

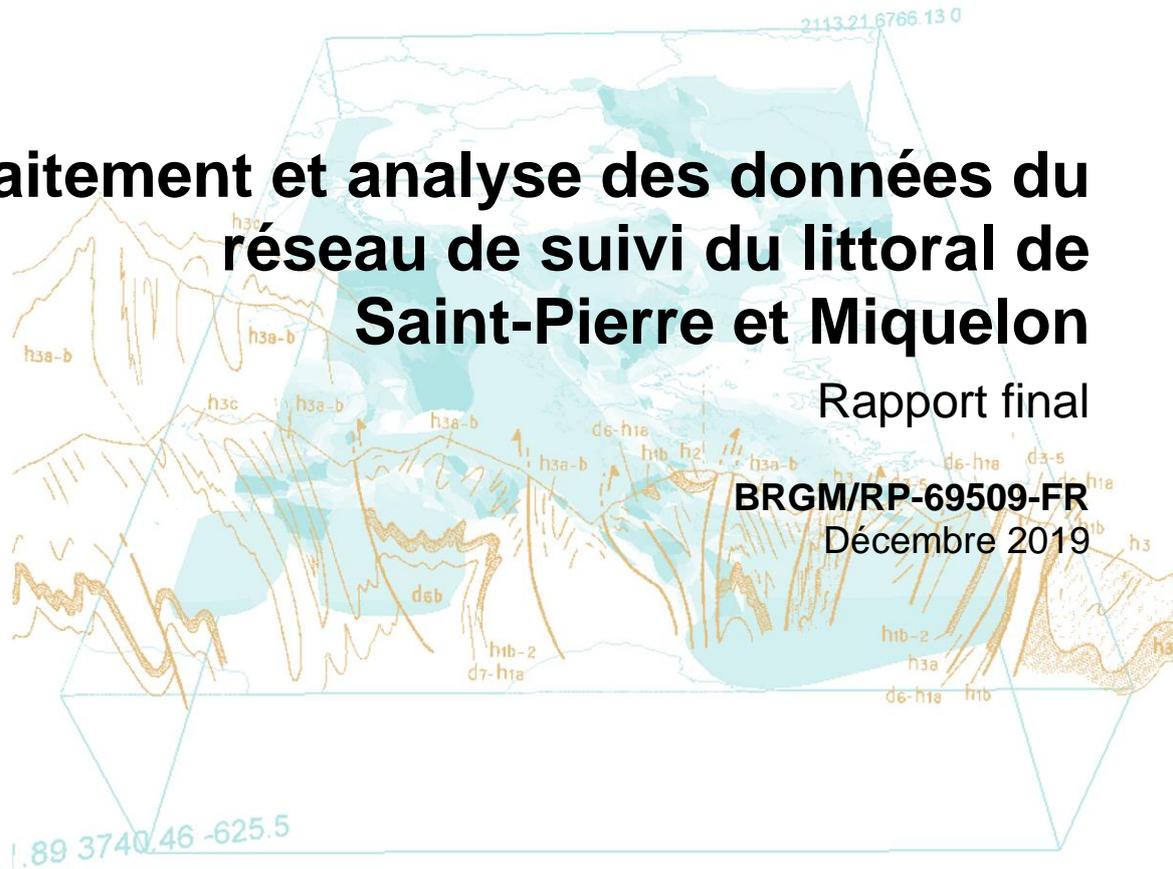


Traitement et analyse des données du réseau de suivi du littoral de Saint-Pierre et Miquelon

Rapport final

BRGM/RP-69509-FR

Décembre 2019



Traitement et analyse des données du réseau de suivi du littoral de Saint-Pierre et Miquelon

Rapport final

BRGM/RP-69509-FR

Décembre 2019

Étude réalisée dans le cadre des projets
de Service public du BRGM

MOISAN M. et LAIGRE T.

Vérificateur :

Nom : J. BILLY

Fonction : Ingénieure chercheuse en
Géologie côtière

Date : 16/12/2019

Signature :



Approbateur :

Nom : Y. DE LA TORRE

Fonction : Directeur régional
Guadeloupe

Date : 17/12/2019

Signature :



Le système de management de la qualité et de l'environnement
est certifié par AFNOR selon les normes ISO 9001 et ISO 14001.

Contact : qualite@brgm.fr



Géosciences pour une Terre durable

brgm

Mots-clés : Erosion littorale, Réseau de surveillance, Saint-Pierre et Miquelon,

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

MOISAN M et LAIGRE T. (2011) – Traitement et analyse des données du réseau de suivi du littoral de Saint-Pierre et Miquelon. BRGM/RP-69509-FR, 82 p., 79 ill.

© BRGM, 2019, ce document ne peut être reproduit en totalité ou en partie sans l'autorisation expresse du BRGM.

Synthèse

Depuis 2012 la DTAM réalise un suivi topographique régulier du littoral de Saint-Pierre et Miquelon. Les sites suivis concernent l'ensemble des côtes basses meubles de l'archipel. Ce qui représente un total de 23 sites : 14 sites sur Saint-Pierre et 9 sites sur Miquelon. Soit un linéaire de trait de côte suivi de 13 km à Saint-Pierre, dont 121 profils de plage, et 41 km à Miquelon comprenant 156 profils de plage. A ce titre, la DTAM a adhéré depuis 2018 au réseau national des observatoires du trait de côte.

Les données acquises par la DTAM sur la période récente (2012-2017) ont été traitées et analysées afin d'interpréter les résultats en termes de dynamique du trait de côte. Les données sur la période historique (1952-2012), issues de la photo-interprétation des campagnes aériennes de l'IGN par De La Torre et al. (2016) dans le cadre du projet VULIT, ont également été utilisées afin de comparer les évolutions du trait de côte sur les deux périodes. Pour chaque site étudié et pour chaque période, une cartographie de l'évolution nette entre la position de trait de côte la plus ancienne et la plus récente ainsi que le taux d'évolution annuel moyen est présentée.

Le secteur de l'isthme de Miquelon-Langlade est le plus affecté par l'érosion. Le taux de recul annuel moyen sur la période récente est estimé à environ -1 m/an dans ce secteur et des valeurs supérieures à -2m/an sont localement atteintes. Les sites de la Dune du Chapeau et de Mirande présentent également une tendance à l'érosion sur la période historique et récente de l'ordre de -0.2 m/an, bien que les aménagements de protection tendent à ralentir le recul du trait de côte sur le site de Mirande. Les observations réalisées sur la Dune de Miquelon indiquent aussi une tendance significative à l'érosion sur la période récente, comprise entre -1 et -2 m/an, dans la moitié sud du site

Concernant les sites étudiés à Saint-Pierre et l'Île aux Marins, même si des évolutions significatives sont identifiées localement sur la période historique, les observations sur la période récente indiquent une relative stabilité.

A partir d'une analyse du protocole élaboré par le CETE, du retour d'expérience de la DTAM sur les premières années de suivi et sur la base de l'analyse des premiers résultats, des recommandations techniques et des perspectives de développement du réseau sont présentées.

A propos du protocole de suivi, il s'agit principalement d'adapter la fréquence d'acquisition selon les évolutions observées d'une part et de réduire le nombre de profil de plage de référence à suivre d'autre part. Des suivis complémentaires, pourront être menés afin d'améliorer les connaissances sur l'évolution de certains sites spécifiques (suivi photogrammétrique par drone, imagerie vidéo ou bathymétrique par exemple, suivi-post tempête).

Enfin, d'autres recommandations concernent la gestion des données ainsi que leur diffusion sur le portail d'information géographique « GEOSPM » afin de les rendre accessibles aux acteurs de l'aménagement du territoire et du grand public.

Sommaire

1. Introduction	11
2. Contexte.....	13
2.1. SITUATION GEOGRAPHIQUE.....	13
2.2. CONTEXTE GEOLOGIQUE ET GEOMORPHOLOGIQUE	14
2.3. CONTEXTE CLIMATIQUE ET HYDRODYNAMIQUE	15
2.3.1. Le vent.....	16
2.3.2. La houle.....	17
2.3.3. Les niveaux marins	19
2.3.4. Les courants marins.....	20
2.4. EVENEMENTS DE FORTE INTENSITE SUR LA PERIODE ETUDIEE	21
3. Présentation des données et méthodologie.....	25
3.1. SUIVI TOPOGRAPHIQUE DE LA DTAM SUR LA PERIODE RECENTE.....	25
3.1.1. Protocole de suivi	25
3.1.2. Sites étudiés	26
3.1.3. Fréquence d'acquisition	27
3.1.4. Format des données	28
3.2. EVOLUTION SUR LA PERIODE HISTORIQUE (1952-2012)	29
3.3. METHODOLOGIE.....	30
3.3.1. Analyse des traits de côte.....	30
4. Analyse de l'évolution du littoral.....	33
4.1. SUD-OUEST DE SAINT PIERRE	33
4.1.1. Présentation générale du secteur	33
4.1.2. Evolution sur la période historique (1952-2012)	34
4.1.3. Evolution sur la période récente (2012-2017).....	36
4.2. SUD-EST DE SAINT PIERRE.....	37
4.2.1. Présentation générale du secteur	37
4.2.2. Evolution sur la période historique (1952-2012)	38
4.2.3. Evolution sur la période récente (2012-2017).....	40
4.3. ILE AUX MARINS	41
4.3.1. Présentation générale du secteur	41
4.3.2. Evolution sur la période historique (1952-2012)	42
4.3.3. Evolution sur la période récente (2012-2017).....	44

4.4. ANSE DE MIQUELON.....	46
4.4.1.Présentation générale du site	46
4.4.2.Evolution sur la période historique (1952-2012).....	46
4.4.3.Evolution sur la période récente (2012-2017)	48
4.5. DUNE DE MIQUELON	50
4.5.1.Présentation générale du site	50
4.5.2.Evolution sur la période historique (1952-2012).....	50
4.5.3.Evolution sur le période récente (2012-2017)	52
4.6. DUNE DU CHAPEAU ET DE MIRANDE	53
4.6.1.Présentation générale du secteur	53
4.6.2.Evolution sur la période historique (1952-2012).....	54
4.6.3.Evolution sur la période récente (2012-2017)	56
4.7. ISTHME DE MIQUELON-LANGLADE	57
4.7.1.Présentation générale du site	57
4.7.2.Evolution sur la période historique (1952-2012).....	59
4.7.3.Evolution sur la période récente (2012-2017)	61
5. Synthèse des évolutions	63
5.1. SAINT-PIERRE	63
5.2. ILE AUX MARINS.....	66
5.3. MIQUELON	68
6. Recommandations et perspectives de développement du réseau de suivi.....	71
6.1. PROTOCOLE DE SUIVI.....	71
6.2. SUIVIS COMPLEMENTAIRES PRECONNISES	74
6.2.1. Suivi par drone	74
6.2.2. Suivi vidéo haute fréquence	74
6.2.3. Suivi bathymétrique	75
6.2.4. Suivi hydrodynamique	75
6.2.5. Suivi post-évènement.....	76
6.3. GESTION, CAPITALISATION ET DIFFUSION DES DONNEES	76
6.3.1. Archivages des données d’acquisition	76
6.3.2. Capitalisation et diffusion des données.....	76
7. Conclusion	79
8. Bibliographie.....	81

Liste des figures

Illustration 1 : Carte de situation de Saint Pierre et Miquelon (Source IEDOM).	13
Illustration 2 – Carte géologique de Saint Pierre et Miquelon à l'échelle 1/50 000 (Blein et al., 2015)	14
Illustration 3 – Morphologie du littoral de l'archipel de Saint-Pierre et Miquelon d'après De La Torre et al., 2013	15
Illustration 4 - Observations météo-marines et localisation des instruments de mesures (d'après les données CANDHIS du CEREMA et Météo-France).....	16
Illustration 5 - Trajectoire des cyclone à proximité de Saint-Pierre et Miquelon depuis 1990. En bleu, trajectoires des cyclones qui sont passés à travers la zone délimitée en noir, centrée sur Saint-Pierre et Miquelon. En rouge, parties des trajectoires considérées comme ayant une influence sur les vagues sur l'archipel d'après la base de données IBTraACS de la NOAA (De la Torre et al., 2016).	17
Illustration 6 – Diagrammes de répartition des paramètres sur la bouée houlographique. De haut en bas et de gauche à droite : $H_{1/3}$: hauteur significative de la houle, H_{max} hauteur maximale de la houle, $T_{1/3}$: période correspondant au $H_{1/3}$, T_{max} : Période correspondant au H_{max} (Source :CANDHIS).....	18
Illustration 7 – Calcul des périodes de retour de la houle au large de Saint-Pierre et Miquelon (source :CANDHIS).....	18
Illustration 8 – Valeurs de retour de H_s et intervalles de confiance associés à plusieurs périodes de retour extrait à partir de la base de données IOWAGA sur un point d'intérêt situé au sud de l'archipel ($46^{\circ}30$ N et $56^{\circ}20$ W) la période 19890-2012. Les valeurs indiquées en italique sont présentées à titre d'information et ne doivent pas être considérées.....	19
Illustration 9 – Tableau des Références Altimétriques Maritimes à Saint Pierre et Miquelon (source :SHOM).....	19
Illustration 10 - Estimation de la période de retour du niveau marin (SWL) au port de St-Lawrence (De La Torre et al., 2016)	20
Illustration 11 - Périodes de retour du niveau d'eau (SWL) à Saint-Lawrence et intervalles de confiances associées (De La Torre et al., 2016)	20
Illustration 12 – De haut en bas : Hauteur significative de la houle, période de la houle, puissance de la houle, niveau d'eau sur la période du 01/01/2012 au 01/01/2018. Les événements de houles extrêmes apparaissent en orange, les événements cumulant houle extrême et niveau d'eau important apparaissent en rouge (sources : houlographe et marégraphe de Saint-Pierre).	22
Illustration 13 –Tableau récapitulatif des tempêtes ayant frappées Saint Pierre et Miquelon entre le 01/01/2012 et le 01/01/2018. PMVE : Pleine mer de vives-eaux ; NE : Niveau d'eau ; PHMA : Plus Hautes Mers Astronomiques ; H2ans : Niveau d'eau de période de retour de 2 ans ; NC : Non Connu.	23
Illustration 14 - Equipes de la DTAM réalisant des mesures topographique ur le terrain.....	25
Illustration 15 - Exemple de profils topographiques de plage (à gauche) et de trait de côte (à droite) réalisé par la DTAM au niveau de l'Anse de Miquelon.....	25
Illustration 16 – Sites étudiés sur Saint Pierre (Source DTAM)	26
Illustration 17 – Sites étudiés sur Miquelon (Source DTAM).....	27
Illustration 18 – Tableau récapitulatif des traits de côte relevés sur la terrain au GPS différentiel par site et par année. A titre d'informaiton apparait également le nombre de profils théoriques de référence pour chaque site. SP : Saint-Pierre et Miquelon ; IM : Ile aux Marins ; M : Miquelon.	28

Illustration 19 - Source de données utilisées pour la digitalisation du trait de côte.....	29
Illustration 20 - Exemple de délimitation du trait de côte utilisé par De La Torre et al. (2016) : A. limite de végétation ; B. limite de haut de versant ; C. limite en pied d'aménagement (Bd Ortho IGN 2005).....	29
Illustration 21 – Mesure de la distance à partir de la ligne de base pour chaque intersection avec la position historique des traits de côte. (Thieler et al., 2009).....	30
Illustration 22 - Description des paramètres calculés pour chaque transect par l'outil DSAS.....	31
Illustration 23 - Calcul de la régression linéaire pondérée sous DSAS (Thieler et al., 2009)	31
Illustration 24 – Vue générale sur l'Anse à Brossard (à gauche) et les ouvrages de protection en haut de plage (à droite) le 08/2019	33
Illustration 25 – Partie sud du cordon de l'Anse de Savoyard à gauche et enrochement sur la partie nord à droite le 08/2019	34
Illustration 26 – Vue générale sur le cordon de l'Anse Duguet à gauche et vue depuis le cordon à droite le 08/2019	34
Illustration 27 – Sud-Ouest Saint Pierre, évolution nette en mètre sur la période historique.....	35
Illustration 28 – Sud-Ouest Saint Pierre, taux d'évolution en m/an sur la période historique.	35
Illustration 29 – Sud-Ouest Saint Pierre, évolution nette en m sur la période récente.	36
Illustration 30 – Sud-Ouest Saint Pierre, taux d'évolution en m/an sur la période récente.	37
Illustration 31 – Vue générale de l'Anse à Ravenel (à gauche) et depuis le cordon (à droite) le 08/2019	37
Illustration 32 – Enrochement du cordon de Pointe Blanche (à gauche) et vue depuis le cordon en face de la Tête du Petit Havre (à droite).....	38
Illustration 33 – Les Falcoux (à gauche) et Anse à l'Allumette (à droite) le 08/2019	38
Illustration 34 – Sud-Est Saint Pierre, évolution nette en mètre sur la période historique.	39
Illustration 35 – Sud-Est Saint Pierre, taux d'évolution en m/an sur la période historique.....	39
Illustration 36 – Sud-Est Saint Pierre, évolution nette en mètre sur la période récente.....	40
Illustration 37 – Sud-Est Saint Pierre, taux d'évolution en m/an sur la période récente.	41
Illustration 38 – Île aux marins le 09/2019, en haut à gauche : cordon de galet et aménagement de protection d'une zone basse, en haut à droite : vue générale de la façade occidentale de l'île vers le sud, en bas : vue générale de l'île.....	42
Illustration 39 - Vue générale de l'isthme de l'Anse Tréouhard à gauche et vue générale sur la façade est de l'île aux Marins le 08/2019	42
Illustration 40 – Rupture au niveau de la flèche de galets sur la façade est de l'île aux Marins : photographie en 1952 à droite et 2005 à gauche (IGN)	43
Illustration 41 – Île aux Marins, évolution nette en mètre sur la période historique.	43
Illustration 42 - Île aux Marins, taux d'évolution sur la période historique.....	44
Illustration 43 – Île aux Marins, évolution sur la période récente.	45
Illustration 44 – Île aux Marins, taux d'évolution sur la période récente.....	45
Illustration 45 – Anse de Miquelon, en haut à gauche : vue du cordon depuis la partie sud l'Anse de Miquelon, en haut à droite : aménagement de protection dans la partie nord du site, en bas : vue panoramique de l'Anse Miquelon.....	46
Illustration 46 – Anse de Miquelon, évolution nette en mètre sur la période historique.	47
Illustration 47 – Anse de Miquelon, taux d'évolution annuel en m/an sur la période historique..	48

