotographies aériennes traitées lors de l'étape précédente, la LVP est digitalisée par photo-interprétation pour chaque date (Figure 13). La photo-interprétation est fortement dépendante de l'opérateur, c'est pourquoi un seul opérateur doit réaliser cette étape afin de maintenir une homogénéité de la saisie.

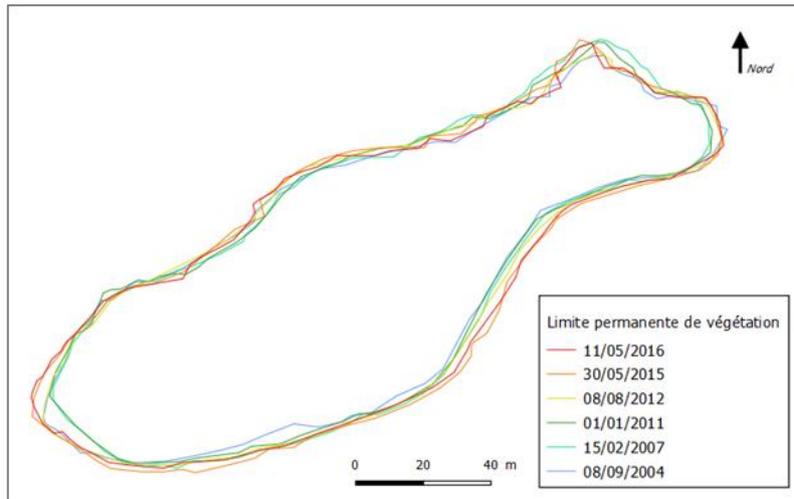


Figure 13 : Limites de végétation permanente numérisée pour 6 dates pour l'îlot Larégnère.

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 soit entre 0,60 et 1,03 d'erreur RMS en mètre (à noter que l'erreur due au géoréférencement des images drones étant inférieure à l'erreur de géoréférencement des images Digital Globe, celle-ci n'est pas comptabilisée) ;
- l'erreur due à la photo-interprétation de l'opérateur : 2 pixels d'erreur, soit 1 m.

Ainsi, par exemple, au RMS de 0,74 m de l'image du 08/08/2012 auquel on ajoute l'erreur de 1 m due à la photo-interprétation pour la fixation de la LVP, on obtient une marge d'erreur totale de 1,74 m. Pour les besoins de l'étude, une marge d'erreur de 2 m, correspondant à la marge d'erreur maximale calculée sur l'ensemble des images géoréférencées, a été fixée.

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

Les vitesses d'évolutions moyennes du littoral (érosion ou accrétion) inférieures à la marge d'erreur (± 2 m) n'ont donc pas été considérées comme significatives. Ainsi, si les distances entre chaque LVP sont égales ou inférieures à 2 m, le secteur est alors considéré comme stable (Figure 14).

Cette marge permettra de nuancer les résultats exposés.

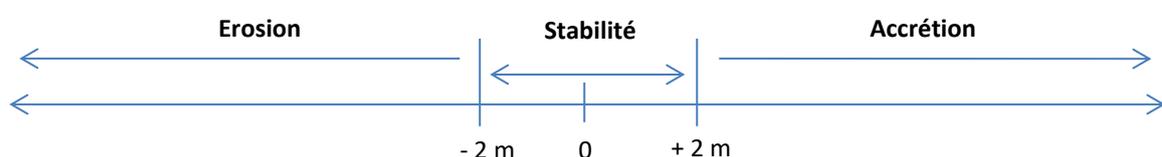


Figure 14 : Signification de la marge d'erreur calculée pour l'analyse diachronique des îlots

La cartographie de cette limite permet ainsi de calculer, mesurer et analyser, pour les 2 îlots, les taux d'érosion et d'accrétion, les vitesses et taux d'évolution du rivage, les superficies, les formes et les géométries pour chaque date et pour chaque période (2004 à 2016 pour l'îlot Larégnère et 2009 à 2017

pour Mbé Kouen). Ces informations fournissent une évaluation de la dynamique des îlots d'une échelle annuelle à pluriannuelle et de leur trajectoire évolutive.

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

La cartographie des LVP permet de calculer, pour chaque date, la surface de l'îlot et d'en déduire des courbes d'évolution des superficies (Figure 15).

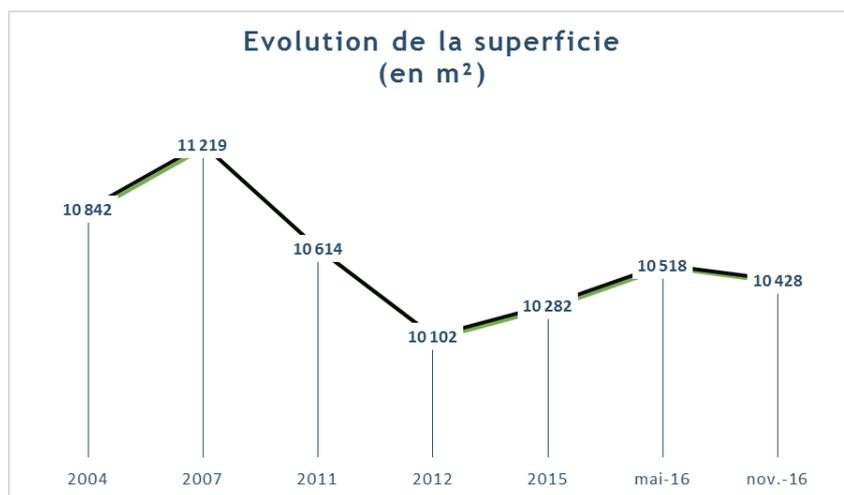


Figure 15 : Evolution de la surface de l'îlot Larégnère exprimée en m²

Afin de réaliser l'analyse statistique permettant d'évaluer les vitesses et taux d'évolution des LVP pour une ou plusieurs périodes, un découpage du rivage des îlots par transects équidistants de 10 m à partir d'une ligne de base virtuelle a été réalisé manuellement. Les transects ont été créés perpendiculaires à cette ligne (Figure 16).



Figure 16 : Transects équidistants de 10 m créés autour d'une ligne de base virtuelle, exemple îlot Larégnère

Cette ligne de base a été créée en arrière de la LVP le plus parallèlement possible au rivage afin de servir de repère pour la création de transects orthogonaux équidistants de 10 m. Cette technique est inspirée

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, la longueur des segments de transects entre chaque date successive a été mesurée de manière automatique afin d'en extraire les valeurs en mètre d'avancée (correspondant au phénomène d'accrétion) ou de recul (correspondant au phénomène d'érosion). L'analyse statistique comprend :

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

Afin de définir une tendance d'évolution à « moyen-terme » sur l'ensemble des 2 périodes étudiées, a été calculé :

- l'avancée ou le recul de la LVP (en mètre) et la vitesse moyenne de cette évolution (en mètre/an) entre 2004 et 2016 pour Larégnère ;
- l'avancée ou le recul de la LVP (en mètre) et la vitesse moyenne de cette évolution (en mètre/an) entre 2009 et 2017 pour Mbé Kouen.

Les transects voisins aux comportements et évolutions homogènes (accrétion, érosion ou stabilité) ont été regroupés en secteurs (Tableau 3 et Tableau 4) selon la typologie des tendances évolutives (

Tableau 5) définie dans l'objectif de représenter sur une carte la mobilité et la tendance d'évolution passée et récente des 2 îlots (Figure 17).

Tableau 3 : Exemple de secteurs d'évolution homogène entre 2004 et 2016 définis pour l'îlot Larégnère

Secteur	Nom	Evolution moyenne en m	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	Centre 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 4 : Exemple de secteurs d'évolution homogène entre 2009 et 2017 définis pour l'îlot Mbé Kouen

Secteur	Nom	Evolution moyenne en m	Vitesse d'évolution moyenne en m/an	Evolution à moyen terme (sur 8 ans)
Secteur1	Nord-est	4,48	0,56	Accrétion très importante
Secteur2	Pointe est	9,16	1,15	Accrétion exceptionnelle (> 1m/an)
Secteur3	Sud-est	3,87	0,48	Accrétion très importante
Secteur4	Ouest	-0,74	-0,09	Stabilité
Secteur5	Nord-ouest	-1,75	-0,22	Erosion importante

Tableau 5 : 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 17 : Cartographie de la dynamique de la LVP sur la période 2004-2016 par secteur d'évolution homogène, îlot Larégnère

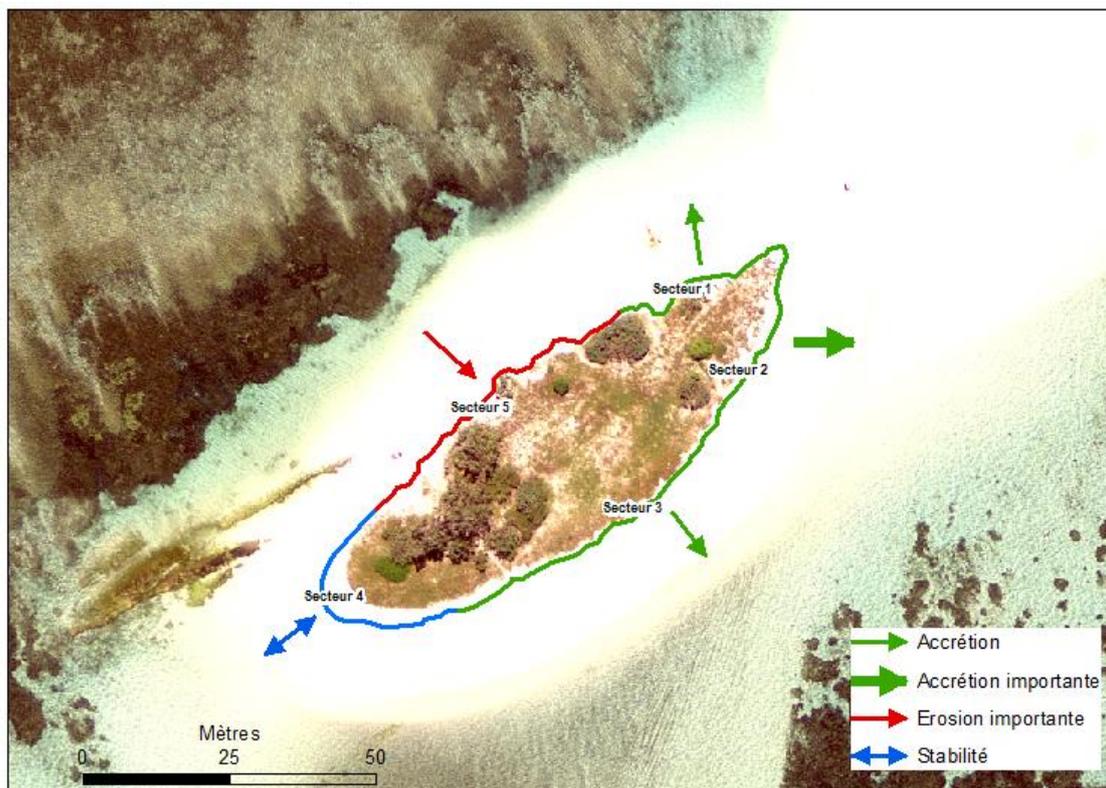


Figure 18 : Cartographie de la dynamique de la LVP sur la période 2009-2017 par secteur d'évolution homogène, îlot Mbé Kouen

1.2.1.2 L'analyse et la caractérisation des évolutions passées et récentes des îlots

1.2.1.2.1 L'évolution passée et récente de l'îlot Larégnère

L'évolution de la surface de l'îlot

L'îlot Larégnère possède une superficie actuelle de 10 428 m². Cette surface est calculée à partir de la digitalisation de la LVP, utilisée comme trait de côte, sur l'orthophotographie acquise par drone le 02/11/2016 (Figure 19). En 2004, sa surface atteignait 10 842 m². Il a, par conséquent, perdu 414 m² de sa surface en 12 ans (34,5 m²/an), soit une décroissance de 4 % de sa superficie totale (Tableau 6).

Si l'on considère la période 2004-2016 (12 ans) en détail, on distingue une alternance de phases d'érosion et de phases d'accumulation. En effet, en 2007, l'îlot a gagné + 3 % de sa surface par rapport à 2004. Puis, entre 2007 et 2012, il subit une diminution de superficie de - 7 % et en 2015 et 2016 une légère augmentation de surface (+ 2 % chaque année), mais qui ne compense pas la superficie perdue lors de la période précédente. Sur la période la plus récente, de mai 2016 à novembre 2016, la tendance évolutive de l'îlot semble être négative (- 1 %) et caractérisée par une érosion présente sur un grand part des rivages de l'îlot (Figure 19 et Tableau 6). La comparaison de cette dernière période par rapport aux périodes précédentes est à nuancer compte tenu de sa très courte durée (6 mois) ; son analyse démontre une évolution saisonnière alors que les autres périodes des évolutions pluriannuelles.

Tableau 6 : 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%

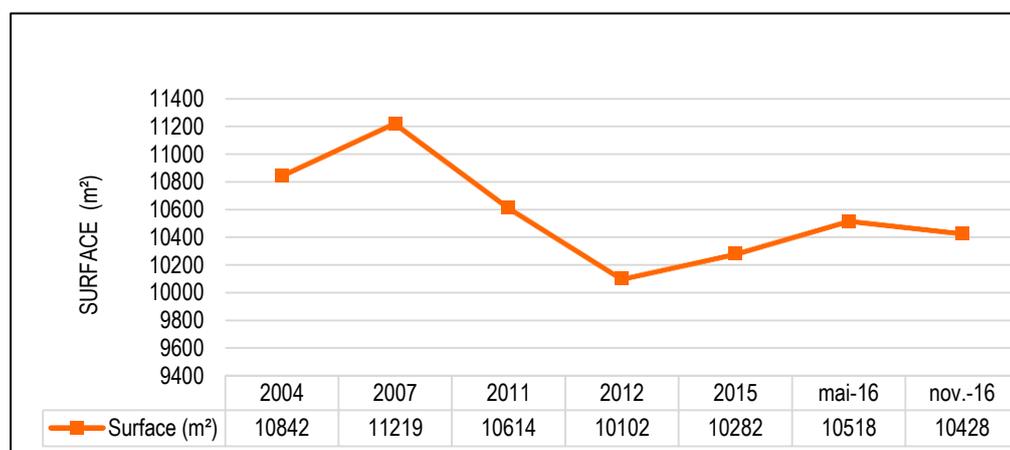


Figure 19 : Evolution de la surface de l'îlot Larégnère de 2004 à 2016 (exprimée en m²)

L'évolution des beachrocks

Plusieurs générations de beachrocks sont observables sur l'ensemble des rivages de l'îlot. Ces bancs sont parfois distants de plusieurs dizaines de mètres du rivage de l'îlot actuel (jusqu'à 50 m pour les beachrocks de la plage nord) (Figure 20). Ils peuvent avoir des directions très obliques par rapport à celles des plages actuelles. Ils sont les marqueurs d'un îlot beaucoup plus étendu par le passé et permettent d'évaluer sa surface antérieure et ses anciennes positions et orientations.

L'îlot Larégnère connaît donc aujourd'hui une phase de régression ; la présence de ces beachrocks éloignés de la plage ou obliques indique que cette érosion n'est pas nouvelle et que la surface de l'îlot a diminué de façon significative depuis l'époque de leur formation. L'îlot présente ainsi un caractère résiduel par rapport aux marques de son extension et de sa morphologie passées.

L'analyse des paléorivages de Larégnère montre une succession importante de bancs de beachrocks localisés au sud de l'îlot. Ils informent sur la fossilisation de plusieurs générations de plages et sur le recul progressif de la plage sur cette zone (Figure 21).

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



Figure 20 : Localisation des beachrocks de l'île Larégnère



Figure 21 : Plusieurs générations de beachrocks obliques par rapport à la plage actuelle et distants d'environ 40 m par rapport au rivage actuel (plage sud de l'île Larégnère)

L'évolution mesurée par secteur et par période

La création de transects équidistants de 10 m (Figure 22) a permis de définir des secteurs de comportement et d'évolution homogènes (érosion, accrétion, stabilité) (Figure 23). L'analyse suivante tente d'identifier les évolutions des secteurs sur l'ensemble de la période 2004 - 2016 (Figure 24) et de localiser les secteurs qui suivent la dynamique générale ou au contraire, qui ont connu, lors de ces 12

dernières années, une évolution radicalement différente. Une analyse des évolutions par période (au nombre de 6) a également été réalisée (Figure 25).



Figure 22 : Localisation des transects qui ont permis de définir les secteurs d'évolution homogène, îlot Larégnère



Figure 23 : Définition des secteurs de comportement homogène, îlot Larégnère

Il faut souligner que les périodes étudiées sont hétérogènes. Pour celles qui s'étalent sur plusieurs années, les données sont lissées. Par contre pour la dernière, d'une durée de 6 mois seulement (entre mai 2016 et novembre 2016), le choix a été fait de considérer plutôt l'intervalle de temps allant de novembre 2015 à novembre 2016 (soit une année). L'objectif étant d'avoir une durée suffisamment grande pour que les interprétations soient cohérentes au regard des autres périodes.

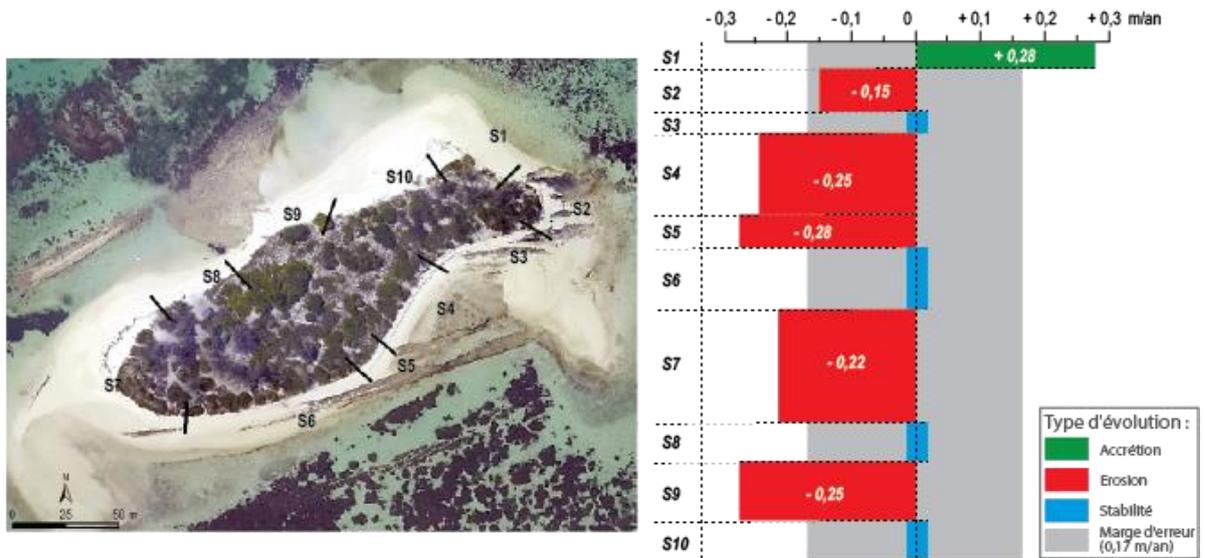


Figure 24 : Vitesse moyenne d'évolution mesurée par secteur pour la période 2004 à 2016 (en m/an), îlot Larégnère

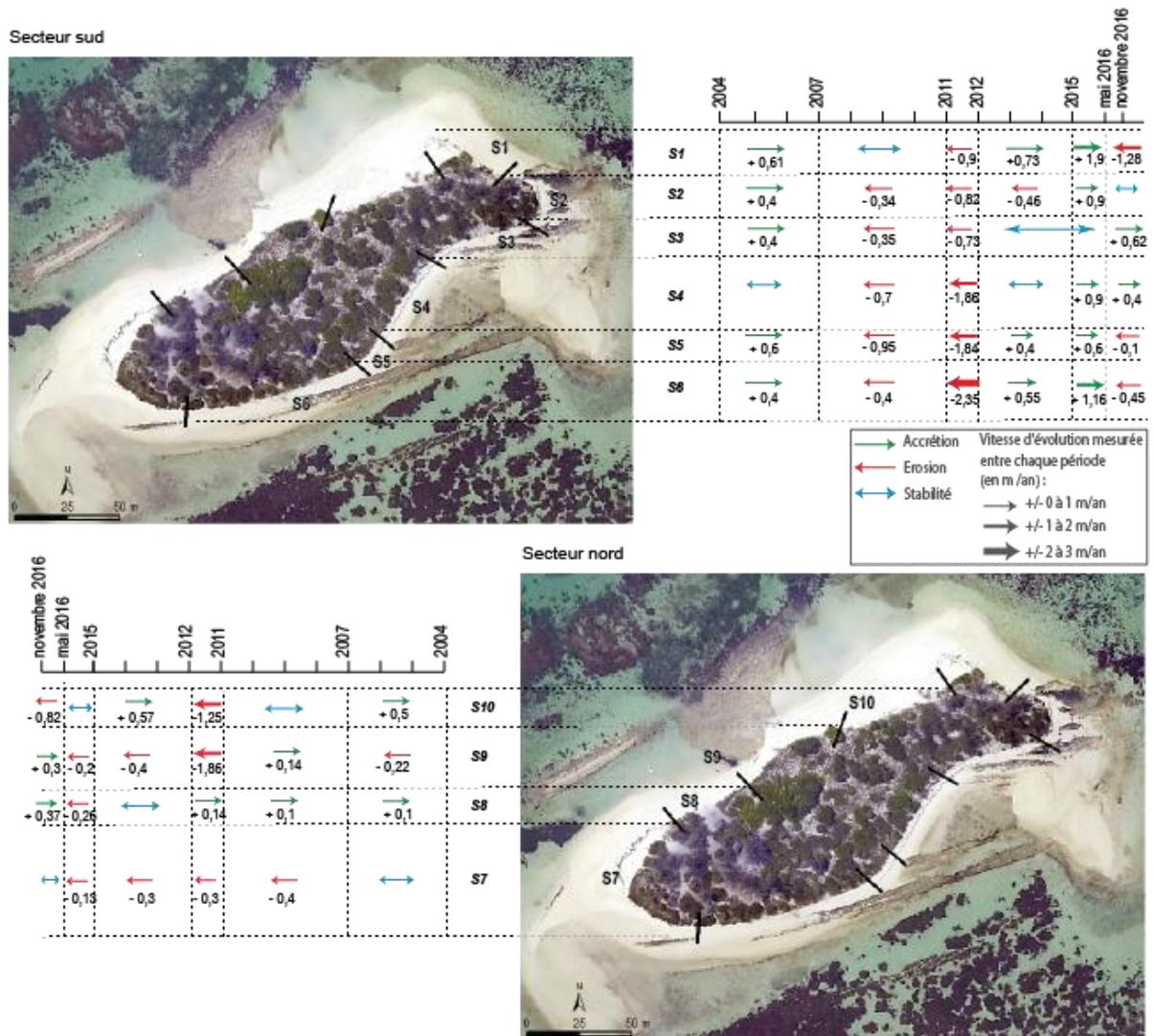


Figure 25 : Vitesse moyenne d'évolution mesurée par secteur et par période (en m/an), îlot Larégnère

Sur l'ensemble de la période étudiée (2004-2016), le **secteur de la pointe nord-est (S1)** connaît une avancée relativement importante de sa LVP avec une amplitude de déplacement de + 3,40 m en 12 ans, soit un taux d'évolution de + 0,28 m/an (Figure 24). A l'extrémité nord de la pointe, au niveau des transects 43, 1 et 2 (Figure 22), on note, respectivement pour chaque transects, une progression de + 0,23 m/an, + 0,39 m/an et enfin + 0,23 m/an.

Si l'on s'attarde sur les différentes phases qui composent ces 12 années (Figure 25), on constate une première phase d'accrétion au cours de la période 2004 à 2007. La limite de végétation avance excepté un léger recul au niveau du transect 2 de l'ordre de - 0,57 m sur les 3 ans. L'extrémité nord (transect 43) a connu une phase de régression de son linéaire côtier entre 2007 et 2011. Cette tendance à l'érosion est davantage marquée entre 2011 et 2012 où l'ensemble du secteur recule de 2 m, notamment au niveau de l'extrémité nord de la pointe. Puis, entre 2012 et 2015, le secteur connaît un nouvel épisode d'engraissement (+ 0,73 m/an). Depuis mai 2016, cette zone semble subir une nouvelle phase de recul de son trait de côte. Les observations de terrain, réalisées au cours du projet entre 2016 et 2017, témoignent de cette tendance ; une zone stable voire en accrétion en avril 2016 et un recul de la LVP en juin 2017 sont constatés (Figure 26).



Figure 26 : 1) zone en accrétion avec de légères traces d'érosion d'ancienne sur le S1 (photo avril 2016) 2) recul de la LVP du S1 (photo juin 2017)

L'**extrémité sud de la pointe nord-est (S2)** a globalement reculé entre 2004 et 2016 (- 1,84 m sur les 12 années, soit - 0,15 m/an). Cependant, cette situation est à nuancer car la valeur de son recul est inférieure à la marge d'erreur. Au départ stable, ce secteur 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 ce projet (Figure 27). Après 2015, la tendance semble s'inverser (environ + 0,70 m entre mai 2015 et novembre 2016) mais les traces de l'érosion antérieure sont toujours visibles.

Au cours des missions de terrain, il a été observé que les événements météo-marins survenus en 2017, le passage des cyclones Cook et Donna en avril ainsi que les 2 coups d'ouest consécutifs de juillet et août, avaient réactivé le recul de ce secteur (comme en témoignent les arbres déchaussés et le talus frais) (Figure 28). Ces événements auraient provoqué une érosion significative avec un impact élevé à très court terme sur la morphologie de l'ensemble de l'îlot.



Figure 27 : Talus d'érosion situé à la pointe sud-est du S2, témoin de la phase de recul entre 2007 à 2015 (photo 2015)



Figure 28 : Arbres déchaussés et talus vif témoins de la réactivation de l'érosion du S2 en 2017 (photo 17/10/2017)

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, ce secteur de l'îlot connaît une phase d'avancée de sa LVP (+ 1,2 m entre 2004 et 2007), suivie d'une phase de recul entre 2007 et 2012 (-2,35 m sur les 5 ans soit - 0,47 m/an). Puis la LVP se stabilise entre 2012 et 2015 et regagne légèrement du terrain entre 2015 et 2016 (+ 0,69 m).

La phase d'érosion de 2007 à 2012 est toujours perceptible à travers la présence d'indices comme une micro falaise d'érosion d'une hauteur de 1,20 m, encore observée aujourd'hui sur le terrain (Figure 29). Une phase de recolonisation du secteur par la végétation rampante (pourpier), relevée en 2016, s'est faite de manière éparse. En effet, on remarque encore de l'érosion active sur de courts linéaires de quelques mètres, visibles sur la Figure 30.

Comme pour le secteur 2, depuis les événements météorologiques du premier semestre 2017, le mécanisme érosif de ce secteur est à nouveau actif (Figure 31).



Figure 29: Recolonisation du talus par une végétation rampante (pourpier) du S3 (photo 2016)



Figure 30 : Talus d'érosion de 1,20 m de hauteur encore actif sur le S3 (photo 2017)



Figure 31 : Processus érosif réactivé sur le S3 (sud-est) en 2017 (photo 17/10/2017) avec un talus actif et impacts sur la végétation

Le **secteur sud (S4)** connaît sur l'ensemble de la période une régression de son rivage (- 0,25 m/an entre 2004 et 2016) (Figure 24). La période 2004-2007 est caractérisée par une relative stabilité (Figure 25). Jusqu'en 2012, on observe une dynamique à l'érosion avec une importante phase de recul de la LVP. Entre 2007 et 2011, celle-ci régresse de - 0,7 m/an et entre 2011 et 2012, ce segment côtier connaît son plus important épisode érosif avec - 1,86 m sur une année. Lui succède alors une période de relative stabilité. Et depuis mai 2015, le secteur sud de Larégnère voit sa LVP avancer : + 1,3 m jusqu'à novembre 2016. Cette tendance à l'accrétion ou à la stabilité semble perdurer jusqu'à maintenant comme en témoignent les observations de terrain réalisées en 2017 (Figure 32).



Figure 32 : Zone stable du S4 (sud) (photo 17/10/2017)

Le **secteur centre sud (S5)** a, sur l'ensemble de la période 2004 - 2016, été affecté par une érosion avec un léger recul de son rivage de - 0,18 m/an. Cette situation est à nuancer compte tenu de la valeur de

recul inférieure à la marge d'erreur. Ce secteur connaît des alternances de périodes d'accrétion (2004-2007 : + 0,6 m/an et 2012-2016 : +1 m/an) et de phases de recul (2007-2012 : - 2,79 m/an). Les cicatrices d'un ancien talus d'érosion actuellement visible sur le terrain témoignent de l'importante régression du trait de côte entre 2007 et 2012. Cette régression n'a pas, ensuite, été compensée par la légère avancée entre 2012 et 2016 (+ 1 m/an) (Figure 33).



Figure 33 : Secteur 5 en situation d'accrétion entre 2012 et 2016 (photo 2016)

Le **secteur sud-ouest (S6)** apparaît stable sur l'ensemble de la période 2004-2016 (Figure 24). Toutefois, il connaît la même dynamique que le secteur précédent, à l'exception d'un épisode d'érosion entre 2011 et 2012 (- 2,35 m en une année) et d'accrétion entre 2012 et mai 2016 (+ 1,71 m/an) qui sont davantage prononcés (Figure 34).



Figure 34 : Stabilité voire accrétion du S6 (photo 2015)

La **pointe ouest (S7)** de l'îlot est également une zone caractérisée par une dynamique de recul (- 0,25 m/an) sur l'ensemble de la période 2004-2016 (Figure 24). Stable jusqu'en 2007, sa LVP recule de - 2,9 m entre 2007 et mai 2016 soit -0,32 m/an. Elle apparaît inchangée sur la période la plus récente mais aussi la plus brève (mai 2016 - novembre 2016). Les observations de terrain renseignent davantage sur

la dynamique réelle de ce secteur : le recul de la végétation de type rampante (pourpier) observé entre 2007 et 2016 a pu être causé par une fréquentation humaine importante (zone de passage, présence d'un faré en arrière plage, etc.) à l'origine d'un piétinement de cette végétation. En 2016, une barrière de protection a été installée. On observe depuis une atténuation du recul de la LVP (Figure 35). La zone d'avant-plage semble, quant à elle, stable sur toute la période (2004-2016).



Figure 35: Zone stable du S7, en haut de plage, on observe une barrière de protection au niveau de la végétation rampante (photo 2016)

Le **secteur nord-ouest (S8)** manifeste une stabilité relative voire une légère tendance à l'accrétion sur les 12 années d'analyse. La LVP avance petit à petit de quelques centimètres (+ 0,78 m entre 2004 et 2016, Figure 36). Contrairement aux autres secteurs côtiers de l'îlot, celui-ci n'a pas subi la période de démaigrissement de son rivage pour la période 2011 - 2012.



Figure 36 : Photographie de 2016 qui témoigne de la situation en engraissement du S8 sur la période 2004-2016

Le **secteur nord (S9)** fait également partie des secteurs où sont observés les reculs les plus importants. Sur l'ensemble de la période, il connaît majoritairement des épisodes érosifs (- 0,25 m/an). Il régresse de - 0,22 m/an entre 2004 et 2007 puis, après une légère avancée entre 2007 et 2011 de + 0,14 m/an, une phase d'érosion importante entre 2011 et 2012 survient (- 1,86 m/an). Cette tendance perdure jusqu'en mai 2016. Ce mécanisme d'érosion est visible sur les photographies prises au cours des missions OBLIC en 2014 et 2015 (Figure 37, 1 et 2). On y observe un talus d'érosion actif et un recul de la LVP. Très récemment, la LVP a avancé (+ 0,3 m en 6 mois), mais cette situation est peut être saisonnière. En effet, en 2016, on remarque sur le terrain une tendance au rechargement en sédiments du haut de plage qui n'occulte pas complètement les traces de l'érosion passée, ainsi qu'une cicatrisation du talus avec une colonisation par la végétation pionnière rampante qui investit les haut et bas de talus et enfin un adoucissement et une diminution de la pente de la plage (Figure 37, 3).



Figure 37 : 1 et 2) photographies du S9 de 2014 (1) et 2015 (2) témoignant de la phase d'érosion active. 3) photographie du S9 en 2016 qui montre la cicatrisation du talus et la recolonisation par la végétation pionnière

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 sa LVP. Néanmoins, 2 épisodes de brefs de recul sont à noter. Le plus important a eu lieu entre 2011 et 2012 (- 1,25 m) et le second, plus récent (mai à novembre 2016), de l'ordre - 0,82 m/an, renseigne sur un épisode d'érosion illustré sur la photographie ci-dessous (Figure 38).



Figure 38 : Photographie du S10 en 2016, secteur stable ponctué de brefs épisodes de recul.

1.2.1.2.2 L'évolution passée et récente de l'îlot Mbé Kouen

L'évolution de la surface de l'îlot

L'îlot Mbé Kouen a gagné 16 % de superficie entre 2009, où sa surface était de 1 759 m², et aujourd'hui en 2017, où elle s'étend sur 2 038 m² (Figure 39). Après avoir connu une première phase de réduction au cours des 4 premières années (- 3 % de 2009 à 2013), sa superficie ne cesse de croître, à raison de + 10 % entre 2013 et 2016 et + 8 % entre 2016 et 2017 (Tableau 7).