Illustration 48 – Anse de Miquelon, évolution nette en m sur la période récente.....	49
Illustration 49 – Anse de Miquelon, taux d'évolution exprimée en m/an sur la période récente.	49
Illustration 50 – Dune de Miquelon le 09/2019, à gauche : point de vue sur le site en direction du sud, à droite : point de vue sur le site en direction du nord.....	50
Illustration 51 – Dune de Miquelon, évolution nette en mètre sur la période historique.	51
Illustration 52 – Dune de Miquelon, taux d'évolution annuel moyen expérimenté en m/an sur la période historique.	51
Illustration 53 – Dune de Miquelon, évolution nette en mètre sur la période récente.....	52
Illustration 54 – Dune de Miquelon, taux d'évolution annuel moyen en m/an sur la période récente.	53
Illustration 55 – Dune de l'Etang à Chapeau le 09/2019: vue générale en direction du nord à gauche et vue depuis le cordon à gauche.....	54
Illustration 56 – Dune de Mirande : vue générale du cordon à gauche et ouvrages de protection destabilisés en haut de plage à droite.	54
Illustration 57 – Dune de Mirande, évolution nette en mètre sur la période historique.	55
Illustration 58 – Dune de Mirande, taux d'évolution exprimé en m/an sur la période historique.	55
Illustration 59 – Dunes de l'Etang du Chapeau et de Mirande, évolution nette en mètre sur la période récente.	56
Illustration 60 – Dunes de l'Etang du Chapeau et de Mirande, taux d'évolution sur la période récente.....	57
Illustration 61 – Façade occidentale de l'isthme de Miquelon-Langlade le 09/2019, en haut :vue générale du l'isthme vers le sud et du massif dunaire des Buttreaux avec l'île de Langlade en arrière plan, en bas à gauche : perré en enrochement pour la protection de la route, en bas à droite : point de vue sur la dune des Buttreaux vers le nord du site.	58
Illustration 62 – Façade orientale de l'isthme de Miquelon-Langlade le 09/2019, à gauche : massif dunaire au Nord du site, à droite : haut de plage au Centre du site.....	58
Illustration 63 - Isthme de Miquelon-Langlade, évolution nette en mètre sur la période historique (à gauche) et taux d'évolution annuel en m/an (à droite) sur la période historique	60
Illustration 64 - Isthme de Miquelon-Langlade, évolution nette (à gauche) et taux d'évolution annuel moyen (à droite) sur la période récente.....	62
Illustration 65 – Synthèse des évolutions sur la période historique (1952-2012).....	63
Illustration 66 – Synthèse des évolutions sur la période récente (1952-2012)	64
Illustration 67 – Synthèse des évolutions observées en m/an entre la période historique et récente à l'échelle des sites étudiés sur Saint-Pierre.....	65
Illustration 68 – Synthèse des évolutions sur la période historique (1952-2012).....	66
Illustration 69 - Synthèse des évolutions sur la période récente (2012-2017)	66
Illustration 70 - Synthèse des évolutions observées en m/an entre la période historique et récente à l'échelle des sites étudiés sur l'île aux Marins.....	67
Illustration 71 - Synthèse des évolutions sur la période historique (1952-2012)	68
Illustration 72 - Synthèse des évolutions sur la période récente (2012-2017)	69
Illustration 73 - Synthèse des évolutions observées en m/an entre la période historique et récente à l'échelle des sites étudiés sur Miquelon	70
Illustration 74 – Synthèse des recommandations concernant le protocole de suivi.....	72

Illustration 75 - Quad utilisé par le Réseau d'Observation du Littoral en Corse pour le levé du trait de côte dans la plaine côtière orientale (BRGM)	73
Illustration 76 - Drone de la DTAM à gauche et modélisation de la pointe Diamant par photogrammétrie à droite (source DTAM)	74
Illustration 77 - Dispositif de suivi par imagerie vidéo de type SolarCam®, utilisé en Guadeloupe pour le suivi des échouages de sargasse et de l'évolution du trait de côte	75
Illustration 78 – Suivi bathymétrique des lagunes du Grand Etang de Miquelon (à gauche) et du Grand Barrachois (à gauche) réalisé par la DTAM.....	75
Illustration 79 – Portail d'information géographique de Saint-Pierre et Miquelon	77

1. Introduction

Le littoral de l'archipel de Saint-Pierre et Miquelon représente un linéaire d'environ 200 km constitué d'environnements rocheux, sédimentaires et artificialisés. Ce littoral est soumis à la fois au recul du trait de côte qui affecte principalement les côtes basses meubles (cordons de sables ou de galets et falaises de moraines) et aux phénomènes de submersions marines dans les zones basses où est implantée la population.

Consciente de la vulnérabilité du littoral de l'archipel au phénomène d'érosion, la DTAM a mis en place un réseau de suivi du trait de côte. Dans ce cadre, elle a bénéficié d'un accompagnement du CETE en 2011 pour l'achat du matériel de mesure (GPS RTK), la formation de son personnel, la définition d'un protocole et l'identification des sites à étudier (Bourban et Jouanneau, 2011).

Depuis 2012 la DTAM réalise ainsi un suivi régulier du littoral de Saint-Pierre et Miquelon. Actuellement 23 sites sont suivis par la DTAM : 14 sites sur Saint-Pierre et 9 sites sur Miquelon. Au total, ce réseau de suivi couvre un linéaire côtier de 13 km à Saint-Pierre, dont 121 profils de plage, et 41 km à Miquelon comprenant 156 profils de plage. Les sites suivis concernent l'ensemble des côtes basses meubles de l'archipel. A ce titre la DTAM a adhéré depuis 2018 au réseau national des observatoires du trait de côte.

C'est dans ce cadre que la DTAM a sollicité le BRGM afin de l'accompagner pour le traitement et l'analyse des données topographiques en termes de dynamique du trait de côte sur la période 2012-2017.

Après une description du contexte physique du littoral de l'archipel de Saint-Pierre et Miquelon ainsi que la présentation du protocole de suivi réalisé par la DTAM, les données sur l'évolution du trait de côte sur la période historique (1952-2012) et récente (2012-2017) sont présentées. Enfin, des recommandations techniques et des perspectives de développement du réseau de suivi sont proposées.

2. Contexte

2.1. SITUATION GEOGRAPHIQUE

Saint-Pierre-et-Miquelon est un archipel français en Amérique du Nord, situé dans le golfe du Saint-Laurent l'océan au sud de Terre-Neuve (47°N - 56°W).

L'archipel est constitué de trois îles principales : Saint Pierre au sud-est d'une superficie de 26 km², Miquelon d'une superficie de 110 km² et Langlade d'une superficie de 91 km². Miquelon est en réalité constituée de 3 îles, reliées entre elles par des cordons sableux : le Cap au Nord, Grande Miquelon au Centre et Langlade au sud (Illustration 1). Le point culminant de l'archipel est situé au Morne de la Grande Montagne à 240 m à Miquelon.

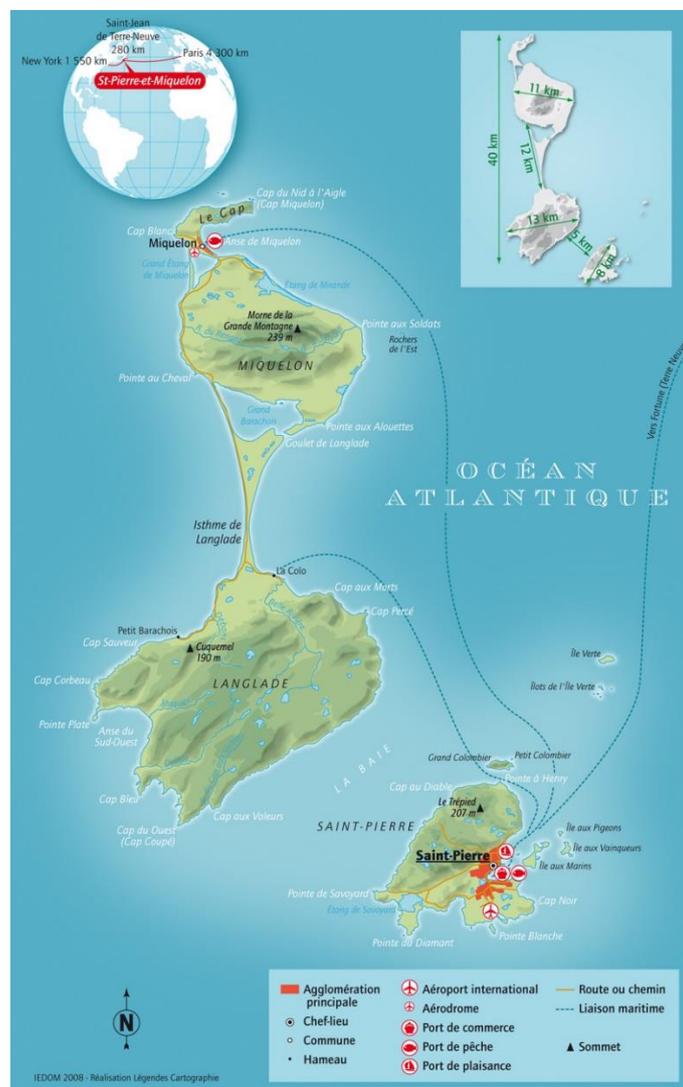


Illustration 1 : Carte de situation de Saint Pierre et Miquelon (Source IEDOM).

2.2. CONTEXTE GEOLOGIQUE ET GEOMORPHOLOGIQUE

Saint-Pierre et la presqu'île de Grande Miquelon sont formés de roches volcaniques alors que les presqu'îles de Langlade et du Cap sont constituées de roches métamorphiques diverses fruit de l'orogénèse de la chaîne des Appalaches au Précambrien (illustration 2). L'ensemble de l'archipel a été fortement modelé par les glaciations au cours du quaternaire et les formations de moraines représentent la majeure partie du stock sédimentaire (Blein et al., 2015).

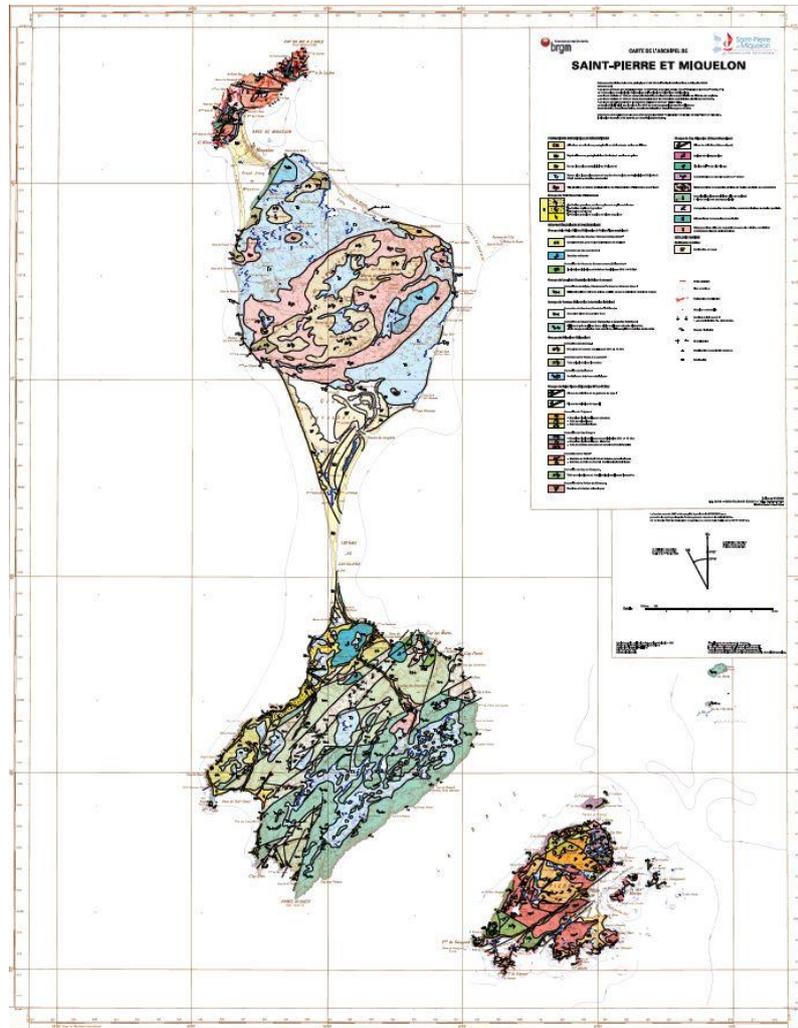


Illustration 2 – Carte géologique de Saint Pierre et Miquelon à l'échelle 1/50 000 (Blein et al., 2015) .

Sur Saint-Pierre, le littoral est constitué d'une alternance de côtes rocheuses et de côtes basses meubles délimitées par des caps rocheux (Illustration 3). D'ampleur réduite, les petites plages de poche sont principalement constituées de galets, issus du démantèlement des moraines glaciaires environnantes et de l'altération du socle rocheux (champs de bloc).

Sur Miquelon, les cordons sédimentaires constitués de sables, de graviers et de galets sont nettement plus développés, les formations dunaires peuvent atteindre plusieurs mètres de haut. L'isthme reliant la presqu'île de Langlade à Miquelon représente le plus grand cordon de l'archipel avec 12 km de long qui s'étend du nord au sud en forme de Y. L'isthme s'est formé en plusieurs phases successives pour finalement rattacher Langlade à Miquelon il y a environ 400 ans (Robin, 2007 ; Billy, 2014). Ce cordon reste très mobile et la route d'accès à Langlade a dû être déplacée à deux reprises.

Plusieurs cordons de l'archipel de Miquelon abritent également des formations lagunaires importantes (Dune de Miquelon, Dune de Mirande et du Chapeau, Nord de l'Isthme de Miquelon-Langlade).

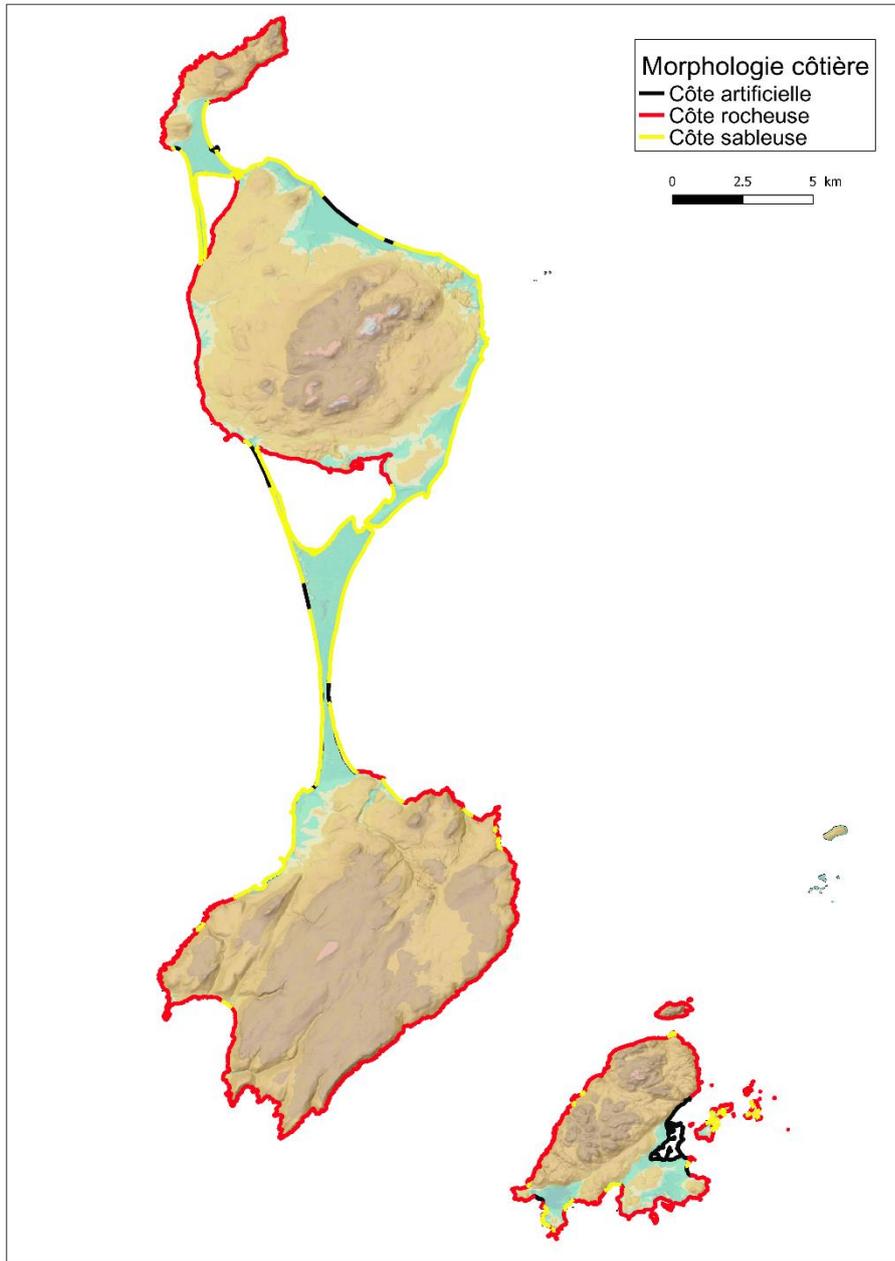


Illustration 3 – Morphologie du littoral de l'archipel de Saint-Pierre et Miquelon d'après De La Torre et al., 2013

2.3. CONTEXTE CLIMATIQUE ET HYDRODYNAMIQUE

Le climat est de type océanique froid, avec de fortes influences liées aux masses d'air froid en provenance des régions arctiques et aux eaux marines froides amenées par le courant de Baffin ou du Labrador. L'amplitude des températures est grande, avec en moyenne -3°C en février et $+16^{\circ}\text{C}$ en août. L'eau de mer a un rôle important dans la régulation du climat de la région, elle peut varier entre 0 et 15°C (Météo-France).

L'archipel est régulièrement exposé à des dépressions de l'Atlantique Nord en période hivernale (qui atteignent l'archipel par l'ouest ; illustration 4) et par les tempêtes extratropicales entre juin et octobre. Les tempêtes extratropicales sont à l'origine des queues de cyclone en provenance de la zone tropicale de l'Océan Atlantique et qui remontent le long des côtes orientales de l'Amérique du nord.

Les précipitations sont importantes avec 1 326 mm par an en moyenne, avec un pic observé en automne. La quantité de neige est très variable d'une année à l'autre (Météo-France).

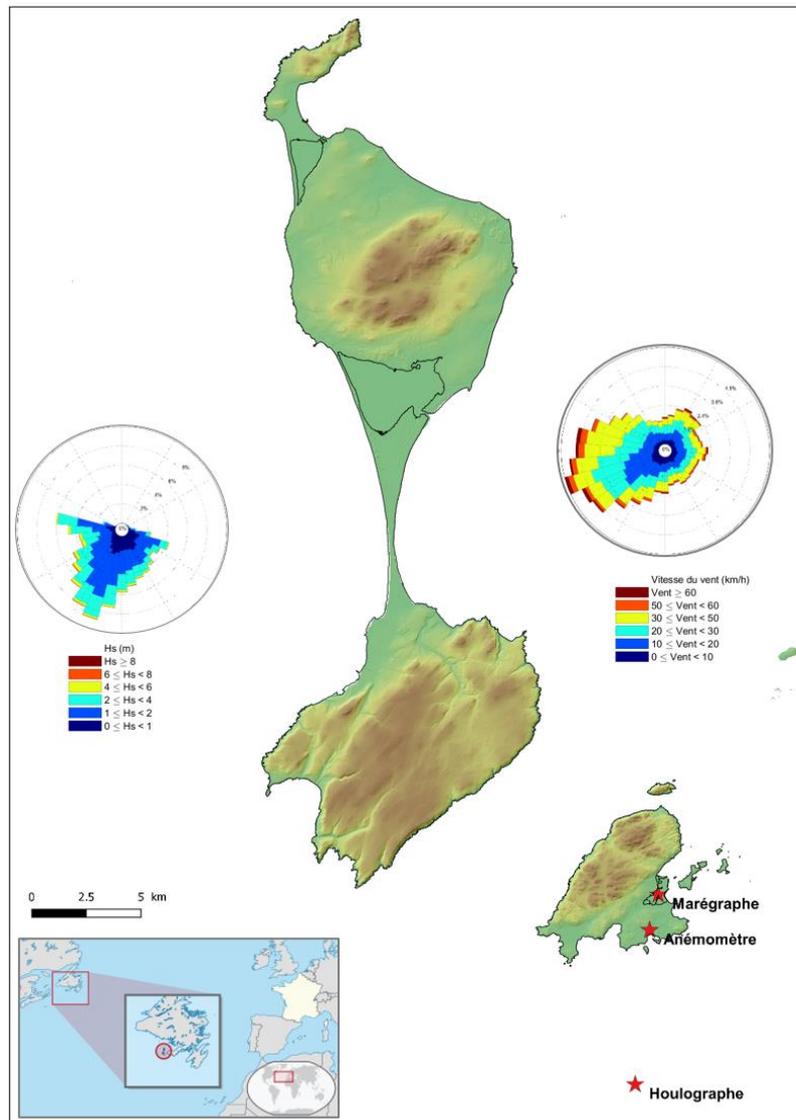


Illustration 4 - Observations météo-marines et localisation des instruments de mesures (d'après les données CANDHIS du CEREMA et Météo-France)

2.3.1. Le vent

L'archipel est très exposé aux vents générés par les dépressions qui se forment dans l'Atlantique Nord. Episodiquement, l'archipel est également exposé aux effets des cyclones tropicaux remontant la côte est américaine depuis la zone tropicale entre les mois de juin et octobre (Illustration 5). Les études montrent que les vents dominants dans cette région proviennent

principalement du secteur ouest-sud-ouest (Météo France). La rose des vents indiquée sur l'illustration 4, représente la fréquence, l'intensité et la direction du vent sur la période de 2012 à 2017.

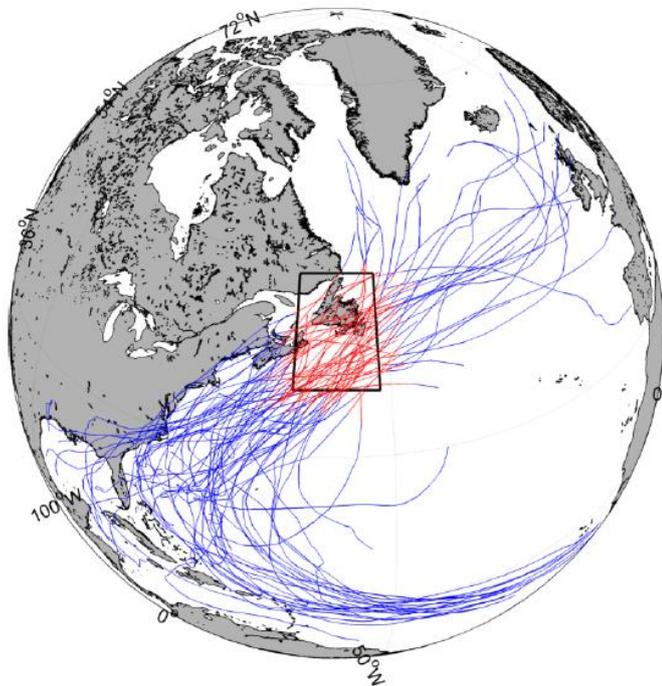


Illustration 5 - Trajectoire des cyclone à proximité de Saint-Pierre et Miquelon depuis 1990. En bleu, trajectoires des cyclones qui sont passés à travers la zone délimitée en noir, centrée sur Saint-Pierre et Miquelon. En rouge, parties des trajectoires considérées comme ayant une influence sur les vagues sur l'archipel d'après la base de données IBTraACS de la NOAA¹ (De la Torre et al., 2016).

2.3.2. La houle

Les données de houle proviennent du houlographe installé à 6 km au large de Saint-Pierre depuis novembre 2011 (Illustration 4). La valeur de hauteur significative (Hs) moyenne est de 1,80 m et la période moyenne de 7,30 sec. L'orientation dominante des houles concerne le secteur sud-sud-ouest. L'illustration 6 représente les histogrammes de fréquences des principaux paramètres mesurés, les houles les plus fréquentes atteignent 1 à 3 m pour une période comprise entre 5 et 10 sec.

Les évènements de forte intensité sont généralement associés aux dépressions hivernales de l'Atlantique Nord (décembre à mars) et aux tempêtes extratropicales (août à octobre).

¹ <https://www.ncdc.noaa.gov/ibtracs/>

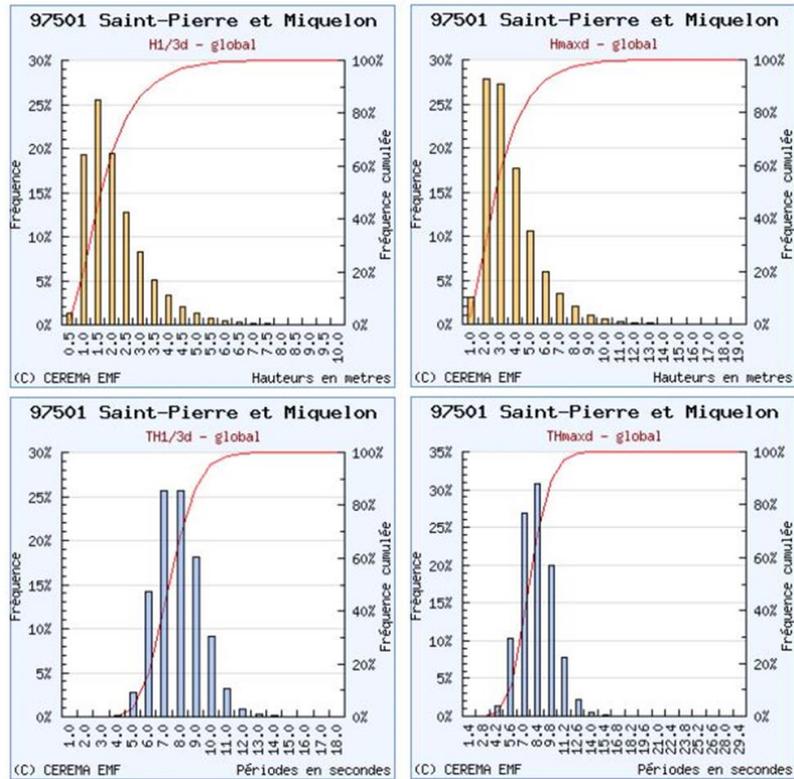


Illustration 6 – Diagrammes de répartition des paramètres sur la bouée houlographique. De haut en bas et de gauche à droite : $H_{1/3}$: hauteur significative de la houle, H_{max} hauteur maximale de la houle, $T_{1/3}$: période correspondant au $H_{1/3}$, T_{max} : Période correspondant au H_{max} (Source :CANDHIS).

L'illustration 7 représente les périodes de retour des houles extrêmes d'après les valeurs observées sur le houlographe sur la période d'observation. Les houles de périodes de retour de 5 à 20 ans sont comprises entre 8 et 9 m.

Période de retour	$H_{1/3}$ (mètres)		Int. de Conf. 70% (mètres)		Int. de Conf. 95% (mètres)	
	GPD	Loi Exp.	GPD	Loi Exp.	GPD	Loi Exp.
5 ans	9,21	9,30	8,80 à 9,38	8,88 à 9,72	8,52 à 9,56	8,57 à 10,25
10 ans	9,45	9,79	8,96 à 9,63	9,28 à 10,31	8,63 à 9,84	8,89 à 10,96
20 ans	9,64	10,27	9,07 à 9,82	9,67 à 10,89	8,69 à 10,12	9,21 à 11,67

Ajustement statistique :

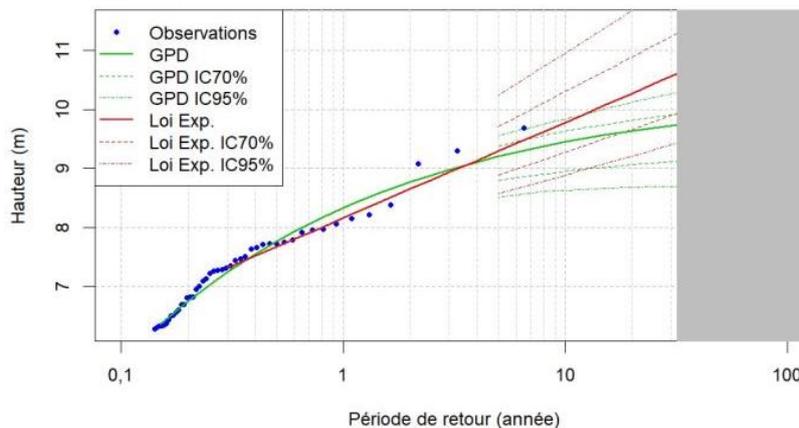


Illustration 7 – Calcul des périodes de retour de la houle au large de Saint-Pierre et Miquelon (source :CANDHIS).

Une étude statistique des houles extrêmes a également été réalisée dans le cadre de projet VULIT, hors événements cyclonique (De La Torre et al., 2016). Les résultats sont présentés dans le tableau ci-dessous pour un point d'intérêt situé au sud de l'archipel sur la période 1990-2012 (Illustration 8).

Période de retour (ans)	Hs (m)	Borne inf. int. conf. 70% (m)	Borne sup. int. conf. 70% (m)	Borne inf. int. conf. 95% (m)	Borne sup. int. conf. 95% (m)
2	8.23	8.11	8.36	8.01	8.48
5	8.88	8.69	9.06	8.54	9.23
10	9.33	9.08	9.58	8.88	9.83
20	9.76	9.42	10.11	9.15	10.46
50	10.30	9.80	10.79	9.44	11.33
<i>100</i>	<i>10.67</i>	<i>10.04</i>	<i>11.30</i>	<i>9.61</i>	<i>12.03</i>
<i>200</i>	<i>11.03</i>	<i>10.25</i>	<i>11.81</i>	<i>9.75</i>	<i>12.76</i>
<i>500</i>	<i>11.47</i>	<i>10.49</i>	<i>12.46</i>	<i>9.89</i>	<i>13.78</i>
<i>1000</i>	<i>11.79</i>	<i>10.63</i>	<i>12.94</i>	<i>9.97</i>	<i>14.58</i>

Illustration 8 – Valeurs de retour de Hs et intervalles de confiance associés à plusieurs périodes de retour extrait à partir de la base de données IOWAGA sur un point d'intérêt situé au sud de l'archipel (46°30 N et 56°20 W) la période 19890-2012. Les valeurs indiquées en italique sont présentées à titre d'information et ne doivent pas être considérées.

L'étude des houles cycloniques sur le même point d'intérêt et la même période indique que le maximum de Hs cyclonique vaut 9,47 m. Cette valeur se situe entre les valeurs de retour 10 ans et 20 ans des Hs non cycloniques (Illustration 8).

2.3.3. Les niveaux marins

La marée

La marée à Saint-Pierre et Miquelon est de type semi-diurne, l'amplitude maximale de la marée est de 2,30 m pour la plus forte marée astronomique et 1,7 m en moyenne pour une marée de vives eaux (SHOM, 2017 ; Illustration 9). Il s'agit donc d'un environnement côtier microtidal (côtes dont le marnage n'excède pas 2 m). Le niveau moyen se situe à 0,13 m au port de Saint-Pierre par rapport au référentiel terrestre.

Les références altimétriques maritimes du SHOM sur l'archipel sont présentées dans le tableau suivant.

Nom	Type	Lat.	Long.	Et.	Constantel	PHMA	PMVE	PMME	NM	BMME	BMVE	PBMA
Saint-Pierre [Saint-Pierre et Miquelon]	R	46 47 N	56 10 W		2014	02.61	02.25	01.90	01.40	00.95	00.55	00.30
Iles Saint-Pierre-et-Miquelon île Miquelon	S	47 06 N	56 22 W		2014	02.59	02.25	01.90	01.39	00.95	00.55	00.29

Nom	Repère fondamental	Organisme	Date	RF/ZH	RF/Ref	ZH/Ref	ZH/Elli	Ref
Saint-Pierre [Saint-Pierre et Miquelon]	AB-2	DTAM	2014	4.190	2.921	-1.269	-2.65	Danger 50
Iles Saint-Pierre-et-Miquelon île Miquelon	Clou arpentage avec collerette scellé dans une dalle carrée en béton de 1m de côté, peinte en blanc. La dalle se situe à proximité (Sud) du milieu de la piste d'atterrissage de l'aérodrome (IGN 97501W)	IGN	2014	2.964	2.000	-0.964	-2.82	Danger 50

Illustration 9 – Tableau des Références Altimétriques Maritimes à Saint Pierre et Miquelon (source :SHOM).

Les surcote marines

En plus de la marée, le passage des dépressions et des cyclones à proximité de l'archipel peut induire une surélévation temporaire du niveau de la mer. D'après De La Torre et al. (2016), le niveau marin de période de retour 100 ans est estimé à environ 3,30 m sur le marégraphe de St-Lawrence situé à proximité de l'Archipel à Terre-Neuve (Illustration 10 et Illustration 11).

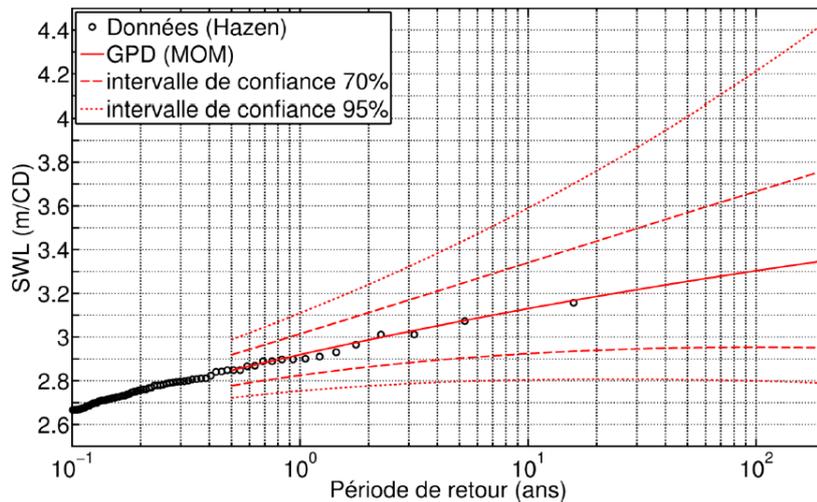


Illustration 10 - Estimation de la période de retour du niveau marin (SWL) au port de St-Lawrence (De La Torre et al., 2016)

Période de retour (ans)	SWL (m/CD)	Borne inf. int. conf. 70% (m)	Borne sup. int. conf. 70% (m)	Borne inf. int. conf. 95% (m)	Borne sup. int. conf. 95% (m)
2	2.99	2.86	3.11	2.78	3.24
5	3.07	2.90	3.24	2.80	3.43
10	3.13	2.92	3.34	2.80	3.59
20	3.19	2.94	3.44	2.81	3.76
50	3.25	2.95	3.57	2.81	4.01
100	3.30	2.95	3.67	2.80	4.21
200	3.35	2.95	3.76	2.79	4.43
500	3.41	2.94	3.89	2.77	4.76
1000	3.45	2.93	3.98	2.75	5.02

Illustration 11 - Périodes de retour du niveau d'eau (SWL) à Saint-Lawrence et intervalles de confiances associées (De La Torre et al., 2016)

2.3.4. Les courants marins

Il n'existe que très peu d'informations sur les courants marins à proximité des côtes de l'archipel (Lazure et al., 2011). Les domaines de modélisation des courants réalisés dans cette région se situent tous en bordure de l'archipel de Saint Pierre et Miquelon (Han et al., 1999 et 2008). Néanmoins, malgré leurs incertitudes, ces deux études font apparaître que les courants moyens autour de l'archipel seraient plutôt orientés vers le Nord avec des vitesses de l'ordre de la dizaine de cm/s.

Les modélisations de la marée réalisées par SAFEGE en 2006, indiquent que les courants de marée peuvent atteindre des valeurs proches de 2 nœuds en vives eaux autour de Saint-Pierre.

Des zones de courants forts ont également été identifiées dans le sud-ouest de Langlade, au nord de Miquelon et à l'ouest de la pointe aux Soldats.

D'une manière générale, les courants marins sont majoritairement influencés par la circulation à l'échelle régionale induite par les courants du Labrador ou du Saint-Laurent et à l'influence des reliefs sous-marins (Lazure et al., 2011). Le courant du Labrador est un courant d'eau froide en provenance de l'Atlantique Nord et qui longe la côte du Labrador ainsi que la côte orientale de l'île de Terre-Neuve. Il finit par se diviser en deux branches dont l'une part vers l'Ouest, et l'autre vers le Sud-Est. Le courant du Saint-Laurent est quant à lui lié au fleuve et golfe éponyme, qui s'écoule en direction de l'Est.

2.4. EVENEMENTS DE FORTE INTENSITE SUR LA PERIODE ETUDIEE

L'illustration 12 représente les paramètres hydrodynamiques observés en termes d'état de mer et de niveau d'eau sur la période 2012 à 2017. Cette figure permet d'appréhender la fréquence et l'intensité des événements de forte intensité sur la période étudiée, le graphique de puissance fait particulièrement ressortir l'aspect très agité des périodes hivernales.