Tableau 7 : Evolution de la surface de l'îlot Mbé Kouen entre 2009 et 2017

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%

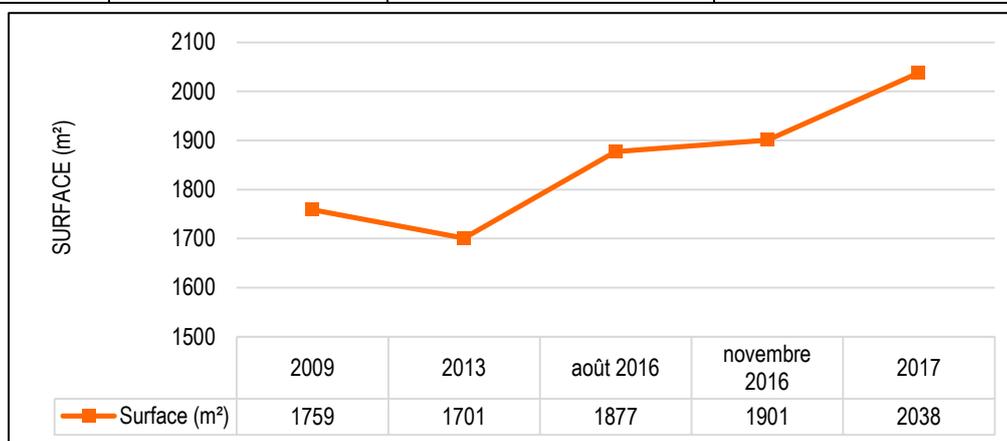


Figure 39 : Evolution de la surface de l'îlot Mbé Kouen de 2009 à 2017 (exprimée en m²)

L'évolution mesurée par secteur et par période

Au même titre que Larégnère, le calcul des vitesses d'évolution du rivage par de transects équidistants de 10 m (Figure 40) a permis de diviser l'îlot Mbé Kouen en 5 secteurs d'évolution homogène dont 2 sur la partie sud-est et 3 au nord-ouest de l'îlot (Figure 41). Les évolutions moyennes par secteurs ont pu être mesurées sur l'ensemble de la période de 2009 à 2017 (Figure 42) mais également par période (au nombre de 4)

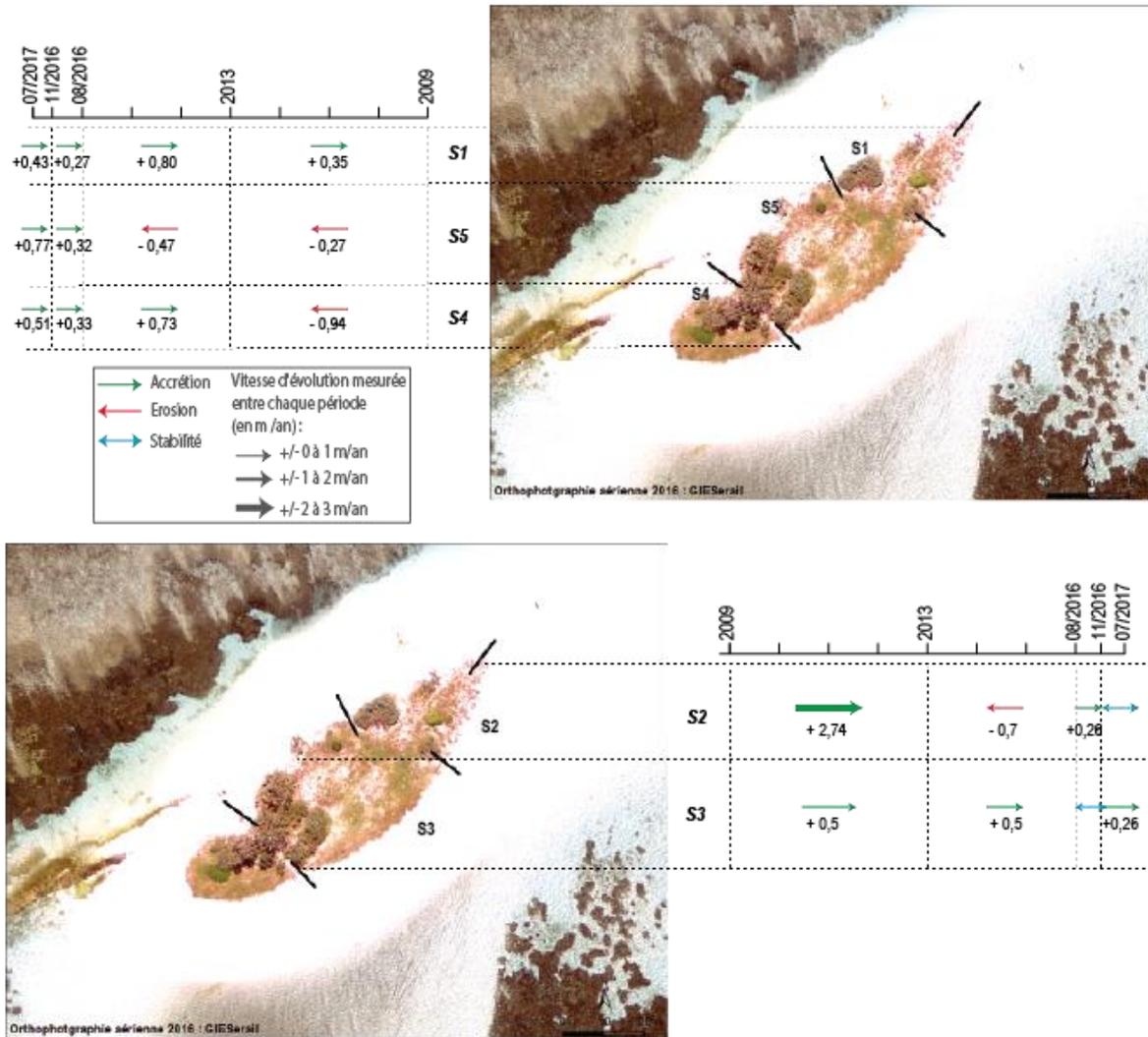


Figure 43).



Figure 40 : Localisation des transects qui ont permis de définir les secteurs d'évolution homogène, îlot Mbé Kouen



Figure 41 : Définition des secteurs de comportement homogène, îlot Mbé Kouen

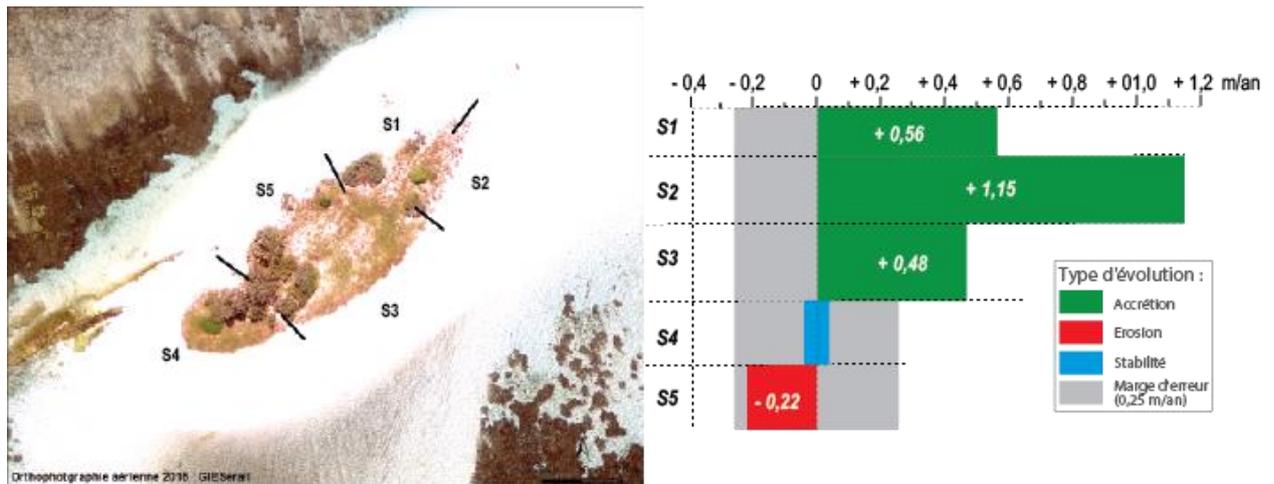


Figure 42 : Vitesse moyenne d'évolution mesurée par secteur pour la période 2009 à 2017 (en m/an), îlot Mbé Kouen

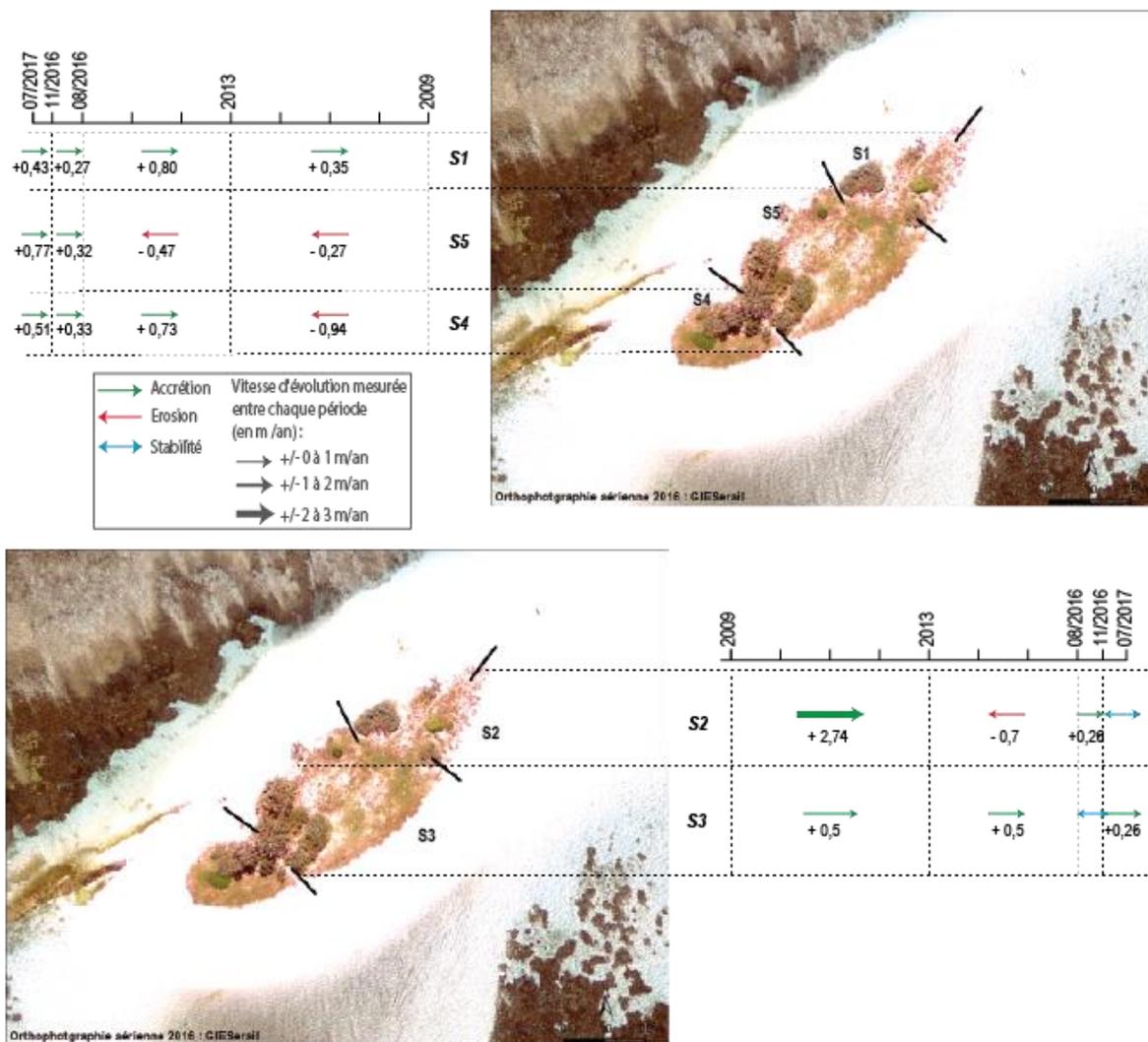


Figure 43 : Vitesse moyenne d'évolution mesurée par secteur et par période (en m/an), îlot Mbé Kouen

La LVP du **secteur nord-est (S1)** est dans une dynamique constante d'avancement sur l'ensemble de la période d'étude 2009-2017 (+ 4,48 m en 8 ans soit + 0,56 m/an). Ce secteur correspond à la partie nord de l'épandage sableux, que l'on peut voir sur la photographie acquise en 2016 lors d'une mission de terrain (Figure 44). L'amplitude maximale de déplacement le plus remarquable s'est déroulé entre 2013 et 2016 avec une progradation vers le nord-est de la langue de sable de + 2,4 m en 3 ans soit un taux d'évolution de + 0,80 m/an.



Figure 44 : Photographie du S1 de Mbé Kouen (2016) en accrétion depuis 2009

Le **secteur pointe-est (S2)** constitue la partie de l'îlot qui a le plus progressé. En effet, on y observe que la LVP a avancé de + 9,16 m en 8 ans, soit + 1,15 m/an pour l'ensemble de la période. Cette aggradation est importante au cours des 4 premières années de l'analyse (2009 à 2013) avec une vitesse d'avancée de + 2,74 m/an soit + 10,95 m en 4 ans. Cette évolution notable a tout de même été ponctuée par un épisode de recul entre 2013 et 2016 (- 2,12 m soit - 0,7 m/an) (Figure 45, 1). Plus récemment, depuis 2016, ce secteur de l'îlot semble connaître une phase de stabilité relative (Figure 45, 2).



Figure 45 : 1) Photographie du S1 de Mbé Kouen (2016) qui témoigne de la phase d'érosion de 2013-2016. 2) Photographie du S1 (2017) qui illustre la stabilité observée actuellement.

Le **secteur sud-est (S3)** est également une zone en progression constante depuis 2009, mais de manière plus modérée que le S2 situé plus au nord. Sur les périodes 2009-2013 et 2013-2016, la LVP a progressé de + 1 m soit + 0,5 m/an. Entre mai 2016 et 2017, la dynamique d'avancement a été beaucoup plus modérée : + 0,09 m/an entre août et novembre 2016 et + 0,26 m/an entre novembre 2016 et juin 2017.

Cette accrétion constante du S3 est confirmée par les observations de terrain réalisées au cours du projet (Figure 46).



Figure 46 : Secteur 3 en situation d'accrétion en 2016

Le **secteur ouest (S4)** est caractérisé par un épisode d'important recul de la LVP entre 2009 et 2013 (- 0,94 m/an soit - 3,76 m en 4 ans). A partir de 2013, la dynamique s'inverse et on constate que la LVP gagne du terrain : + 2,18 m entre 2013 et 2016 (0,73 m/an) et + 0,84 m entre août 2016 et juin 2017. La tendance générale du S4 sur les 8 années de l'analyse est par conséquent à la stabilité (Figure 47).



Figure 47 : Stabilité du S4 en 2017

Le **secteur nord-ouest (S5)** connaît la même dynamique que la zone précédente (S4). Cependant, le passage d'une phase de recul (- 2,48 entre 2009 et 2016 soit -0,35 m/an) à une phase d'avancée est plus tardif. La progression de la LVP ne s'observe qu'à partir de novembre 2016 (Figure 48, 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 48 : 1) LVP du S5 en situation de recul en 2014 2) En 2017 avancée de la LVP qui s'observe au niveau du faux-tabac

Les trois secteurs à l'est de l'îlot ont connu une accrétion au cours des 8 dernières années tandis que les secteurs à l'ouest, notamment celui du nord-ouest, ont accusé une perte de matériel et un recul de la LVP. On peut alors émettre l'hypothèse d'un transfert de sédiments du sud vers l'épandage sableux au nord-est (Figure 49). Un autre élément d'observation va dans le sens de cette hypothèse : des beachrocks, observables sur les images satellites (Figure 50), sont situés au sud-ouest de Mbé Kouen. Ils sont les marqueurs d'un îlot plus étendu au sud-ouest. Ainsi l'îlot a connu possiblement une migration vers le nord-est au cours de son évolution récente.

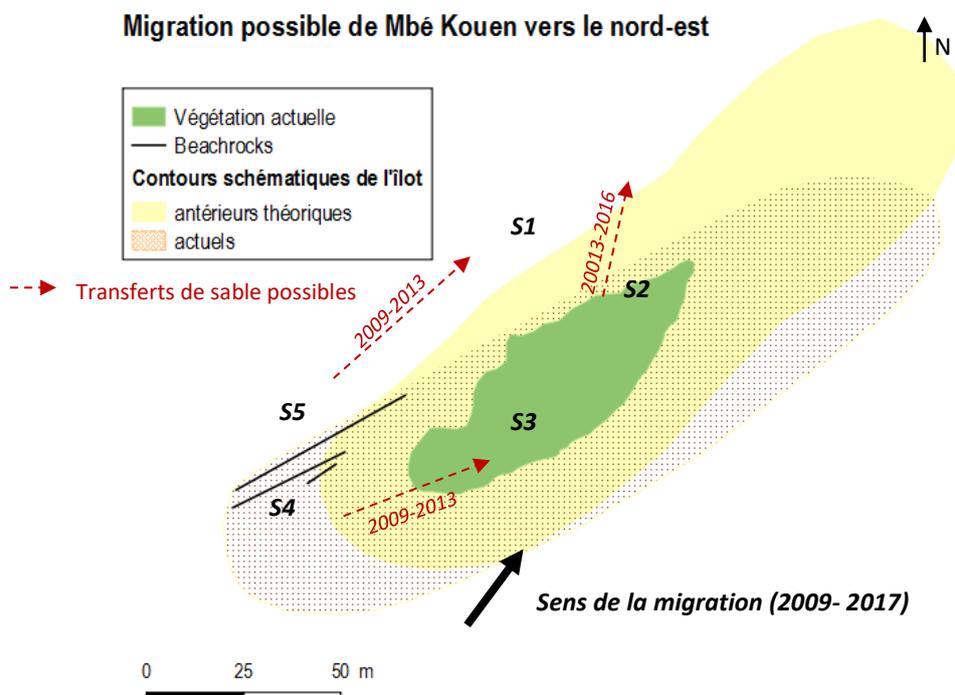


Figure 49 : Schématisation de la dynamique sur la période récente (2009-2017) de l'îlot Mbé Kouen



Figure 50 : Localisation des beachrocks de l'îlot Mbé Kouen

L'analyse des évolutions passées et récentes, réalisée à partir de l'interprétation des missions successives de photographies aériennes anciennes et des images satellites, a ainsi permis de caractériser la tendance d'évolution des 2 îlots sur une période de 8 et 12 ans.

Cette analyse doit être complétée par des mesures de terrain (levés topométriques réalisées par cadre, par GPS différentiel et par photogrammétrie aéroportée à l'aide d'un drone). Elles permettront de quantifier les changements sur la durée du projet (2 ans) mais également de définir des états de référence (Etat initial/T0) qui autoriseront, dans le futur, la caractérisation fine des évolutions (évolution de la position du trait de côte, évolution des profils de plages, etc.) et ainsi de les inscrire dans une perspective.

1.2.2 L'évolution actuelle des îlots

1.2.2.1 Des mesures topographiques *in situ* pour une analyse actuelle

1.2.2.1.1 Les données topographiques acquises sur le terrain

L'acquisition de données *in situ* réalisée au cours du projet a pour objectif de définir 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 51).

Ces méthodes ont été spécifiées et testées afin de valider leur utilité, de les comparer entre elles et 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) ;
- acquisition d'images drone pour leur traitement photogrammétrique pour l'obtention de Modèle Numérique de Surface (MNS).

Ces mesures ont été complétées par des observations géomorphologiques.

La fréquence des levés au cadre d'Emery et des observations géomorphologiques a été fixée à 3/4 mois, des semis de points et profils au DGPS à 6 mois et des levés au drone également à 6 mois (Figure 51). Il a également été prévu d'organiser des missions juste après l'occurrence d'un événement marin et/ou météorologique d'ampleur significative. Une mission non programmée post cyclone a été déclenchée en avril 2017 suite au passage du cyclone Cook.

Ces fréquences ont été définies afin de dégager les évolutions annuelles, saisonnières et les impacts des événements extrêmes sur les îlots.

Des ajustements ont été réalisés quant au programme d'acquisition initialement prévu en fonction des conditions météorologiques et de la disponibilité des équipes. Des levés drone ont notamment été annulés en raison de conditions météorologiques défavorables ne permettant pas de réaliser le vol.



Figure 51 : Détail chronologique des différentes missions terrain réalisées dans la cadre du projet EMIL

Le cadre

Le cadre est une technique utilisée pour le suivi du trait de côte des littoraux meubles depuis les années 1960. Cette méthode basée sur les principes de la topométrie permet de mesurer la dénivelée relative le long de profils de plage à partir de point fixe géoréférencé et d'un azimuth, par visées successives entre 2 montants distants d'un mètre (Figure 52). Les variations d'altitude (dénivelée cumulée) du profil de plage sont ainsi obtenues tous les mètres.



Figure 52 : Mise en pratique de l'outil par les gardes nature de la province Sud lors de la mission du 17/10/2017, îlot Larégnère

Cette méthode a été mise en œuvre lors de 5 missions terrain réalisées par les gardes nature de la province Sud et le SGNC sur la période allant d'avril 2016 à octobre 2017 (Figure 51) :

- 14/04/2016
- 24/08/2016
- 02/11/2016
- 19/01/2017
- 07/06/2017
- 17/10/2017

Les 2 cadres utilisés pour ces missions ont été confectionnés par le SGNC à l'aide de tubes en PVC.

Dix profils de plages ont été implantés sur les deux îlots : 6 à Larégnère et 4 à Mbé Kouen. Pour ce faire des stations de références permanentes (tête de profil) matérialisées par une borne fixe ont dû être identifiées. Les repères existants (plot de la province Sud à Larégnère, pied du support du mât installé pour la protection des oiseaux pour Mbé Kouen) ont été privilégiés. Mais les points de fixations étant rares sur ces îlots, il a également été nécessaire d'implanter certains repères pour les besoins du projet (piquet cimenté à leur base pour s'assurer d'un maintien stable et durable de la station) (Figure 53).

Les coordonnées géographiques X et Y de ces repères ainsi que leur altitude Z (base ou sommet du repère) sont connus et mesurés au DGPS par l'équipe du Service Topographique et Foncier de la DFA de la province Sud afin d'effectuer leur rattachement au référentiel géographique local.



Figure 53 :
en haut à gauche : repère existant, pied du mât province Sud (Mbé Kouen)
en haut à droite : repère implanté, piquet cimenté à la base (Larégnère)
en bas : repère existant, plot coin feu province Sud (Larégnère)

Si le repère utilisé n'est pas positionné au sol (par exemple les plots province Sud ou les piquets implantés (Figure 53), les mesures débutent au sommet de ces repères (Figure 54). Il est alors nécessaire, au cours du traitement des données, de réaliser une correction afin de connaître l'altitude du sol à un instant t lors des mesures. Cette correction correspond à la différence entre l'altitude Z du repère (mesurée au DGPS par le service topographique de la DFA de la province Sud) et la hauteur du repère mesurée à chaque levé.



Figure 54 : Méthode pour le levé de profil débutant au sommet du repère

L'ensemble des 10 profils et leurs caractéristiques sont présentés dans le Tableau 8, la Figure 55 et Figure 56.

La quasi-totalité des têtes de repère de chaque profil correspondent à un repère existant, excepté pour les profils 1-a et 1-b (Larégnère) qui ont été implantés (Figure 53).

Les profils sont tracés 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°2). Lorsqu'un marqueur tel que la limite de végétation, le haut/bas de talus, la ligne instantanée du rivage (jet de rive), la ligne du niveau des pleines mers, la limite entre sable sec et sable humide, la laisse de mer, le niveau atteint par une pleine mer antérieurs etc. apparaît le long du tracé, il est noté au cours de la prise de mesures pour ensuite être replacé sur les courbes et graphiques des profils.

Le cadre est déplacé le long du transect matérialisé au sol par un décimètre. La lecture de la mesure de la dénivelée est faite tous les mètres (correspond à la longueur du cadre) (Figure 52).

Tableau 8 : Les caractéristiques des 10 profils de plage implantés sur les îlots

Nom profil	Point X	Point Y	Z repère NGNC (m) : nov 2016	Hauteur repère (m) : nov 2016	Z sol NGNC (m)	Azimut	Direction	Longueur moyenne des profils	Site
1-a	432968,47	208403,31	3,32	0,24	3,08	N335	NO	30,5	Larégnère
1-b	432989,01	208388,79	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



Figure 55 : Les 6 profils de plage de l'îlot Larégnère

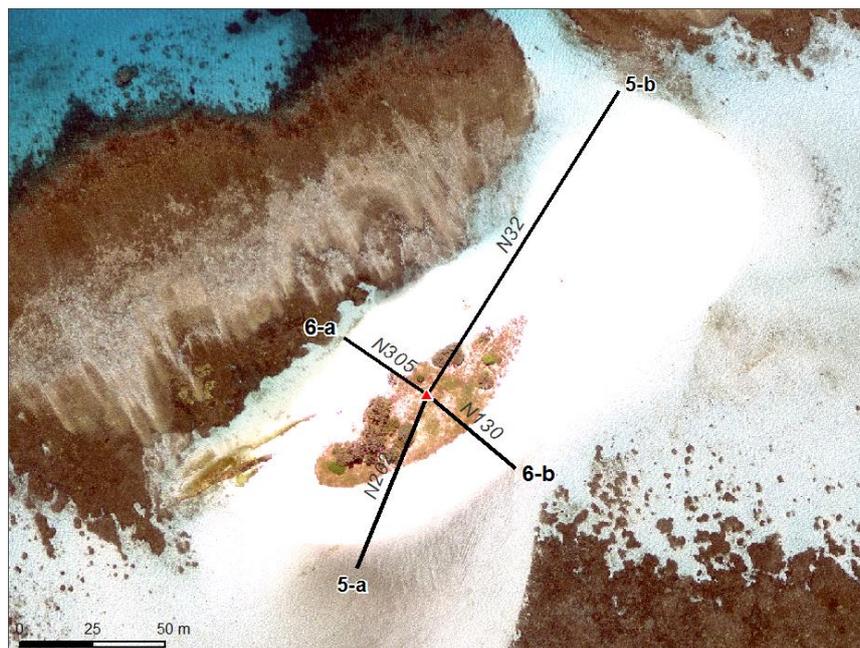


Figure 56 : Les 4 profils de plage de l'îlot Mbé Kouen

Les données topographiques acquises le long de ces profils permettent de caractériser à une échelle fine les évolutions des plages sur une section rectiligne. En effet, un profil topographique est constitué de l'assemblage d'une suite de pentes de trois principales sections : haut de plage (zone supratidale), estran (zone intertidale) et avant plage (zone subtidale) (Sinane, 2013). Sans aller jusqu'à la définition de « morphotypes » pour les profils de cette étude, il sera considéré que l'apparition d'une convexité est synonyme d'accrétion et, au contraire, que l'apparition d'une concavité est synonyme d'érosion.

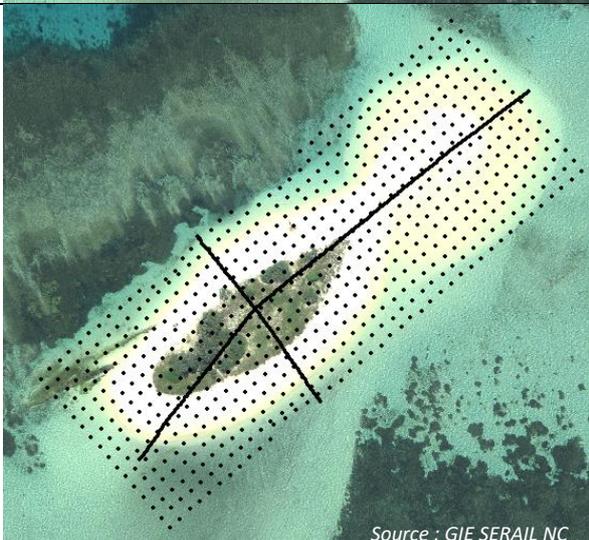
Le DGPS (GPS différentiel)

Un DGPS (ou GPS différentiel) est une amélioration du GPS. Il utilise un réseau de stations fixes de référence transmettant l'écart entre leur position réelle connue et la position indiquée par les satellites. Il permet de réaliser des levés topographiques de grande précision.

Des données topographiques ont été acquises au DGPS par les opérateurs de la DFA de la 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 (Figure 51 et Tableau 9). La méthode consiste à prendre des mesures selon une grille régulière (appelé semi de points). Une mesure (coordonnées X, coordonnées Y et altitude Z) est relevée tous les 10 m sur l'ensemble du terrain d'étude, avec autant de points mesurés que le permet la marée du jour. La marge d'erreur en altitude (Z) des mesures est estimée à 0,03 m. 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 les données sont indisponibles) afin de produire une interpolation plus précise au niveau des profils lors de la création des Modèles Numériques de Terrain (MNT).

Tableau 9 : Caractéristiques des semis de points levés au DGPS

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	

<p>Larégnère 13/04/2017</p>	<p>BM : 3h11 ; H : 0,49 m PM : 9h09 ; H : 1,49 m BM : 15h24 ; H : 0,35 m PM : 21h44 ; H : 1,52 m</p>	 <p>Source : orthophotographie 2011 de la province Sud</p>
<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>Source : GIE SERAIL NC</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>Source : GIE SERAIL NC</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>	 <p>Source : GIE SERAIL NC</p>
---------------------------------	---	--

Le drone

Des photographies ont été acquises par photogrammétrie aéroportée à très haute résolution spatiale à l'aide d'un drone. L'objectif est de réaliser des Modèles Numériques de Surfaces (MNS) à résolution centimétrique après traitements photogrammétriques. Deux missions « drone » ont été effectuées sur le temps du projet : le 02/11/2016 et le 05/07/2017 (Figure 51). Le Tableau 10 présente l'ensemble des caractéristiques des drones, de l'appareil photographique utilisé et des prises de vues réalisées.

Tableau 10 : Caractéristiques des missions drone

	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 m	25 m
<i>Larégnière</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 Kouen</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, le drone a été piloté en mode automatique à partir d'un plan de vol établi et programmé au préalable. Après chaque vol, les opérateurs terrain, munis d'un DGPS, relèvent les coordonnées du centre des cibles (Figure 57) placées selon des transects équidistants d'environ 20 m sur l'ensemble du rivage et selon des diagonales à l'intérieur des îlots. Ces informations sont nécessaires pour le géoréférencement des orthophotographies.



Figure 57 : Exemple de cibles disposées sur l'îlot Larégnère lors de la mission du 02/11/2016 (image drone)

Des observations géomorphologiques complémentaires

En complément des données quantitatives acquises par le biais d'instruments de mesure, des observations naturalistes géolocalisées sont réalisées à chaque mission par les gardes nature de la province Sud et par le SGNC.

Ces observations, basées sur une approche naturaliste, consistent à caractériser les indices et les 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,...). Ces marqueurs sont des indicateurs de l'état du littoral et informent sur les processus actifs responsables de l'évolution des îlots.

Ces observations sont retranscrites sur des fiches type qui servent de fil conducteur pour noter, dessiner toutes les informations nécessaires et utiles. Puis ces indices, repérés à l'œil nu, sont photographiés et localisés à l'aide d'un GPS (Figure 58).

La réalisation de ces observations successives, à un pas de temps très court et de manière régulière, permet de caractériser l'évolution des formes et des phénomènes sédimentaires actifs. En effet, elles donnent des informations sur l'évolution des processus en termes d'érosion, de transport sédimentaire etc., qui ne sont pas nécessairement décelables à travers les analyses de l'évolution du tracé du trait de côte ou des profils cross-shore.

Ces observations permettent donc de comprendre la tendance actuelle de l'évolution du littoral de l'îlot et sa variabilité mais aussi de contextualiser les zones les plus mobiles.

Ces informations apportent des indications utiles et complémentaires à l'interprétation des données topographiques acquises par drone, DGSP ou cadre et permettent de valider et de corroborer ces analyses en apportant une vérité terrain. Cette méthode, contrairement à celles évoquées ci-dessus, ne permet pas de quantifier et mesurer de manière précise les évolutions, les pertes ou les gains de sédiments.



Figure 58 : Observations géomorphologiques réalisées sur le terrain (Ilot Larégnère, 2016)

1.2.2.1.2 Les méthodes adoptées pour le traitement des données topographiques

La méthodologie mise en œuvre pour traiter les données topographiques acquises dans le cadre de ce projet et obtenir des rendus permettant leur analyse et leur interprétation est développée ci-après.

La réalisation des profils de plage et leur comparaison

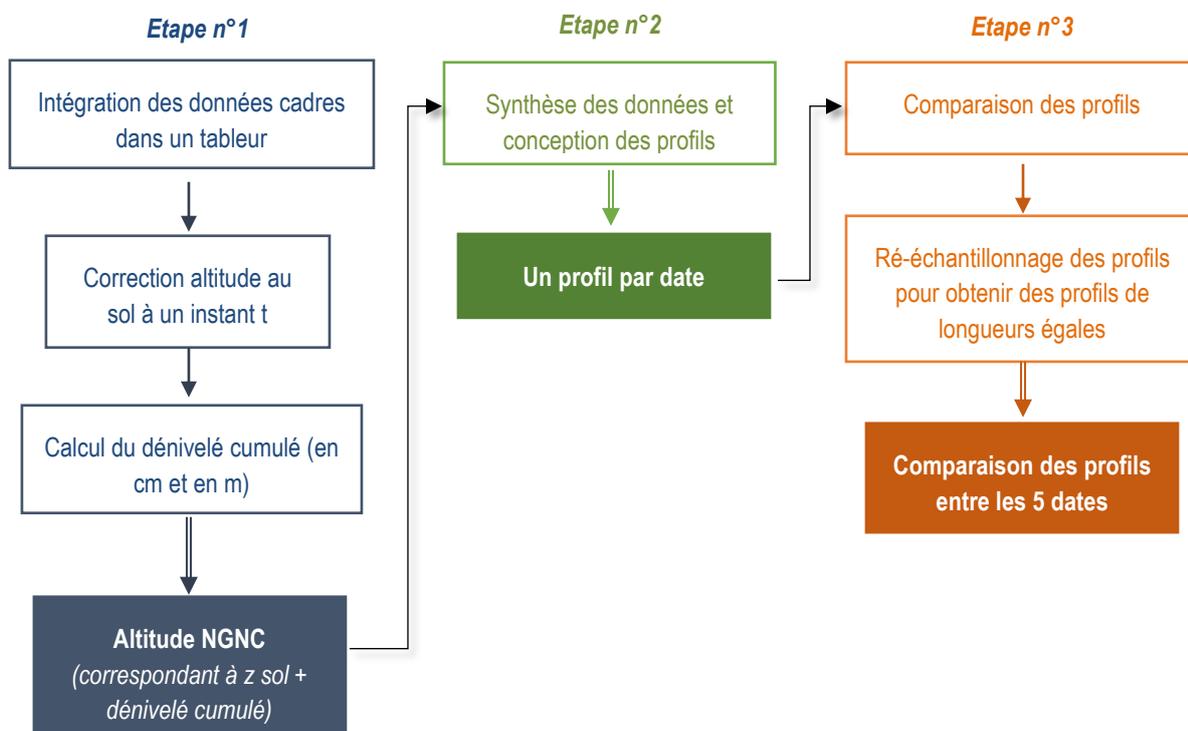


Figure 59 : Les étapes successives du protocole de traitement appliqué pour la création des profils de plage et pour leur comparaison

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

Une première étape de post-traitement des données est nécessaire pour la création des profils de plage. Après avoir saisi les données recueillies sur le terrain (prise de note à la main sur une fiche) dans un tableur Microsoft Excel, la correction de l'altitude au sol est réalisée pour Larégnère du fait de la prise de mesures du point numéro 1 (à 1 m de la tête de profil) au sommet des repères de référence (Figure 54). L'altitude du repère, notée « Z (repère) » en mètres dans le référentiel NGNC¹ est précisément connue (mesurée à l'aide d'un DGPS par l'équipe de géomètres du Service Topographique et Foncier de la province Sud). Sur le terrain, les opérateurs mesurent à chaque mission la hauteur entre le sol et le sommet du repère noté « H (repère) ». La soustraction de « H (repère) » à « Z (repère) » donne l'altitude du sol à un instant t notée « Z (sol) ». Cette mesure peut donc varier s'il y a eu accumulation ou au contraire, arrachage de sable à la base du repère.