La valeur seuil de détection des fortes tempêtes a été établie à 7.20 m de hauteur de houle significative à partir des informations de la base de données CANDHIS (houlographe de Saint-Pierre), ce qui représente une moyenne de 4 événements par an, cette valeur est appelée Hs_{seuil} . La durée de chaque événement est celle pendant laquelle la valeur de Hs dépasse $2/5$ de Hs_{seuil} ($Hs_{\text{seuil } 2/5}$). Sur l'ensemble de la période 19 événements sont identifiés. Ces tempêtes sont représentées en Orange sur l'illustration 12.

Un second tri des événements de forte intensité a été effectué à partir des niveaux d'eau avec la valeur de la PHMA (Plus Haute Marée Astronomique), estimé à 2.61m au Port de Saint Pierre d'après les données du SHOM. Les événements dépassant la valeur de PHMA sont représentés en Orange sur le graphique des niveaux d'eau (Illustration 12).

Les événements associant des valeurs de Hs supérieures au seuil de détection des tempêtes et un niveau d'eau dépassant au PHMA (2,61 m) sont représentées en rouge sur l'ensemble des graphiques. Cinq événements sont identifiés sur l'ensemble de la période d'observation.

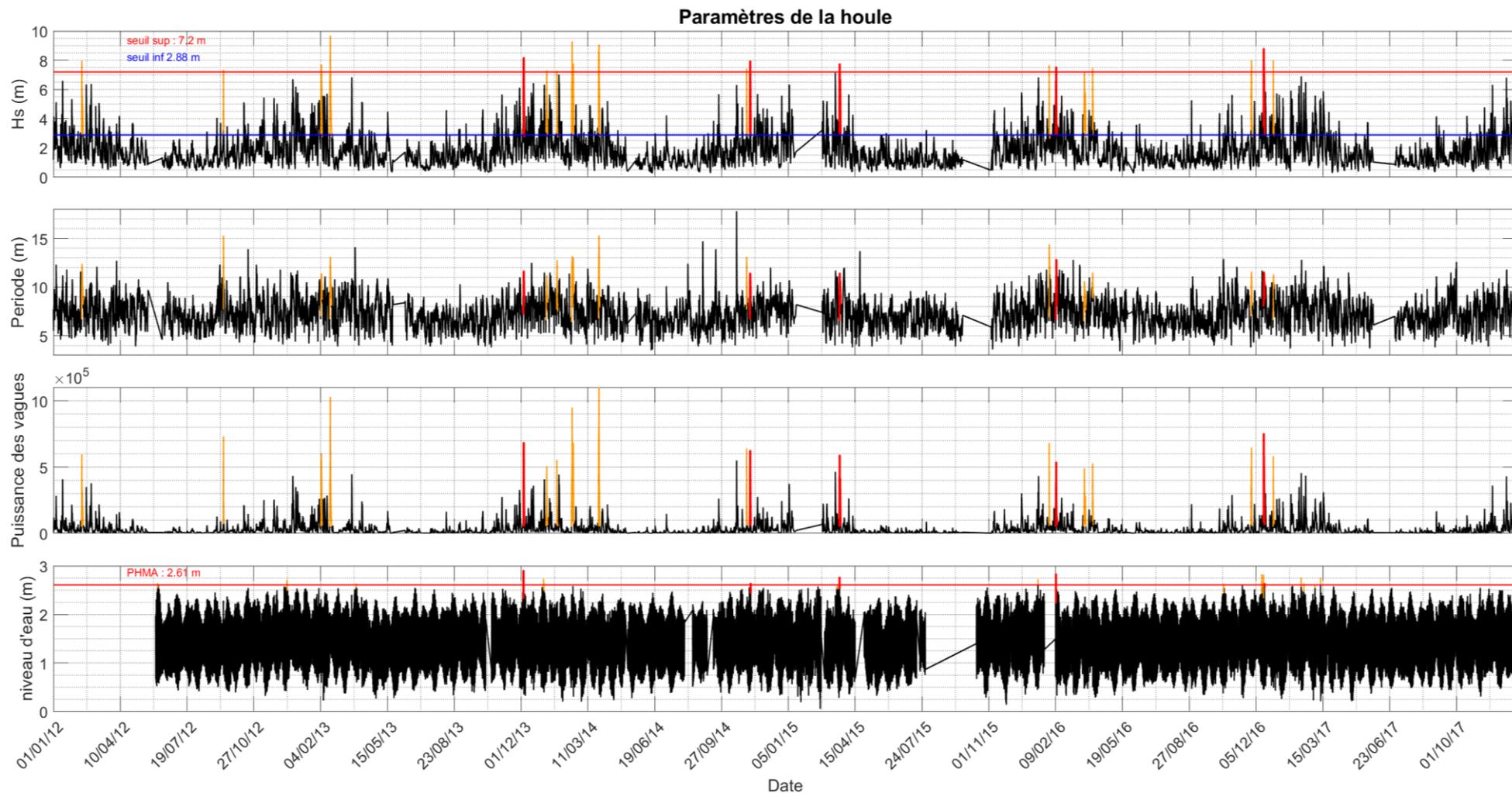


Illustration 12 – De haut en bas : Hauteur significative de la houle, période de la houle, puissance de la houle, niveau d'eau sur la période du 01/01/2012 au 01/01/2018. Les événements de houles extrêmes apparaissent en orange, les évènements cumulant houle extrême et niveau d'eau important apparaissent en rouge (sources : houlographe et marégraphe de Saint-Pierre).

Le tableau suivant reprend les principaux paramètres associés à ces évènements en termes d'état de mer et de niveau d'eau (Illustration 13). Les évènements associant houles et niveaux d'eau extrêmes apparaissent en rouge vif. Les évènements avec un niveau d'eau compris entre la PMVE (Pleine Mer de Vives Eaux) et la PHMA sont indiqués en rouge et ceux ne dépassant pas la PMVE en rouge pâle.

Date début	Date fin	Durée (jours)	Pic Hs (m.)	Pic T (sec.)	Direction au pic (°)	Puissance cumulée (Kw)	Niveau d'eau	
							Indice	Valeur (m)
20120212	20120214	2,4	8	12,4	153	510	NC	NC
20120911	20120912	0,7	7,4	15,3	168	168	PMVE < NE < PHMA	2,29
20130204	20130206	2,4	7,7	11,4	201	671	PMVE < NE < PHMA	2,31
20130217	20130220	2,8	9,7	13,1	232	796	NE < PMVE	2,04
20131204	20131205	1,4	8,2	11,6	220	363	PHMA < NE < H2ans	2,90
20140107	20140109	2,5	7,3	11,2	162	450	PMVE < NE < PHMA	2,30
20140123	20140124	1,6	7,3	12,8	143	250	NE < PMVE	2,24
20140214	20140217	3,5	9,3	13,2	203	1170	PMVE < NE < PHMA	2,59
20140326	20140328	2	9,1	15,3	168	856	PMVE < NE < PHMA	2,26
20141103	20141104	1,1	7,4	13,1	211	232	NE < PMVE	2,21
20141108	20141109	1,1	7,9	11,4	201	313	PHMA < NE < H2ans	2,65
20150322	20150324	1,8	7,7	11,4	201	518	PHMA < NE < H2ans	2,78
20160129	20160131	1,2	7,7	14,4	135	240	NC	NC
20160209	20160210	1,9	7,5	12,8	190	358	PHMA < NE < H2ans	2,83
20160321	20160325	3,3	7,2	10,6	171	579	PMVE < NE < PHMA	2,37
20160404	20160405	1,3	7,5	11,5	169	319	NE < PMVE	2,01
20161127	20161129	1,6	8	11,6	167	442	PMVE < NE < PHMA	2,31
20161216	20161217	1,7	8,8	11,5	237	510	PHMA < NE < H2ans	2,65
20161230	20161231	1,4	8	11,3	139	288	PMVE < NE < PHMA	2,45
20171225	20171229	3,3	7,7	11,2	202	832	NE < PMVE	2,18

Illustration 13 – Tableau récapitulatif des tempêtes ayant frappées Saint Pierre et Miquelon entre le 01/01/2012 et le 01/01/2018. PMVE : Pleine mer de vives-eaux ; NE : Niveau d'eau ; PHMA : Plus Hautes Mers Astronomiques ; H2ans : Niveau d'eau de période de retour de 2 ans ; NC : Non Connue.

Il est ainsi recensé une vingtaine d'évènements météo-marins sur l'ensemble de la période 2012-2017. Il apparaît que les évènements de forte intensité se produisent tous entre septembre et mars avec une direction dominante des houles de secteur sud au pic d'intensité. Deux évènements sont identifiés en 2012, trois en 2013, six en 2014, un en 2015, sept en 2016 et un en 2017. La durée moyenne des évènements, estimée à partir du pic d'intensité de la houle, est d'environ 2 jours.

Cinq évènements associant de forte houles à des niveaux d'eau important dépassant le PHMA mais inférieurs à la période de retour 2 ans sont identifiés (indiqué en rouge vif) :

- du 04 au 05 décembre 2013 ;
- du 08 au 09 novembre 2014 ;
- du 22 au 24 mars 2015 ;
- du 09 au 10 février 2016 ;
- du 16 au 17 décembre 2016.

3. Présentation des données et méthodologie

3.1. SUIVI TOPOGRAPHIQUE DE LA DTAM SUR LA PERIODE RECENTE

3.1.1. Protocole de suivi

Depuis 2012 un suivi topographique du littoral de Saint-Pierre et Miquelon est réalisé par la DTAM. A ce titre la DTAM a adhéré depuis 2018 au réseau national des observatoires du trait de côte. Ce suivi est réalisé à l'aide de GPS différentiel en mode RTK permettant une précision centimétrique des levés (Illustration 14).



Illustration 14 - Equipes de la DTAM réalisant des mesures topographique ur le terrain

Le protocole d'acquisition a été défini avec l'aide du CETE Normandie (CETE, 2011). Il repose sur l'acquisition annuelle de la position du trait de côte et des profils de plage à l'échelle de la cellule sédimentaire (Illustration 15). Les traits de côte permettent de suivre l'avancée et le recul des cordons sableux. Les profils de plages, perpendiculaires à la côte, permettent eux de suivre la morphologie de la plage et de suivre l'évolution du stock sédimentaire à l'échelle du profil (engraissement ou perte de sédiment).

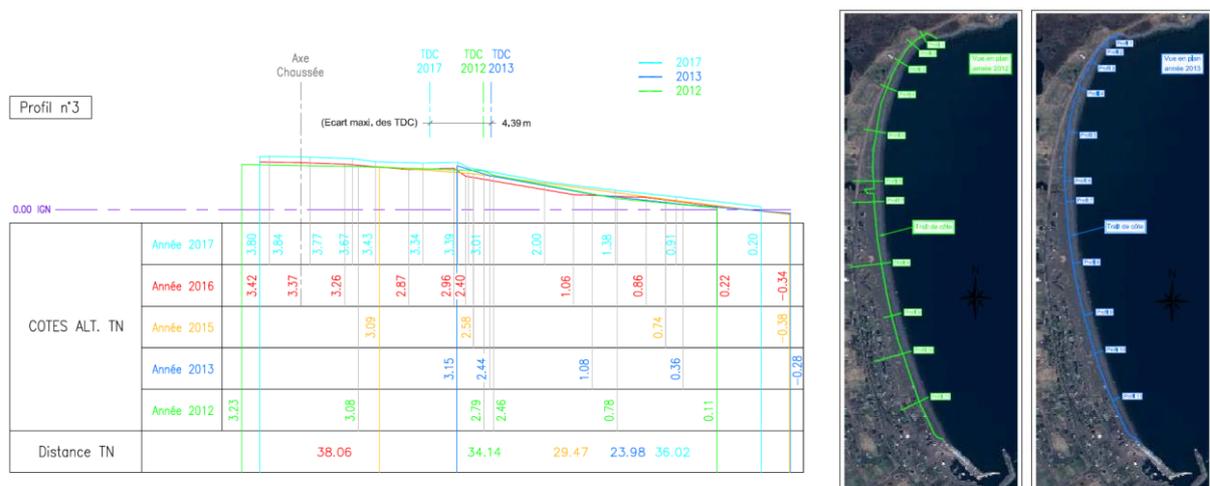


Illustration 15 - Exemple de profils topographiques de plage (à gauche) et de trait de côte (à droite) réalisé par la DTAM au niveau de l'Anse de Miquelon

La position du trait de côte est déterminée soit à partir (i) de la limite de végétation, (ii) de la rupture morphologique dans le profil de plage (talus d'érosion par exemple), ou (iii) de la position du pied des ouvrages, selon les contextes rencontrés sur le terrain.

Les profils de plages sont levés à partir de profils de référence préalablement déterminés permettant de comparer les observations d'une année sur l'autre. Avant 2014, la DTAM n'avait pas déterminé de profils de référence. Les observations ne sont donc pas directement comparables entre la période 2012-2013 et 2014-2017.

Par ailleurs, les informations sur les références altimétriques utilisées n'étaient pas les mêmes entre ces deux périodes, ce qui pose une difficulté supplémentaire pour comparer les observations sur les profils de plages. L'IGN a effectué une mission sur l'archipel en 2018 afin de réviser les données géodésiques sur l'archipel par rapport à un nouveau modèle de Géoïde.

3.1.2. Sites étudiés

Actuellement 23 sites sont suivis par la DTAM sur l'ensemble de l'archipel : 14 sites sur Saint-Pierre et 9 sites sur Miquelon. Les sites suivis concernent la quasi-totalité des côtes basses meubles de l'archipel. Au total, ce réseau de suivi représente un linéaire côtier de 13 km à Saint-Pierre, dont 121 profils de plage (Illustration 16), et 41 km à Miquelon comprenant 156 profils de plage (Illustration 17).

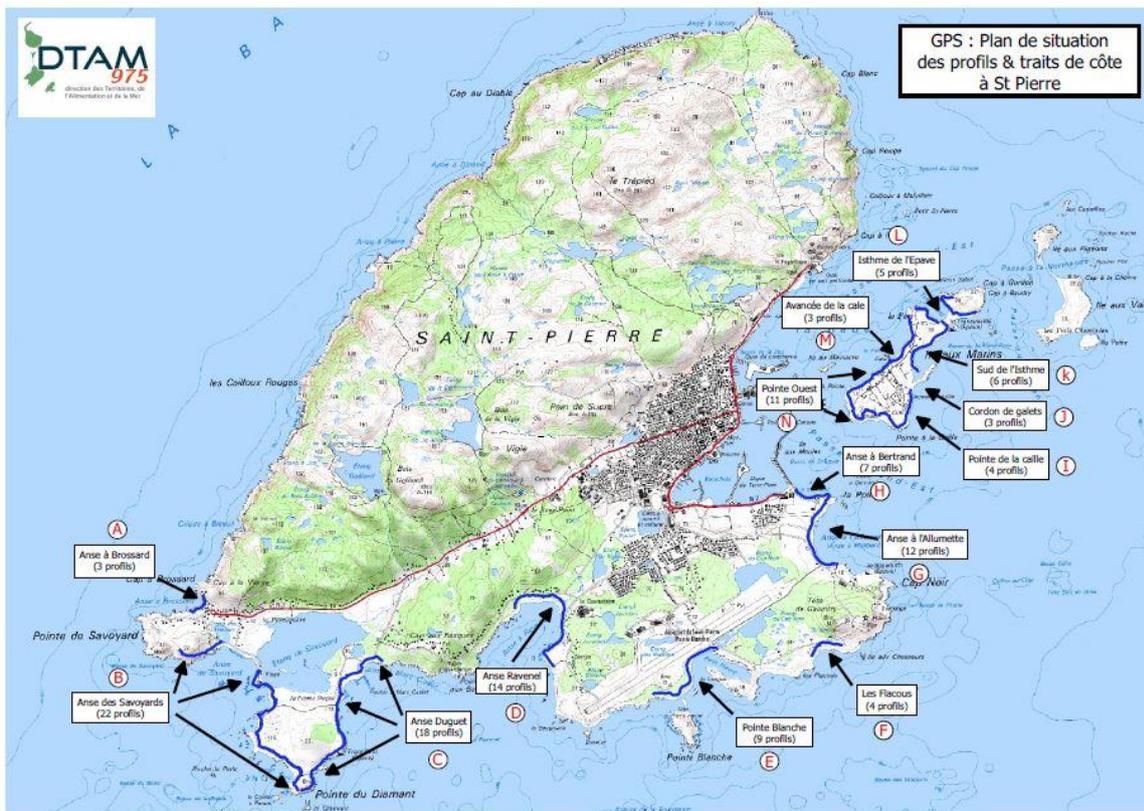


Illustration 16 – Sites étudiés sur Saint Pierre (Source DTAM)

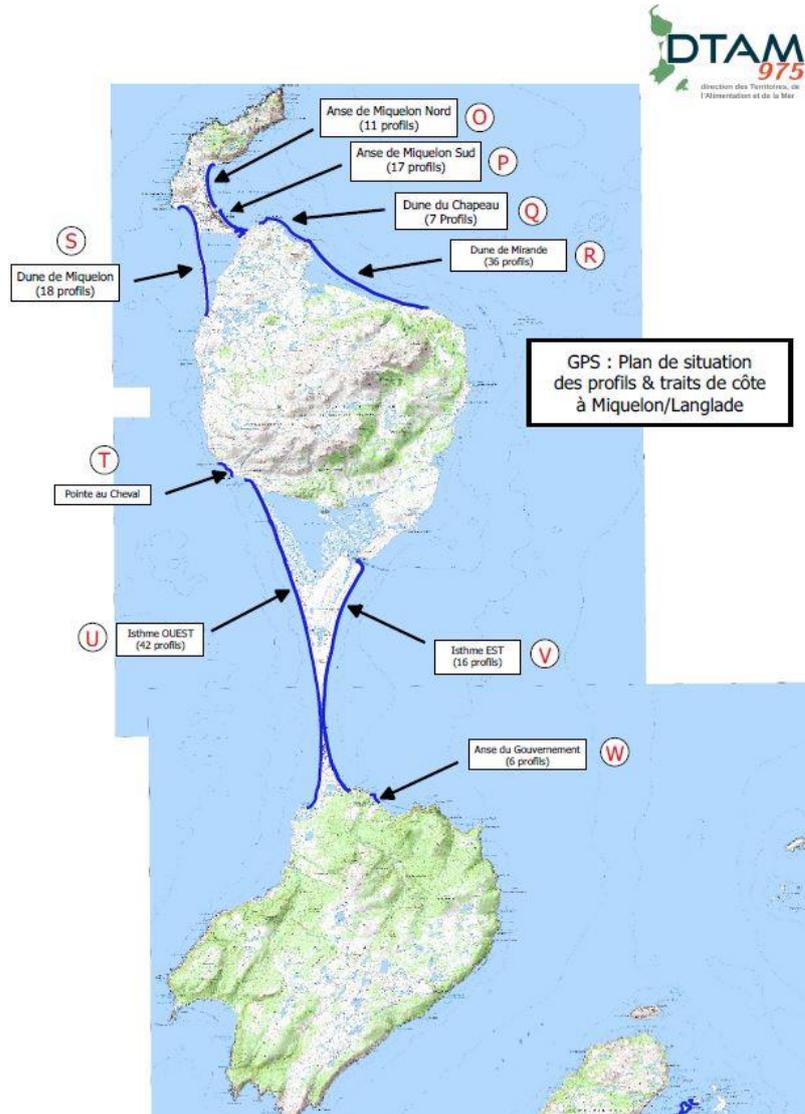


Illustration 17 – Sites étudiés sur Miquelon (Source DTAM)

3.1.3. Fréquence d'acquisition

Le tableau présenté en Illustration 18 indique pour chaque année les levés réalisés par site.

La fréquence d'acquisition n'est pas régulière en fonction des sites et des années. Cependant, hormis les sites situés sur l'île aux Marins, chaque site a été levé au moins une fois tous les deux ans pour la position du trait de côte.

Ile	ID DTAM	Nom du site	Nb Profils théoriques	Acquisition trait de côte					
				2012	2013	2014	2015	2016	2017
SP	A	Anse à Brossard	3	X	X			X	
SP	B	Anse des Savoyards	22	X	X	X		X	
SP	C	Anse Duguet	18	X	X	X		X	
SP	D	Anse Ravenel	14		X	X		X	
SP	E	Pointe Blanche	9	X	X	X	X	X	
SP	F	Les Flacous	4	X	X		X	X	
SP	G	Anse à l'Allumette	12	X	X	X	X	X	
SP	H	Anse à Bertrand	7	X	X	X		X	
IM	I	Pointe de la Caille	4	X	X			X	
IM	J	Cordon de Galets	3		X				
IM	K	Sud de l'Isthme	6	X	X				
IM	L	Isthme de l'Epave	5		X				
IM	M	Avancée de la Cale	3		X				
IM	N	Pointe Ouest	11	X	X			X	
M	O	Anse de Miquelon Nord	11	X	X		X	X	X
M	P	Anse de Miquelon Sud	17	X	X		X		X
M	Q	Dune du Chapeau	7	X			X		X
M	R	Dune de Mirande	36	X	X		X		X
M	S	Dune de Miquelon	18	X			X		X
M	T	Pointe au Cheval	0	X			X		X
M	U	Isthme Ouest	42	X	X		X		X
M	V	Isthme Est	16	X	X		X		X
M	W	Anse du Gouvernement	6	X	X		X		X

Illustration 18 – Tableau récapitulatif des traits de côte relevés sur la terrain au GPS différentiel par site et par année. A titre d'information apparaît également le nombre de profils théoriques de référence pour chaque site. SP : Saint-Pierre et Miquelon ; IM : Ile aux Marins ; M : Miquelon.

3.1.4. Format des données

Les données transmises pas la DTAM dans le cadre de cette étude se composent d'un ensemble de fichiers « .CSV » avec la position X,Y,Z et les annotations de la DTAM concernant la nature du trait de côte ainsi que des profils de plage.

Des traitements préalables ont été réalisés sous Qgis afin de convertir les fichiers de points en polygones représentant la position du trait de côte pour une année donnée et filtrer les positions aberrantes.

3.2. EVOLUTION SUR LA PERIODE HISTORIQUE (1952-2012)

Les données utilisées pour analyser l'évolution du trait de côte sur la période historique sont issues du projet VULIT (De La Torre, 2016). Elles sont tirées de la photo-interprétation des campagnes aériennes de l'IGN et des images satellites Pléiades (Illustration 19).

Année	Source	Nature des clichés	Résolution de l'image
1952	BD HISTO IGN	Noir et Blanc	1 pixel = 0.5 m
2000	BD HISTO IGN	Couleur	1 pixel = 0.5 m
2005	BD ORTHO IGN	Couleur	1 pixel = 0.5 m
2012	PLEIADES (diffusion IGN)	Couleur	1 pixel = 0.5 m

Illustration 19 - Source de données utilisées pour la digitalisation du trait de côte

La définition de la limite du trait de côte utilisée dans le cadre de cette étude correspond à la limite de végétation ou le pied des aménagements pour les côtes basses meubles et la partie sommitale du versant pour les côtes à falaise (Illustration 20). Le trait de côte a été digitalisé manuellement par photo-interprétation à l'échelle du 1/2 500 pour une exploitation cartographique au 1/5 000.



Illustration 20 - Exemple de délimitation du trait de côte utilisé par De La Torre et al. (2016) : A. limite de végétation ; B. limite de haut de versant ; C. limite en pied d'aménagement (Bd Ortho IGN 2005)

De La Torre et al. (2016) indiquent que plusieurs zones ne sont pas cartographiées en raison de la mauvaise qualité des images ou de clichés manquants. Quatre traits de côtes ont ainsi été extraits pour les années 1952, 2000, 2005 et 2012 sur l'ensemble de l'archipel. La marge d'erreur associée à ces données est estimée entre 5 et 10 m.

3.3. METHODOLOGIE

3.3.1. Analyse des traits de côte

Afin d'étudier l'évolution du littoral sur la période historique (1952-2012) et récente (2012-2017), une analyse statistique de la position des traits de côte a été réalisée grâce à l'outil DSAS (*Digital Shoreline Analysis System*) développé par l'USGS (Thieler et al., 2009).

Cet outil, spécialement développé pour l'analyse statistique des données de trait de côte, permet de calculer une série d'indicateurs concernant l'évolution du littoral (illustrations 20 et 21). A partir d'une ligne de base créée parallèlement au rivage, cet outil va générer une série de transects perpendiculaires à intervalle régulier venant recouper l'ensemble des traits de côte historiques (Illustration 21). Pour cette étude, les transects ont été générés tous les 50 m sur le littoral de Miquelon et 25 m sur le littoral de Saint-Pierre (résultats présentés sur l'illustration 22).

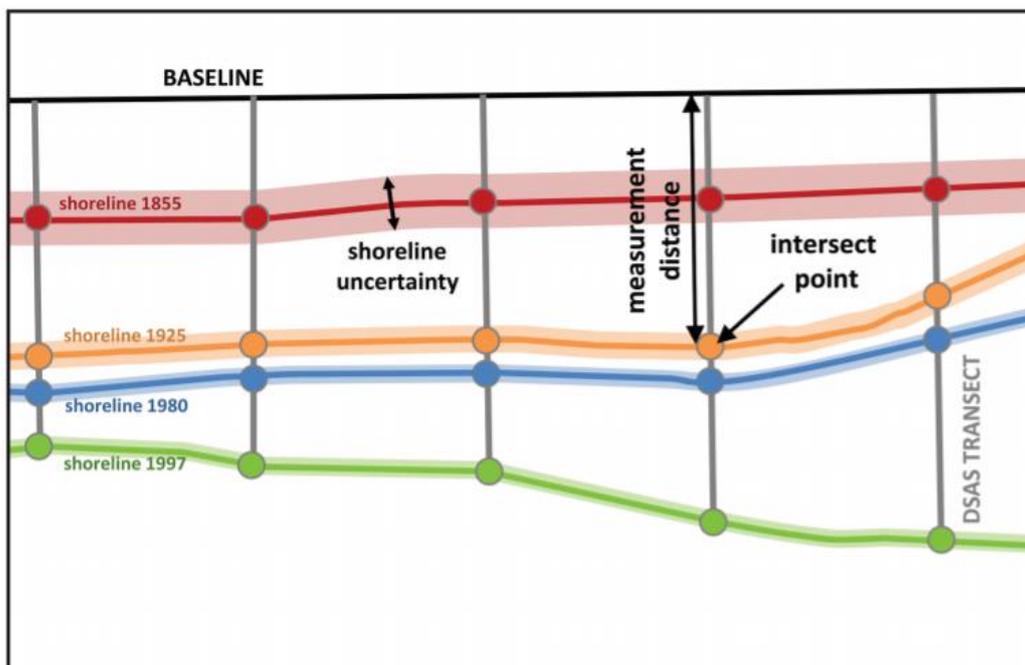


Illustration 21 – Mesure de la distance à partir de la ligne de base pour chaque intersection avec la position historique des traits de côte. (Thieler et al., 2009)

Mesure de la distance	Shorline Change Envelope (SCE)	Valeur absolue de l'amplitude maximale d'évolution du trait de côte sur l'ensemble de la période d'observation exprimée en m
	Net Shoreline Movement (NSM)	Valeur absolue de l'évolution entre la date de position la plus ancienne et la plus récente exprimée en m
Calcul statistique	End Point Rate (EPR)	Taux d'évolution annuel moyen calculé entre la date de position la plus ancienne et la plus récente exprimée en m/an
	Least Regression Rate (LRR)	Taux d'évolution annuel moyen calculé sur l'ensemble de la période d'observation exprimée en m/an
	Weighted Least Squares Regression (WLR)	Taux d'évolution annuel moyen calculé sur l'ensemble de la période d'observation avec prise en compte du poids de l'incertitude de la position exprimée en m/an

Illustration 22 - Description des paramètres calculés pour chaque transect par l'outil DSAS

Le paramètre statistique qui a été choisi pour calculer le taux d'évolution annuel moyen sur chaque transect est le *LRR* (Least Regression Rate). Le taux de régression linéaire (LRR) correspond à la pente de la droite de régression linéaire obtenue grâce à la position des différents traits de côte sur un transect en fonction du temps (Illustration 23), exprimé en m/an.

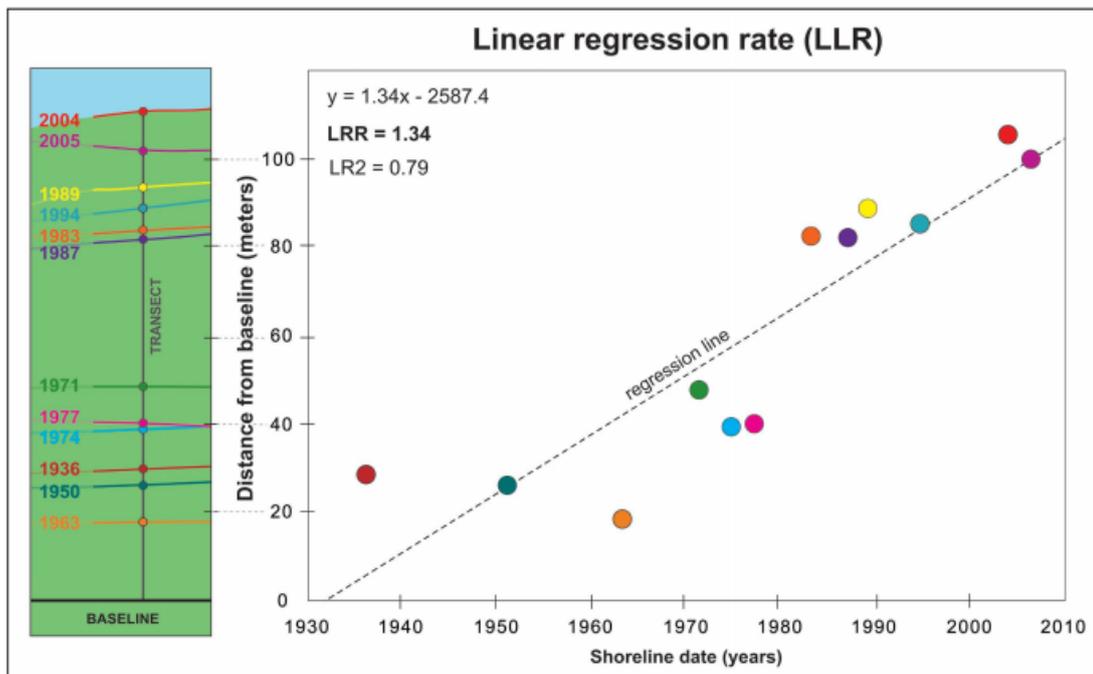


Illustration 23 - Calcul de la régression linéaire pondérée sous DSAS (Thieler et al., 2009)

4. Analyse de l'évolution du littoral

Dans cette partie, l'analyse de l'évolution de la position du trait de côte sur la période historique (1952-2012) et la période récente (2012-2017) est présentée sur chaque site étudié. La localisation des sites étudiés est présentée sur les Illustration 16 et l'illustration 17.

L'évolution sur ces deux périodes est illustrée par une carte de l'évolution nette entre le trait de côte le plus ancien et le plus récent sur la période étudiée, exprimé en mètre, et le taux d'évolution annuel moyen exprimé en m/an.

4.1. SUD-OUEST DE SAINT PIERRE

4.1.1. Présentation générale du secteur

Dans la partie du sud-ouest de Saint-Pierre trois sites principaux sont suivis par la DTAM (illustrations 24-26):

- l'anse à Brossard forme une petite plage de poche d'environ 100 m constituée de galet, elle est partiellement protégée par un enrochement désorganisé sur le haut de plage et des gabions (Illustration 24);
- le cordon de sable et de galet de l'anse à Savoyard abrite une lagune du même nom sur sa façade occidentale, s'étendant sur 500 m, il est en grande partie artificialisé dans sa partie nord par des enrochements ($h > 2\text{m}$) (Illustration 25);
- l'anse à Duguet forme un cordon de galet d'environ 500 m, abritant également la lagune de Savoyard sur sa façade orientale (Illustration 26).



Illustration 24 – Vue générale sur l'Anse à Brossard (à gauche) et les ouvrages de protection en haut de plage (à droite) le 08/2019



Illustration 25 – Partie sud du cordon de l’Anse de Savoyard à gauche et enrochement sur la partie nord à droite le 08/2019



Illustration 26 – Vue générale sur le cordon de l’Anse Duguet à gauche et vue depuis le cordon à droite le 08/2019

4.1.2. Evolution sur la période historique (1952-2012)

Sur la période historique le cordon de Savoyard affiche un recul général avec un recul maximum de 55 m. Le taux d'évolution du cordon de galet sur cette période est compris entre -0.5 m/an et -1m/an.

Etant très réduite, il est difficile d'estimer l'évolution sur la plage de l'Anse à Brossard à partir de l'analyse des données de trait de côte.

Enfin, l'analyse de l'évolution du cordon de l'Anse Duguet n'a pas pu être réalisée car les données de traits de côte historiques, issues du projet VULIT, sont manquantes sur ce site (Illustration 27 et Illustration 28).

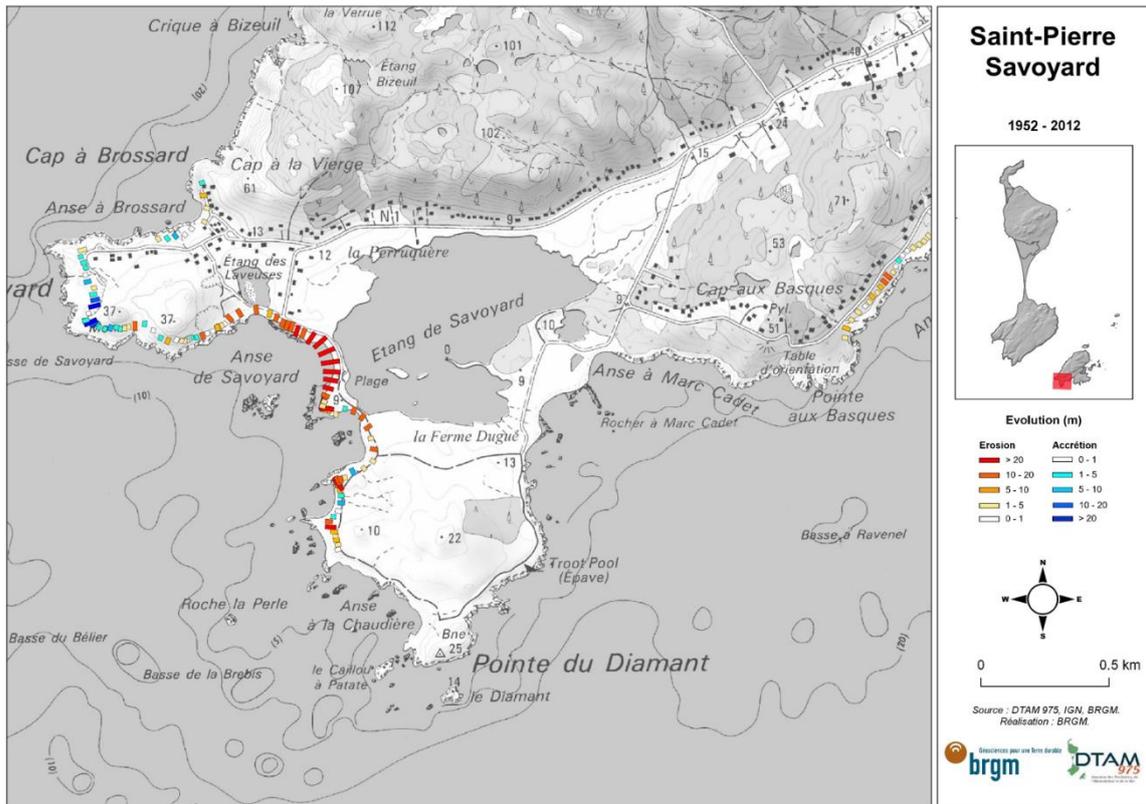


Illustration 27 – Sud-Ouest Saint Pierre, évolution nette en mètre sur la période historique.