Cette opération n'est pas opérée pour les données de Mbé Kouen car la tête de profil est un clou positionné dans une dalle de métal posée à même le sol (support d'un mât sur lequel la province Sud

¹ NGNC : Nivellement Général de la Nouvelle-Calédonie

peut fixer un drapeau indiquant l'interdiction d'accès à l'îlot pendant la période de nidification des oiseaux marins). Son altitude est également connue et mesurée au DGPS par l'équipe des géomètres de la province Sud (Figure 53).

La dénivelée relative cumulée est calculée le long du profil, d'abord en centimètre puis ces valeurs sont converties en mètre. Ensuite, elles sont ajoutées à la valeur « Z (sol) », corrigée pour Larégnère et connue pour Mbé Kouen, sur l'ensemble du profil afin d'obtenir la dénivelée absolue. 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 *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 cross-shore et d'altitude (Z). Cette extension 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.

Etape n° 3 : comparer les profils

Profiler 3.2 XL offre la possibilité de comparer les profils à plusieurs dates successives (Figure 60 et Figure 61). Les 10 profils de l'étude sont comparés à 5 dates différentes grâce à l'outil « Comparaison ». L'outil permet le calcul du différentiel entre les mesures localisées sur le même point du profil et à chaque date.

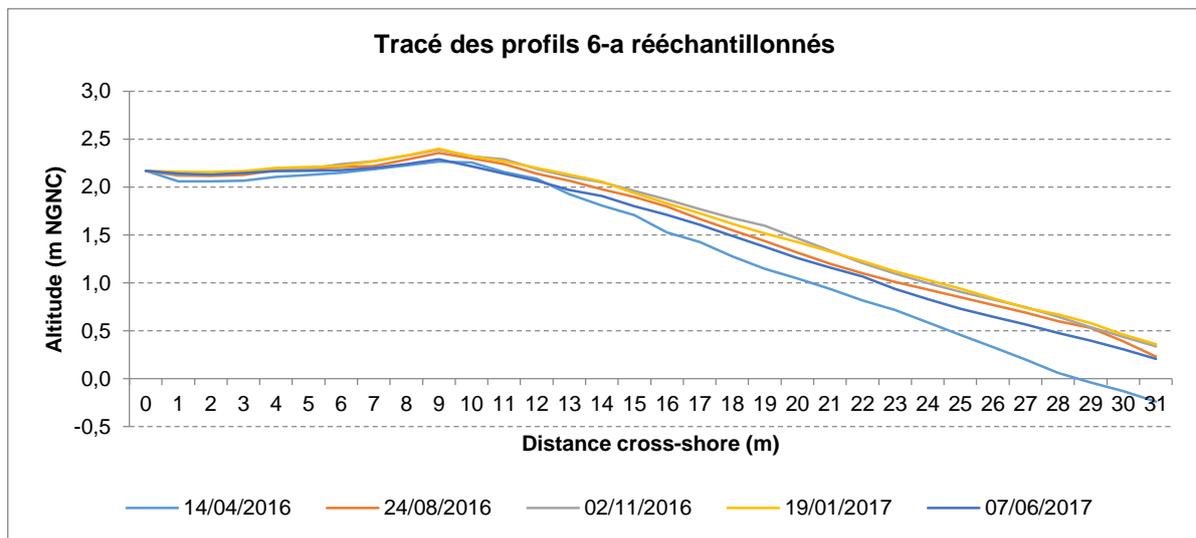


Figure 60 : Comparaison des 5 profils 6-a (Mbé Kouen)

Après le ré-échantillonnage des profils, c'est-à-dire la découpe des profils en sections d'égale longueur (ici la valeur 1 m 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 2 à 2 avec les différences d'altitude et de volume (Figure 61) ;
- 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.

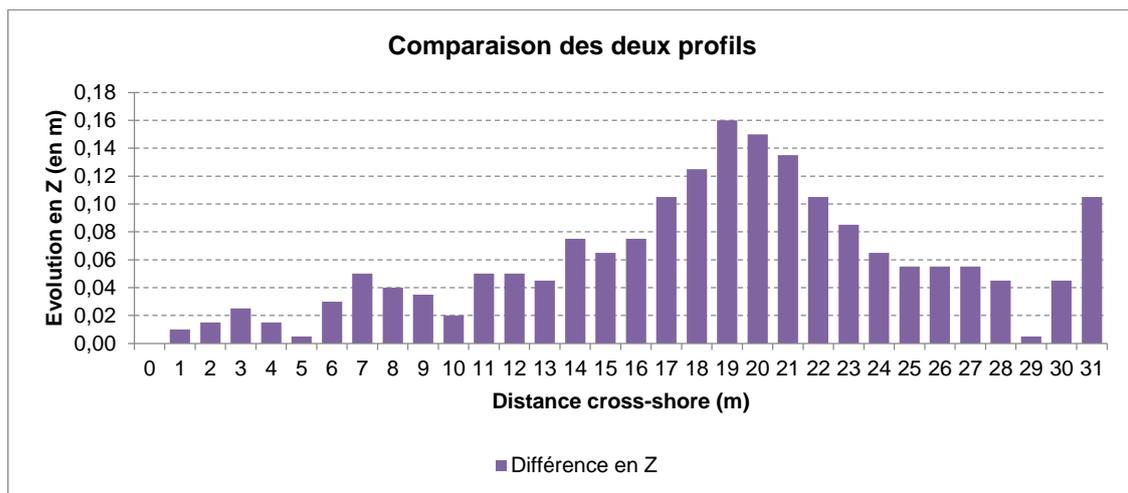
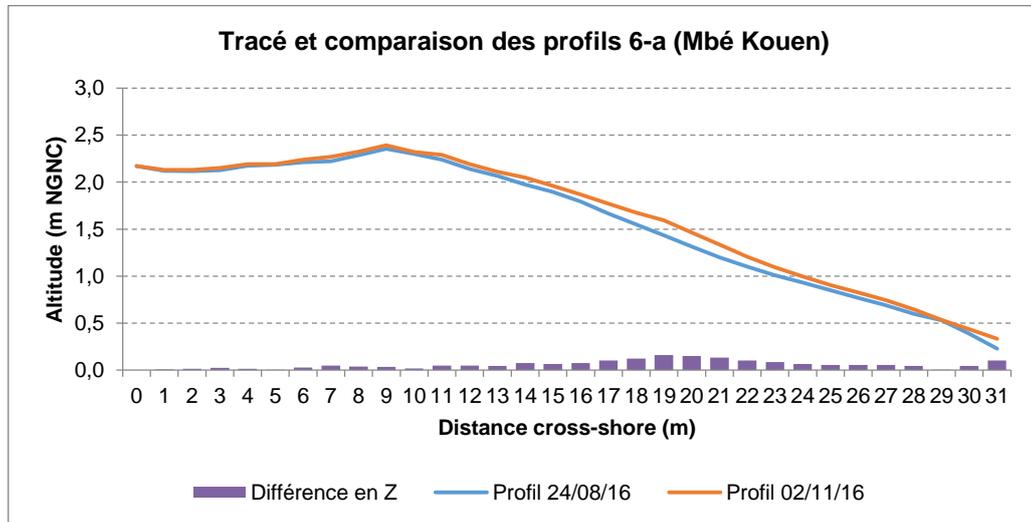


Figure 61 : Comparaison des profils 6-a (Mbé Kouen) du 24/08/2016 et 02/11/2016 après ré-échantillonnage

La représentation de l'ensemble des profils réalisés est consultable en annexe du rapport (Annexe n° 3 et 4)

La réalisation des Modèles Numériques de Terrain (MNT)

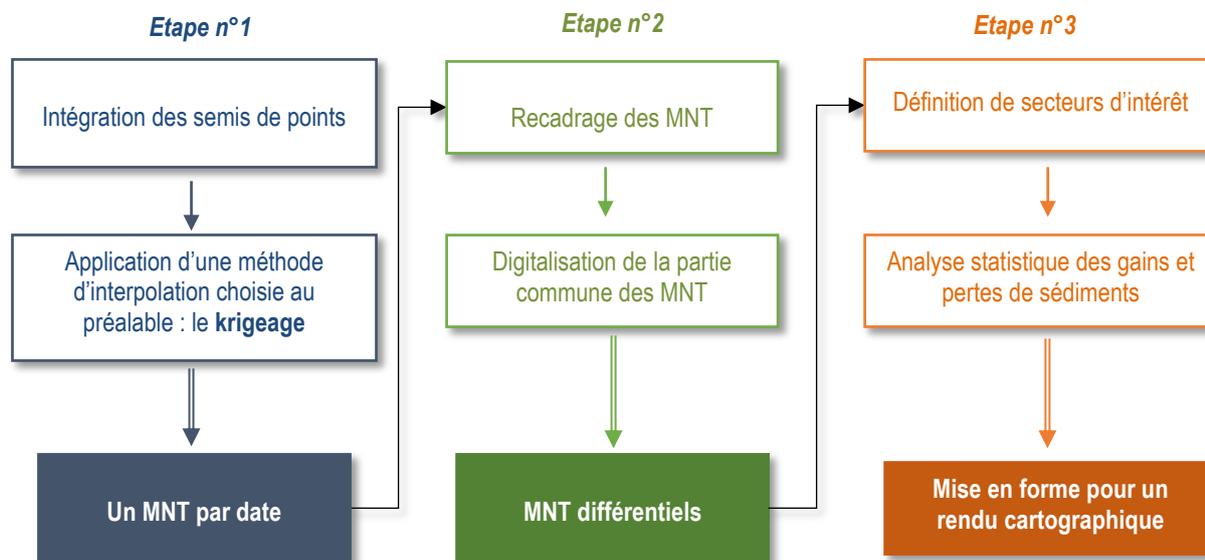


Figure 62 : Les étapes successives du protocole de traitement appliqué pour la création des MNT

Les méthodes d'interpolation spatiales sont basées sur le principe de l'autocorrélation spatiale, qui suppose que, plus les points sont proches, plus ils se ressemblent, c'est-à-dire que ces méthodes prédisent la valeur d'un point sur la base des valeurs des points dans le voisinage.

Plusieurs méthodes d'interpolation géostatistique existent. Les logiciels proposent 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, 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 dépendance spatiale des données par l'intermédiaire d'un variogramme. Celui-ci dépend de la répartition spatiale des données plutôt que des valeurs réelles. Quand on applique la méthode de krigeage on peut voir des résultats pour des points en entrée différents de la valeur en entrée.

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, 2002). C'est donc cette méthode d'interpolation qui a été privilégiée pour la création des modèles.

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

Les MNT aux différentes dates sont générés à partir des tableurs de données contenant les coordonnées X,Y et Z des semis de points levés au DGPS. Le logiciel effectue le calcul des grilles à partir de la méthode d'interpolation choisie. La résolution des grilles (taille d'un pixel) doit être spécifiée ; ici la taille de la maille est définie à 5 m (Figure 63).

Lorsque les profils de plage n'avaient pas été levés au DGPS, un calcul a été réalisé afin de générer des profils « interpolés » sur les MNT ; l'objectif étant de les comparer aux profils « réels ».

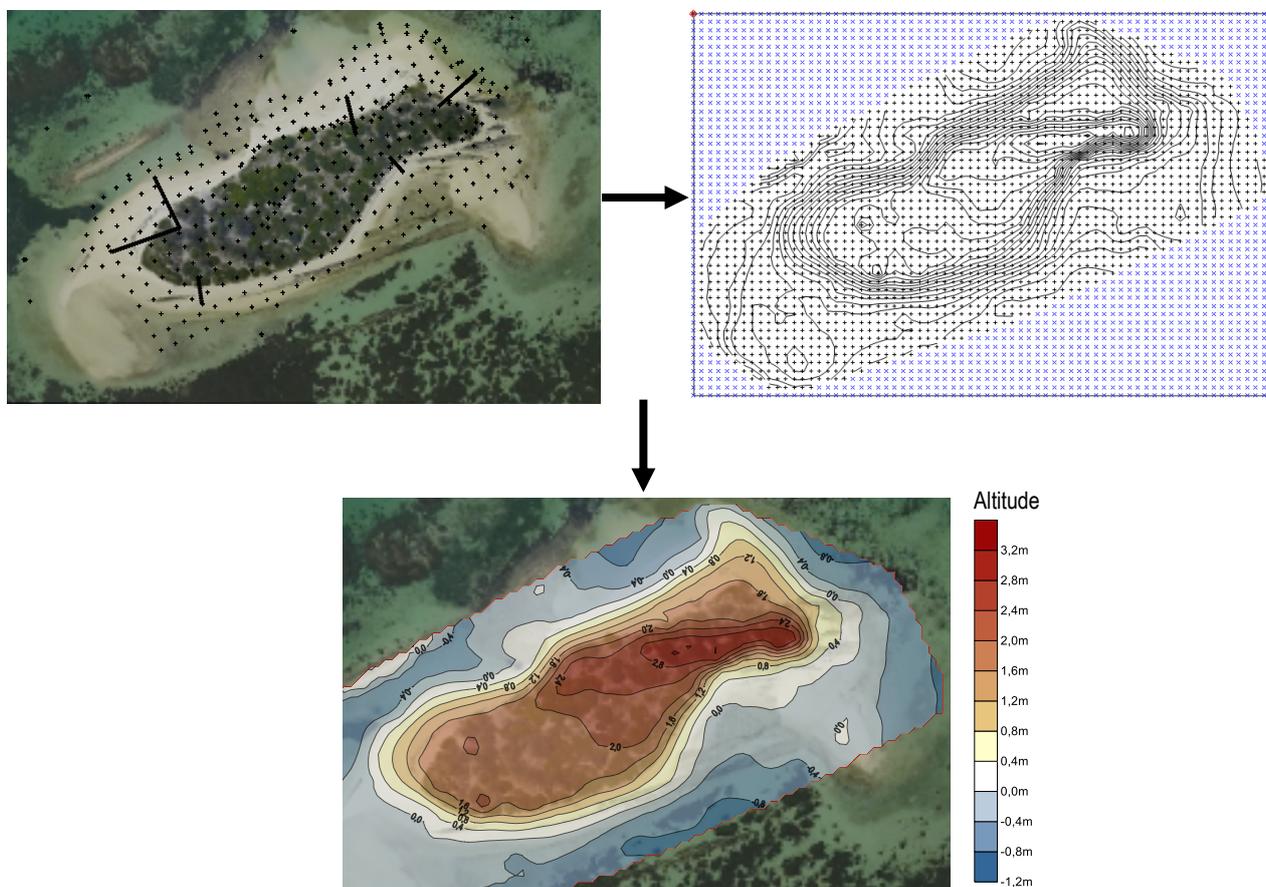


Figure 63 : Du semi de point (DGPS) à l'interpolation, exemple de la création d'un MNT (Larégnière)

Etape n°2 : comparer les MNT avec la génération de MNT différentiel

Afin de comparer des MNT disponibles à différentes dates, il est possible de générer des MNT différentiels. Il est impératif que les MNT comparés aient la même résolution spatiale, c'est-à-dire, des pixels de même taille (ici 5 m) et la même emprise (sélection de la partie commune).

Une fois les 2 MNT redimensionnés selon leur partie commune, la soustraction du MNT le plus ancien au MNT le plus récent permet d'obtenir le MNT différentiel (Figure 64). Ainsi les secteurs avec un différentiel d'altitude négatives correspondent aux zones en érosion et ceux d'altitude positives au zones en accrétion.

On obtient alors, pour Larégnière :

- 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 (1 an).

L'étude des MNT différentiels permet d'identifier et définir les secteurs des îlots les plus mobiles. Une estimation des hauteurs de pertes ou de gains de matériel entre deux dates sur des secteurs de l'îlot permet une analyse plus fine des mouvements sédimentaires.



Figure 64 : Exemple de création d'un MNT différentiel (entre mars 2016 et avril 2017, Larégnère)

Etape n°3 : calculer des volumes de gains/pertes de sédiments

Ensuite les bilans volumétriques sont calculés par secteurs et par dates à partir des MNT. Une surface de base correspondant à une grille plane d'altitude égale au 0 m NGNC et s'étendant sur l'ensemble de la surface du MNT est créée. C'est à partir de cette grille virtuelle que sont calculés les volumes de sédiments qui se trouvent au-dessus ou au-dessous de 0 m. Pour les secteurs où le MNT est d'altitude supérieure 0, le volume est alors positif. A l'inverse, pour les secteurs où le MNT est d'altitude inférieure à 0, le volume est alors négatif. L'ensemble donne le volume total du MNT à une date t par secteur et pour l'ensemble de l'îlot. Puis les volumes différentiels et bilans volumétriques sont obtenus par soustraction des volumes entre les levés successifs.

Les MNT et les différentiels sont consultables dans les annexes n°5, 6, 7 et 8.

La réalisation des Modèles Numériques de Surface (MNS)

A la différence d'un MNT, le MNS prend en compte les éléments du sol et du « sursol ». Il représente le sommet de la végétation ou du bâti (Leclerc, 2015) et, dans le cas de cette étude, celle de l'eau de mer.

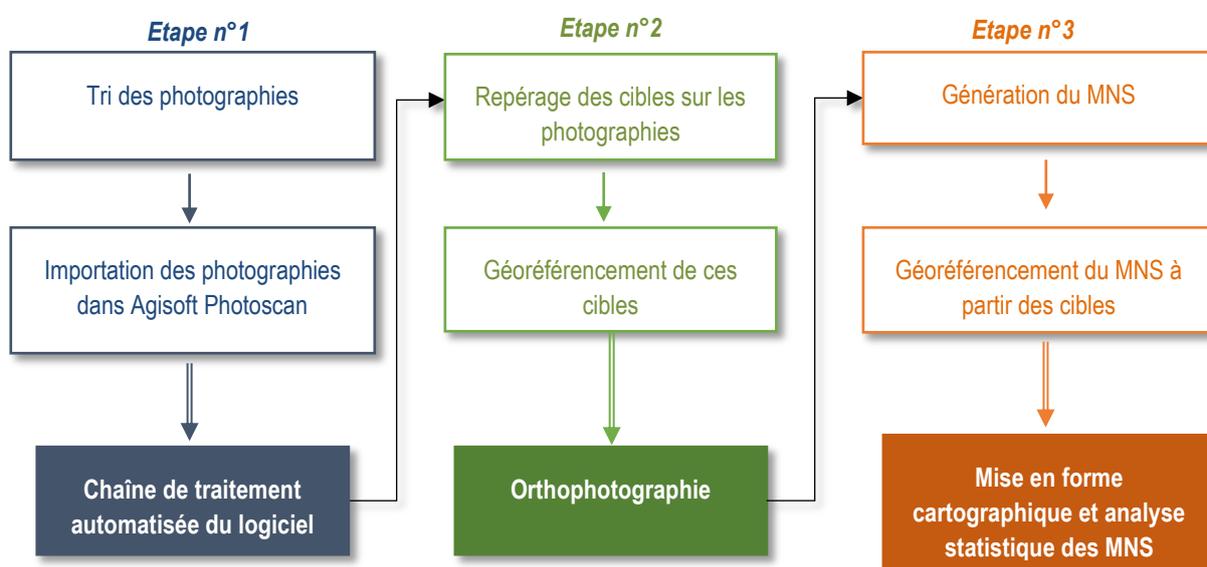


Figure 65 : Les étapes successives du protocole de traitement appliqué pour la création des MNS

Le logiciel *Agisoft Photoscan*, utilisé en photogrammétrie informatique, est basé sur la technologie moderne de reconstruction multi-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 : MNS) à haute résolution. La modélisation est entièrement automatisée. Les différentes étapes du protocole à suivre par la création des MNT sont détaillées dans la Figure 65.

Etape n°1 : importer les photographies dans une chaîne de traitement

La première étape consiste à trier les photographies en supprimant celles qui se répètent ou qui possèdent des caractéristiques pouvant nuire au traitement et au rendu final comme : les reflets du soleil, les photographies avec trop de surface maritime ou celles où on distingue le pied du drone.

Une fois les photographies triées et sélectionnées, elles sont importées dans le logiciel *Agisoft Photoscan*. Avant de lancer les traitements, il est nécessaire d'harmoniser les référentiels géodésiques et projections des images et des levés des cibles au sol par DGPS. L'objectif étant d'éviter des confusions et des erreurs de calages de pixels importantes.

La chaîne de traitement (Figure 66) peut être appliquée étapes par étapes (manuellement) ou automatisée (traitement par lots). Elle 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 un algorithme (SIFT²). En sortie, un nuage de points clairsemé représente 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 qui représente 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.

Un traitement par lot sera effectué pour un gain de temps.

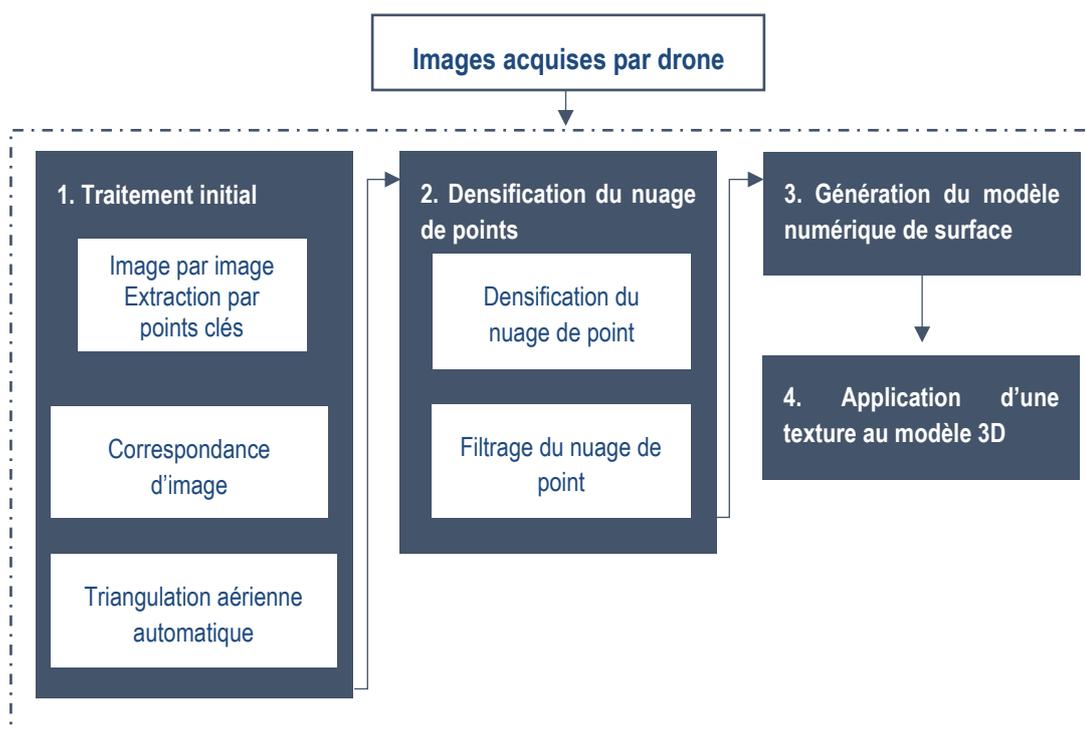


Figure 66 : Chaîne de traitement générale utilisée en vision par ordinateur (d'après Bhandari et al. 2015 « Generation of High Resolution DSM Using UAV Images »)

Etape n°2 : géoréférencer les images du modèle pour créer des orthophotographie

Une seconde étape consiste à géoréférencer les photographies verticales et obliques acquises par drone dans le référentiel géodésique RGNC91-93 et la projection Lambert NC. L'objectif est d'intégrer ces orthophotographies à l'analyse diachronique de la mobilité des îlots à moyen terme.

Pour ce faire l'utilisation de repères (ou « markers ») permet de lier les images, de les orienter et de les mettre à l'échelle. Ces repères sont des cibles positionnées au sol, levées sur le terrain à l'aide d'un

² 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).

DGPS afin connaître leurs coordonnées XYZ. Ces coordonnées sont affectées manuellement à chaque cible visible sur les photographies pour les géoréférencer. Ensuite un traitement permet d'assembler les images orthorectifiées et ainsi de créer une orthomosaique.

Etape n°3 : géoréférencer et créer le MNS

Le géoréférencement est également une étape à réaliser pour les modèles numériques composés des photographies verticales et obliques. Les photographies de références pour le placement des cibles restent les photographies verticales. Une fois cette étape réalisée, il est possible de procéder au traitement permettant de créer le modèle MNS.

Les temps de traitements étant considérablement longs, la qualité dite « moyenne » a été retenue pour le géoréférencement des images.

Les MNS et les différentiels sont consultables dans les annexes du rapport (Annexes n°8, 9 et 10).

1.2.2.2 L'analyses et la caractérisation des tendances d'évolution actuelles des îlots

Les données topographiques acquises et traitées selon ces différentes méthodes sont analysées et interprétées afin de définir les changements actuels des 2 îlots, aussi bien en terme morphologique que volumétrique (quantification des mouvements de volumes sédimentaires).

L'expression « évolution actuelle » des îlots renvoie à l'évolution des îlots à court terme, c'est-à-dire la période sur laquelle s'est déroulé le projet EMIL, entre mars 2016 et juin 2017. L'évolution mise en avant sera alors annuelle et saisonnière voire événementiel (levé post-cyclone), compte tenu des différentes missions menées sur le terrain pour l'acquisition de données topographiques *in situ* (Figure 51).

1.2.2.2.1 L'évolution actuelle de l'îlot Larégnère

Les MNT différentiels générés entre mars et octobre 2016 (hiver austral) et entre octobre 2016 et avril 2017 (été austral) montrent une certaine saisonnalité entre les phénomènes d'accrétion et d'érosion sur certaines zones, notamment au niveau des 2 pointes nord-est et sud-ouest de l'îlot (Figure 67).

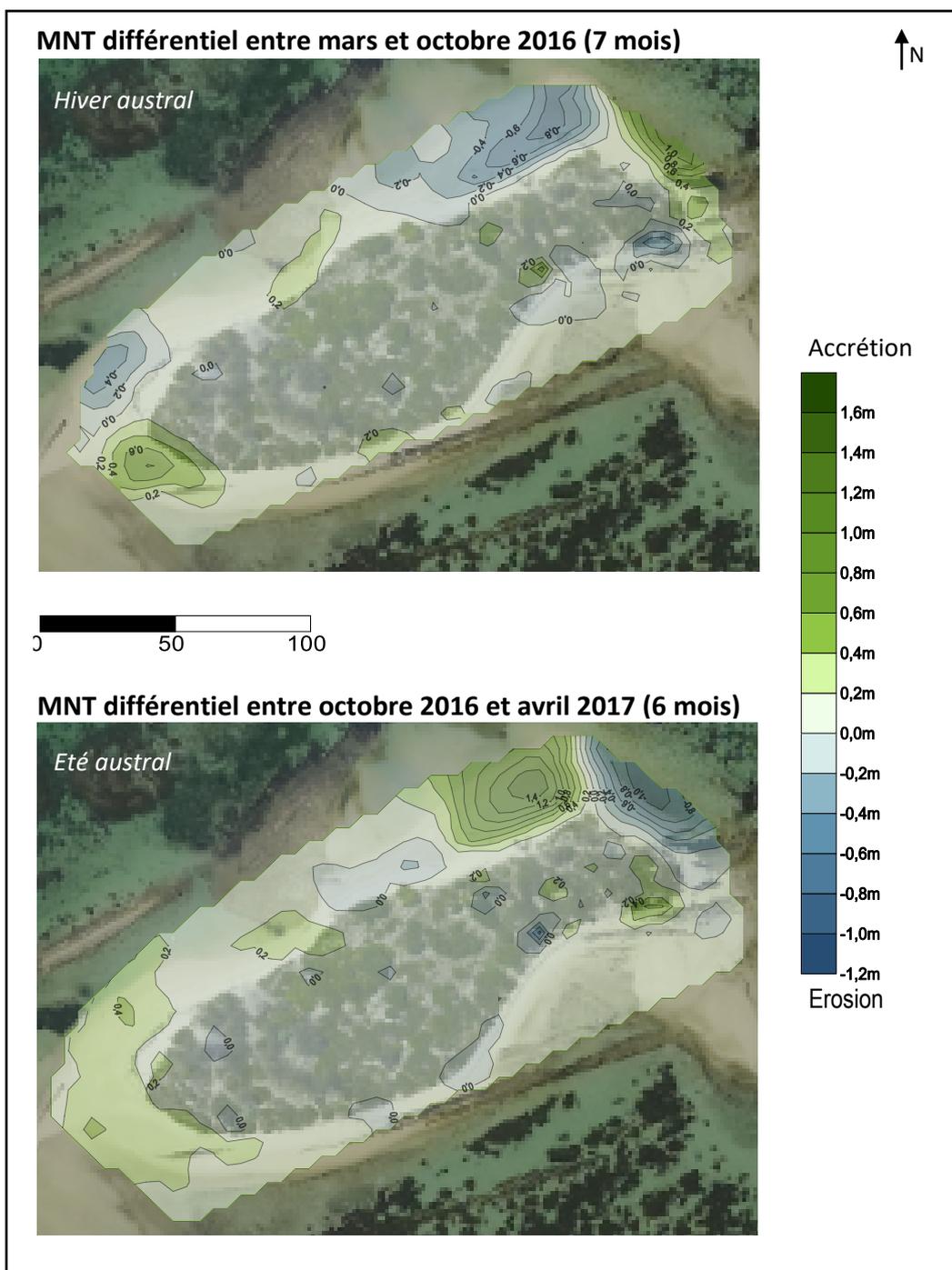


Figure 67 : MNT différentiels d'une résolution de 5 m et interpolés par krigeage à partir de semis de points levés au DGPS, îlot Larégnère

A partir de l'analyse des MNT différentiels une variabilité spatiale et saisonnière des processus de réengraissement et d'érosion semble s'opérer sur l'îlot Larégnère. Afin de qualifier et quantifier ces évolutions, des secteurs ont été définis à l'aide des analyses de ces MNT différentiels mais aussi des profils des plages (Figure 68) : le secteur 1 (S1) correspond à la partie nord de la côte est et la partie occidentale de la pointe nord-est ; le secteur 2 (S2) à la partie orientale de cette même pointe ; le secteur 3 (S3) à la partie nord de la pointe sud-ouest exposée aux vagues d'orientation SSO (australes) et aux vents d'ouest (« coup d'ouest »). Enfin un autre secteur a été analysé, le secteur 4 (S4), qui se trouve sur la côte au vent de l'îlot et exposée aux vagues d'orientation SSE (alizées), et sur lequel on observe un talus d'érosion d'une hauteur de 1,5 m environ confirmé par l'analyse du profil 1-b. Des

volumes de pertes et de gain de sédiments ont été calculés pour chacun des secteurs (Tableau 11 et Tableau 12).



Figure 68 : Localisation des différents secteurs et des profils de plage utilisés pour l'analyse des évolutions actuelles et exposition de l'îlot aux différentes conditions de vagues, îlot Larégnère

Tableau 11 : Bilans volumétriques 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 12 : Pertes et gains en sédiments calculés 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

L'ensemble de l'îlot présente un bilan sédimentaire positif sur l'ensemble de l'année de l'ordre de + 3 775,27 m³ soit + 12,56 % entre mars 2016 et avril 2017. 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. Cette contradiction repose sur l'utilisation de la limite de végétation permanente comme indicateur pour réaliser la cartographie de l'évolution récente des îlots. En effet, la LVP informe uniquement sur la mobilité de la bande littorale, alors que dans ce cas il s'agit de quantifier de manière précise les mouvements des volumes de sédiments sur l'ensemble de l'îlot. En effet, les zones en arrière plage et à l'intérieure sont comptabilisées dans le calcul, faussant ainsi l'interprétation. La définition de secteurs localisés sur la zone intertidale permet ainsi une analyse focalisée sur la bande côtière ainsi que la comparaison entre les 2 méthodes d'analyses.

Le **secteur 1 (S1)**, d'une superficie de 1 100 m², possède un bilan sédimentaire négatif entre mars et octobre 2016 (hiver austral) correspondant à - 171 m³ du volume comptabilisé en mars sur ce secteur. Le MNT différentiel correspondant à cette même période montre une érosion avec jusqu'à - 0,8 m de hauteur de sédiments (Figure 67). Au cours de l'été (octobre 2016-avril 2017), il gagne 462 m³ soit + 50 % en volume de sédiments par rapport à la quantité disponible en octobre et on observe sur le MNT « été austral » un engraissement de + 1,4 m en hauteur de sédiments. Sur l'ensemble de l'année, le secteur 1 présente un bilan volumétrique sédimentaire positif (+ 26,6 % soit un apport de 292 m³ de sable) correspondant à une phase d'accumulation non négligeable.

L'observation à différentes dates du profil de plage 1-a (Figure 69) localisé au centre de ce secteur (Figure 68) permet de préciser l'évolution de cette zone à une résolution plus fine (mesures réalisées tous les mètres) que celle des MNT (à 5 m).

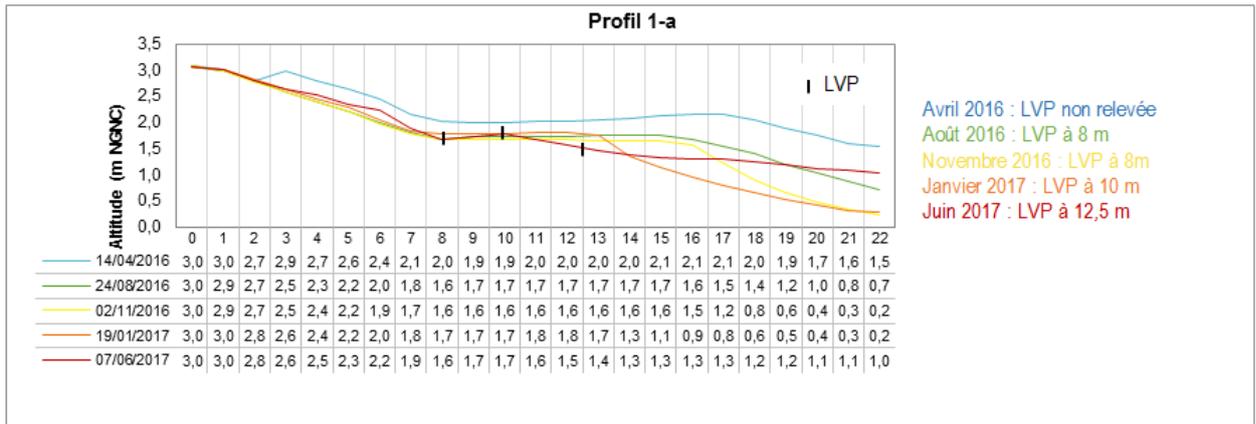


Figure 69 : Profil 1-a mesuré à 5 dates (14/04/2016 ; 08/08/2016 ; 02/11/2016 ; 19/01/2017 ; 07/06/2017), îlot Larégnère

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 m sur le profil en bas de plage. Au début de la période estivale (novembre 2016), on note le recul du talus : le haut de talus est maintenant à environ 16 m. En janvier 2017, ce talus se situe sur le 13^{ème} mètre sur le profil et est plus marqué (environ 60 cm de haut) (Figure 70). Au mois de juin, on observe un aplanissement du profil avec un engraissement en bas de plage (+ 0,50 m à 22 m de distance) et une avancée de la LVP (Figure 71). Cette accumulation correspond au bilan sédimentaire positif calculé à partir des MNT pour la période « été austral » (Figure 67). Toutefois, on note un recul de la LVP en haut de plage (- 2,5 m entre janvier et juin). Ainsi, on peut supposer que les sédiments arrachés au talus formé en août 2016 et accentué au début de l'été austral (novembre 2016) et en janvier 2017, ont contribué au rechargement du bas de plage observé en juin 2017. On peut également attribuer ce phénomène de transfert des sédiments du haut au bas de l'estran à l'intensité des houles lors des passages des cyclones Cook et Donna (avril et mai 2017).

On peut 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 du haut et du bas de plage.



Figure 70 : Apparition d'un talus de haut de plage d'une hauteur de 60 cm situé à 13 m sur le profil de plage 1-a (19/01/2017)

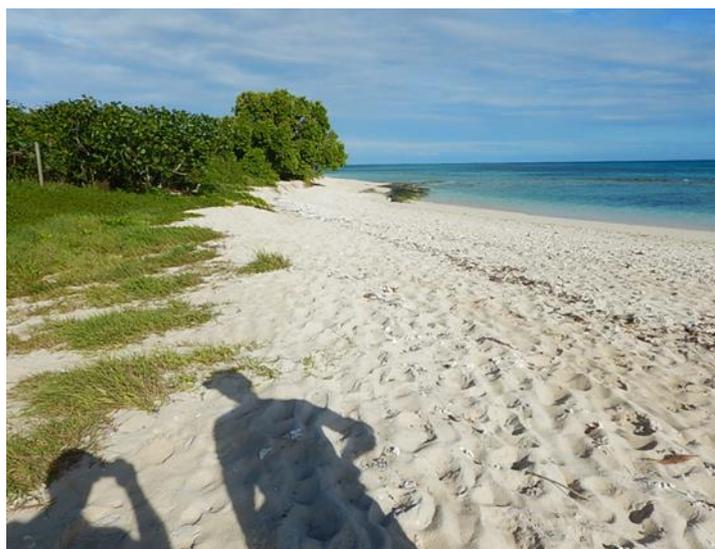


Figure 71 : Aplatissement du profil 1-a en haut de plage et disparition du talus (07/06/2017)

Le **secteur 2 (S2)**, d'une superficie de 1 000 m² présente un budget sédimentaire négatif de - 207 m³ environ sur l'ensemble de l'année, soit - 29 % 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 accumulation de + 1 m en hauteur de sédiments (Figure 67). Le bilan sédimentaire du S2 est alors positif (+ 365 m³ soit 50 % de sédiments supplémentaires entre mars et octobre 2016). Au cours de la saison estivale, la zone accuse une déflation d'un volume de - 572 m³ soit - 53 % du volume d'octobre, correspondant à perte de hauteur de - 0,8 m de sédiments (Figure 67, Figure 72).

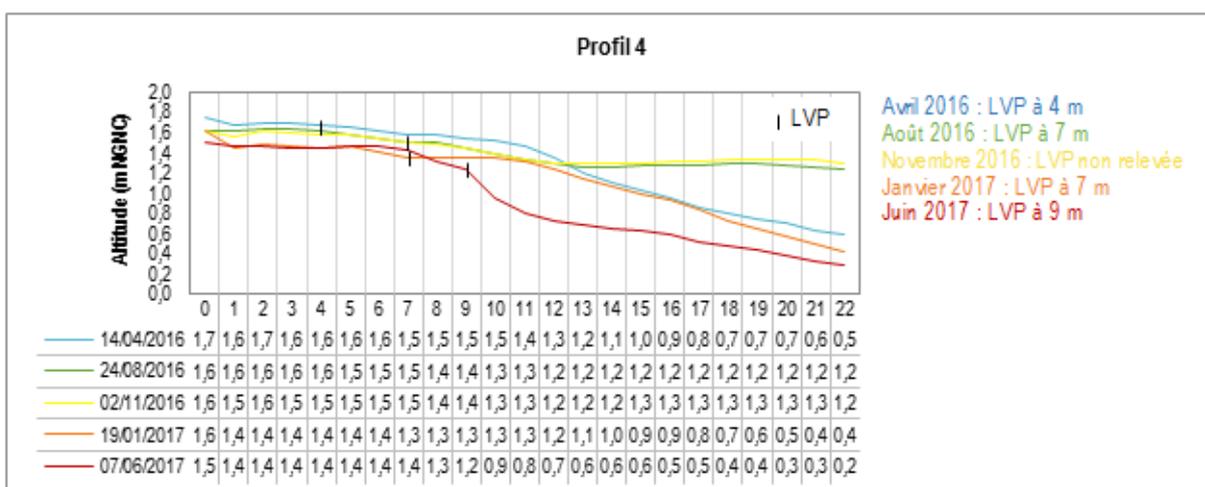


Figure 72 : Profil 4 mesuré à 5 dates (14/04/2016 ; 08/08/2016 ; 02/11/2016 ; 19/01/2017 ; 07/06/2017), îlot Larégnère

Le profil 4 (Figure 72) situé au centre du S2 permet de décrire davantage les évolutions qui ont lieu du haut au bas de plage sur ce secteur. Ainsi, on observe, à partir d'avril et jusqu'à novembre (hiver austral) un engraissement de + 30 à 70 cm en bas de plage, à partir du 13^{ème} mètre du profil. 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'accrétion précédent (jusqu'à - 90 cm en bas de plage). Enfin, en juin 2017, on note l'apparition d'un talus

d'érosion (entre les 9 et 10^{ème} mètres du secteur) d'une hauteur de 40 à 50 cm et d'une déflation en bas de plage atteignant jusqu'à 50 cm de hauteur (Figure 73). 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 (Tableau 18).



Figure 73 : Formation d'un talus de 40 cm de hauteur situé en haut de plage (07/05/2017)

Ces observations effectuées sur les secteurs 1 et 2 permettent de formuler l'hypothèse suivante : au cours de l'hiver austral, le S1 est en situation d'érosion tandis que le S2 est en accrétion et inversement au cours de la saison estivale qui suit. Il pourrait donc y avoir un 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 transport du sable vers les zones adjacentes au cours de l'hiver pourrait être attribué aux vagues australes (SSO) et d'ouest («coups d'ouest»). Et en été (octobre-avril), le phénomène peut être attribué aux vagues dominantes d'alizées (SSE).

Cependant, une partie des sédiments transférés au cours de l'été 2016-2017 aurait été redistribuée au vers les petits fonds sous l'action du vent et des houles provoqués par les événements météorologiques successifs importants qui sont survenus en 2017 tels que la dépression tropicale de février ou les cyclones Cook en avril et Donna en mai de cette même année. Ce phénomène de transfert de sédiments vers le large au cours des périodes plus tempétueuses peut être contrebalancé par un transfert sous l'action des houles vers la plage au cours des périodes plus calmes.

Le **secteur 3 (S3)**, s'étend sur une superficie de 1 250 m³. Sur l'ensemble de la période d'étude (2016-2017), l'évolution du stock sédimentaire montre un déficit de - 75 m³ soit - 7 % entre mars 2016 et avril 2017). Au cours de la période hivernale, il perd un volume sédimentaire de près de 155 m³, ce qui correspond à une déflation atteignant - 0,4 m visible sur le MNT différentiel « hiver austral ». Entre octobre 2016 et avril 2017, en été, il regagne + 80 m³ de volume (Figure 67). Ce mécanisme d'érosion et d'amaigrissement de ce secteur en hiver pourrait être dû à son exposition aux houles australes et aux vagues générées par les vents d'ouest.

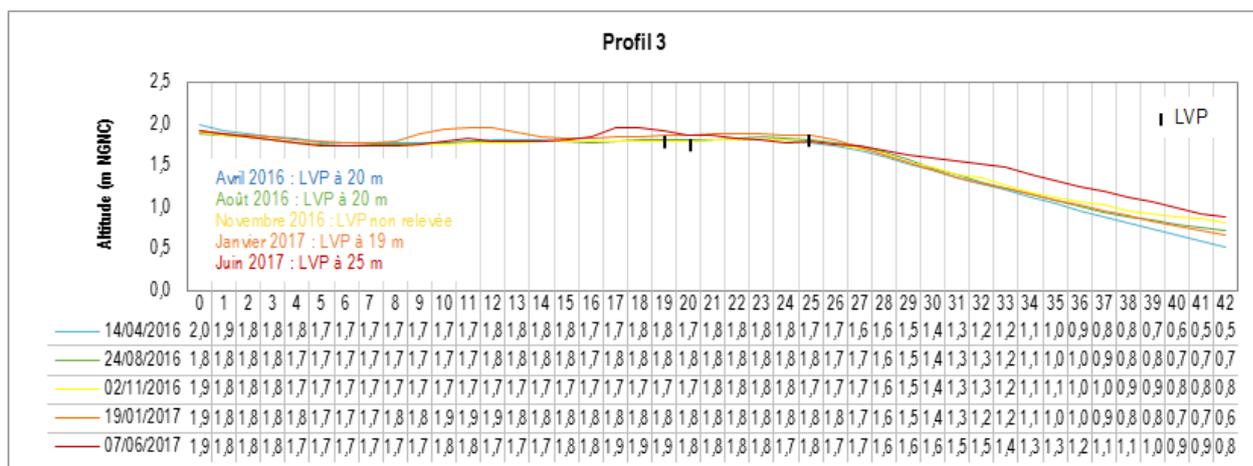


Figure 74 : Profil 3 mesuré à 5 dates (14/04/2016 ; 08/08/2016 ; 02/11/2016 ; 19/01/2017 ; 07/06/2017), îlot Larégnère

Le profil de plage 3 (Figure 74) qui se situe au sud du S3 présente un tracé régulier et une pente douce sans cassure majeure jusqu'au 28^{ème} mètre du profil. Cette zone apparaît donc relativement stable pour les 5 dates. On observe ensuite 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, un léger abaissement de la plage et enfin, de janvier à juin 2017, on 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 avancé d'environ 6 m entre janvier et juin 2017 (été) (Figure 75). Si l'alternance d'épisodes d'accrétion et d'érosion est attesté sur le S3 et le long du profil 3, leur saisonnalité reste hypothétique et à démontrer avec davantage d'observations.



Figure 75 : A gauche 19/01/2017 et à droite 07/05/2017 : avancée de la limite de végétation rampante mesurée à partir du panneau d'information de la province Sud

Le **secteur 4** n'apparaît pas particulièrement mobile à travers l'observation des MNT différentiels (Figure 67). Il présente 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 talus actif pouvant atteindre jusqu'à 1,20 m environ de haut (en avril 2016) dont la partie haute se situe dès le 2^{ème} mètre le long du profil. Les variations de hauteur et le recul de ce talus atteste de la mobilité du secteur. Ce

constat met en avant les limites de l'utilisation de MNT à un pas de 5 m qui ne permettent pas de distinguer les variations fines de la morphologie.

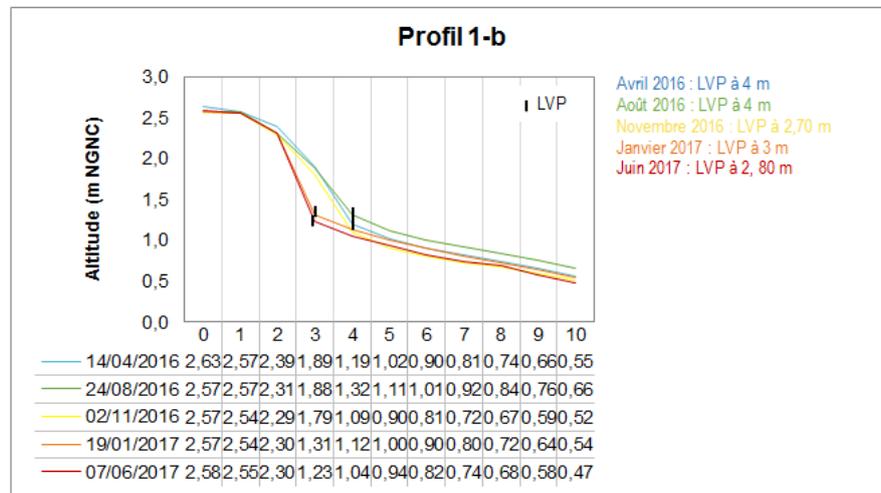


Figure 76 : Profil 1-b mesuré à 5 dates (14/04/2016 ; 08/08/2016 ; 02/11/2016 ; 19/01/2017 ; 07/06/2017), îlot Larégnère

Ce talus a reculé entre novembre 2016 et janvier 2017 d'environ 1 m et un deuxième talus localisé entre les 4^{ème} et 5^{ème} mètres du profil (Figure 76) s'est formé en bas de plage, comme le confirme les observations réalisées sur le terrain (Figure 77). Cet épisode d'érosion pourrait être rattaché aux événements pluvieux qui ont impacté la Nouvelle-Calédonie au cours des mois de novembre et décembre 2016 (Tableau 18) :

- 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 sur la commune de Houailou. Des impacts morphologiques ont été observés sur le littoral de la côte ouest au cours des missions de terrain de l'OBLIC ;
- le 16 décembre : épisode de fort vent combiné à un coefficient de marée important. Des impacts morphologiques ont été observés sur l'îlot Larégnère par les gardes nature de la province Sud.

Ainsi, ce talus est la marque d'une érosion ancienne, qui connaît des occurrences de recul sur la période 2016-2017.



Figure 77 : A gauche 02/11/2016 et à droite 19/01/2017 : recul du talus de 1 m environ

1.2.2.2 L'évolution actuelle de l'îlot Mbé Kouen

Les MNT différentiels de Mbé Kouen montrent que plusieurs parties de l'îlot sont mobiles, et cela davantage durant l'été que durant l'hiver austral (Figure 86) où les mouvements d'érosion ou d'accrétion semblent moins marqués. 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.

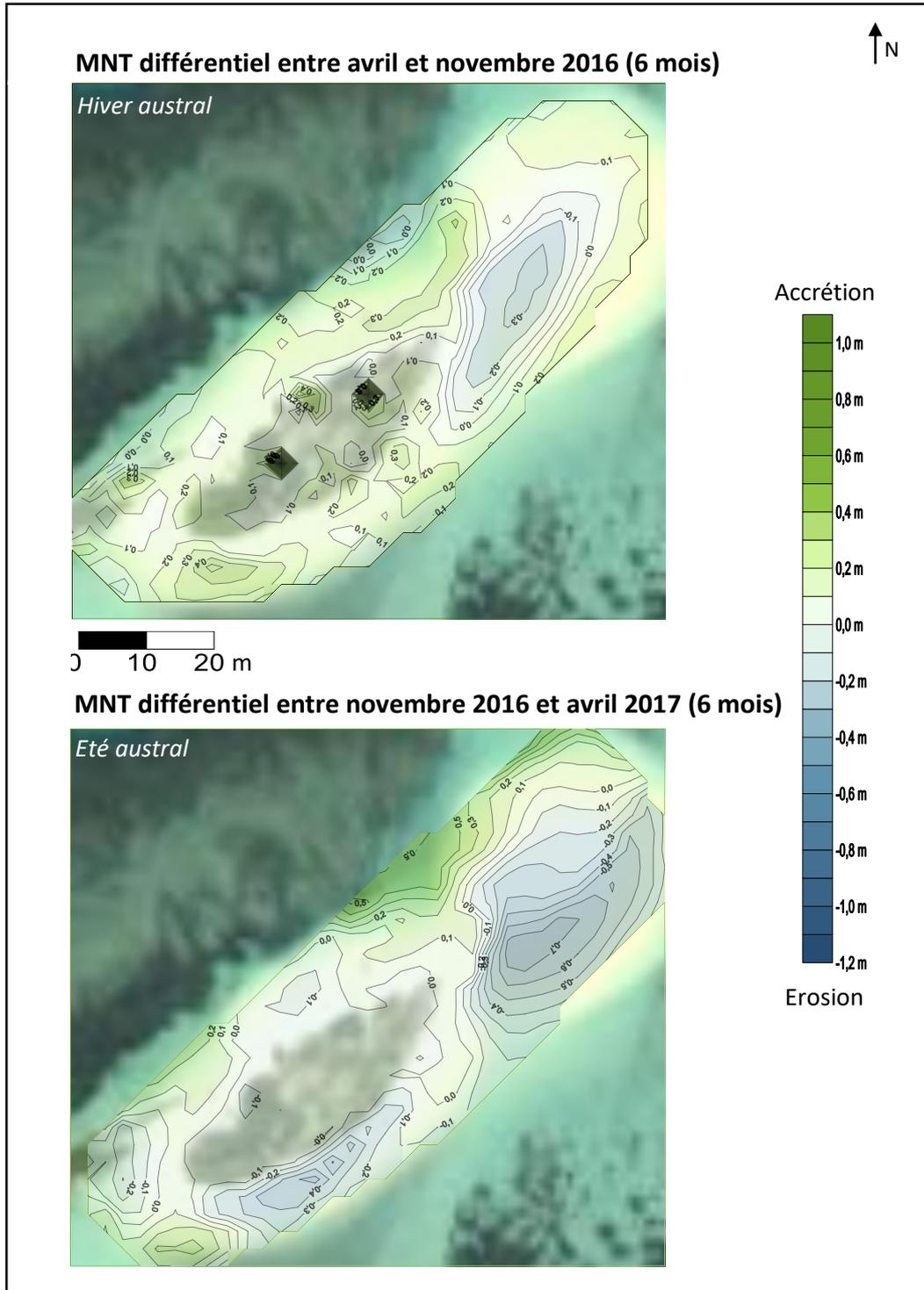


Figure 86 : MNT différentiels d'une résolution de 5 m et interpolés par krigeage à partir de semis de points levés au DGPS, îlot Mbé Kouen

Afin de mieux identifier les dynamiques de l'îlot pour chaque saison et sur l'ensemble de l'année, Mbé Kouen a été découpé en 3 secteurs (Figure 79). Le premier secteur (S1) correspond à la partie de l'îlot exposée à l'influence directe des vents du sud-est (alizés) et des vagues d'orientation SSE. Les MNT différentiels montrent que le S1 connaît une phase d'apport sédimentaire entre avril et novembre 2016 (hiver) et une phase de perte de matériel au cours de la saison suivante (été), pouvant être causée par des alizés plus soutenues et des occurrences d'évènements tempétueux plus courantes 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 de la pointe nord-est de l'îlot. La côte sous le vent, visiblement moins mobile, n'a quant à elle pas été analysée dans le détail.

A partir de ces 3 secteurs, des volumes de gains et pertes en sédiments ont été calculés afin de quantifier les évolutions préalablement observées et de formuler des hypothèses relatives aux dynamiques sédimentaires actuelles de l'îlot (Tableau 13 et Tableau 14).

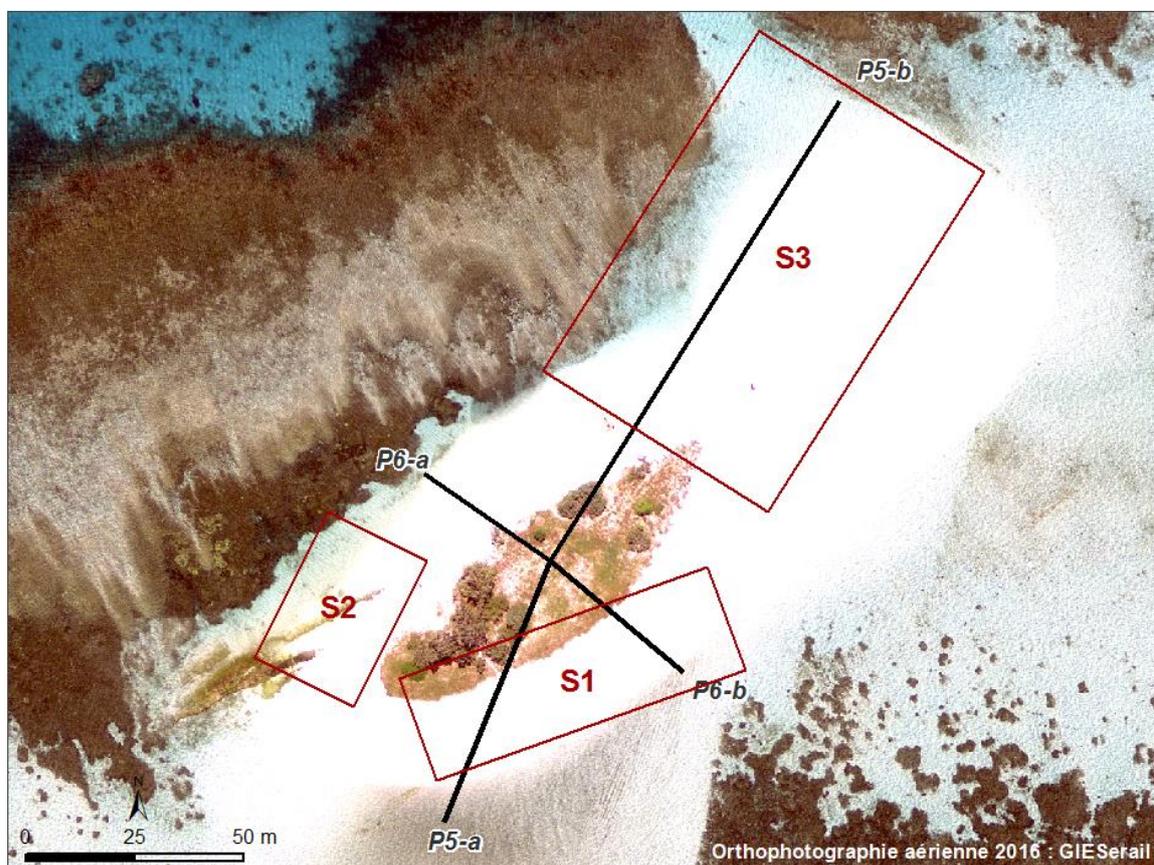


Figure 79 : Localisation des différents secteurs et des profils de plage utilisés pour l'analyse des évolutions actuelles et exposition de l'îlot aux différentes conditions de vagues, îlot Mbé Kouen

Tableau 13 : Bilans volumétriques 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 14 : Pertes et gains en sédiments calculés 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

L'évolution du stock sédimentaire de l'ensemble de l'îlot est croissant entre 2016 et 2017 (+ 402 m³ soit + 3,65 %). Saisonnièrement, on observe deux tendances : une tendance à l'accrétion en hiver (+ 1 132,3 m³ soit + 10 %) et une tendance à l'érosion au cours de l'été austral (- 730 m³ soit - 6 %) (Tableau 14).

Le bilan sédimentaire positif sur l'année est en adéquation avec l'analyse à moyen terme menée précédemment. L'îlot Mbé Kouen connaît donc actuellement une phase d'engraissement, mais moins significative que celle observée pour l'îlot Larégnère.

Le **secteur 1 (S1)** connaît un régime en progression au cours de l'hiver ; l'élévation la plus importante relevée sur le MNT différentiel est de + 0,4 m au sud-ouest du secteur entre avril et novembre 2016. En été, on observe à l'inverse un régime érosif avec une courbe de niveau minimale à - 0,4 m vers le centre du secteur (Figure 78). Le calcul des volumes confirme que le S1 présente un apport de sédiments en hiver de + 304 m³ (soit + 24,5 %) et une perte de - 212 m³ (soit - 13,8 %) en été. Le bilan sédimentaire global est positif avec un apport de + 91 m³ mesuré sur l'année (Tableau 14).

Les profils 5-a et 6-b sont situés respectivement à l'ouest et à l'est du S1 (Figure 79). Leur analyse permet de considérer les dynamiques sur l'ensemble du système plage de ce secteur. Le profil 5-a (Figure 80) renseigne sur l'avancée de la LVP : elle est située au niveau du 40^{ème} mètre sur le profil en avril 2016, ensuite elle progresse au niveau du 43^{ème} mètre en juin 2017, ce qui revient à une avancée de + 3 m (Figure 81). 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 l'ordre de + 1 m.

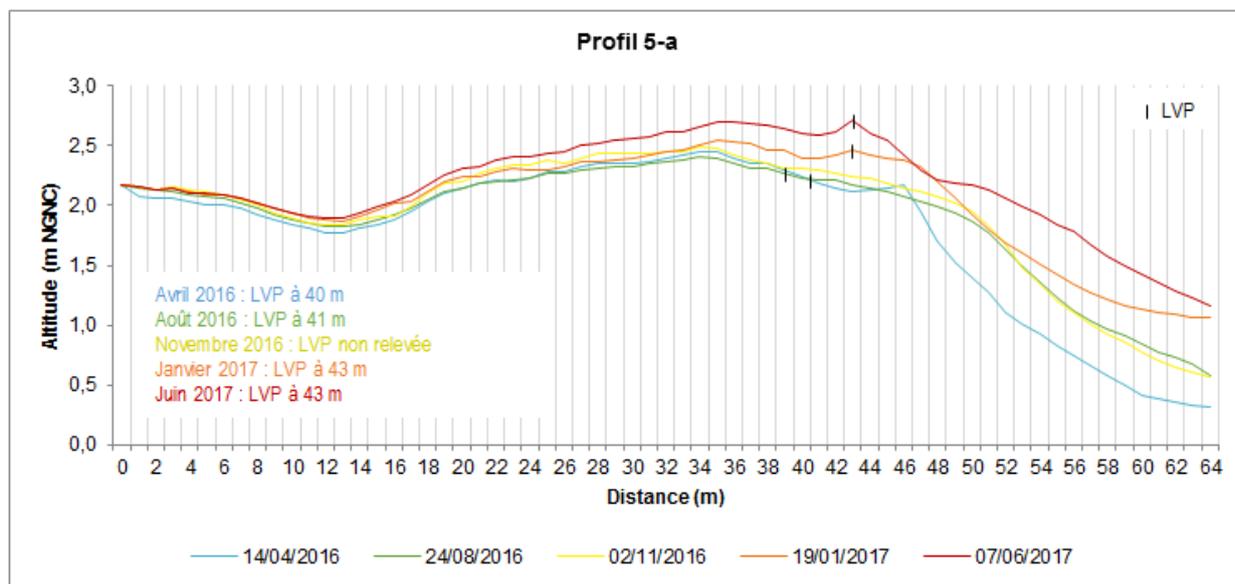


Figure 80 : Profil 5-a mesuré à 5 dates (14/04/2016 ; 08/08/2016 ; 02/11/2016 ; 19/01/2017 ; 07/06/2017), îlot Mbé Kouen



Figure 81 : A gauche 14/04/2016 et à droite 07/05/2017 : avancée de la LVP

Le profil 6-b (Figure 82) montre un engraissement de l'avant plage entre avril et novembre 2016, c'est-à-dire durant l'hiver austral. Ensuite, entre novembre 2016 et juin 2017, durant la saison estivale, la même zone subit une perte de matériel pour retrouver le profil initial d'avril 2016. Cette alternance de phases d'accrétion et d'érosion n'est pas marquée au niveau de la LVP qui connaît même une avancée de + 2 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) pour se stabiliser ensuite. L'observation du bas de plage souligne une dynamique ; la redistribution et le transfert des sédiments du haut vers le bas de plage (au niveau du 35^{ème} mètre) entre novembre 2016 et janvier 2017 (Figure 83). Cette hypothèse est confirmée par l'analyse des MNT (Figure 78).

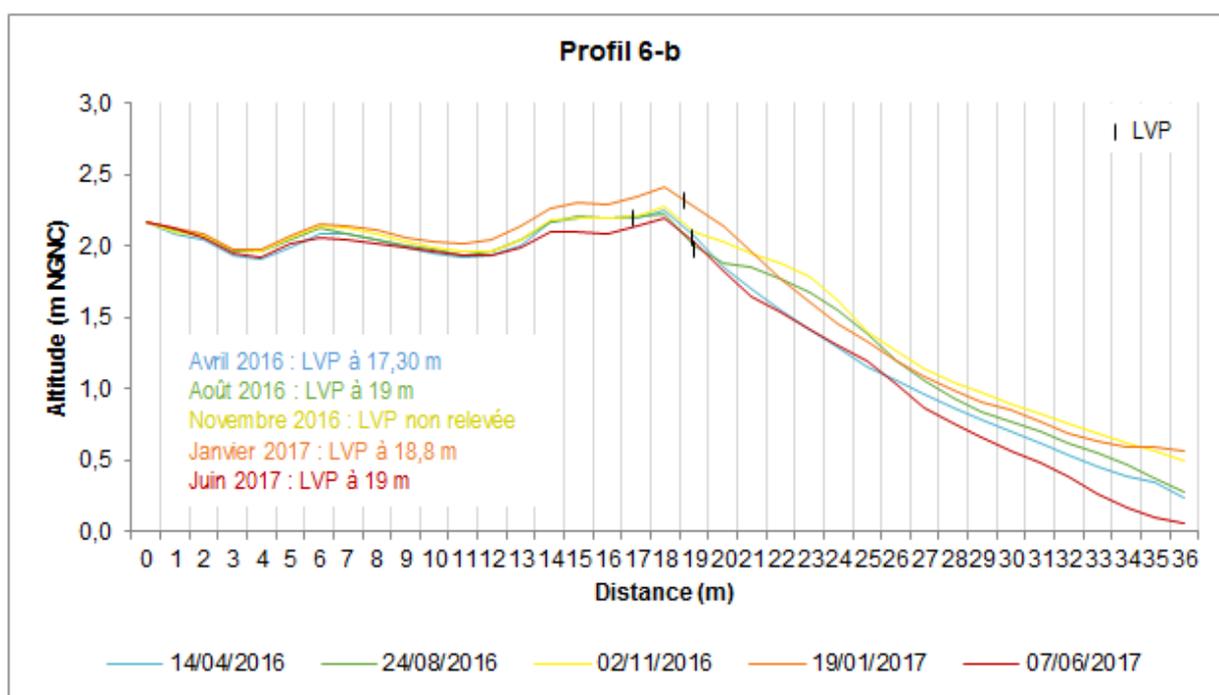


Figure 82 : Profil 6-a mesuré à 5 dates (14/04/2016 ; 08/08/2016 ; 02/11/2016 ; 19/01/2017 ; 07/06/2017), îlot Mbé Kouen



Figure 83 : A gauche 02/11/2016 et à droite 19/01/2017 : engraissement du bas de plage entre ces deux dates

L'étude de ces 2 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, les modifications saisonnières impactent de manière plus prononcée la partie centrale du S1 tandis que sa partie sud apparaît plus stable.

Le **secteur 2 (S2)** présente un budget sédimentaire positif sur l'ensemble de l'année 2016-2017 (+ 28 m³ soit + 7,9 % entre avril 2016 et avril 2017). Selon l'analyse des MNT, une première phase de rechargement sédimentaire se produit en hiver (+ 62 m³), suivie d'une phase d'érosion en été (- 33 m³). Cette dynamique est semblable au secteur précédemment étudié (Tableau 14). 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-est de l'îlot Mbé Kouen, accuse une déflation de - 589 m³ soit - 18,25 % en volume de sédiments sur l'année (entre avril 2016 et avril 2017). Au cours de la période hivernale, on note un apport de matériels se rapportant à + 70 m³ 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 », une courbe de niveau minimale d'une valeur de - 0,7 m est localisée au sud-est du S3 (Tableau 14) alors qu'en bordure nord-ouest du secteur, on observe sur ce même MNT des apports sédimentaires de l'ordre de + 0,5 m de hauteur (Figure 78). Les variations et mouvements de sable sur ce secteur sont donc importants et très localisés.

Le profil 5-b a été comparé à 5 dates sur une distance de 120 m par rapport au point de référence (Figure 84). Le haut de plage est marqué par un premier talus de 40 cm de haut, situé au 38^{ème} mètre en avril 2016 au même niveau que la LVP. Puis, on note un comblement de ce talus à mi-hauteur entre avril et août 2016. Cependant, une nouvelle micro falaise d'érosion de 40 à 50 cm de haut se forme 5 m plus loin (Figure 85). Elle est visible sur le profil pour les trois dates suivantes mais un creusement à sa base est identifié entre août 2016 et juin 2017. Au niveau du 57^{ème} mètre, un troisième talus d'érosion de 60 cm de haut est observé. Il est apparu au cours de la saison hivernale (entre avril et août 2016). Puis, ce talus recule d'1 m 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 86).