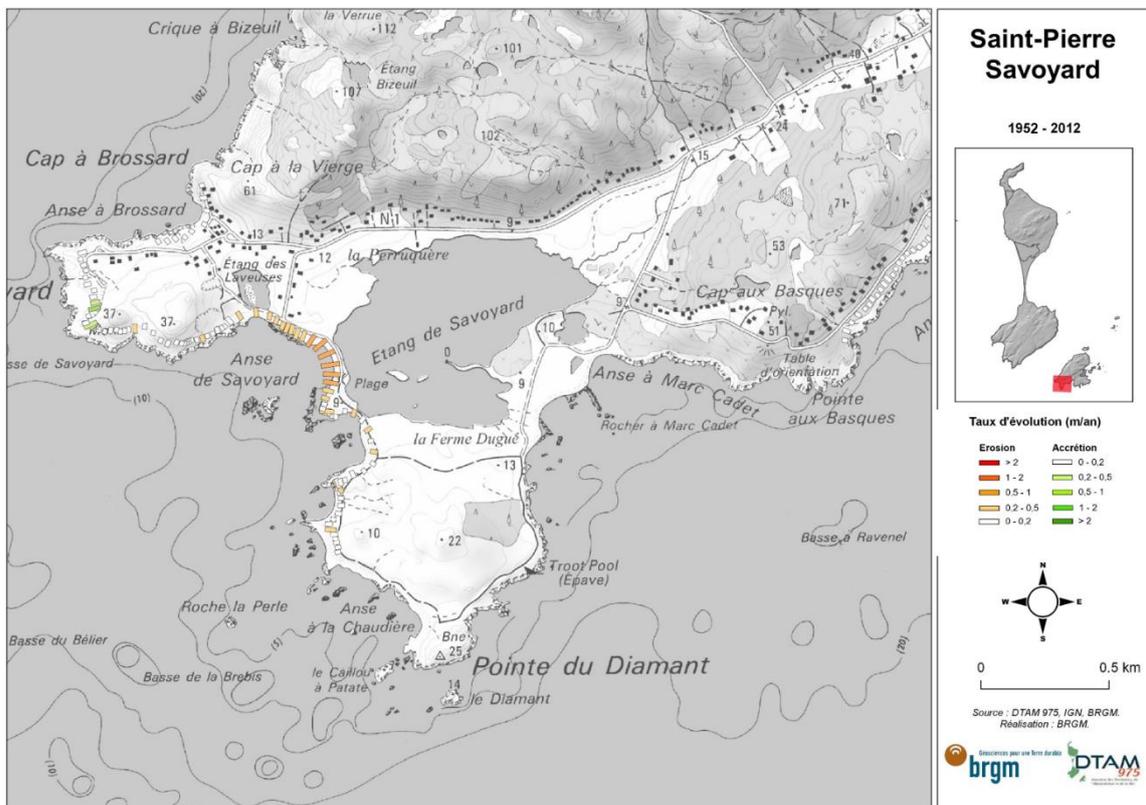


Illustration 28 – Sud-Ouest Saint Pierre, taux d'évolution en m/an sur la période historique.

4.1.3. Evolution sur le période récente (2012-2017)

Sur la période récente, le cordon de l'anse Duguet présente en avancée comprise entre 10 et 20 m et un taux d'évolution positif, localement supérieur à 2 m/an (Illustration 29 et Illustration 30).

Le cordon de l'Anse de Savoyard apparait stable sur la même période, ce qui est cohérent avec les aménagements de protection réalisés sur ce site.

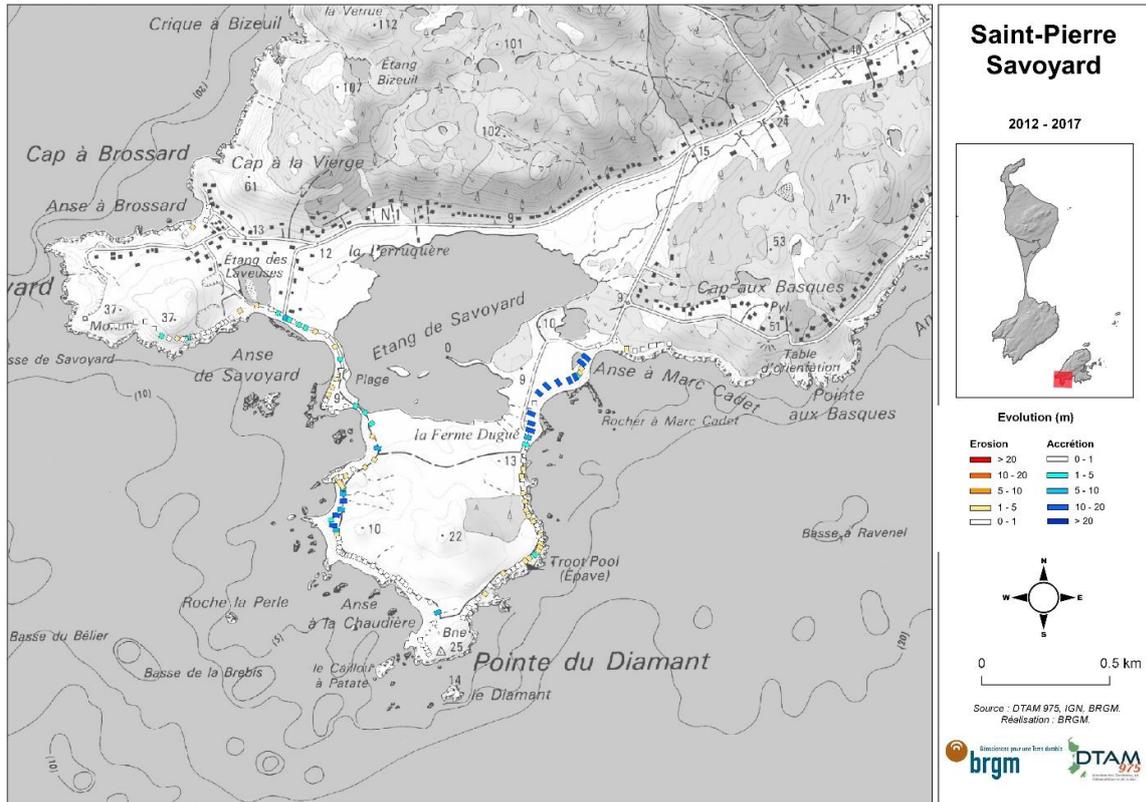


Illustration 29 – Sud-Ouest Saint Pierre, évolution nette en m sur la période récente.

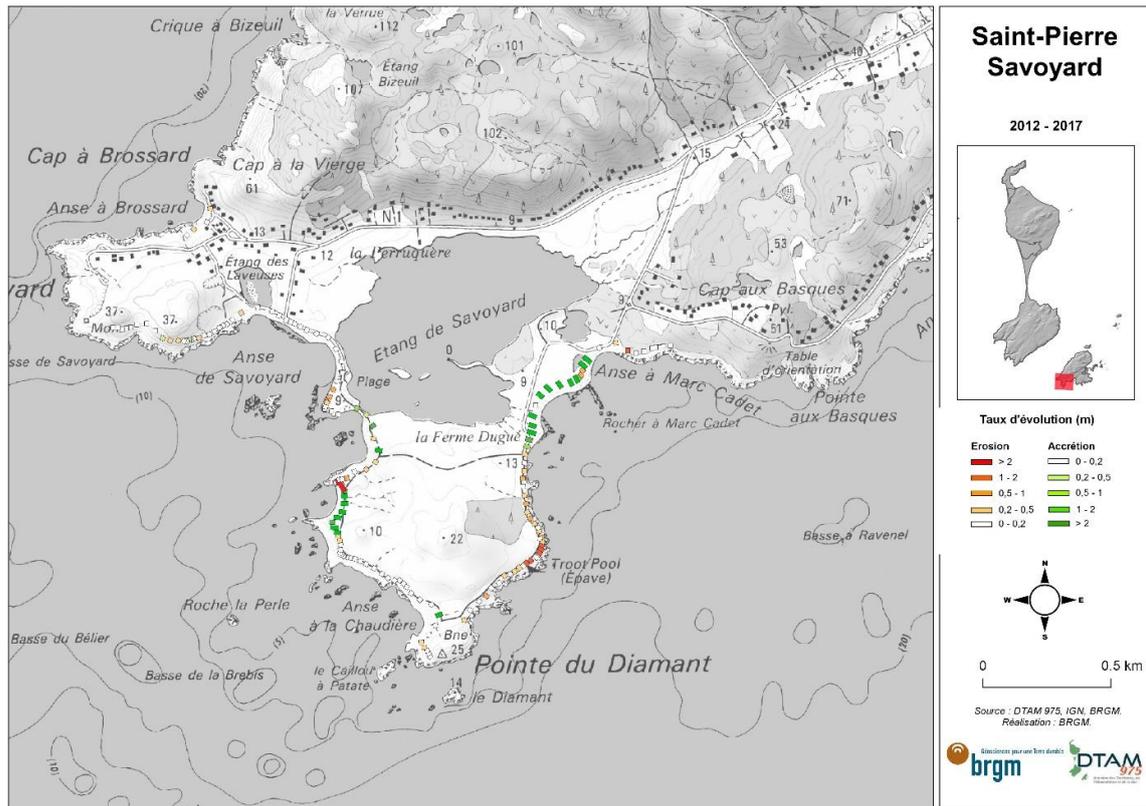


Illustration 30 – Sud-Ouest Saint Pierre, taux d'évolution en m/an sur la période récente.

4.2. SUD-EST DE SAINT PIERRE

4.2.1. Présentation générale du secteur

Le secteur Sud-Est de Saint-Pierre regroupe les sites de Anse à Ravenel, Pointe Blanche, les Flacous, Anse à l'allumette et Anse à Bertrand (illustrations 31-33). Il s'agit de côtes basses meubles, avec un stock sédimentaire constituées de sable, de galets et de blocs, qui s'étendent entre les caps rocheux. De nombreux aménagements de protection ont été réalisés sur les sites de Pointe Blanche, Anse à l'Allumette et à Bertrand (Illustration 32 et Illustration 33).



Illustration 31 – Vue générale de l'Anse à Ravenel (à gauche) et depuis le cordon (à droite) le 08/2019



Illustration 32 – Enrochement du cordon de Pointe Blanche (à gauche) et vue depuis le cordon en face de la Tête du Petit Havre (à droite)



Illustration 33 – Les Falcous (à gauche) et Anse à l'Allumette (à droite) le 08/2019

4.2.2. Evolution sur la période historique (1952-2012)

L'évolution du trait de côte sur la période historique sur ce secteur est très variable et alterne d'un site à l'autre entre avancée ou recul (Illustration 34 et Illustration 35).

A l'Ouest, l'Anse à Ravenel présente un recul assez net avec des valeurs pouvant atteindre-80 m de recul. Cette évolution est la conséquence de l'ouverture d'une ancienne zone humide par rupture du cordon.

Les autres sites du secteur, même si l'évolution nette est très variable, présentent une relative stabilité sur la période historique (Illustration 35). Une zone présente une avancée importante au niveau de la décharge, il s'agit en réalité d'un remblai.

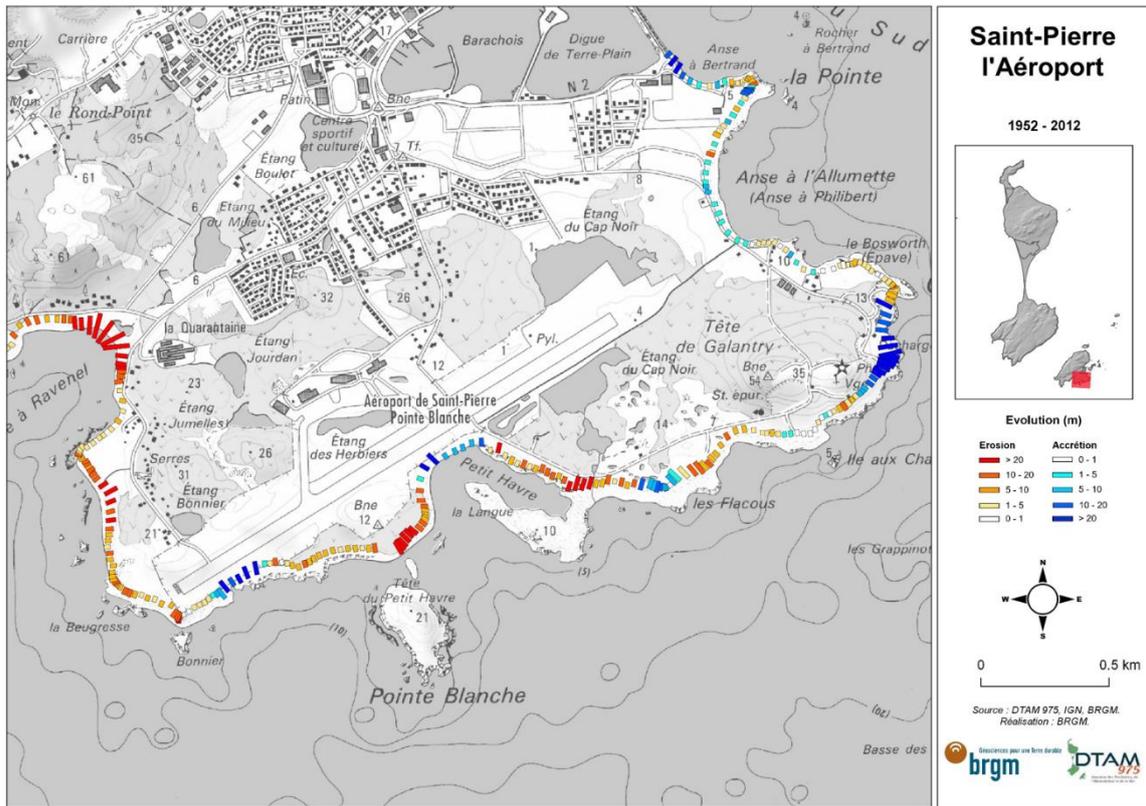


Illustration 34 – Sud-Est Saint Pierre, évolution nette en mètre sur la période historique.

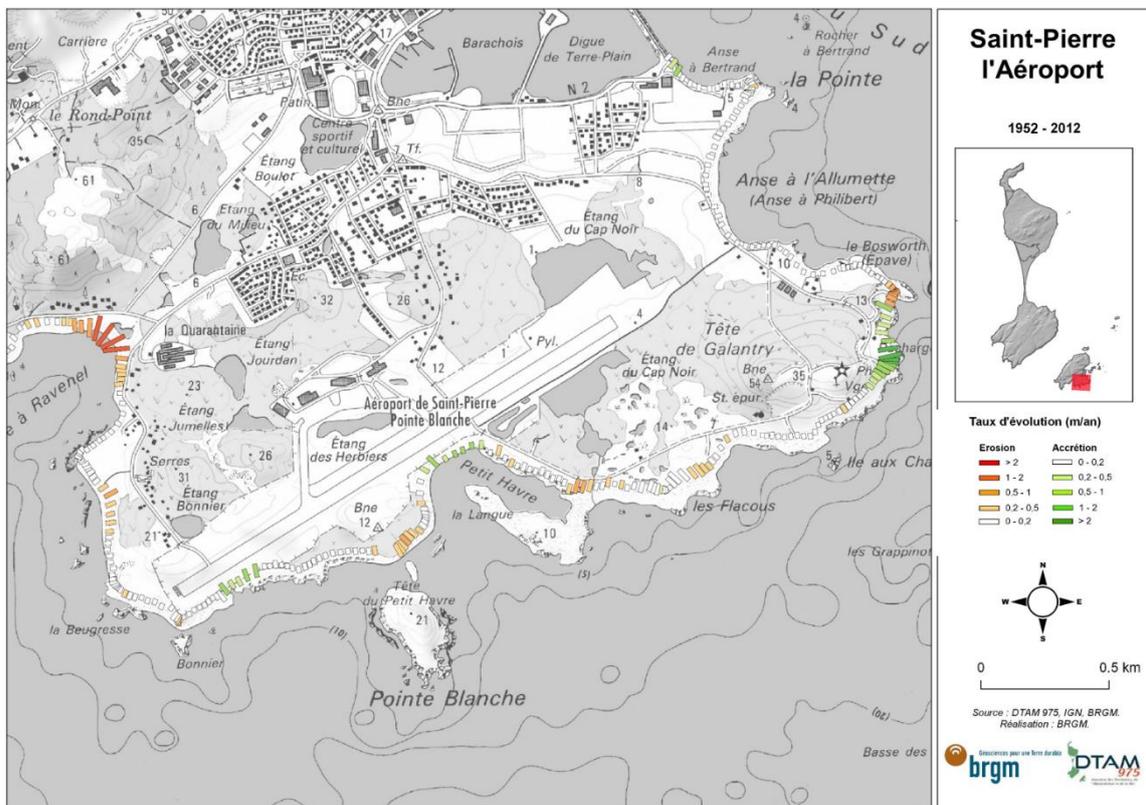


Illustration 35 – Sud-Est Saint Pierre, taux d'évolution en m/an sur la période historique.

4.2.3. Evolution sur la période récente (2012-2017)

Les évolutions observées sur la période récente montrent une relative stabilité générale de ce secteur (Illustration 36 et Illustration 37). Ceci est à mettre en relation avec les aménagements de protection réalisés afin de figer le trait de côte et protéger les infrastructures (aéroport et route côtière).

Toutefois, il est observé localement un recul de 5 à 10 m en face de la tête du Petit Havre sur le site de Pointe Blanche. Actuellement aucun enjeu n'est directement menacé par ce recul.

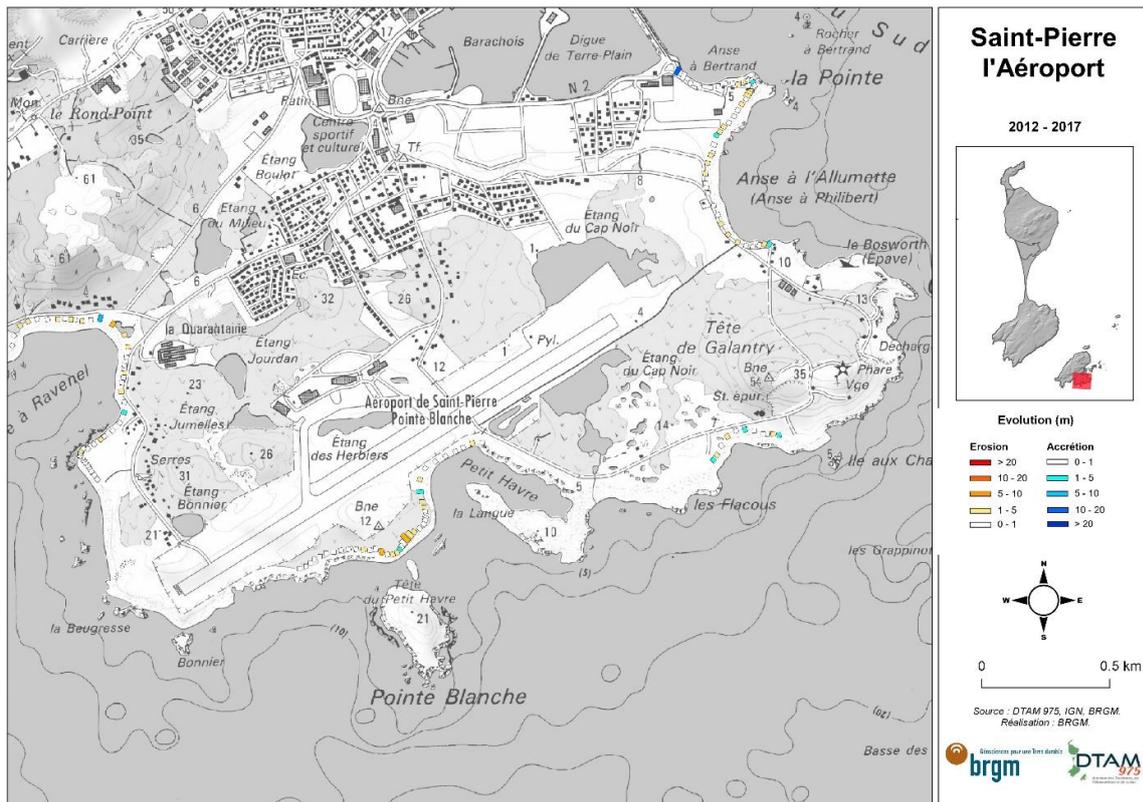


Illustration 36 – Sud-Est Saint Pierre, évolution nette en mètre sur la période récente.

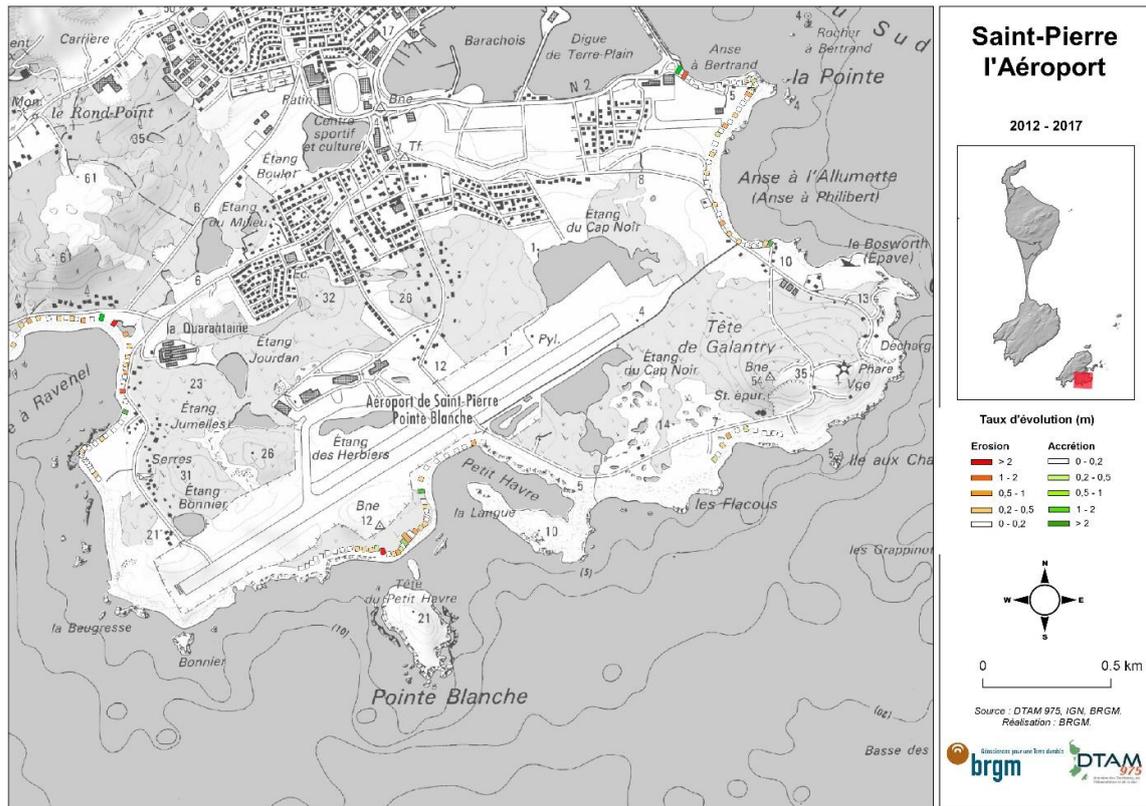


Illustration 37 – Sud-Est Saint Pierre, taux d'évolution en m/an sur la période récente.

4.3. ILE AUX MARINS

4.3.1. Présentation générale du secteur

L'île aux marins est située en face du port de Saint-Pierre. Elle s'étend sur 1700 m de long et sa largeur varie entre 100 et 700 m. L'altitude de l'île est relativement faible, inférieure à 5 m, et les cordons littoraux abritent de nombreuses zones humides. Son emplacement l'expose aux houles en provenance des secteurs sud à est. Le stock sédimentaire est assez varié avec du sable et des galets sur la façade ouest et une dominance de galets et de blocs sur les façades est et sud de l'île. A noter la présence d'un isthme au niveau de l'Anse Tréouhard (Illustration 39).

L'île, est aujourd'hui habitée seulement pendant la période estivale, quelques aménagements de protection avec des gabions sont localement implantés pour protéger des zones basses (Illustration 38).

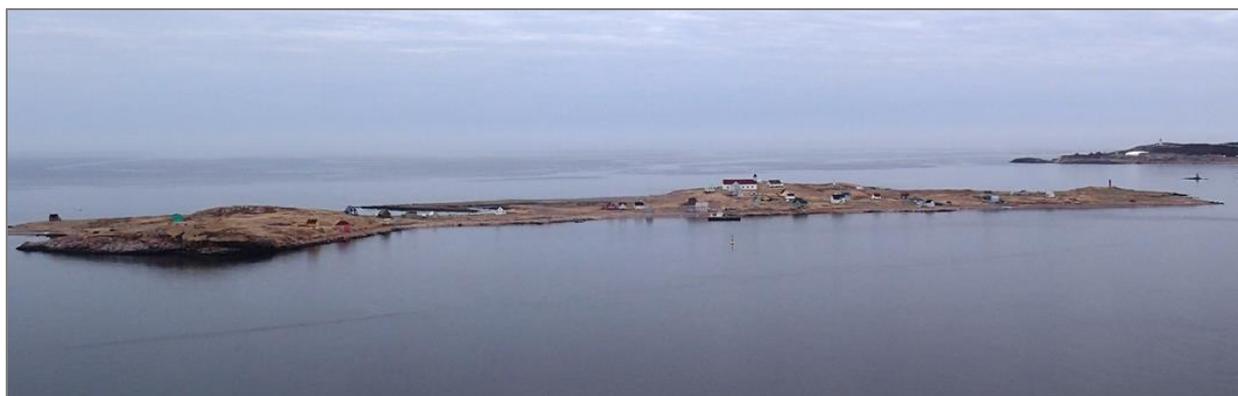


Illustration 38 – Île aux marins le 09/2019, en haut à gauche : cordon de galet et aménagement de protection d'une zone basse, en haut à droite : vue générale de la façade occidentale de l'île vers le sud, en bas : vue générale de l'île.



Illustration 39 - Vue générale de l'isthme de l'Anse Tréouhard à gauche et vue générale sur la façade est de l'île aux Marins le 08/2019

4.3.2. Evolution sur la période historique (1952-2012)

Les observations montrent une relative stabilité générale du trait de côte à l'échelle de l'île sur la période historique (Illustration 42). Les évolutions nettes sont très variables mais ne dépassent pas la dizaine de mètre (Illustration 41).

La seule exception concerne le recul d'un cordon de galet sur la façade orientale de l'île suite à sa rupture ayant provoqué un recul d'environ 25 m (Illustration 40).



Illustration 40 – Rupture au niveau de la flèche de galets sur la façade est de l'île aux Marins : photographie en 1952 à droite et 2005 à gauche (IGN)

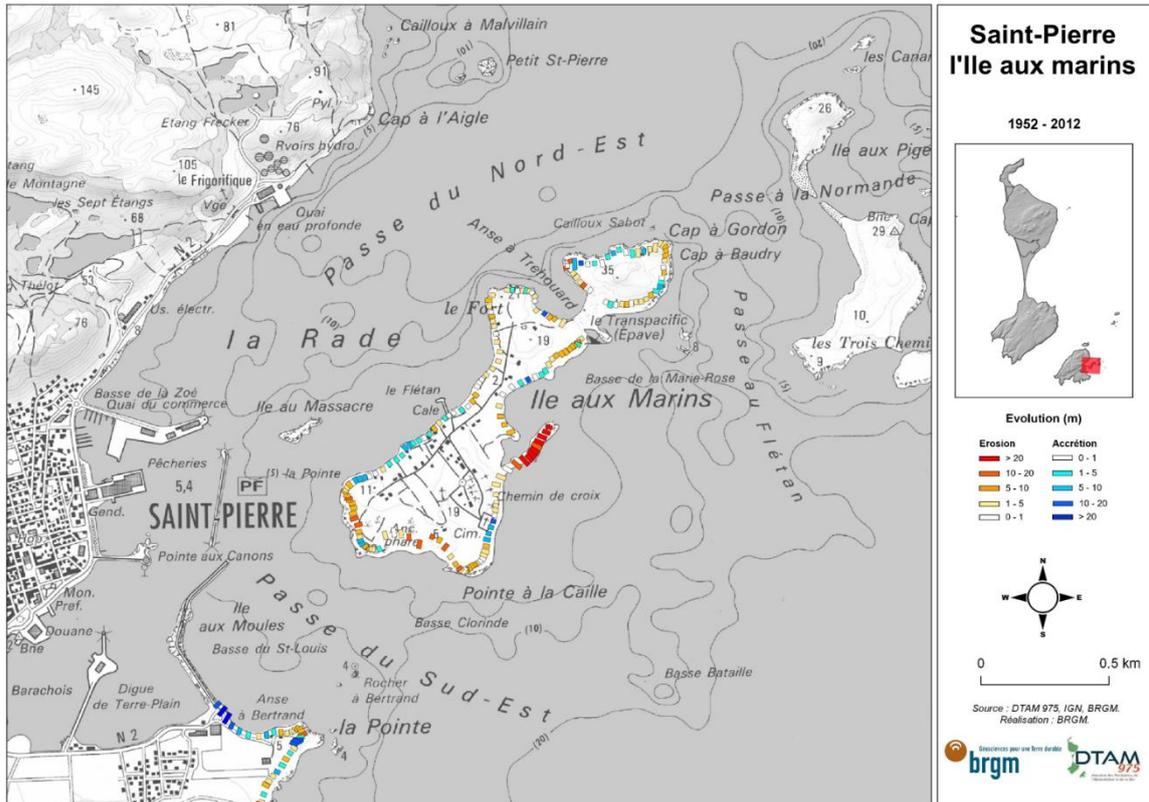


Illustration 41 – Île aux Marins, évolution nette en mètre sur la période historique.

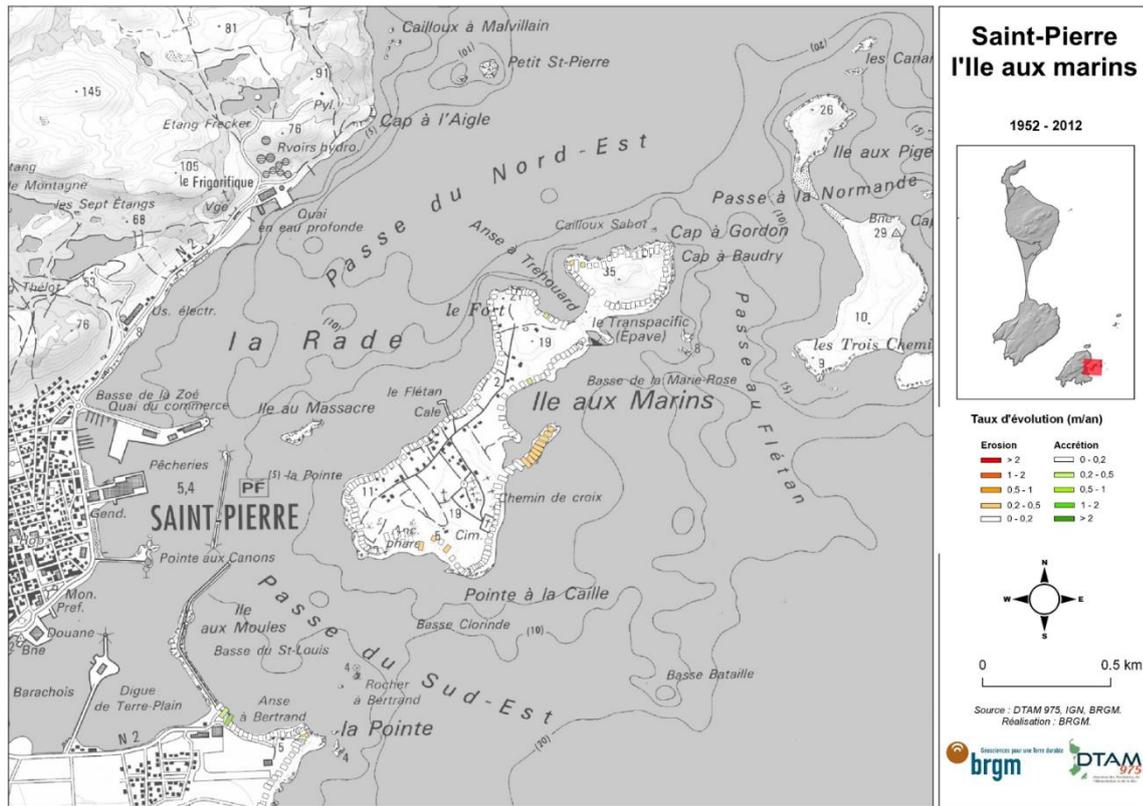


Illustration 42 - Ile aux Marins, taux d'évolution sur la période historique.

4.3.3. Evolution sur la période récente (2012-2017)

Comme pour la période historique, l'évolution du trait de côte sur la période récente présente une relative stabilité (Illustration 43 et Illustration 44). Cependant, il est localement observé une tendance à l'érosion sur la façade sud au niveau du cimetière et de l'ancien phare.

Par ailleurs, il est à noter que plusieurs portions n'ont pas été levées systématiquement sur la période d'observation et notamment la flèche de galets sur la façade est, présentant un recul sur la période historique.

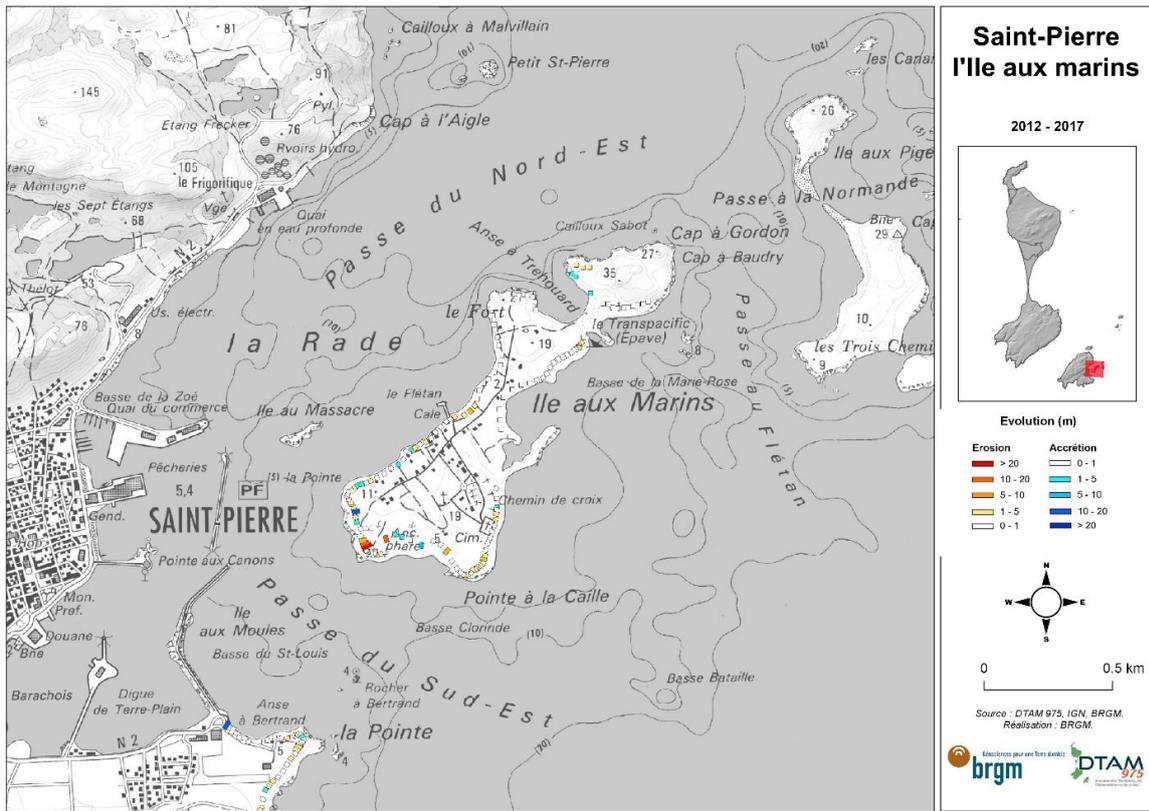


Illustration 43 – Île aux Marins, évolution sur la période récente.

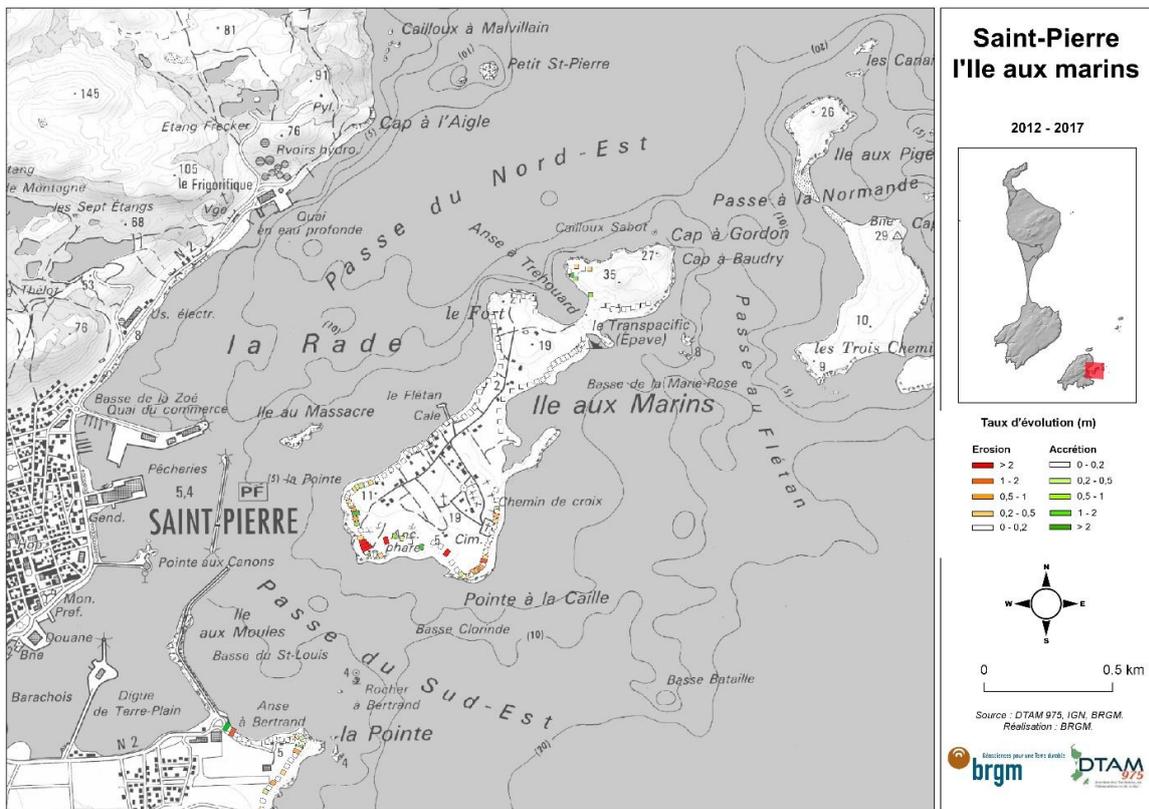


Illustration 44 – Île aux Marins, taux d'évolution sur la période récente.