Le bas de plage connaît un déficit de sédiments entre avril et août 2016 puis un engraissement entre août et novembre 2016 pour retrouver son profil initial. Les sédiments arrachés lors de la formation du

premier talus sont vraisemblablement évacués 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 120ème mètre.

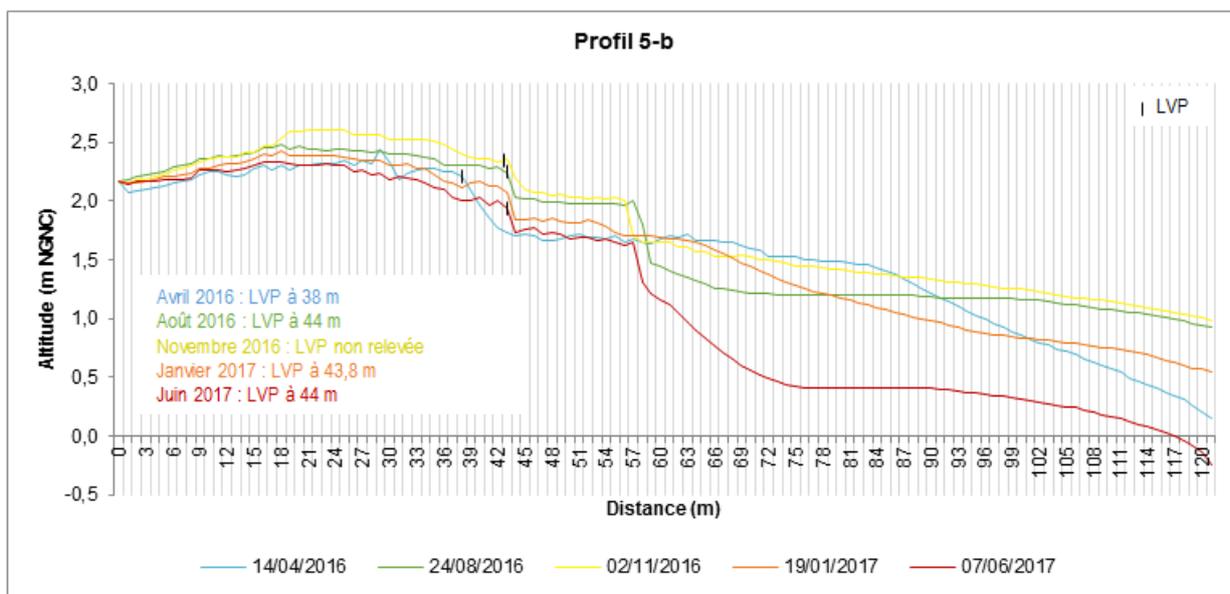


Figure 84: Profil 5-b mesuré à 5 dates (14/04/2016 ; 08/08/2016 ; 02/11/2016 ; 19/01/2017 ; 07/06/2017), îlot Mbé Kouen



Figure 85 : Formation d'un talus d'érosion sur le S3 bien visible sur le profil 5b (photographie 24/08/2016)



Figure 86 : Talus d'érosion toujours actif (photographies 05/06/2017)

A travers l'analyse de ces trois secteurs, il est possible de formuler des hypothèses quant à des redistributions de sédiments qui pourraient avoir lieu au sein du système fermé « îlot-plateforme récifale ».

Il a été démontré que le S3 connaissait une érosion importante durant la période estivale excepté en bordure nord. Ainsi, un certain volume perdu au sud-est de l'étendue sableuse pourrait être transféré vers le nord-ouest et alimenter la bordure nord actuelle. Donc du sable se trouverait probablement davantage au nord, mais ceci ne peut être vérifié 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 de sable perdu en été au niveau du S2 serait redistribué 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, qu'elle provienne du sud du S3 ou bien du S2, suggérerait un déplacement de l'îlot vers le nord-ouest.

Il est également possible de suggérer un transport du sable vers les zones adjacents mais aussi vers les petits fonds au cours des périodes tempétueuses et cycloniques (en été) et à l'inverse un transfert vers la plage sous l'action des houles au cours des périodes plus calmes (hiver).

La réelle dynamique de l'îlot Mbé Kouen ne pourra être identifiée que par des données acquises ultérieurement qui viendraient étayer les observations actuelles et confirmer ou infirmer ces hypothèses.

Chaque îlot est caractérisé par sa morphologie actuelle, son évolution géomorphologique/morpho sédimentaire et de sa dynamique passée et future. Ces caractéristiques peuvent être influencées par les différents paramètres hydro-météorologiques et climatiques appelés « facteurs de forçage ». La caractérisation de ces facteurs puis leur confrontation aux analyses des évolutions récentes et actuelles permettent d'identifier et d'estimer leurs liens voir leurs responsabilités dans les processus d'évolution des îlots.

2- Caractérisation et analyse pluri-échelles des facteurs de forçages de l'évolution des îlots

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 marquées par une forte variabilité spatiale et temporelle.

La zone côtière est donc soumise aux agents météo-marins et climatiques (vent, houle, courants, surcotes, cyclones, tempêtes), au ruissèlement et à l'infiltration des eaux continentales et à divers agents biologiques. Le littoral est également le siège d'activités humaines plus ou moins importantes qui interfèrent avec les influences marines et continentales. Ces agents sont regroupés sous le terme de « facteurs de forçage » (Suanez, 2009). Ils sont responsables de processus morphogènes et influencent de façon directe ou indirecte l'évolution du littoral (quel que soit leur nature, leur durée et l'échelle de temps concernée). Si l'un ou plusieurs de ces facteurs de forçage évoluent à un moment donné, le segment côtier concerné s'adaptera à ce changement.

Alors que la caractérisation de l'évolution des côtes et notamment la mobilité du trait de côte est relativement aisée, l'attribution de ces changements à une ou plusieurs causes est beaucoup plus complexe. De surcroît, concernant les îlots, leurs caractéristiques (superficie, altitude, forme de leur plate-forme récifale,...) et leur configurations (exposition, distance et position par rapport à une passe et au récif barrière,...) sont très changeantes leur conférant une sensibilité variable à ces facteurs de forçage.

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, régissant ces 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 87) :

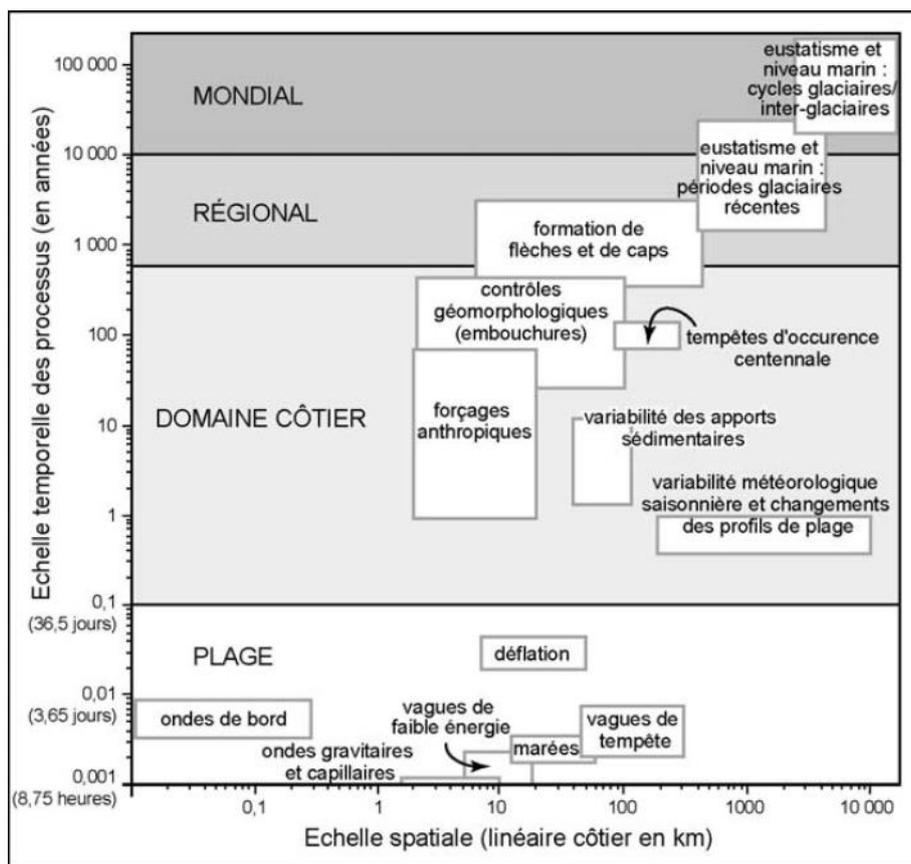


Figure 87 : Echelles spatio-temporelles des changements du littoral (d'après Suanez S., 2009, adapté de S. Fenster et al., 1993)

Concernant les îlots étudiés dans le cadre de cette étude, l'intérêt est de replacer leur évolution dans le contexte global, régional et local. Les paramètres impactant l'évolution des îlots sont multiples et agissent à des échelles spatiales variables : du global avec les variations du niveau marin et les incidences des oscillations ENSO, au niveau régional avec les l'évolution des fréquences et/ou intensité des évènements intenses, jusqu'au niveau local avec les climats de vagues à l'échelle du lagon et de l'îlot (Figure 88).

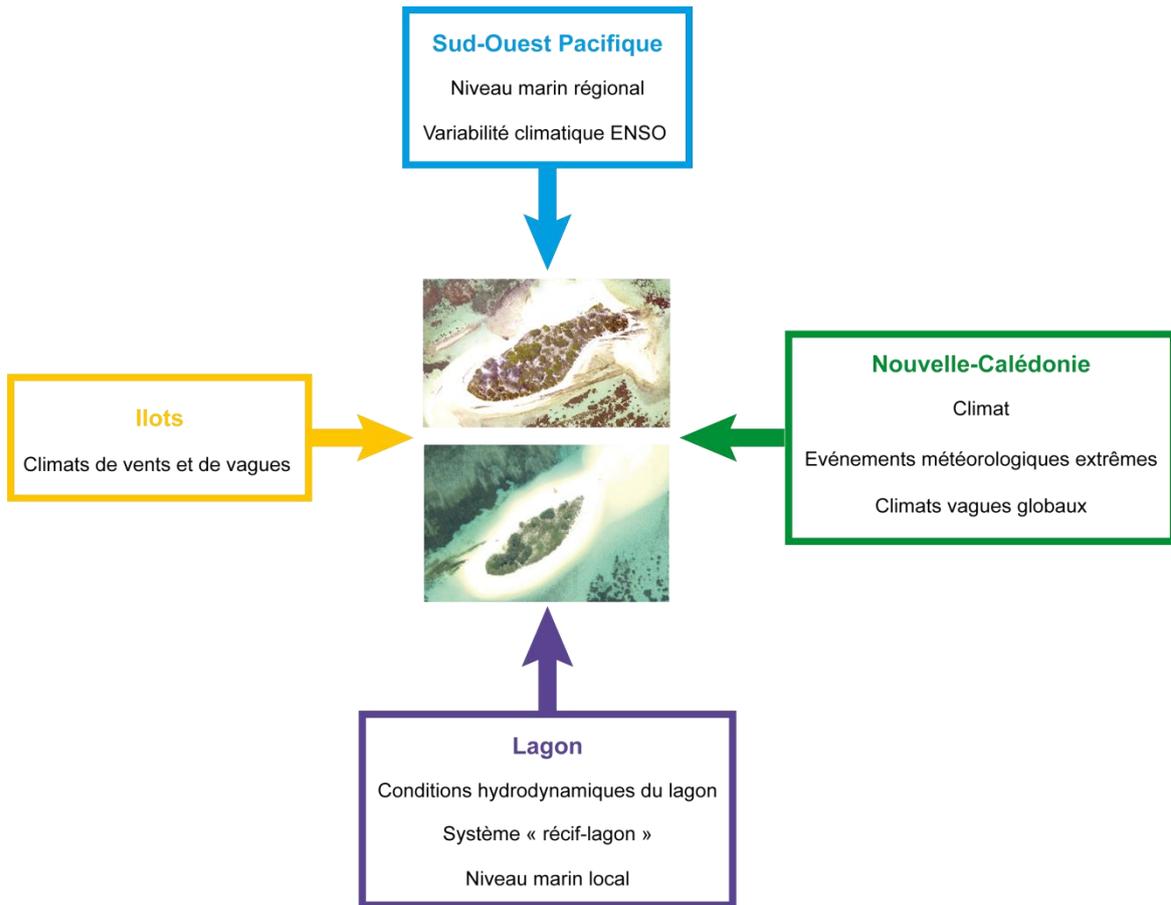


Figure 88 : Les facteurs de forçage de l'évolution des îlots à différentes échelles spatiales

2.2 Facteurs de forçages à l'échelle du sud-ouest de l'océan Pacifique

2.2.1 L'évolution du niveau marin régional

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 (Figure 89). 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 : Topex-Poseidon (1993-2001), Jason 1 (lancé en 2001) et Jason 2 (lancé en 2008), permettent de mesurer des variations spatiales et temporelles du niveau des océans moyennées à partir de nombreuses mesures sur de grandes surfaces (100 à 1 000 km) (Figure 90). Par exemple, une élévation de + 3,3 mm/an (moyenne à l'échelle du globe, +/- 0,4 mm) depuis 1993 a été calculée par Milne et al., 2009, par Ablain et al., 2009 ou encore par Cazenave et al.2010.

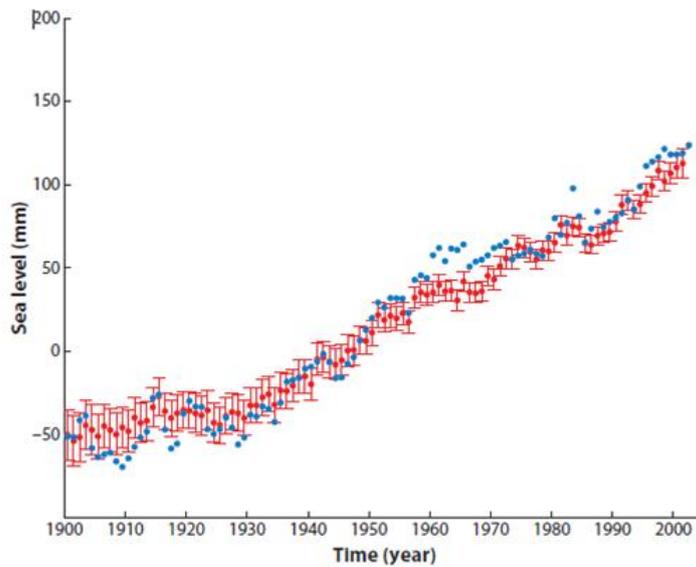


Figure 89 : Niveau marin global obtenu à partir des marégraphes entre 1900 et 2001 (sources : Church et al. 2004 ; Jevrejeva et al. 2006, d'après Cazenave et al., 2010)

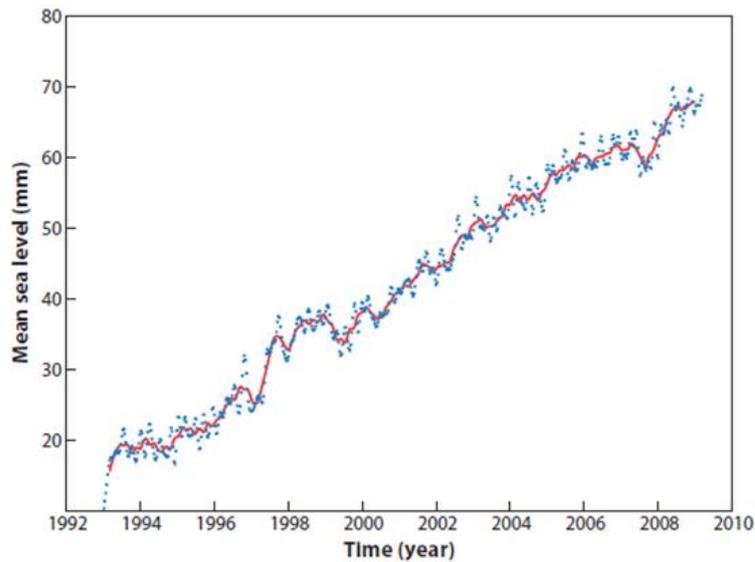


Figure 90 : Niveau moyen marin obtenu à partir des mesures par altimétrie satellitaire entre janvier 1993 et 2008. Les données brutes acquises tous les 10 jours apparaissent en bleu, la ligne rouge correspond au lissage de 90 jours de données brutes (d'après Cazenave et al., 2010)

Des variabilités régionales de cette tendance mondiale existent. En effet, les vitesses de la remontée du niveau marin d'origine climatique sont variables selon les régions océaniques ; elles peuvent y être significativement supérieures ou inférieures à la moyenne globale (Figure 91).

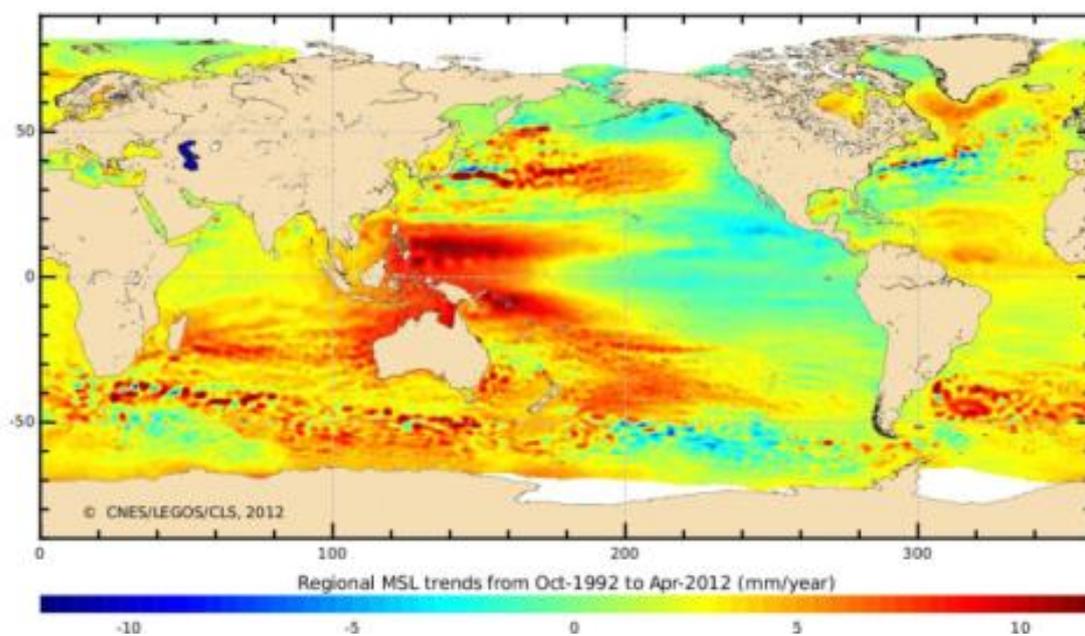


Figure 91 : Vitesse d'élévation du niveau marin sur la période altimétrique 1992-2012 (en mm/an) (Becker et al., 2012)

L'élévation du niveau marin dans la région de l'Océan Pacifique Ouest a été reconstituée en 2017 par Aucan (Aucan, 2017) (Figure 92). Les différentes données sources qui ont permis cette reconstitution proviennent d'une part, des marégraphes, d'autre part des mesures altimétriques.

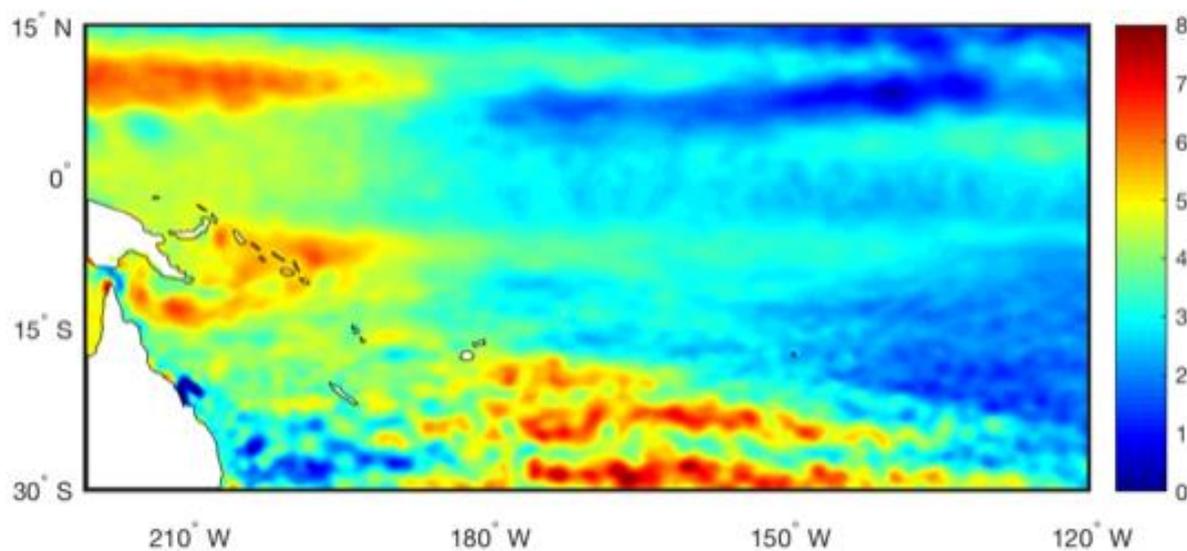


Figure 92 : Vitesse d'élévation du niveau marin de l'Océan Pacifique Ouest sur la période altimétrique 1993-2017 (en mm/an) (Aucan, 2017)

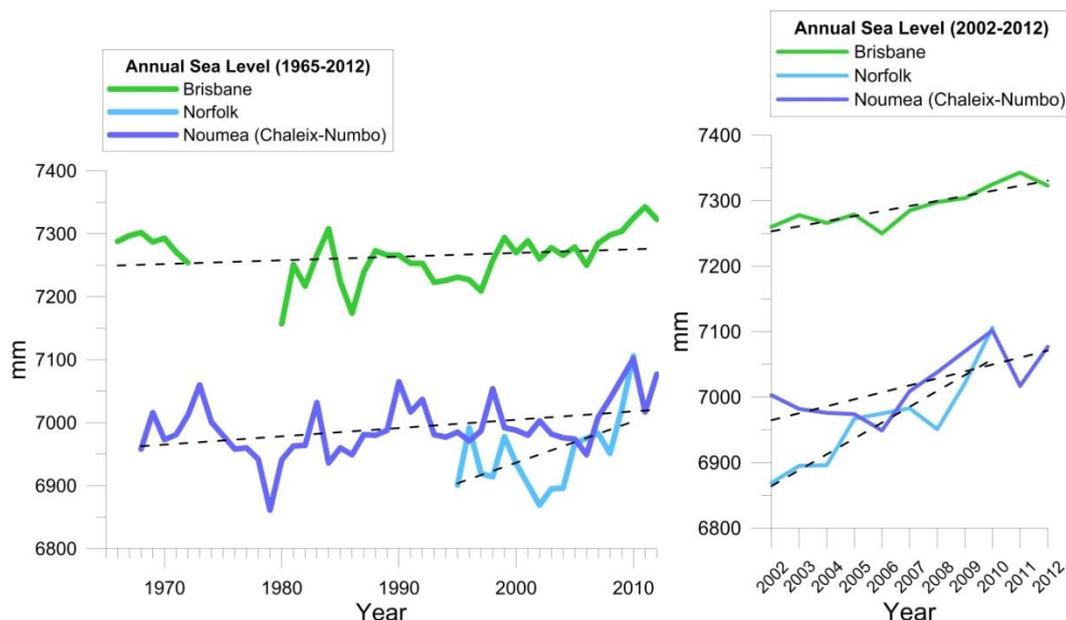


Figure 93 : A gauche niveau marin annuel de 1968 à 2012. A droite : vue détaillée de la période 2002 à 2012 avec une élévation accélérée du niveau de la mer. Les lignes noires pointillées montrent des tendances linéaires (SHOM, www.Sonel.org, www.psmsl.org) (Garcin et al., 2016)

En 2016, Garcin et al. réalisent une comparaison des niveaux marins annuels de 1968 à 2012 de Brisbane en Australie, de l'île de Norfolk et de Nouméa (Figure 93).

De plus, 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., 2011 ; Cazenave et al.2012).

2.2.2 Les phénomènes de variations climatiques interannuelles

Le phénomène de variabilité climatique interannuelle interne ENSO (*El Niño Southern Oscillation*) joue un rôle non négligeable sur les caractéristiques de l'Océan Pacifique entraînant une variation de la température de sa surface.

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. On y 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 inter décennale.

L'index ONI (*Oceanic Niño Index*) permet de caractériser les oscillations ENSO (Figure 94). Il est calculé à partir de la moyenne des anomalies de la SST (*Sea Surface Temperature*) de la région Niño 3-4 sur 3 mois. Les événements sont considérés comme significatifs et qualifiés de El Niño ou La Niña si ces anomalies dépassent respectivement + 0,5°C (El Niño) ou - 0,5°C (La Niña) pendant au moins 3 périodes consécutives de la moyenne glissante des SST sur 3 mois.

Plus l'indice est élevé ($> 0,5 \text{ }^{\circ}\text{C}$), plus nous sommes en présence d'un El Niño (phase positive) important. Au contraire, plus l'indice est faible ($> -0,5 \text{ }^{\circ}\text{C}$), plus le phénomène El Niña (phase négative) est marqué (Figure 94).

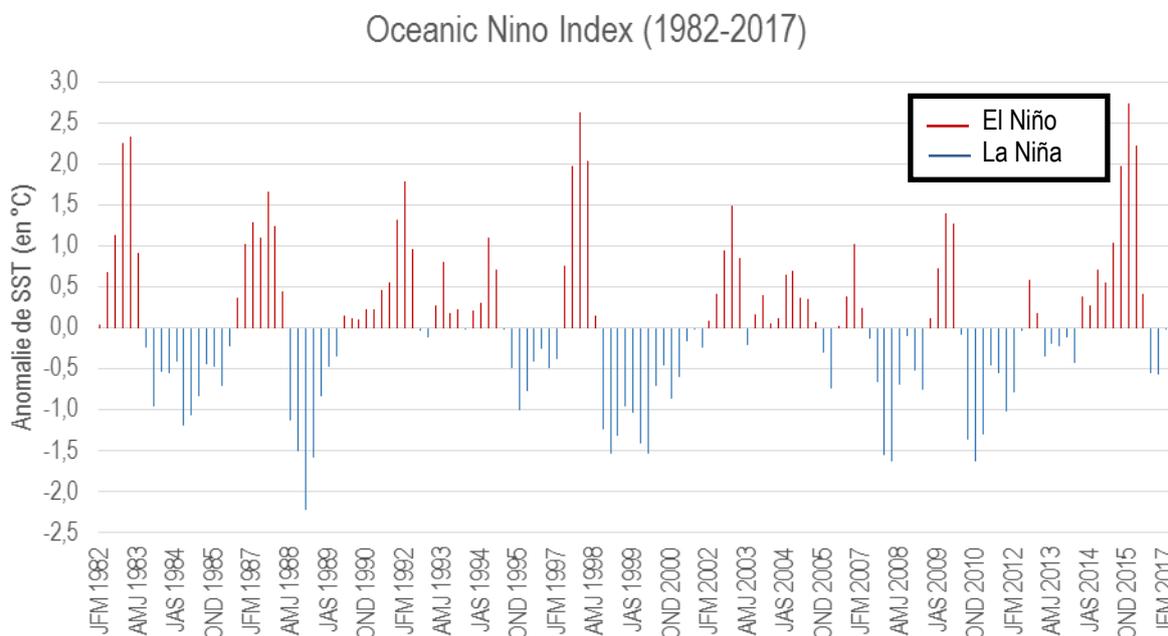


Figure 94 : Représentation de l'indice OIN entre 1982 et 2017 (NOAA, www.cpc.ncep.noaa.gov, juin 2017)

Une caractérisation plus fine permet de distinguer les événements de faible ampleur (anomalie de $\pm 0,5 \text{ }^{\circ}\text{C}$ à $\pm 0,9 \text{ }^{\circ}\text{C}$), ampleur modérée (anomalie comprise entre $\pm 1 \text{ }^{\circ}\text{C}$ et $\pm 1,4 \text{ }^{\circ}\text{C}$), ampleur forte (entre $\pm 1,5 \text{ }^{\circ}\text{C}$ et $\pm 1,9 \text{ }^{\circ}\text{C}$) et très forte (anomalie supérieure ou inférieure de $\pm 2 \text{ }^{\circ}\text{C}$; Tableau 15).

Tableau 15 : Caractérisation des périodes de ONI de 1950 à 2016 (NOAA, juin 2017)

El Niño				La Niña		
<i>faible</i>	<i>Moyen</i>	<i>Fort</i>	<i>Très fort</i>	<i>faible</i>	<i>Moyenne</i>	<i>Forte</i>
1951-52	1963-64	1957-58	1982-83	1950-51	1955-56	1973-74
1952-53	1986-87	1965-66	1997-98	1954-55	1970-71	1975-76
1953-54	1987-88	1972-73	2015-16	1964-65	1998-99	1988-89
1958-59	1991-92			1967-68	1999-00	
1968-69	2002-03			1971-72	2007-08	
1969-70	2009-10			1974-75	2010-11	
1976-77				1983-84		
1977-78				1984-85		
1979-80				1995-96		
1994-95				2000-01		
2004-05				2011-12		
2006-07						

Les ENSO ont pour conséquence une modification de la hauteur moyenne de l'océan. Ces derniers seraient à l'origine d'importantes variations interannuelles du niveau marin de + 0,20 à + 0,30 m dans le Pacifique Sud-Ouest (Becker et al. 2011) par rapport au niveau marin moyen observé habituellement dans cette région du monde. Durant les périodes La Niña ou certaines phases dites neutres, on note, pour le Pacifique Sud-Ouest, un renforcement des alizés et une augmentation de l'altitude de la mer (Merrifield et al. 1999; Merrifield 2011). A l'inverse, durant les périodes El Niño les alizés sont un peu moins établis, moins forts et le niveau de la mer baisse. Le fait que le niveau marin soit plus haut en période La Niña avec des alizés plus établis conduit à exposer le littoral au déferlement des vagues à une altitude plus élevée entraînant une érosion des côtes. De même, les transports sédimentaires générés par les vagues d'alizés sont eux aussi généralement plus forts. Ces deux facteurs conduisent à augmenter l'intensité des processus d'érosion en période « ordinaire » en Nouvelle-Calédonie et dans les régions avoisinantes (Garcin & Vende-Leclerc 2016).

La variabilité climatique peut donc avoir des répercussions sur les processus côtiers, les morphologies côtières et la mobilité de la position du trait de côte.

Ces données à l'échelle du Pacifique Sud-Ouest constituent des éléments indispensables qui seront mises en relation avec les évolutions des îlots.

2.3 Facteurs de forçages à l'échelle de la Nouvelle-Calédonie

2.3.1 Le climat calédonien

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 (source : Atlas climatique de la Nouvelle-Calédonie, 2007) :

- De décembre à mars (*été austral*), une saison chaude et humide, 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. Au cours de cette période, la Nouvelle-Calédonie peut être touchée par des dépressions et cyclones tropicaux ;
- D'avril à mai, la ITCZ est dans sa position la plus australe. Période intermédiaire entre la saison chaude et la saison fraîche, elle est caractérisée par des températures plus fraîches et une baisse des précipitations. Néanmoins la température de la mer est encore chaude et peut favoriser la formation d'épisodes pluvio-orageux importants voire des dépressions subtropicales ;
- De juin à septembre (*hiver austral*), 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 précipitations et de « coups d'ouest ». Ces épisodes interrompent un temps généralement sec avec des précipitations d'intensité modérée et frais avec des températures minimales relativement basses. Les alizés sont plus faibles et leur direction varie davantage ;

- De août à novembre, une saison sèche marque la transition entre la saison fraîche et la saison chaude. Les précipitations sont faibles et les températures sont basses la nuit et plus élevées en journée.

Le phénomène de variabilité climatique ENSO influence également le climat local (Leroy, 2006), notamment au cours de la saison chaude. 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 Niña, 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).

2.3.2 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-Simpson qui prend en compte la vitesse des vents. Le Tableau 16 ci-dessous expose la classification utilisée par le service de la météorologie de la Nouvelle-Calédonie (Météo NC).

Tableau 16 : Classification des événements cycloniques (source : Météo NC)

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 extrêmes peuvent affecter directement et profondément une région et auront des incidences sur le littoral. L'énergie des vagues arrivant à la côte au cours de ces événements aura des répercussions importantes avec des phénomènes d'érosion et de recul rapide du trait de côte ou au contraire des apports sédimentaires provoquant une accretion et des modifications morphologiques.

Les impacts et effets de ces événements intenses sur les processus côtiers induits pourront être très différents selon les caractéristiques du cyclone et notamment sa trajectoire. En effet, la trajectoire suivie par un cyclone va conditionner et influencer l'intensité des vents et donc les paramètres des vagues qui atteindront un secteur de côte (hauteur, périodes, direction), voire même les modifier dans le temps. Les côtes seront donc différemment affectées selon l'orientation de la dépression. De surcroit, la présence de morphologies sous-marines, d'îles ou de récifs entre le centre dépressionnaire et la côte considérée peut jouer un rôle protecteur en changeant les caractéristiques des vagues qui l'atteindront.

De même, les événements intenses distants des sites peuvent avoir des incidences sur les littoraux d'une région. En Nouvelle-Calédonie, les houles australes ou cycloniques lointaines pourront elles-aussi impacter significativement les côtes.

Ces événements extrêmes 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 17 ci-dessous recense quant à lui les événements météorologiques extrêmes (DTM, DTF et cyclones) qui sont produits à proximité de la Nouvelle-Calédonie depuis le début des années 2000 (d'après les informations récoltées sur le site internet de Météo NC). Une carte représentant la trajectoire des cyclones a été réalisée à partir de données disponibles sur le site de la NOAA (Figure 95).

Tableau 17 : Evénements cycloniques depuis 2002 à aujourd'hui (source : Météo NC)

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

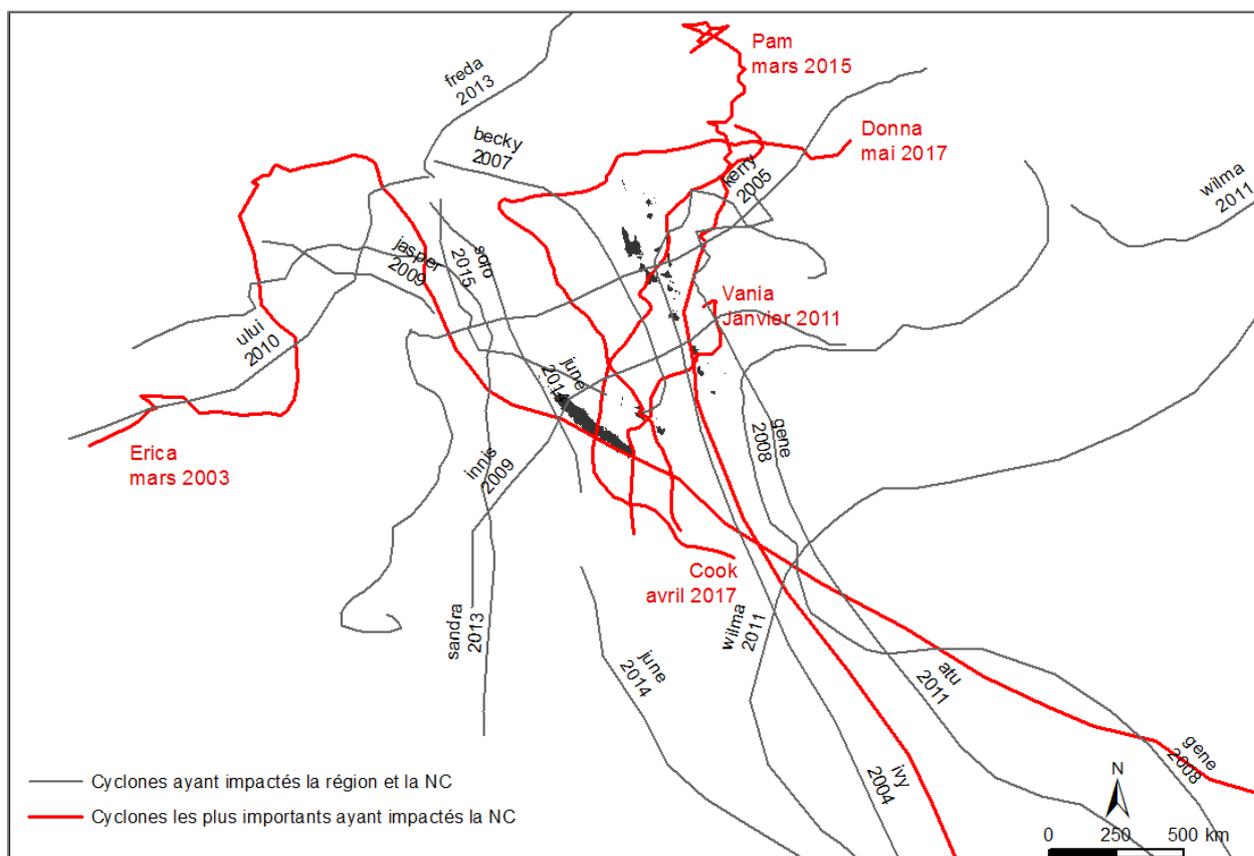


Figure 95 : Cartographie de la trajectoire des événements cycloniques ayant impactés la Nouvelle-Calédonie entre 2000 et 2017 (source : NOAA)

Afin de compléter cet inventaire, un recensement des événements météorologiques les plus importants ayant impactés les îlots du lagon sud-ouest a été réalisé sur la période allant de janvier 2016 à juin 2017 (Tableau 18).

Tableau 18 : Recensement des événements météorologiques notables ayant impactés le sud-ouest de la Nouvelle-Calédonie et les îlots étudiés (colonnes grisées évènements ayant un impact fort sur les 2 îlots) (recensement SGNC et bulletins météorologiques Météo NC - janvier 2016 à juin 2017)

	2016							2017				
Mois/date de l'événement	24 fév	07-08 mai	Juillet	4-5, 13-14 et 28-29 août	Sept/ oct	Novembre	Décembre	07-10 fév	09-11 avril	Mai	Juillet	Août
Nom/Nature	Cyclone Winston	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. Glissement de terrain à Houailou avec pertes humaines	16/12 : épisode de fort vent combiné à un fort coefficient de marée. Modifications observées sur Larégnère	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), îles Loyautés impactées	Coup d'ouest le 20 juillet	Coup d'ouest les 19 et 20 août
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, des impacts ont été observés sur la côte ouest	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)		

Des photographies prises par les gardes nature de la province Sud sur l'îlot Larégnère après les événements de décembre 2016 (fort vent) (Figure 96), de février 2017 (DTF) (Figure 97) et des cyclones Cook (avril 2017) et Donna (mai 2017) (Figure 98) illustrent les effets et les modifications engendrées par ces événements extrêmes.

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



Figure 96 : A gauche : creusement du talus de la plage nord-est ; à droite : 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 97 : A gauche : talus d'érosion, végétation rampante arrachée, arbres déracinés sur la plage sud de Larégnère (10/02/2017) à droite : talus d'érosion sur la plage sud-ouest de Mbé Kouen (13/02/2017) (Source : DENV)

Observations post-cyclones (Cook et Donna, avril et mai 2017) :



Figure 98 : En haut à gauche : Nombreux débris coralliens au-delà de la limite de végétation ; en haut à droite : talus d'érosion sur la partie est de l'îlot Larégnère (le 13/02/2017, après le passage du cyclone Cook) ; en bas à gauche : talus d'érosion, arbres déracinés et débris coralliens à l'est de Larégnère ; en bas à droite : falaisage en haut de plage

Ces informations vont permettre de mettre en relation les événements météorologiques et les changements morphologiques des îlots à court et moyen termes.

2.4 Facteurs de forçages à l'échelle du lagon calédonien

2.4.1 Les conditions hydrodynamiques du système « récif-lagon »

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

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 n) par rapport au niveau moyen au large (msl). Les flux d'eau entrants $q(r)$ passent par-dessus le récif et les flux sortants (*seaward flow*), notés $q(c)$, traversent les passes. Ces échanges d'eaux océan/lagon sont schématisés dans la Figure 99 ci-dessous.

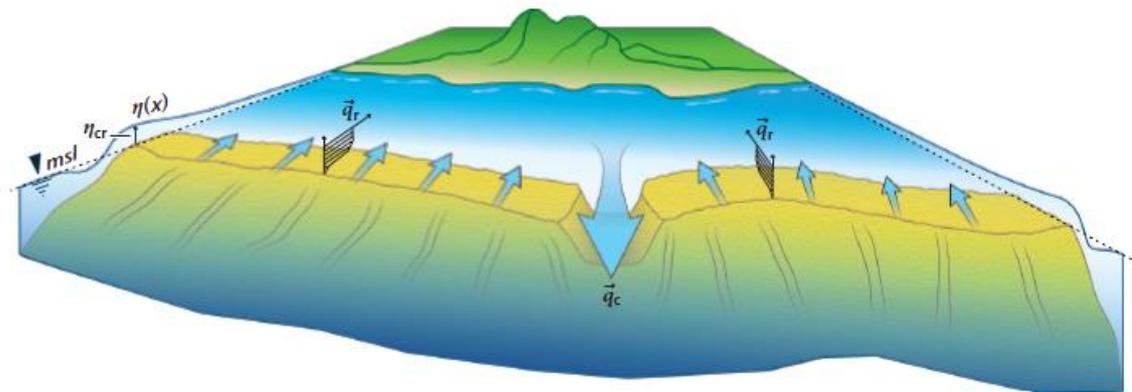


Figure 99 : Circulation de l'eau dans un système côtier "récif-lagon" (source : Lowe et Falter, 2015)

L'énergie transmise par la houle océanique dans le lagon 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 significative moyenne des vagues (H_s) dans le lagon oscille entre 1,3 à 3,4 m avec un maximum à 7 m et la moyenne annuelle de leur période (T_p) est de l'ordre de 7,1 s à 8,7 s (Caires et al., 2005 ; Young et al., 1999).

On distingue ainsi 3 principales familles de houles affectant le lagon sud (Garcin et al, 2016) :

- les houles d'alizé, de direction sud-est (secteur $N130^\circ - 160^\circ$) et générées par les alizés, peuvent être observées tout au long de l'année. La hauteur moyenne significative des vagues (H_s) est comprise entre 1,3 et 2,9 m, avec des périodes de longueur d'onde (T_p) entre 5,9 et 10,2 s ;
- les houles australes, de direction sud-sud-ouest (secteur $N190^\circ - 210^\circ$) et générées par des dépressions polaires, est dominante toute l'année (75 % d'occurrence par an). Ces houles sont caractérisées par de longues périodes de longueur d'onde (entre 10 et 25 s). La hauteur moyenne significative des vagues (H_s) varie entre 1,3 et 3,4 m avec un maximum pendant l'hiver australe ;
- les houles d'ouest sont plus rares (2% des occurrences par an) et généralement observées pendant la saison fraîche. De direction ouest (secteur $N240^\circ$ à 300°) elles possèdent des caractéristiques très variables avec une moyenne de hauteur moyenne significative des vagues (H_s) de 2,1 m mais qui peut atteindre un maximum de 7 m. La période de longueur d'onde (T_p) moyenne est de 9.1 s et peut atteindre 12 à 14 s.

La marée possède un rôle non négligeable dans la circulation des eaux du lagon et par conséquent, sur la redistribution sédimentaire. Cette dernière est soumise à un régime de marée micro-tidal avec un marnage compris entre 0.4 m et 1.6 m 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 s) 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'obstacle et sans changer de direction, est plus important lors des épisodes d'alizés du sud-est. Une importante mer de vent est également observée lors les 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.

Les forces à l'origine de la circulation hydrodynamique au sein du lagon, comme vu précédemment, sont étudiées depuis une quarantaine d'années (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'IFREMER 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., 1998 et 2001, Ouillon et al., 2004, Jouon et al., 2006, Le Gendre et al., 2008). 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 100 représente le temps de résidence des eaux dans le lagon sud (Fichez et al., 2008).

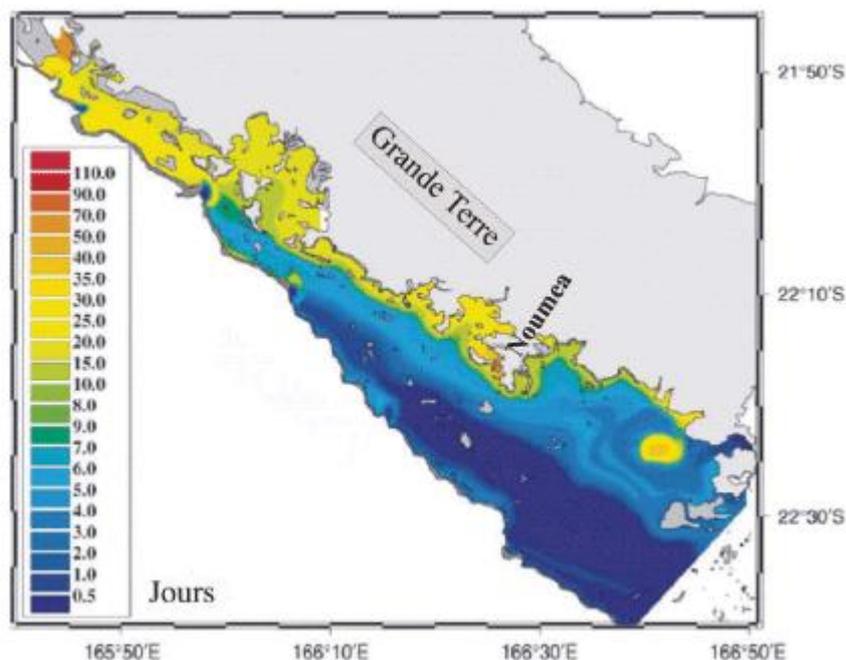


Figure 100 : Distribution du temps de vidange locale, en jours, dans la zone sud du lagon de la côte ouest de Nouvelle-Calédonie (Jouon et al., 2006)

2.4.2 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 de la lithosphère telles que la subsidence ou la surrection. 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. En effet, la mesure de ces derniers est indispensable pour obtenir le niveau marin relatif servant pour les études globales ou encore pour la calibration des satellites. La différence entre niveau marin relatif et absolu est théoriquement égale au *VLM (Vertical Land Movement)*.

A Nouméa, le niveau de la mer est mesuré en permanence depuis 1957 Un premier marégraphe mécanique permettant la mesure du niveau de la mer est installé par le Service Hydrologique et Océanographique de la Marine (SHOM) en 1957 à la pointe de Chaleix. Puis en 1967, un nouveau marégraphe combinant les technologies américaines Ficher and Porter Analog-to-Digital et françaises, marégraphe mécanique OTT R16 remplace le précédent. Le niveau marin y est alors mesuré jusqu'en 2005. Puis, à 6 km de là, dans la baie de Numbo, un nouvel instrument du SHOM, équipé d'un radar khrono BM100 et de la technologie Mareta acquisition unit, prend le relais en 2005 (Aucan, 2017). La multiplication des instruments et des sites d'installation ne permettaient pas de disposer de données homogènes jusqu'à 2017.

L'ensemble de ces mesures a ont permis la rédaction et la publication d'une étude publiée en août 2017 par des chercheurs de l'IRD, du SHOM, et du centre Hawaïien du niveau de la mer présentant la reconstruction d'une série homogène des données sur le niveau de la mer à Nouméa de 1957 à nos jours (Figure 101). Les séries de données issues des deux marégraphe ont été corrigées à partir de données altimétriques venant de trois missions satellites successives (Topex-Poseidon, Jason 1 et Jason 2).

Il est montré qu'entre 1957 et 2017, le niveau de la mer est monté à une vitesse moyenne de 0,9 mm/an, mais ses évolutions ne sont pas régulières (Figure 101). En effet, le niveau moyen de la mer peut varier de plusieurs centimètres d'une année à l'autre à cause des phénomènes climatiques de grande échelle comme El-Niño. Grâce à cette nouvelle série longue du niveau de la mer à Nouméa, des tendances pertinentes peuvent être calculées sur 40 ans. Elles montrent une accélération de la vitesse de montée du niveau marin à Nouméa qui est passé de 0,5 mm/an entre 1957 et 1997 à 1,9 mm/an entre 1977 et 2017 (Figure 102).

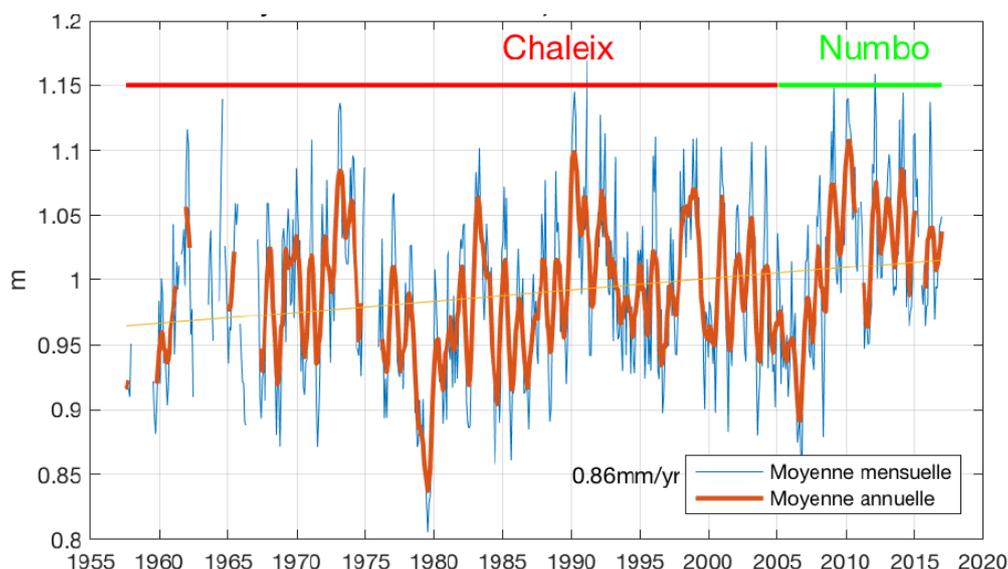


Figure 101 : Niveau moyen de la mer à Nouméa en m (15/12/2016)

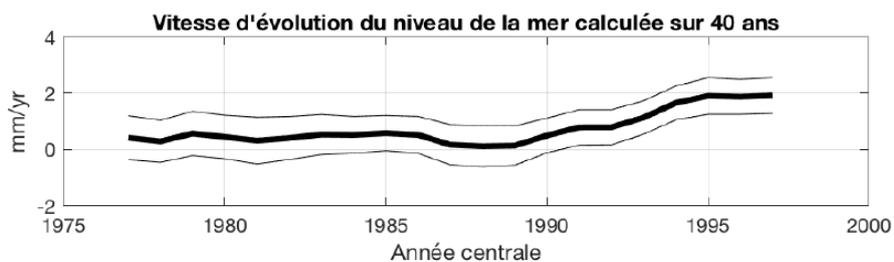


Figure 102 : Vitesse d'évolution du niveau moyen de la mer à Nouméa calculé sur 40 ans (en mm/an)

Sur une période courte, celle de l'étude (2016-2017), ont pu être extrait les données du niveau marin absolu à Nouméa à partir du marégraphe de Numbo (Figure 103).

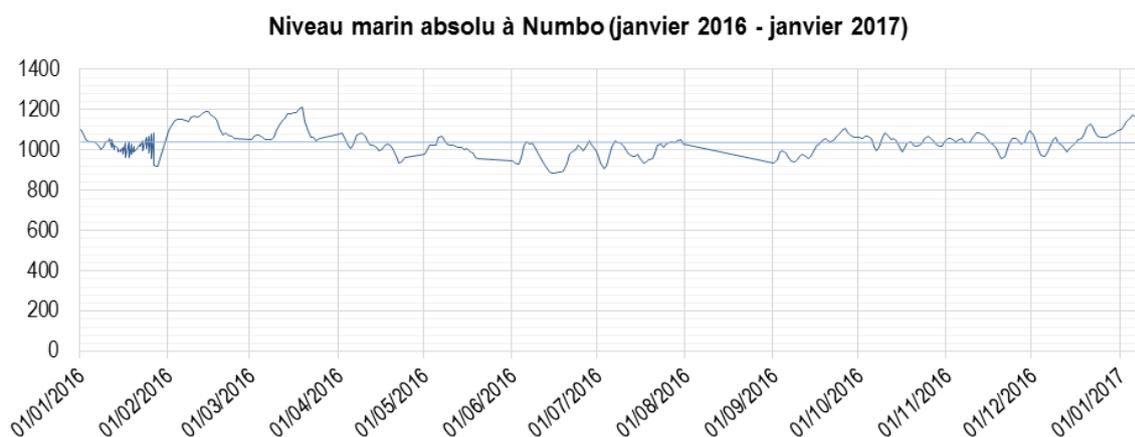


Figure 103 : Niveau marin absolu mesuré au marégraphe de Numbo (bleu foncé) et la courbe de tendance (bleu clair), source : Système d'Observation du Niveau des Eaux Littorales – SONEL

2.5 Facteurs de forçages à l'échelle des îlots

2.5.1 Les climats de vents et de vagues locaux à proximité des îlots

D'après l'article « Wave forcing and morphological changes of the New Caledonia lagoon islets », Aucan J., et al, 2017, *Comptes Rendus Geosciences*

Six capteurs de pression ont été déployés en juin 2016 à proximité des îlots Larégnère et Mbé Kouen. Les données issues de ces capteurs ont été récoltées en mai 2017, soit un enregistrement s'étalant sur une période de 11 mois. Les capteurs nommés « Mbek1 » et « Lare1 » sont installés au niveau du récif externe correspondant au tombant de la plateforme récifale des îlots (Figure 104). « Mbek2 », « Mbek3 », « Lare2 » et « Lare3 » sont, quant à eux, disposés à l'intérieur de la plate-forme récifale des 2 îlots sur le récif frangeant (Figure 104). Un dernier, « uitoe », est installé à la Fausse passe de Uitoé sur la pente externe du récif (Figure 105).

Le choix de la localisation des capteurs s'est opéré en fonction de leur exposition aux houles dominantes : alizés et australes (sud-est et sud-ouest).

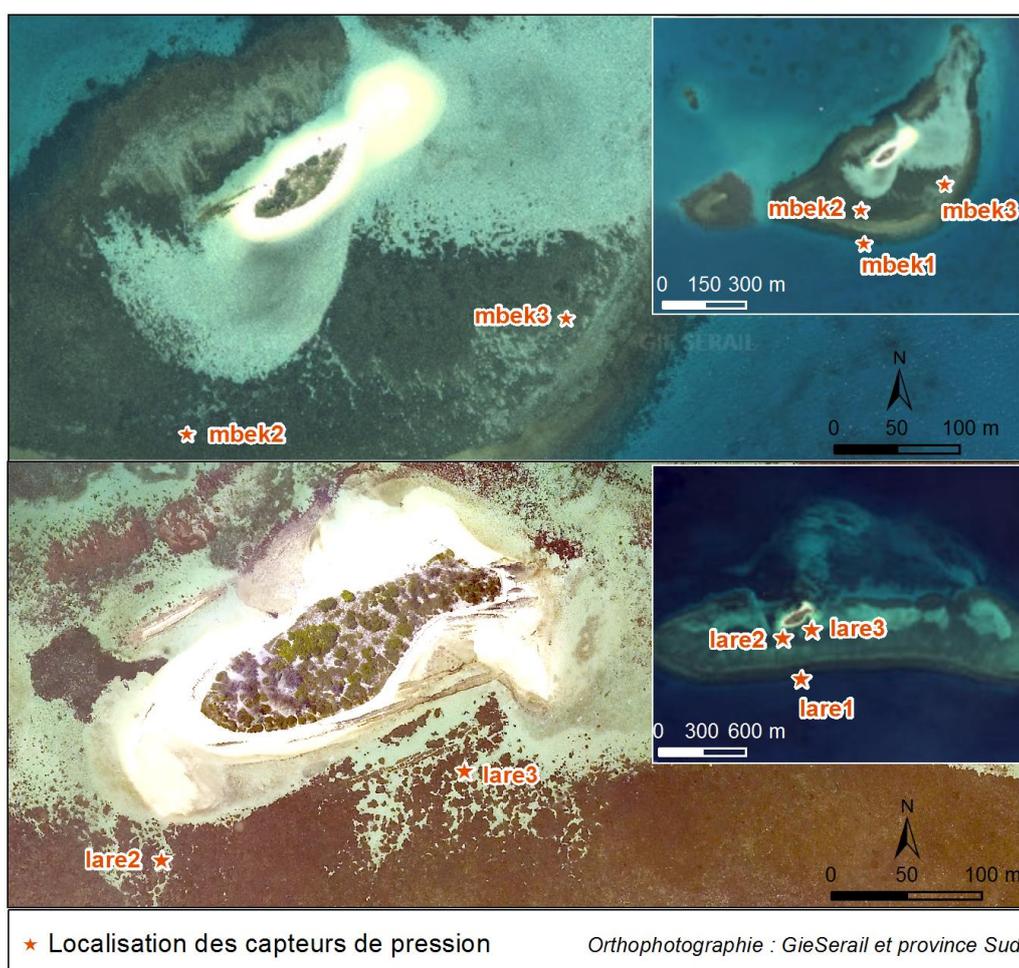


Figure 104 : Localisation des capteurs de pression à proximité des îlots, Mbé Kouen en haut et Larégnère en bas

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.

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.

2.5.1.1 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 (Figure 105). Pour compléter les mesures *in situ* des conditions de la mer dans le lagon, les conditions au large ont été obtenues à partir d'un modèle régional de vague Wave Watch III, forcé par les vents du centre européen pour les prévisions météorologiques à moyen terme (*European Centre for Medium-Range Weather Forecasts – ECMWF*). Les données ont été extraites au point 22,5°sud, 166,33°est. (Figure 105).

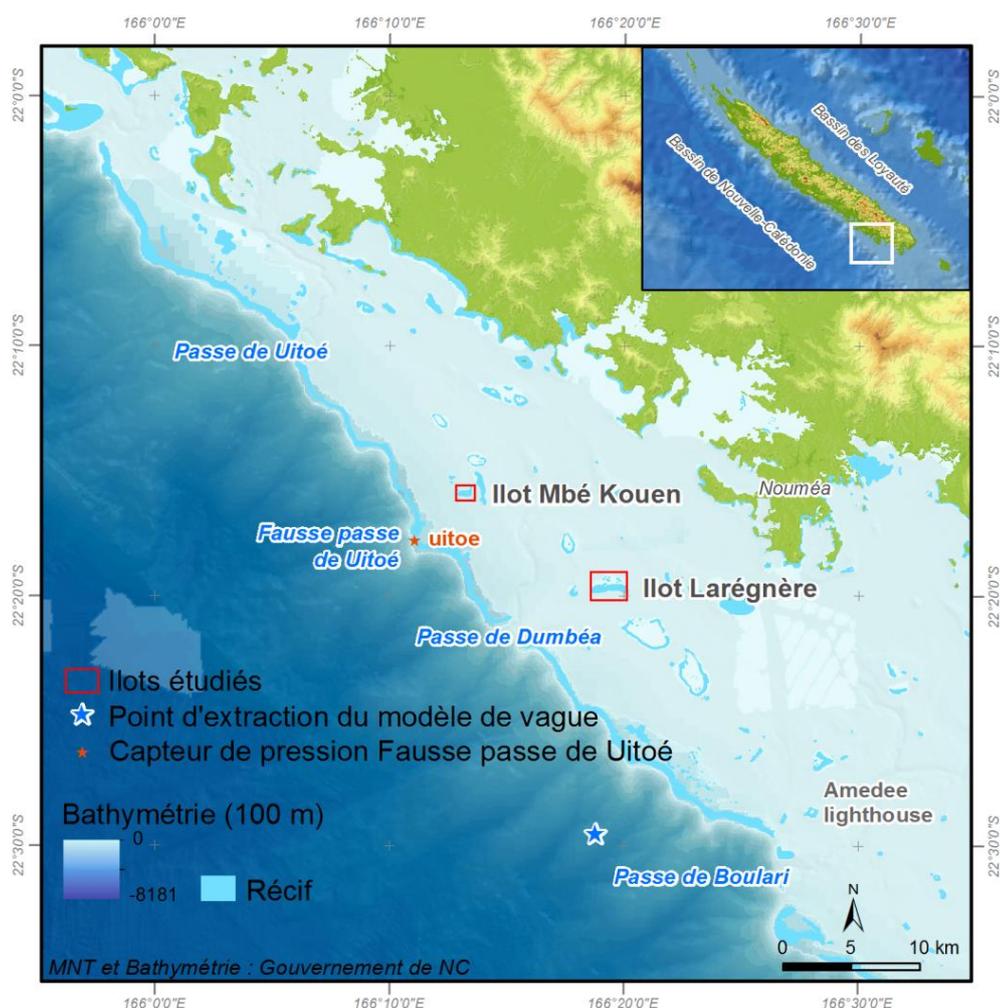


Figure 105 : Localisation du point d'extraction du modèle de vague Wave Watch III

Cette zone au large est soumise aux conditions générées 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 : cyclone tropical Cook.

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

On retrouve 2 conditions de houle au large dans la zone :

- les houles de longue période générées par les tempêtes extratropicales de la mer de Tasman qui arrivent au niveau de la 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 la 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 la Nouvelle-Calédonie.

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

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

Elles correspondent aux vagues générées par la houle de sud-ouest qui viennent se briser contre le récif barrière. 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 Fausse passe de Uitoé (uitoé) (0,94 m). Elles arrivent donc directement sur l'îlot Larégnère, et au contraire, lors de leur approche à la côte de Mbé Kouen, l'énergie des vagues est dissipée et atténuée par la faible profondeur et par les frictions créés sur les vagues au niveau du platier récifal de l'îlot.

2.5.1.3 Les vagues infra gravitaires (25-500 secondes)

Elles peuvent être dues :

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

Elles seraient des résidus d'énergie des vagues à faible fréquence 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 2 sites d'étude. Ces vagues, bien que peu documentées, peuvent avoir un fort impact sur la géomorphodynamique des îlots.

2.6 Tentative de corrélation entre les évolutions de la géomorphologie des îlots et les facteurs de forçages

L'ensemble des informations et des données environnementales décrites précédemment à différentes échelles spatiales (régionale, locale et *in situ*), vont maintenant être confrontées et corrélées avec les évolutions des îlots acquises à différentes échelles temporelles (moyen terme et court voire très court terme) (Figure 106).

Cette analyse a pour objectif de mettre en évidence les liens et interactions entre les changements notables de morphologie de chaque îlot et les facteurs de forçage, de cerner les impacts de ces derniers sur l'évolution géomorphologique des îlots et de définir leur sensibilité aux modifications des conditions environnementales qui les affectent.

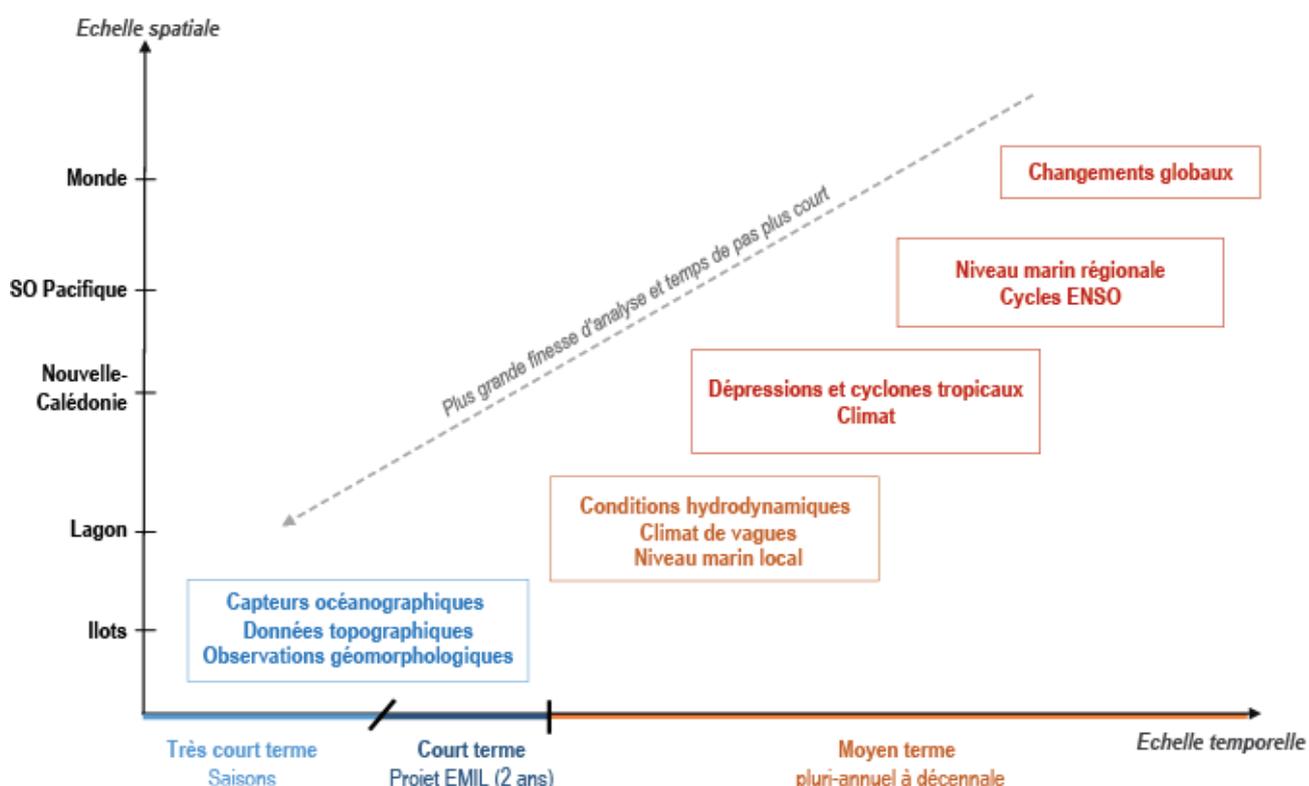


Figure 106 : Des données environnementales recueillies à différentes échelles spatiales corrélées à l'évolution des îlots caractérisées à différentes échelles temporelles

2.6.1 La mise en corrélation des évolutions passées et récentes avec les paramètres environnementaux régionaux et locaux

La mise en corrélation des évolutions des superficies des îlots et des paramètres environnementaux (niveau marin, oscillations ENSO, évènements cycloniques) de 2004 à 2017 est schématisée dans la Figure 107.

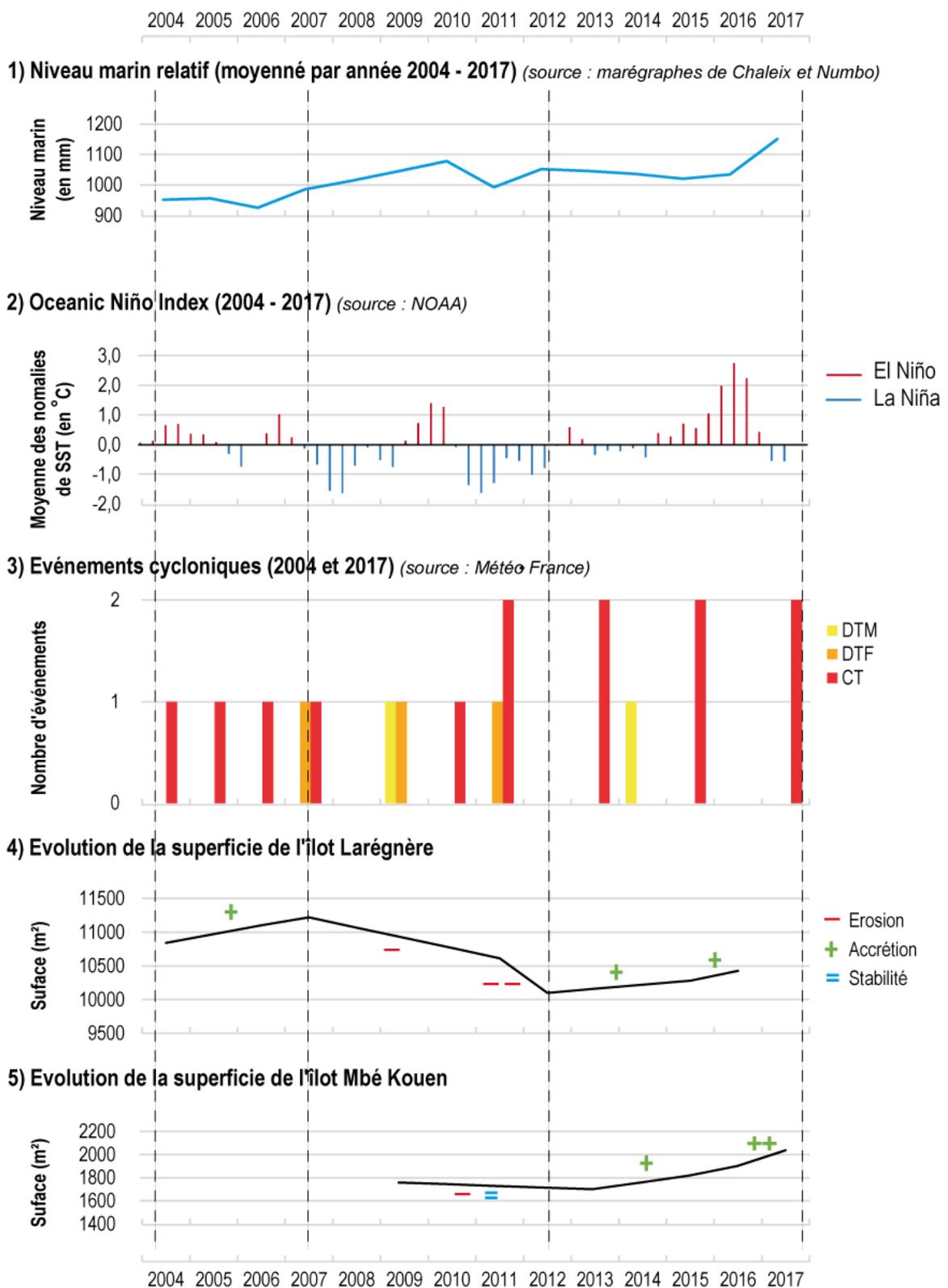


Figure 107 : Mise en corrélation des facteurs de forçage avec les évolutions des superficies des îlots Larégnère et Mbé Kouen

2.6.1.1 L'îlot Larégnère

Concernant l'îlot Larégnère, 4 phases d'évolution sont mises en évidence :

- entre 2004 et 2007 : une accrétion et une stabilité sont observées sur l'ensemble des 6 secteurs ;
- entre 2007 et 2011 : on constate une érosion sur la moitié des secteurs. Le trait de côte de la zone nord est stable alors que les secteurs est, sud et ouest connaissent une période d'érosion avec un recul de leur rivage, excepté l'extrémité de la pointe est ;
- 2011-2012 : une érosion importante est présente sur la quasi-totalité des secteurs, notamment sur les parties centrales de l'îlot et la zone sud-ouest ;
- entre 2015 et 2016 : une accrétion du sud de l'îlot et une érosion de la partie nord sont observés mais l'évolution de la courbe des surfaces de l'îlot reste positive.

La superficie de l'îlot a augmenté entre 2004 et 2007 puisqu'elle est passée d'environ 10 842 m³ à près de 11 219 m³ soit + 3 % en 3 ans. L'analyse de l'évolution des LVP sur les 10 secteurs (Figure 23) confirme que tous connaissent une phase d'accrétion voire de stabilité au cours de la période. Les données environnementales disponibles (Figure 107, 1 et 2) pour cette période indiquent une relative stabilité du niveau marin ainsi qu'un phénomène El Niño de faible ampleur (Tableau 15). Trois événements cycloniques tropicaux (CT) ont toutefois été recensés entre 2004 et 2007, mais sans impact immédiat et significatif sur cet îlot (Figure 107, 3).

Entre 2007 et 2011, la superficie totale de l'îlot décroît sensiblement avec une perte de surface de 5 % en 4 ans (Figure 107, 4). Parallèlement, une augmentation du niveau marin absolu (mesurée à partir du marégraphe de Numbo) est constaté sur la même période (Figure 107, 1). Les années 2007 à 2009 sont marquées par 2 événements La Niña d'ampleur modérée (Figure 107, 2), phénomène qui peut localement entraîner une élévation du niveau marin, des alizés plus forts et des précipitations plus importantes (Merrifield et al. 1999 ; Merrifield, 2011). Le littoral est alors exposé à des vagues déferlant à une altitude plus élevée sur les rivages et à des vagues d'alizés qui génèrent des transports sédimentaires plus importants. Ainsi, la période La Niña peut être responsable d'une amplification des phénomènes d'érosion observés sur l'îlot. On note également au cours de cette période, 8 événements cycloniques (Figure 107, 3) dont une dépression tropicale modérée (DTM), 3 dépressions tropicales fortes (DTF) et 3 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 de manière significative (- 5 %) (Figure 107, 4). Au cours de cette même période, le niveau marin augmente (Figure 107, 1) et une phase négative du phénomène ENSO La Niña de faible ampleur est active (Figure 107, 2 et Tableau 15). 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 (Tableau 17 et Figure 107, 3) : le cyclone Vania début janvier 2011 et le cyclone tropical Wilma à la fin de ce même mois de janvier. L'important processus d'érosion observé sur l'îlot pourrait donc être également lié à ces événements extrêmes.

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). On note la présence d'une phase négative de l'oscillation ENSO (La Niña) de très faible ampleur ($< -0,5^{\circ}\text{C}$) en début de période (2012-2014) et une phase d'El Niño très forte entre la fin d'année 2014 et la fin d'année 2016 (Tableau 15 et Figure 107, 1 et 2). On dénombre 5 événements météorologiques significatifs (Figure 107, 3) dont une DTM et 4 cyclones qui pourraient être responsables de l'érosion observée sur la partie nord de l'îlot. Néanmoins, la fragmentation et l'arrachage de matériel corallien au récif sous l'action des vagues et courants au cours de ces événements intenses pourraient également avoir permis un rechargement en sédiments de l'îlot. Le passage à une phase positive ENSO (El Niño) entraînant une diminution des alizés, des précipitations et une stabilisation du niveau marin a pu également permettre une diminution des phénomènes érosifs. La concomitance de ces 2 facteurs permettrait d'expliquer la période de ré-engraissement générale de l'îlot et l'augmentation de sa superficie.

2.6.1.2 L'îlot Mbé Kouen

Pour l'îlot Mbé Kouen, 2 phases principales sont identifiées :

- entre 2009 et 2013 : on observe une phase d'érosion pour le sud-ouest de l'îlot et une phase d'accrétion pour les autres secteurs (nord et rivage est) avec une courbe d'évolution des surfaces néanmoins positive (+ 3 %) ;
- 2013-2017 : la quasi-totalité de l'îlot est en situation d'accrétion avec une augmentation importante de sa surface totale de l'îlot de + 18 % en 4 ans.

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 de moyenne ampleur entre 2010 et 2011 puis de faible ampleur de 2011 à 2012 (Tableau 15 et Figure 107, 2). On observe sur cette même période de nombreux événements météorologiques ayant affectés le sud-ouest de la Nouvelle-Calédonie : 5 cyclones (2010, 2011 et 2013), 2 dépressions tropicales fortes et 2 faibles. Le sud-ouest de l'îlot semble avoir été impacté par ces facteurs environnementaux qui ont pu entraîner des reculs ponctuels de la LVP.

La deuxième période (2013-2017) est principalement placée sous l'influence d'une phase positive de l'ENSO (El Niño) d'ampleur très forte qui a sévit de 2015 à 2016 (Tableau 15 et Figure 107, 2). Elle a également connu 4 événements cycloniques, 2 en 2015 (Pam et Solo) et 2 en 2017 (Cook et Donna) (Tableau 17 et Figure 107, 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 précipitations donc des facteurs morphogènes) et qu'un apport en sédiments, issus du démantèlement de la barrière de corail après le passage des cyclones sur cette période, a conduit à une augmentation de la superficie de l'îlot Mbé Kouen sur cette dernière période (Figure 107, 5).

2.6.2 La typologie OBLIC appliquée aux 2 îlots étudiés

La typologie des îlots, établie dans le cadre de l'OBLIC (Garcin et al, 2016), comporte 5 stades, de la nucléation, en passant par les phases de croissance, maturité, décroissance, relique, jusqu'à la disparition de l'îlot. Les analyses des évolutions diachroniques ont permis de classer ces 2 îlots selon cette typologie. Il faut souligner que ces évolutions historiques peuvent différer des comportements actuels des îlots observés sur le terrain et mesurés à partir de l'analyse actuelle.

L'îlot Larégnère voit sa surface totale diminuer entre 2004 et 2016 de 4 %. Cette perte de superficie et donc ce recul de la limite de végétation sont confirmés par la présence de divers indices visibles sur le terrain (talus d'érosion actifs, souches d'arbres déchaussées et arbres déracinés...). L'étude des paléo rivages matérialisés par les beachrocks suppose également un retrait de l'îlot par rapports à ses 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 d'un rivage débute lorsque 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 bien en train de perdre de sa surface et que, par conséquent, il appartient toujours à cette classe (Tableau 19).

L'îlot Mbé Kouen connaît quant à lui une phase de « migration » appartenant au stade « maturité » de la typologie OBLIC (Tableau 19). Ainsi, alors que le rivage sud-ouest est en situation d'érosion, le rivage nord-est est en accrétion (avec alimentation du panache sableux), ce qui conduit à une migration progressive de l'îlot vers le nord-est. Ce déplacement pourrait être dû à des processus autophages ; c'est-à-dire que la bande sableuse serait alors nourrie par les sédiments en provenance du sud-ouest par processus de tapis roulant sédimentaire. Cet apport en matériel pourrait aussi être extérieur et dû à un rechargement de la plate-forme récifale en débris coralliens à la suite d'événements extrêmes (cyclones, dépressions tropicales, tempêtes) amenant à une production de sable. Cette migration est définie comme une forme d'adaptation de l'îlot aux contraintes et aux forçages environnementaux. Cette analyse ne corrobore pas ce qui avait été défini dans le rapport OBLIC de 2015, où, sur la période 2009-2013, l'îlot avait été classé dans le stade de « décroissance ».

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 19 : Stade actuel des îlots Larégnère et Mbé Kouen selon la typologie d'évolution des îlots (Garcin et al., 2016)

Ilot	Evolution récente (en %)	Surface actuelle	Stade attribué par l'OBLIC en 2014	Stade défini à l'issue 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

2.6.3 Une tentative de corrélation entre les évolutions actuelles et les climats de vagues locaux

Les capteurs océanographiques renseignent sur les régimes de vagues observés au large et à proximité des îlots. Une corrélation est tentée entre ces données et les observations géomorphologiques couplées aux éléments d'interprétation des données topographiques acquises *in situ* relatifs à l'évolution des îlots entre début 2016 et juin 2017.

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

La côte de l'îlot Larégnère exposée aux alizés (S2) possède un bilan sédimentaire négatif sur l'année (-29 % entre mars 2016 et avril 2017), alors que la côte nord-est (S1) est quant à elle excédentaire (+ 26 %). L'analyse détaillée des bilans volumétriques permet d'évoquer l'hypothèse d'un transfert saisonnier de sédiments (). En effet, en saison hivernale, le stock de sédiments est positif pour le secteur S2 et négatif pour le secteur S1. L'énergie de la houle générée par les coups d'ouest d'hiver, arrivant directement sur la côte nord-ouest (S1), peut être à l'origine de ce transfert d'ouest vers l'est (Figure 108). De même, au cours de la période estivale, le budget négatif pour le secteur S2 et positif pour le secteur S1 attestent d'un transport sédimentaire d'est vers le nord-ouest. Ce flux peut être attribué à l'énergie des vagues générées par les alizés dominantes en été (haute fréquence/courte période).

Le secteur 3 (côte sud-ouest de l'îlot) a un bilan sédimentaire négatif sur l'année. Il est exposé aux houles australes et perd davantage de sédiments en hiver qu'en été (Figure 108). 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, à l'approche de l'îlot, par l'effet de frottement provoqué sur les vagues lors de leur passage sur le récif frangeant et par la faible profondeur d'eau. L'analyse des données issues des capteurs de pression montre que l'énergie de ces vagues reste néanmoins importante en arrivant sur l'îlot. A souligner que l'îlot est directement exposé à ces vagues du fait de sa localisation dans l'axe de la passe de Dumbéa. L'îlot Mbé Kouen est, quant à lui, dans une situation différente car plus distant de la barrière et des passes.



Figure 108 : Interprétation des relations entre les familles de vagues et les bilans sédimentaires saisonniers par secteur, îlot Larégnère

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 (Figure 109). En effet, 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.

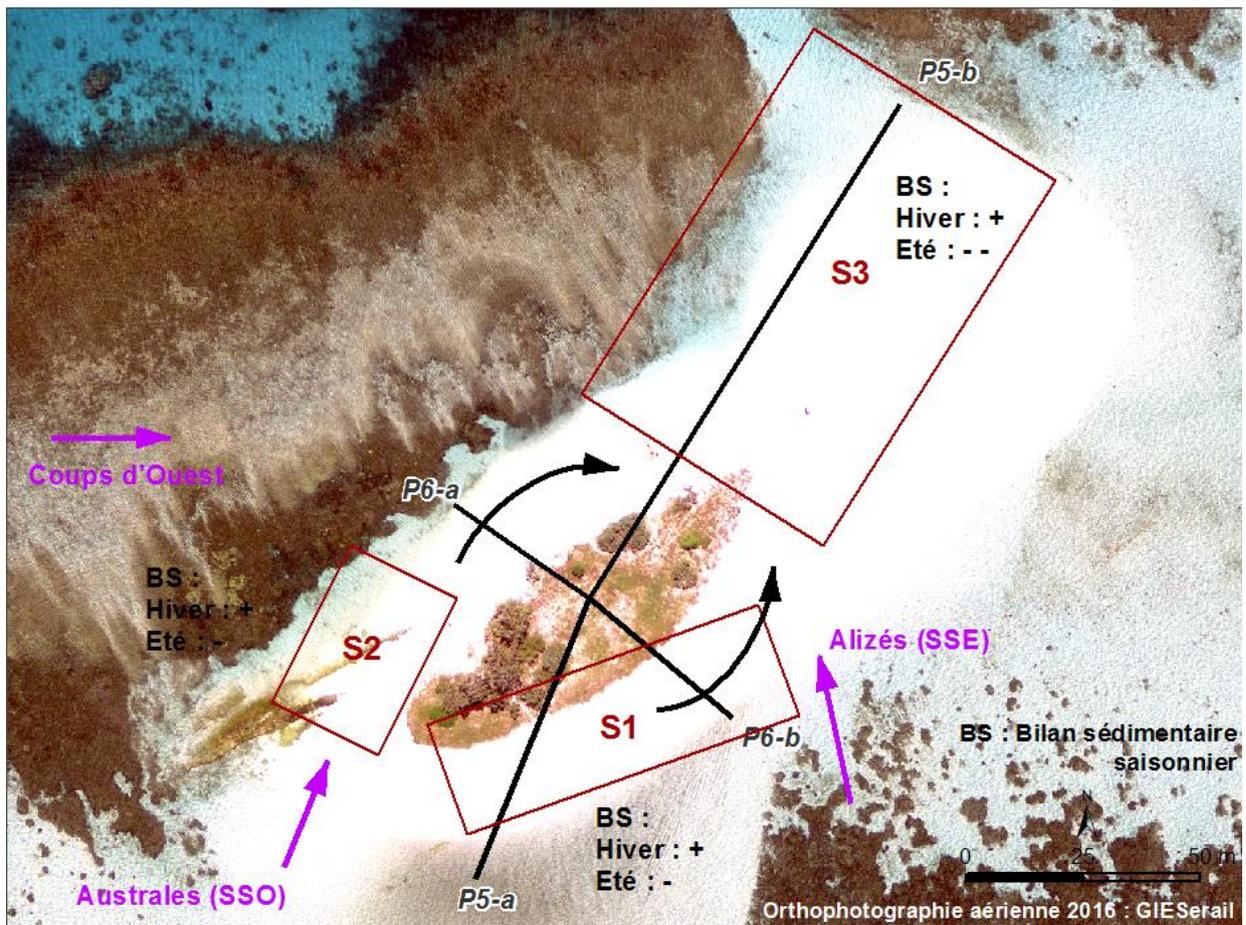


Figure 109 : Interprétation des relations entre les familles de vagues et les bilans sédimentaires saisonniers par secteur, îlot Mbé Kouen

Ces analyses reposent sur l'exploitation et la valorisation des données acquises sur le terrain (observations géomorphologiques, données topographiques acquises par cadre, DGPS et drone). C'est pourquoi il est nécessaire de définir des outils et des méthodes de récolte, de traitement et l'interprétation adaptés.

3- Spécification et mise en place d'un réseau de mesures pérenne

Dans le cadre du projet EMIL, des outils et des protocoles d'acquisition de données permettant d'assurer le suivi morpho-sédimentaires des îlots ont été spécifiés puis testés. Ce qui a permis ensuite de comparer ces méthodes et d'analyser leurs avantages et leurs limites.

La mise en place d'un réseau de mesures avec l'implication de collectivités locales a également été expérimentée au cours de ce projet.

L'ensemble de ces informations permettra d'avoir le recul nécessaire afin d'opérer les choix pour la définition d'un cadre méthodologique et opérationnel de surveillance de l'évolution morpho-sédimentaire des littoraux calédoniens et d'émettre des perspectives pour la continuité du suivi des îlots du lagon calédonien.

3.1 Spécification d'outils et de méthodes adaptés à l'étude de la mobilité des îlots

3.1.1 La description des outils et des méthodes

La description des outils et méthodes utilisés dans le cadre du projet est nécessaire afin d'évaluer l'opportunité de leur mise en place dans le cadre d'un réseau de mesures et de surveillance adapté aux îlots.

3.1.1.1 Les méthodes pour les analyses de la mobilité des littoraux à moyen et long terme (< 10 ans – échelle séculaire) :

L'étude diachronique de la cinématique du trait de côte du littoral permet une analyse de l'évolution historiques 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, il est possible de reconstituer l'évolution du trait de côte à partir de photographies et ainsi reconstituer les évolutions passées. Les images d'archives anciennes peuvent être exploitées en réalisant la prise de vue d'un lieu déjà photographié antérieurement en respectant les principaux paramètres de la première prise de vue.

Il est également possible de mettre en place un observatoire photographique. Il suffit de prendre une série de clichés à partir d'un même point de vue et à des intervalles réguliers. Si le suivi est rigoureux et systématique, il permet une étude diachronique avec identification des changements. Cet outil, plus qualitatif que quantitatif, est complémentaire des photographies aériennes verticales et possède un bon rapport coût/efficacité. Il est insuffisant pour estimer précisément les volumes de matériaux mobilisés et le suivi de différents compartiments sédimentaires, mais peut être porteur d'un message visuel clair.

Ainsi, plusieurs observatoires du littoral de la côte métropolitaine ont mis en place ce type d'observatoire photographique (par exemple : Lambert et Garcin, 2013).

L'explorateur cartographique OBLIC propose le service web « Observatoire photos » qui permet de visualiser les clichés géoréférencés pris au cours des missions de terrain de l'Observatoire (<http://carto.oblic.georep.nc>).

La photo-interprétation des images aériennes, satellites et des cartes

Des photographies aériennes plus ou moins anciennes (DITTT, IGN, SHOM, US army) et des cartes anciennes peuvent être recueillies pour ensuite, par méthode de photo-interprétation, en extraire le trait de côte. Ces images doivent, au préalable, être scannées, géoréférencées et, si possible, orthorectifiées pour pouvoir être interprétées. 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 choisis. Ensuite la comparaison de la position du trait de côte à différentes dates permet le calcul des vitesses d'avancée ou de recul du rivage et ainsi l'analyse de la dynamique côtière.

De nombreux littoraux ont ainsi fait l'objet 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).

3.1.1.2 Les méthodes pour les analyse de la mobilité des littoraux à court terme (< 1 ans – 10 ans)

Dans les années 1980, l'approche morphodynamique est conceptualisée par Wright et 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.

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 le rapport « Synthèse de références des techniques de suivi du trait de côte » (BRGM/RP-60616-FR) 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.

Les observations géomorphologiques et sédimentologiques

Cette méthode consiste à observer, noter, caractériser des marqueurs géomorphologiques, hydrodynamiques ou botaniques sur le terrain tels que les talus d'érosion (Figure 110), les zones en accrétion, la granulométrie des sédiments, les limites de végétation, etc. (Rapport BRGM, 2016). C'est

une approche qualitative qui permet de repérer les tendances évolutives d'un segment côtier si les observations sont réalisées successivement à un pas de temps régulier.

Ces observations peuvent être complétées par des mesures régulières de distance entre des repères fixes présents sur le site d'étude, stables, pérennes et généralement situés en arrière plage, et les marqueurs géomorphologiques (haut de talus par exemple).



Figure 110 : Talus d'érosion photographié à Larégnère le 24/08/2016 lors d'une mission d'observation de terrain

Le cadre

Les instruments d'acquisition de données et les méthodes exposés ici permettent de réaliser des profils de plage et/ou de modéliser la topographie d'une zone côtière.

Le cadre est un instrument de mesure topographique mis en place dans les années 1960 par Emery (Emery, 1961) et repris 20 ans plus tard par Troadec pour le suivi des côtes réunionnaises (Troadec, 2012). Plus récemment, il a été appliqué pour le suivi des littoraux des Comores (Sinane et al., 2010) et de l'île 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 de la dénivelée tous les mètres à partir d'un repère fixe (dont les coordonnées XY et l'altitude Z sont connus) et le long d'un profil matérialisé au sol (décamètre, corde tendue ou tracé rectiligne sur le sable) ayant un azimuth connu et perpendiculaire à la côte (Rapport OBLIC 2016) (Figure 111). Ses principaux intérêts sont son faible coût de construction et sa facilité de mise en œuvre sur le terrain et de traitement des données.

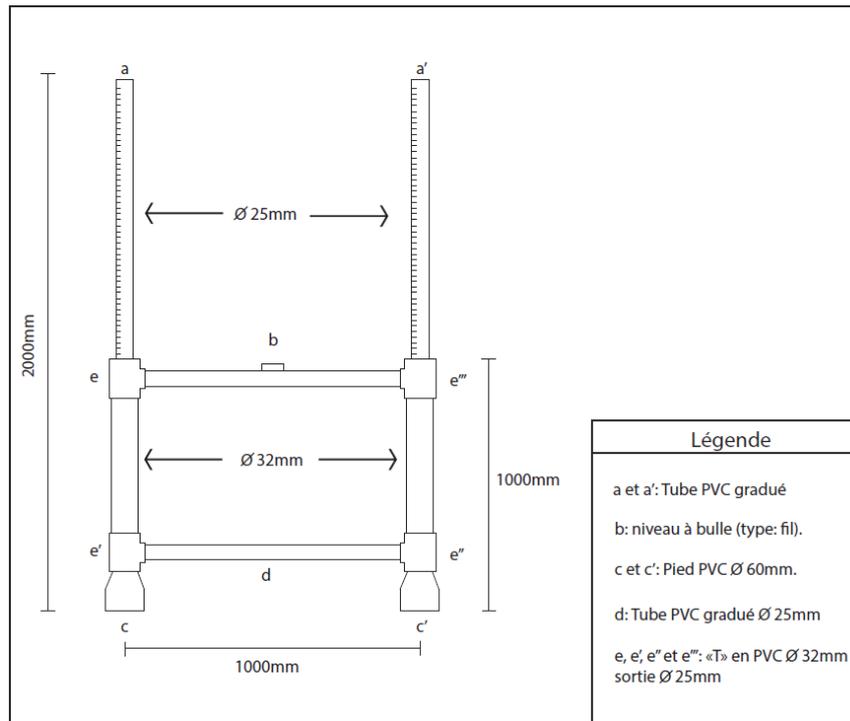


Figure 111 : Plan et principe du cadre d'Emery, technique utilisée dans la réalisation de profils de plage (SGNC d'après Troadec, 2012)

Le GPS et le 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 (latitude, longitude et altitude) à partir de la mesure du temps de trajet des signaux radioélectriques émis par les satellites par triangulation. Sa trop grande incertitude concernant la valeur de l'altitude z ne convient pas à des mesures topographiques de précision. Néanmoins, la précision des coordonnées en x et en y est de l'ordre de 1 à 5 m en fonction du lieu et du matériel. Cette précision est suffisante pour localiser des observations de terrain, des prises de vues etc. Les points ainsi levés peuvent être ensuite intégrés dans un SIG pour être exploités.

Le GPS différentiel ou DGPS (Differential Global Positioning System) permet de réaliser des levés topographiques de grande précision et est davantage utilisé pour le suivi des littoraux du fait de sa plus grande précision altimétrique qui est de l'ordre du centimètre voire sub-centimètre pour les plus performants. Ce système permet de calculer l'écart entre la position réelle connue et celle donnée par les satellites. Ainsi, il est composé d'un récepteur GPS (base) (Figure 112) positionné sur une station dont les coordonnées en x, y et z sont connues avec précision qui peut être une borne rattachée à un réseau géodésique (réseau Banian en Nouvelle-Calédonie). La base est couplée à un GPS mobile. L'avantage d'un DGPS réside dans la rapidité de la mesure et l'automatisation, aucun repère général n'étant nécessaire.

Les points levés au DGPS permettent l'obtention d'un semi de points pour la réalisation de Modèles Numériques de Terrain (MNT) et le levé de profil de plage. Ces relevés peuvent ensuite être intégrés à un SIG.



Figure 112 : Repère fixe et base du DGPS installée lors du levé terrain du 05/07/2017 sur l'îlot Mbé Kouen

Le drone

Émergeant depuis quelques années, l'utilisation des drones pour l'acquisition de données sur le littoral sont en pleine expansion.

Les drones sont classiquement utilisés pour réaliser des vidéos ou des photographies aériennes. Les drones permettent en effet à moindre coût de réaliser des clichés ou films de bonne qualité. Leur facilité de mise en œuvre autorise par ailleurs une utilisation dans des secteurs où une acquisition aérienne classique (avion, hélicoptère) aurait été impossible. Ces photographies et vidéos permettent des observations morphologiques et de suivre des processus en cours de réalisation (Rapport OBLIC, 2016).

Avec des drones équipés de capteurs adaptés, il est possible de réaliser des prises de vue aériennes de photographies qui sont ensuite mosaïquées, géoréférencées et orthorectifiées. Afin d'obtenir une précision et un positionnement spatial correct (centimétrique), des repères au sol, dont on connaît la position et l'altitude, doivent être utilisés. Une approche classique consiste à placer des cibles au sol avant l'acquisition et de relever leur position et leur altitude au DGPS (Rapport OBLIC, 2016).

La photogrammétrie est une technique d'imagerie qui permet de déterminer la position en trois dimensions d'un point à partir de son observation sous 2 angles de vue différents.

Les orthophotographies acquises par drone peuvent, si toutes les contraintes ont été respectées, permettre de créer des Modèles Numériques de Surface (MNS) à très haute résolution (5 à 10 cm) par photogrammétrie. La précision en x et y peut être centimétrique (en fonction du nombre de point de calage au sol, de la précision de ce calage, de la qualité du capteur, des conditions de vol etc.) tandis que

la précision en z est pluri-centimétrique (Cohen et al. 2015). La réalisation de plusieurs acquisitions dans le temps permet de caractériser les mouvements du trait de côte, d'analyser les évolutions de profil de plage et de quantifier les volumes de sédiments gagnés ou perdus entre 2 périodes, voire avant et après un événement tempétueux.

Des essais d'utilisation de cette méthode sur les littoraux sont réalisés par le laboratoire EPOCH (Bordeaux), le BRGM (STOOB-Obslitt, Rosu et al. 2015) et par l'Université de Nouvelle-Calédonie (Cohen et al. 2015).

3.1.2 Les limites de l'analyse de l'évolution récente des îlots

L'analyse diachronique de l'évolution des îlots Larégnère et Mbé Kouen à partir des LVP à différentes dates a permis le calcul des vitesses d'évolution et donc l'évaluation de la dynamique du système côtier des îlots.

Cependant, cette analyse est limitée dans le temps car elle couvre à peine une décennie (12 ans pour le cas de Larégnère, 8 ans pour 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. La faible couverture par des photographies aériennes et les images satellites explique que la reconstitution temporelle des 2 îlots ne remonte pas plus dans le temps. En effet, les missions de vol pour les acquisitions de photographies aériennes couvrent généralement la Grande Terre et peu le lagon calédonien. Même chose, le nombre d'images satellites récoltées est également faible car peu d'images sont disponibles sur la zone maritime.

De plus, ce travail s'est vu limité par un autre obstacle, seules 4 sources d'images (aériennes et satellites) sont disponibles : la DITTT (gouvernement de la NC), la Province Sud, le GIE SERAIL et les images satellites Digitale Globe (Google Earth).

Ce manque de données a conduit à un autre frein. 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, afin de pouvoir lui attribuer tel ou tels impacts sur la morphologiques des îlots.

Une autre limite est à prendre en compte dans l'interprétation des résultats que nous avons obtenus : la marge d'erreur. Elle est définie à 2 m 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. Elle apparaît ainsi dans la représentation des résultats. Cette marge a donc été 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 de la marge d'erreur dans l'interprétation des résultats de 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 2 des secteurs de l'étude possèdent un recul dont la valeur est inférieure à la marge d'erreur calculée :

- le secteur 2 de Larégnère (- 0,15 m/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 la méthodologie semble être à discuter. En effet, il a été 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 manuellement en transects perpendiculaires équidistants de 10 m. La définition de cette méthode s'inspire de 2 outils existant : l'extension ArcGis DSAS et le logiciel d'analyse de la Mobilité du Trait de Côte développé par le Centre d'Etudes Techniques et d'Equipement (CETE) Méditerranée (Mallet et Michot, BRGM, 2012). 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). La longueur de côte des îlots étant faible et ces objets étant de forme arrondie et non rectiligne, ces applications n'ont donc pas été utilisées dans cette analyse car non pertinentes. De plus, la méthode manuelle appliquée n'a pas été spécialement chronophage, les îlots étant de petite surface.

3.1.3 La comparaison des méthodes d'analyse de l'évolution actuelle des îlots

3.1.3.1 La comparaison de profils de plages levés au cadre, au DGPS et issus des modèles

Les profils de plage analysés dans le cadre de l'étude proviennent des données acquises par le cadre d'Emery. Cette méthode manuelle, mise en œuvre par plusieurs opérateurs du projet, peut comporter des limites. C'est pourquoi, une comparaison de ces données avec les profils de plage levés à l'aide d'un DGPS a été effectuée.

Ensuite, les différences que l'on peut relever entre des profils de plage issus de données topographiques directement levées sur les îlots au DGPS et les profils issus de données interpolées d'un modèle MNT ou MNS seront évaluées.

Profils « cadre » versus profils « DGPS » : l'exemple des profils 1-a (Larégnère) et 5-b (Mbé Kouen) du 02/11/2016

Au cours des missions de terrain, des profils de plage ont été levés simultanément au cadre et au DGPS selon la 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 113 : Levé d'un profil de plage au cadre et au DGPS en simultané (02/11/2016)

Les différences observées entre le profil « cadre » (courbe bleue) et le profil « DGPS » (courbe grise) sur le profil 1-a de Larégnère (Figure 114) sont toujours inférieures à 0,10 m (valeur d'altitude ou Z). Elles apparaissent donc relativement faibles. C'est au niveau du dernier mètre du profil (point n°22) que la différence en Z est la plus importante avec une valeur de 0,09 m. La précision du DGPS est évaluée à 3 cm par les géomètres du Service Topographique et Foncier de la province Sud. Ainsi, on peut considérer que les valeurs topographiques levées au cadre le long du profil 1-a sont de bonne qualité et validées.

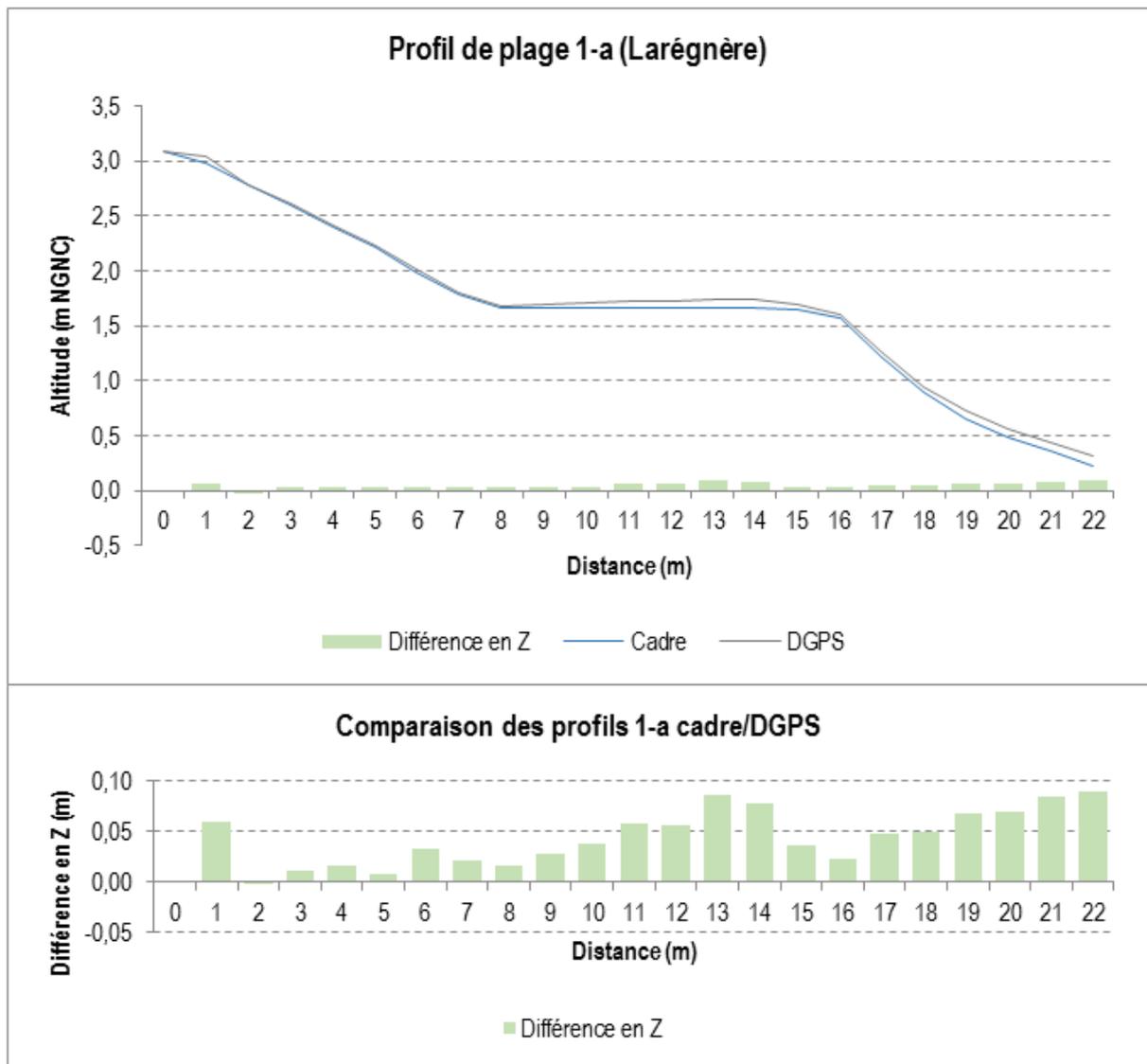


Figure 114 : Représentations du profil 1-a de Larégnère réalisées avec les données acquises au cadre d'Emery (courbe bleue) et les données acquises au DGPS (courbe grise) le 02/11/2016

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

Le long du profil 5-b de Mbé Kouen, les différences en Z entre profil « cadre » (courbe bleue) et profil « DGPS » (courbe grise) sont nettement supérieures à celles constatées sur le profil de plage précédent 1-a (Figure 115). Du 1^{er} mètre au 18^{ème}, cette différence est inférieure à 0,10 m. A partir du point n°19 et

jusqu'à l'extrémité du profil, on note une différence en Z d'une valeur comprise entre 0,10 et 0,60 m. C'est également au niveau du dernier point du profil (n°131) que l'on relève la différence la plus grande. Le tracé et la courbe du profil selon les 2 méthodes sont est toutefois semblables. En effet, on observe 2 talus aux mêmes emplacements et de mêmes hauteurs sur les 2 profils. Le premier haut de talus se situe au point n°43 à une altitude NGNC de 2,36 m sur le profil « cadre » et à 2,13 m sur le profil « DGPS ». Le second talus se trouve au point n°56 à une altitude NGNC de 2 m sur le profil « cadre » et à 1,72 m sur le profil « DGPS » (Figure 115).

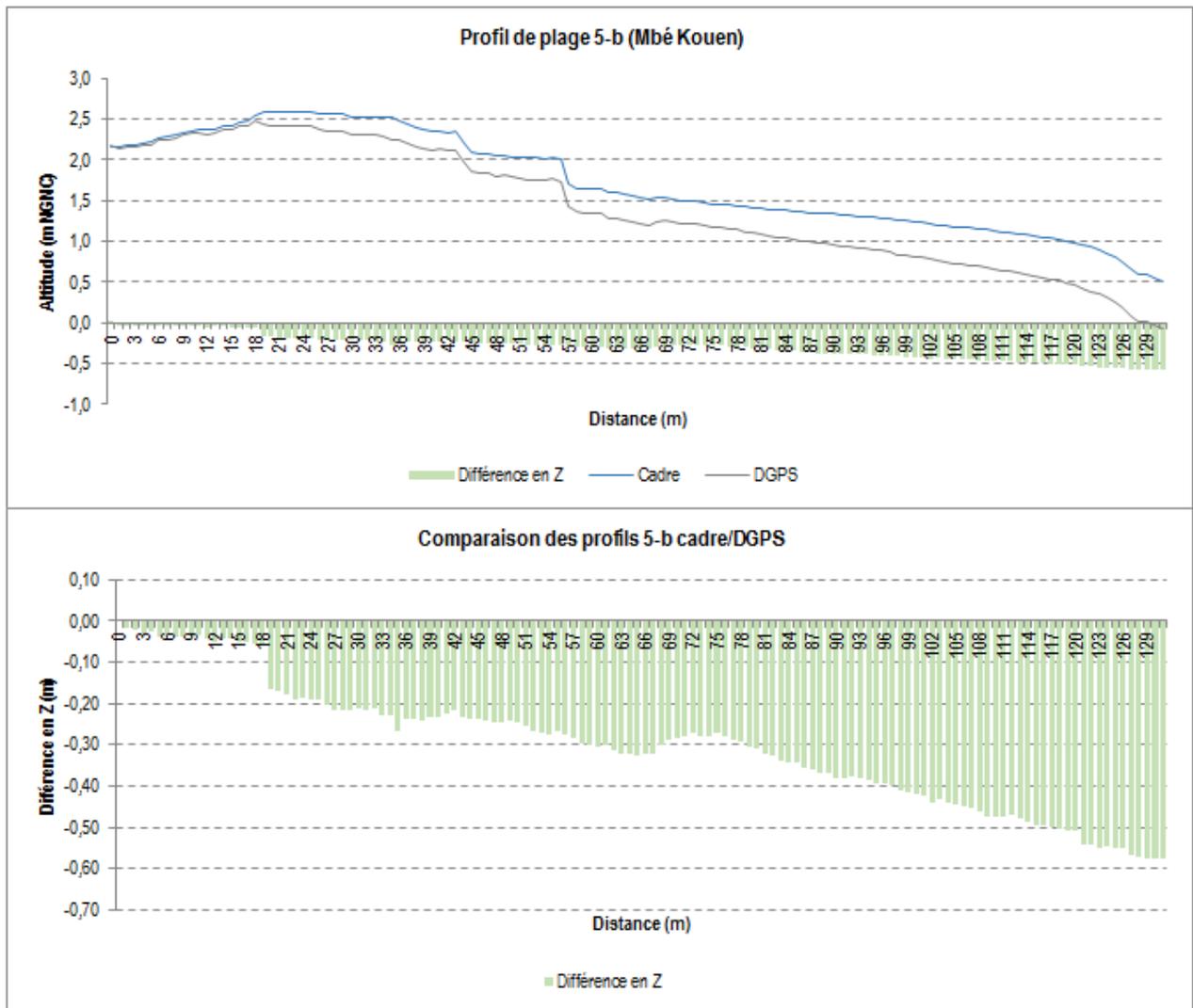


Figure 115 : Représentations du profil 5-b de Mbé Kouen réalisées à partir des données acquises au cadre d'Emery (courbe bleue) et des données acquises au DGPS (courbe grise) le 02/11/2016.

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

Cette différence en Z met en lumière les erreurs humaines qui peuvent survenir au cours des 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 papier de terrain dans un classeur Excel. De plus, les

erreurs de lecture ou de saisie réalisées au début du levé sont répercutées tout au long et en fin de profil, du fait du calcul de la dénivelée cumulée.

Ainsi, des écarts en Z entre les 2 méthodes de levé de terrain peuvent exister. Elles sont variables d'un levé à l'autre car elles dépendent fortement des opérateurs de terrain. Le cadre reste une méthode fiable si les levés sont réalisés avec rigueur. Il est ainsi préconiser de réaliser des relevés en « aller-retour » afin d'avoir un contrôle sur la lecture des mesures. En effet, le procédé actuellement opéré, dit « en antenne », ne permet aucune vérification.

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

Les profils « réels » obtenus après traitement des levés de terrain cadre et DGPS (représentés par des courbes en trait plein) et les profils « interpolés » générés à partir des MNT et MNS DGPS et drone (représentés par des courbes en pointillés) présentent des différences notables (Figure 116).

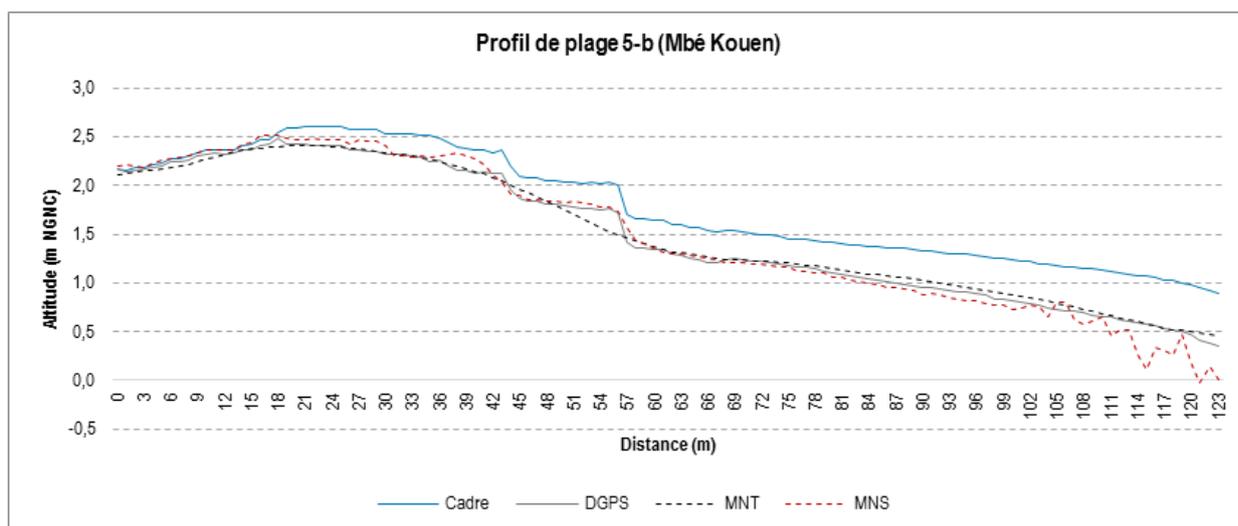


Figure 116 : représentations du profil 5-b de Mbé Kouen du 02/11/2016 réalisées à partir des données acquises au cadre d'Emery (courbe bleue en trait plein), au DGPS (courbe grise en trait plein) et à partir de modèles interpolés : MNT (courbe noire en pointillés) et MNS (courbe rouge en pointillés)

Le profil « interpolé » issu du MNT du 02/11/2016 de Mbé Kouen, réalisé à partir d'une grille de points à maille carrée (10 x 10 m) et d'une résolution de 5 m, présente une courbe 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 telles que les micros falaises d'érosion, ainsi que tous les changements de morphologie dont les objets ont une taille inférieure à 5 m.

Le profil « interpolé » 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 un tracé proche de celui obtenu 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 m avant au niveau du point n°41. Le profil issu du MNS présente une autre anomalie : la présence d'eau déforme les valeurs en Z en bas de plage. C'est pourquoi, de nombreuses ruptures de pentes qui n'existent pas sur les profils « réels » entre les points n°103 et 123 du profil sont observées.

De ce fait, les profils « interpolés » issus des MNT « semi de points » sont difficilement interprétables ; leur résolution est 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 les ruptures et changements 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 immergées.

3.1.3.2 La comparaison des MNT et des MNS

Pour rappel, un Modèle Numérique de Terrain (MNT) est une représentation en trois dimensions (x,y,z) de la surface d'un terrain. Ce modèle 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. Pour l'analyse du système-plage des îlots, la végétation et l'eau de mer ont été masquées afin d'obtenir un MNT de la zone intertidale.

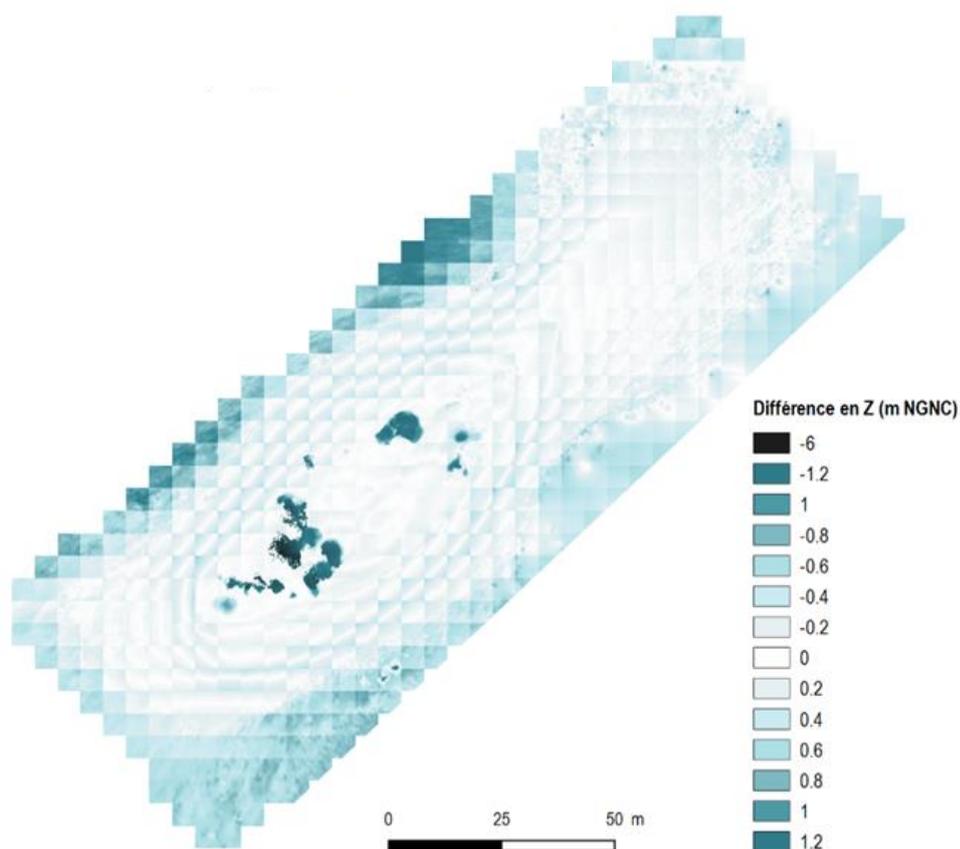


Figure 117 : MNT différentiel représentant la différence d'élévation (Z) entre un MNT issu de données DGPS (5 m de résolution) et un MNT issu de traitements photogrammétriques à partir d'images acquises par drone (1,7 cm de résolution)

Les plus grands écarts en Z (bleu foncé) sont observés au niveau de la végétation et de l'eau de mer (Figure 117), 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, située entre le haut de plage délimité par la LVP et la ligne de rivage, sont comprises entre - 0,6 m 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 probablement due à des résolutions différentes (5 m pour l'un et 1,7 cm pour l'autre). La grande hétérogénéité des méthodes d'acquisition des données (levés terrestres pour le MNT « semi de point » et levés aériens pour le MNT « photogrammétrique ») et de génération des 2 MNT limite à fortiori l'interprétation de ce différentiel.

L'analyse d'un profil de plage (le profil 5-b – Mbé Kouen) peut permettre de mieux saisir et comprendre les écarts entre MNT issus des mesures DGPS et MNT issus de traitements photogrammétriques. La Figure 118 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, une différence maximale en Z de 0,5 m (point n°121) est observée. Les deux profils présentent donc les mêmes courbes, cependant elles diffèrent dans la représentation des ruptures de pente. C'est-à-dire que le MNT « semi de points » génère un profil « lissé » tandis que le profil issu du MNT « photogrammétrique » rend compte des ruptures de pentes telles que les talus. C'est d'ailleurs au niveau des 2 talus du profil que l'on observe les plus importantes différences en Z (entre -0,2 m et + 0,3), si l'on fait abstraction du bas de plage pour les raisons évoquées plus haut.

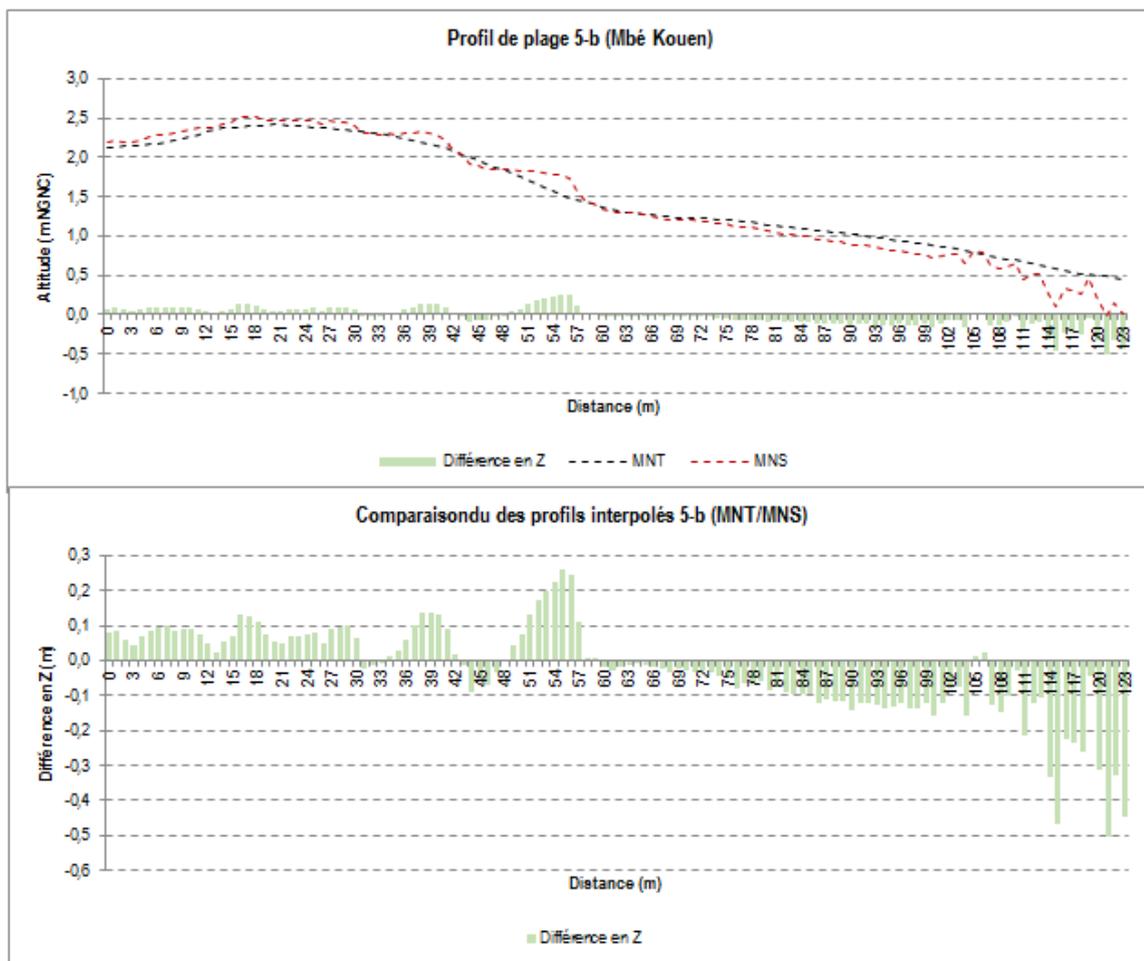


Figure 118 : Représentations du profil 5-b de Mbé Kouen à la date du 02/11/2016 réalisées à partir d'un MNT « semi de points » (courbe noire en pointillés) et d'un MNT « photogrammétrique » (courbe rouge en pointillés)
 La différence de la valeur topographique mesurée tous les mètres le long du profil apparaît en vert pastel.
 Le second graphique est un agrandissement de la représentation de cette différence observée en Z.

Enfin, la Figure 119 permet de comparer les MNT « semi de points » et les MNT « photogrammétriques ». Elle affiche 2 MNT différentiels : entre novembre 2016 et avril 2017 pour le premier, entre novembre 2016 et juin 2017 pour le second. Ils correspondent tous les 2 à la même période de l'année : l'été austral durant laquelle les phénomènes d'érosion et d'accrétion sont particulièrement prononcés. On y observe les mêmes tendances au niveau des secteurs analysés précédemment. Cependant, les courbes de niveau du MNT différentiel « photogrammétrique » sont plus denses et plus précises. Elles 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 quant à eux l'avantage d'étendre la représentation des valeurs topographiques au-delà de la LVP en haut de plage, dans la zone supratidale et au-delà de la ligne de rivage, dans la zone subtidale. L'analyse de cette zone peut révéler des dynamiques sédimentaires particulières alors indétectables à la lecture d'un MNT « photogrammétrique ».

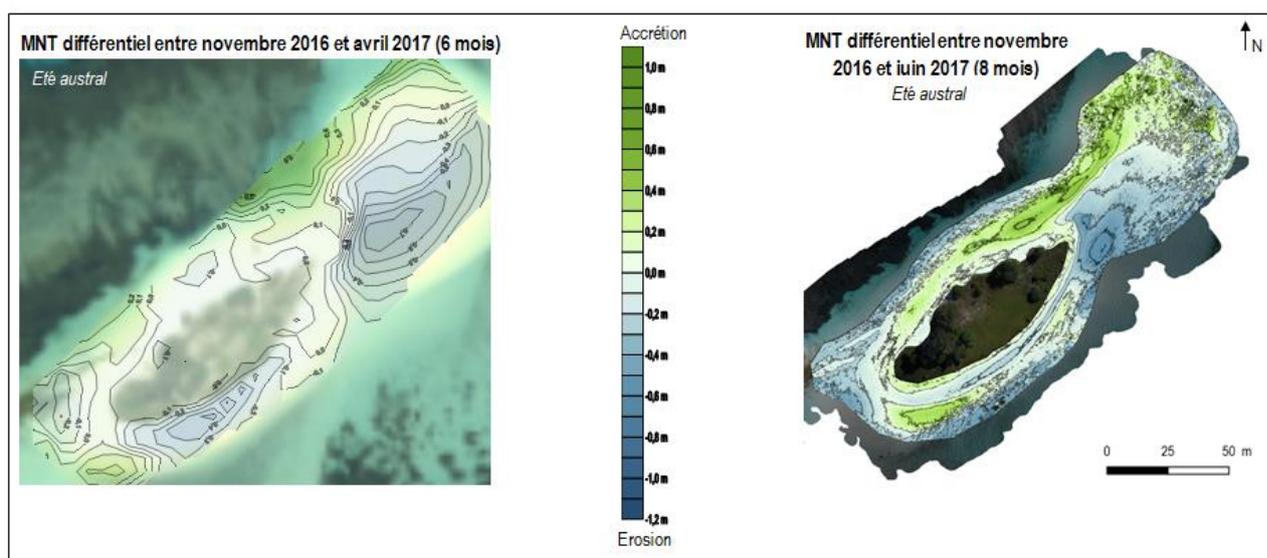


Figure 119 : A gauche, MNT différentiel de l'îlot Mbé Kouen entre novembre 2016 et avril 2017, qualifié de MNT différentiel « semi de points » car réalisés à partir de mesures DGPS acquises sur le terrain. A droite, un MNT différentiel de l'îlot Mbé Kouen entre novembre 2016 et juin 2017, qualifié de MNT différentiel « photogrammétrique » car issu du traitement par photogrammétrie d'images acquises par drone.

3.1.3.3 Avantages et inconvénients de chaque méthode

La comparaison de 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 a permis d'établir le Tableau 20 ci-dessous.

Il présente les différents avantages et inconvénients de chaque méthode testée selon 3 critères principaux : l'acquisition des données, leurs traitements et enfin, les rendus obtenus pour leur analyse et leur interprétation.

Tableau 20 : Avantages et inconvénients des méthodes d'acquisition et de traitement de données topographiques testées au cours de l'étude

	Cadre	DGPS	Drone
Acquisition			
Coût du matériel	Faible (15 000 cfp/125 €)	Très Elevé (5 000 000 cfp/40 000 €)	Elevé (500 000 cfp/ 4150 €) + Nécessité de posséder un DGPS afin de lever les coordonnées des cibles qui serviront au géoréférencement du modèle.
Eléments logistiques à prendre en compte	<p>Facile à transporter et peut s'utiliser quel que soit les conditions météorologiques.</p> <p>L'implantation 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)</p> <p>Les levés de profil de plage au cadre nécessitent de relever précisément la position et l'altitude au DGPS des stations de référence.</p>	<p>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.</p>	<p>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).</p>
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 règlementé , 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	Graphe 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 complète des dynamiques sédimentaires à un pas de temps annuel et saisonnier. D'un côté, les profils de plage générés à partir des levés au cadre permettent d'observer des portions de plages avec une très grande précision et offrent ainsi la possibilité d'analyser les mouvements sédimentaires à une très fine 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.

3.2 Perspectives et préconisations pour la continuité du suivi des évolutions morphologiques de Larégnère et Mbé Kouen

Cette étude pose les fondements pour une analyse quantitative et qualitative des évolutions morphologiques des îlots Larégnère et Mbé Kouen. Ainsi, différentes méthodes d'acquisition puis de traitement des données ont été testées sur les objets géographiques singuliers que sont les îlots du lagon calédonien. Ces méthodes mixent différentes techniques et instruments d'acquisition :

- les levés topométriques réalisés par DGPS et par photogrammétrie aéroportée à l'aide d'un drone qui requièrent une technicité et un coût matériel important, mais qui permettent de générer des données à haute résolution spatiale ;
- les levés au cadre d'Emery, d'un usage nécessitant moins de technicité, simple à utiliser et d'un faible coût, mais de précision moindre.

En fonction des ressources humaines, financière, technique et logistique, l'une ou l'autre de ces méthodes peuvent être appliquées.

Cette méthodologie pourra être transposée à d'autres îlots mais également aux autres types de littoraux calédoniens en fonction de futurs travaux menés notamment par l'OBLIC.

Les éléments issus d'une analyse à court terme (2016-2017), réalisée au cours de ce projet, permettent l'identification et la définition de 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.

Les fréquences d'acquisition fixées pour le projet sont de :

- 3/4 mois pour les profils au cadre et les observations ;
- 6 mois pour les semis de points et les profils au DGPS ;
- 6 mois pour les levés au drone.

Afin de valider la thèse de la variabilité saisonnière, il est primordial de poursuivre les levés DGPS et drone tous les 6 mois. De même, pour reconstituer des chroniques d'évolutions à haute résolution, il faut maintenir les levés au cadre tous les 3 mois. Ainsi, il est préconisé d'avoir une continuité des suivis saisonniers (DGPS et drone), trimestriels voire mensuels (cadre et observations) ainsi qu'événementiels (après l'occurrence d'un événement météorologique possiblement morphogène).

La condition au maintien de ces acquisitions est la pérennisation du suivi morfo-sédimentaire mis en place dans le cadre de ce projet. En effet, le projet EMIL a bénéficié du concours d'organismes de recherche (BRGM, IRD, UNC) mais également de celui de collectivités locales (province Sud - DENV, DFA et Gouvernement - SGNC). L'implication d'institutions publiques, gestionnaires de l'espace littoral, comme la province Sud, dans les phases de récolte et de traitement des données a permis la mise en place d'un réseau participatif. Les gardes nature de la DENV ont assuré les levés au cadre et les observations géomorphologiques après une phase préalable de définition des protocoles et méthodes et de formation aux observations géomorphologiques. Ils ont également été très réactifs suite aux événements intenses survenus au cours projet en relevant sur les 2 îlots les indices des désordres liés à ces phénomènes.

Les géomètres du Service Topographique et Foncier de la DFA réalisent, quant à eux, les relevés topographiques. Deux agents du Service de la Géologie de la Nouvelle-Calédonie et de l'OBLIC ont également participé à l'ensemble des missions de terrain.

Toutes les informations acquises ont été capitalisées et bancarisées au sein d'une base de données. Celle-ci constitue le socle de ce réseau et pourra être exploitée et restituée.

Ce réseau de suivi et de mesures pourrait être étendu à d'autres îlots du lagon calédonien. Ces îlots seraient sélectionnés en fonction des enjeux et de leur dynamique actuelle. De même, la mise en place d'un réseau de surveillance et d'alerte participatif des îlots pourrait être envisagée. Afin d'être informé des éventuels désordres pouvant se déclarer, une veille active (« surveillance ») pourrait bénéficier d'une participation des acteurs et parties prenantes ayant une connaissance fine et une pratique régulière de ces littoraux (taxis-boat, charters, clubs de plongée, ...). Ce réseau pourrait déclencher une alerte au cas où une évolution significative du littoral se produirait sur un îlot suite, par exemple, au passage d'un cyclone, d'un « coup d'Ouest » ou d'un épisode de houles australes. Cette alerte pourrait déclencher le déplacement des agents des collectivités en vue d'analyser le phénomène et de réaliser une campagne de mesure (Rapport OBLIC 2016).

Les mesures et les suivis sont des éléments nécessaires et indispensables pour caractériser, analyser et quantifier l'évolution du littoral. Toutefois, afin de mieux comprendre les liens entre les dynamiques morphologiques et les facteurs de forçage hydro-marins, il s'avère nécessaire d'effectuer un monitoring des conditions locales autour des îlots. Ces mesures visent à caractériser les conditions vagues, les niveaux d'eau, les courants, etc.

Le travail de définition des régimes de vents et de vagues à proximité des îlots, comme la campagne d'acquisition qui s'est déroulée entre juin 2016 et mai 2017 autour des 2 îlots, constitue donc un travail nécessaire à une meilleure compréhension des relations entre les facteurs de forçage et les mouvements sédimentaires constatées et observées. Ceci aboutira à mieux comprendre les processus régissant le système. 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 les données acquises et l'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 particulièrement mobiles d'après les résultats de cette étude, tout en gardant les anciens en place dans un souci de comparaison.

Conclusion

Dans le contexte actuel de changements environnementaux, la communauté scientifique tente d'apporter des éléments de compréhension et de réponse quant à aux évolutions futures des littoraux. Ces espaces, à l'interface terre-mer, constituent des territoires d'études privilégiés de l'impact de ces changements.

L'étude menée à l'échelle locale des îlots du lagon calédonien s'inscrit dans cette démarche d'acquisition de connaissances en vue d'une meilleure prise en compte des changements actuels 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 comme des « laboratoires » pour la mise en place de méthodes de suivi à des pas de temps allant de la saison et à la décennie.

L'intérêt de cette étude réside, dans un premier temps, dans la mise en place d'une méthodologie basée sur des instruments, des outils et des protocoles visant à assurer le suivi de la mobilité et de la dynamique géomorphologique des îlots.

Trois types de levés topographiques ont ainsi été mis en œuvre : 2 levés terrestres (cadre d'Emery et DGPS) et un levé aérien (drone) pour la représentation de profils de plage et de MNT/MNS des îlots. Les méthodes de traitement de ces données ont également été testées. 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 3 techniques sur le terrain est complémentaire et correspond aux besoins de l'étude. En effet, les profils de plages couplés aux modèles ont permis de révéler certaines dynamiques saisonnières sur les 2 îlots Larégnère et Mbé Kouen.

Ensuite, cette étude repose sur des données disponibles à plusieurs échelles spatiales : du Pacifique à au grain de sable de l'îlot. Les premières données correspondent à des éléments climatiques et météorologiques agissant à une échelle régionale tels que l'élévation du niveau marin dans le Pacifique sud-ouest et les cycles de variabilités climatiques comme l'ENSO et à une échelle locale tels que les événements cycloniques impactant la Nouvelle-Calédonie. Le second type de données récoltées est 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*, 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.

La difficulté de l'analyse des changements géomorphologiques aux 2 échelles de temps (récente et actuelle) réside dans l'imbrication des échelles d'analyse. Les tendances évolutives à moyen terme ont été confrontées aux données acquises à grande échelle. Par exemple, a été soulignée l'influence du phénomène La Niña (phase négative de l'oscillation ENSO) sur la variation de la superficie des îlots (perte de surface). Au contraire, l'analyse des évolutions actuelles des îlots entre 2016 et 2017 a permis davantage la corrélation des forçages météorologiques tels les vents et houles dominantes (alizés, australes, coup d'ouest) et les événements météorologiques ponctuels avec le changement de la

morphologie des plages des îlots. Ces changements constatés par le biais de l'analyse des données ont été étayés et appuyés par des observations de terrain. 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 il est primordial d'encourager d'une part, la pérennisation du suivi des îlots pour acquérir le recul nécessaire pour définir plus précisément les dynamiques géomorphologiques et d'autre part, une exploitation plus détaillée des données océanographiques. La continuité de cette étude repose donc sur la poursuite du partenariat entre la province Sud, le gouvernement et les organismes de recherche 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.

Bibliographie

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 Mallet C. et Capdeville J.P, 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*

Aucan J, Vendé-Leclerc M, Bricquir M, Dumas P Wave forcing and morphological changes of the New Caledonia islets, 2017, *Comptes Rendus Geosciences*

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, Coudray J, 1967, Premiers enseignements apportés par un forage réalisé dans le récif barriere de la côte sud-ouest de Nouvelle-Calédonie. *CR Acad Sci Paris D* 265 1867-1869

Beaugrand G, 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, 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, Inman DL, 1966, Budget of littoral sands in the vicinity of Point Arguello, California. USACE Technical Memorandum 19
- Brutto ML, 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, Wirrmann D, Sémah A-M, Corrège T, 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, Swail V, 2005, The KNMI/ERA-40 Wave Atlas derived from 45-years of ECMWF reanalysis data.
- Carassou L, Le Borgne R, Rolland E, 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, Guilyardi E, 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, 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, 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-
- 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, 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, La Roche 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, 2008, 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

Duvat VKE, Volto N, Salmon C, 2017, Impacts of category 5 tropical cyclone Fantala (April 2016) on Farquhar Atoll, Seychelles Islands, Indian Ocean. *Geomorphology* 298 41-62

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, Torrétion 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 19ème au 20ème 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
- Gonson Charles, 2017, Intégration des usages récréatifs et de la biodiversité marine pour la gestion et l'évaluation des espaces côtiers, Thèse de doctorat, IFREMER
- 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 Combrît-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 lagunaire 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 Ouvéa 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
- Lowe Ryan J. and Falter James L., 2015, Oceanic Forcing of Coral Reefs, *Annual Review of Marine Science*, Vol. 7:43-66 (Volume publication date January 2015)
- Maller C, Michot A, avec la collaboration de De La Torre Y, Lafon V, Robin M et Prevotaux 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 XIe 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. *International Geophysics* 75 65-95

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 a 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

Suarez 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 :

- 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-savoirplus/comprendre-la-meteo/publications/atlas-climatique-de-la-nouvelle-caledonie>

- Site internet du NOAA : <http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/precip/CWlink/MJO/enso.shtml>

- Site du Système d'Observation du Niveau des Eaux Littorales (SONEL) : <http://www.sonel.org/>

- Portail REFMAR : <http://refmar.shom.fr/>

- Portail SHOM : <http://data.shom.fr/>