4.4. ANSE DE MIQUELON

4.4.1. Présentation générale du site

Le site de l'Anse de Miquelon est constitué d'un cordon qui s'étend sur 3 km entre la presqu'île du Cap au nord et la Grande Miquelon au sud, pour une largeur d'environ 50 m et une élévation comprise entre 3 et 4 m (Illustration 45). Le cordon est constitué principalement de graviers et de sable. Par sa configuration, il est exposé par réfraction aux houles de secteur sud-sud-est à est.

Le transit des sédiments s'effectue vers le nord et le port de Miquelon, situé au centre de l'anse, constitue une barrière aux échanges sédimentaires entre la partie sud et nord de la cellule sédimentaire (Billy et al., 2019). A noter que sur le cliché de 1952, le port n'était constitué d'une seule digue perpendiculaire. Localement quelques gabions sont présents en haut de plage au nord du site (Illustration 45). Au sud, une embouchure tidale (le goulet) permet les échanges entre la mer et la lagune du Grand Etang de Miquelon.

A noter que ce cordon sédimentaire étant situé en surélévation joue un rôle de protection important contre les submersions marines par franchissement de paquet de mer qui peuvent affecter le bourg situé en contrebas et qui constitue l'essentiel de la communauté vivant sur Miquelon. Ici les enjeux sont directement menacés par le recul du trait de côte.



Illustration 45 – Anse de Miquelon, en haut à gauche : vue du cordon depuis la partie sud l'Anse de Miquelon, en haut à droite : aménagement de protection dans la partie nord du site, en bas : vue panoramique de l'Anse Miquelon.

4.4.2. Evolution sur la période historique (1952-2012)

D'après les évolutions observées sur la période historique, il est possible de distinguer deux sous-ensembles au sein de cette cellule sédimentaire délimités par la présence du port (Illustration 46). Le secteur situé au sud du port présente une avancée notable de l'ordre de 30 m entre 1952 et 2012, alors que la partie nord recule légèrement d'environ 8 m sur la même période. L'extrémité

nord du site présente localement une très légère avancée d'environ 2 à 3 m. Conformément à ces observations, les taux d'évolutions annuels moyens du secteur nord présente une stabilité relative et le secteur sud une tendance générale l'avancée de l'ordre de +0,50 m/an (Illustration 47).

La zone de l'embouchure du Grand Etang de Miquelon apparaît en érosion mais il est difficile d'interpréter les tendances à long terme du fait de la dynamique d'embouchure très mobile au cours du temps et des cycles de développement (Billy et al., 2019).

Ces tendances historiques attestent du rôle de la dérive littorale qui transporte les sédiments vers le nord du site par réfraction des houles de secteurs sud à sud-est. Les sédiments s'accumulent donc sur la partie sud de l'anse, en amont-dérive du port, ainsi la partie nord présente un léger déficit car elle n'est plus autant alimentée en sédiment (transit sédimentaire naturel perturbé par les digues du port). Cependant, on constate que la construction du port et des digues n'engendre pas de perturbation trop importante au nord du port, avec un recul du trait de côte de 5-10 m sur la période historique.

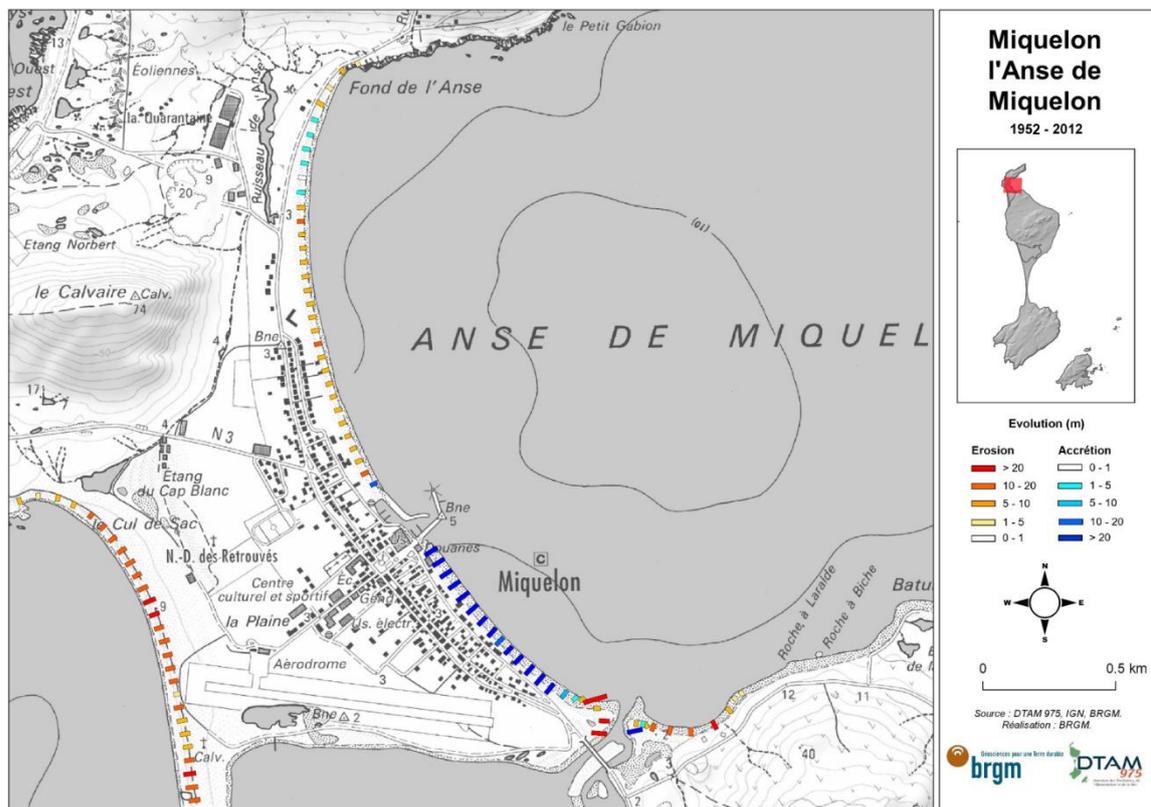


Illustration 46 – Anse de Miquelon, évolution nette en mètre sur la période historique.

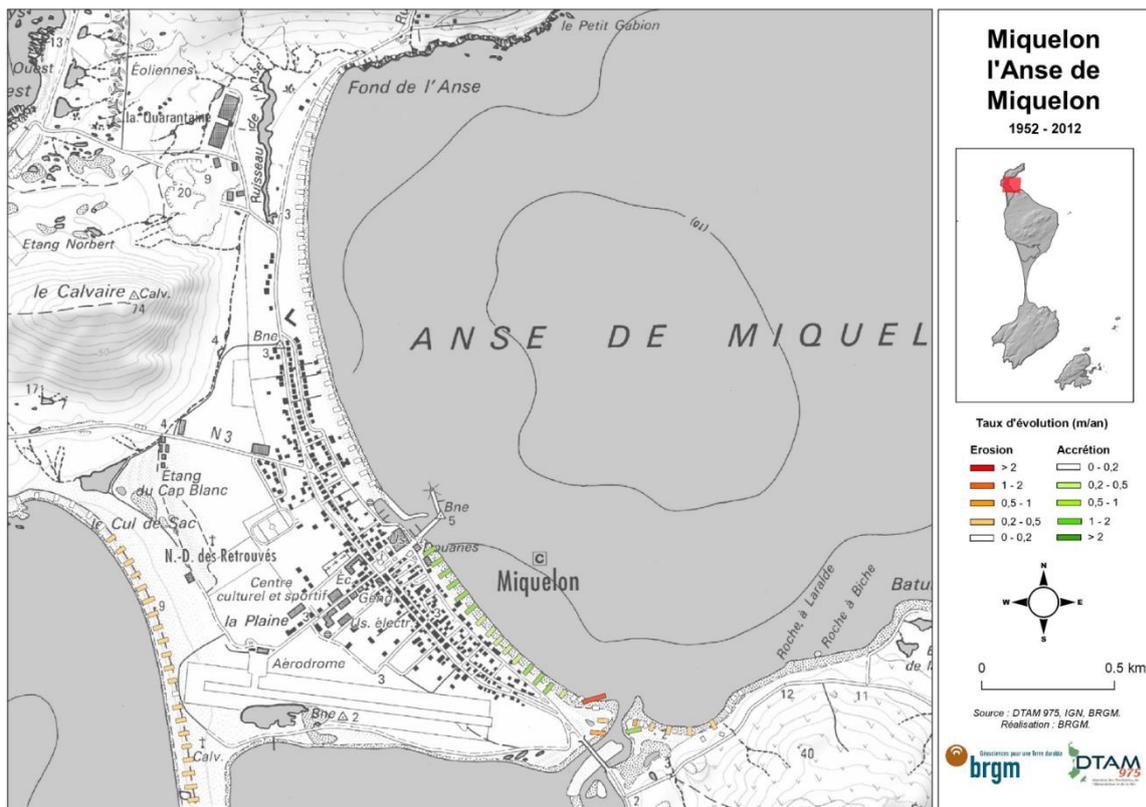


Illustration 47 – Anse de Miquelon, taux d'évolution annuel en m/an sur la période historique.

4.4.3. Evolution sur la période récente (2012-2017)

Sur la période récente, la partie nord présente une relative stabilité même si les amplitudes de variation du trait de côte peuvent atteindre une dizaine de mètres (Illustration 48). La zone jouxtant la digue sud du port montre une légère accrétion. Les divagations de l'embouchure montrent un comportement plus contrasté avec des amplitudes élevées pouvant dépasser la vingtaine de mètres (Illustration 48).

Localement, une légère érosion du cordon est constatée au centre de sa partie sud. Cette érosion préoccupe les autorités car elle constitue un point de fragilité dans le cordon en termes de protection contre les submersions par franchissement de paquet de mer (Billy et al., 2019).

Les taux d'évolution annuels moyens traduisent globalement une relative stabilité à l'échelle de l'Anse sur la période récente (Illustration 49).

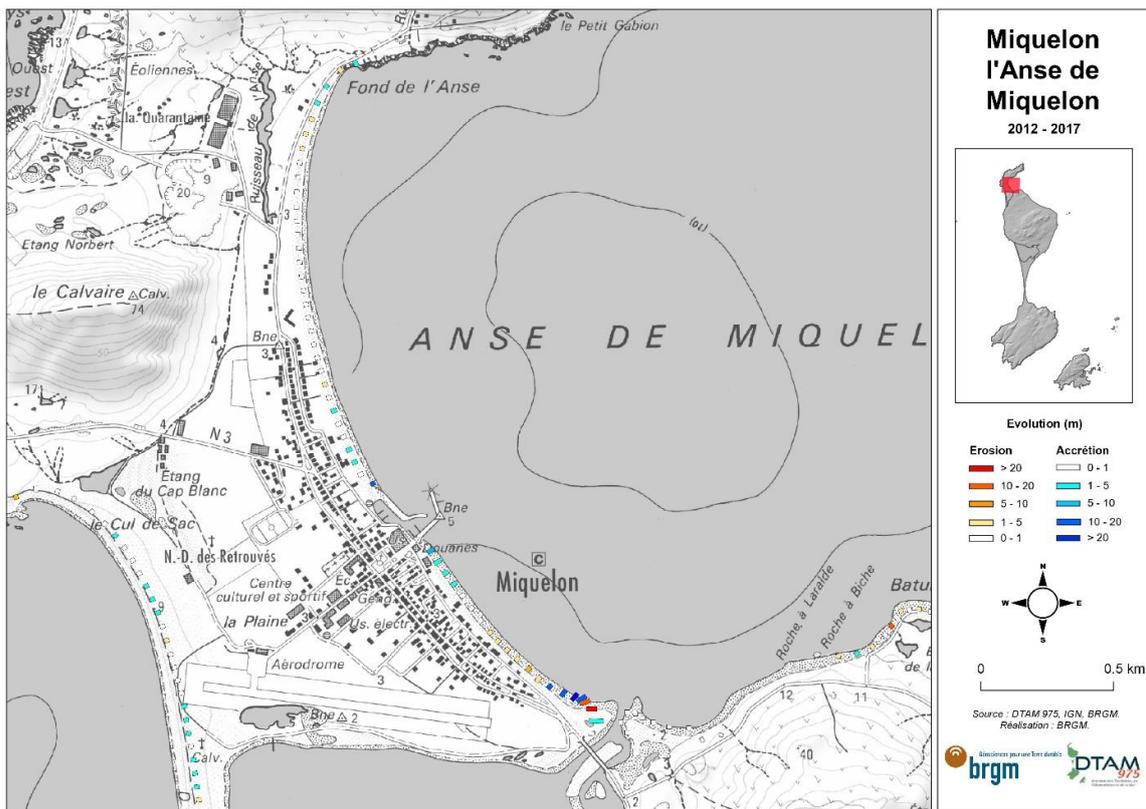


Illustration 48 – Anse de Miquelon, évolution nette en m sur la période récente.

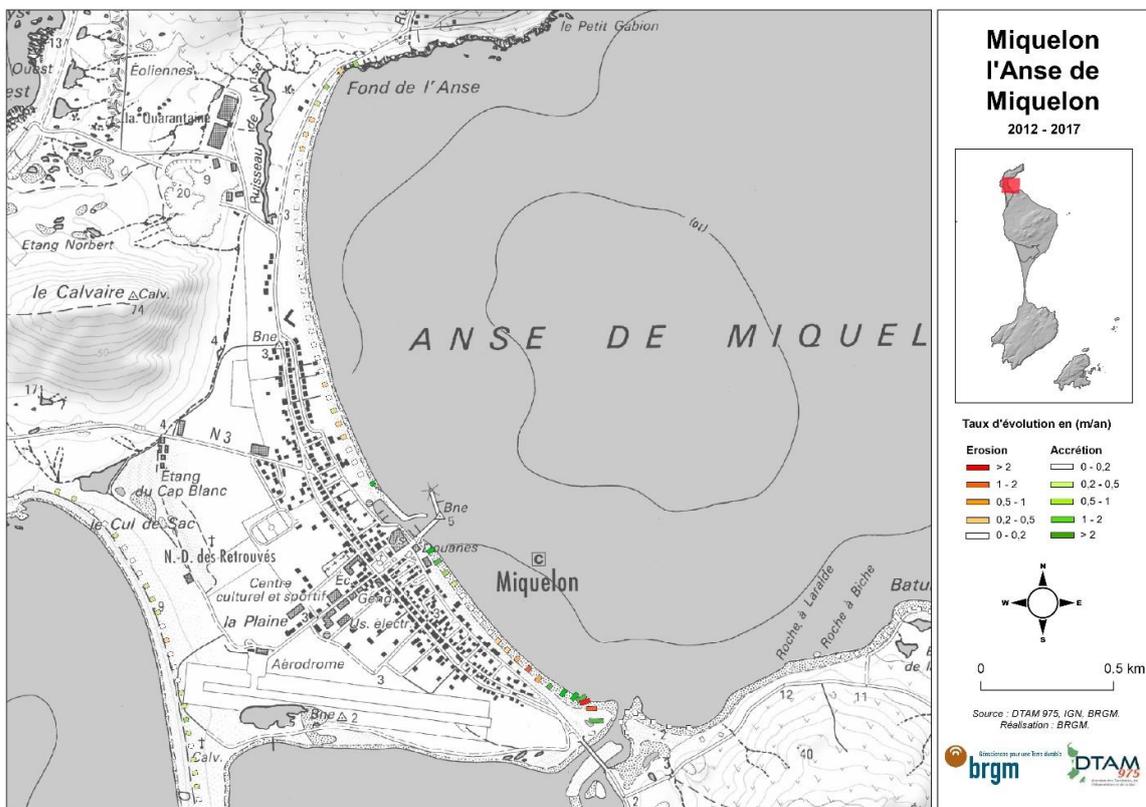


Illustration 49 – Anse de Miquelon, taux d'évolution exprimée en m/an sur la période récente.

4.5. DUNE DE MIQUELON

4.5.1. Présentation générale du site

Le site de la Dune de Miquelon est un cordon sédimentaire végétalisé situé sur la façade occidentale de la lagune du Grand Etang et du village de Miquelon, qui relie la presqu'île de Miquelon à la presqu'île du Cap. Le cordon s'étend sur un linéaire de 4.5 km, il est constitué de sable et galets (Illustration 50). La largeur du cordon est d'environ 150 m et son élévation est comprise entre 4 et 6 m. Aucun aménagement de protection apparent n'est identifié sur le site.

Ce cordon subit l'impact des houles les plus violentes en provenance du quart sud-ouest. Ainsi, des franchissements et des ruptures du cordon ont pu être observés localement au niveau du Grand Etang et de l'Etang du Cap Blanc (au nord) d'après des témoignages datés de 1911 et 1912.



Illustration 50 – Dune de Miquelon le 09/2019, à gauche : point de vue sur le site en direction du sud, à droite : point de vue sur le site en direction du nord.

4.5.2. Evolution sur la période historique (1952-2012)

Sur la période historique, De La Torre et al. (2016) n'ont pas digitalisé le trait de côte dans la partie sud du site. L'évolution sur la partie sud n'a pas été cartographiée (Illustration 51 et Illustration 52). Cependant, Billy et al. (2019) constatent que l'ensemble du cordon recule sur cette période vers la lagune du Grand Etang. Le nord du site présente un net recul sur la période historique avec des valeurs pouvant atteindre -40 m (Illustration 51).

Le taux d'évolution annuel moyen est de -0,3 m/an et la tendance au recul semble s'intensifier graduellement du Nord au Sud, pour la portion comportant des données (Illustration 52).

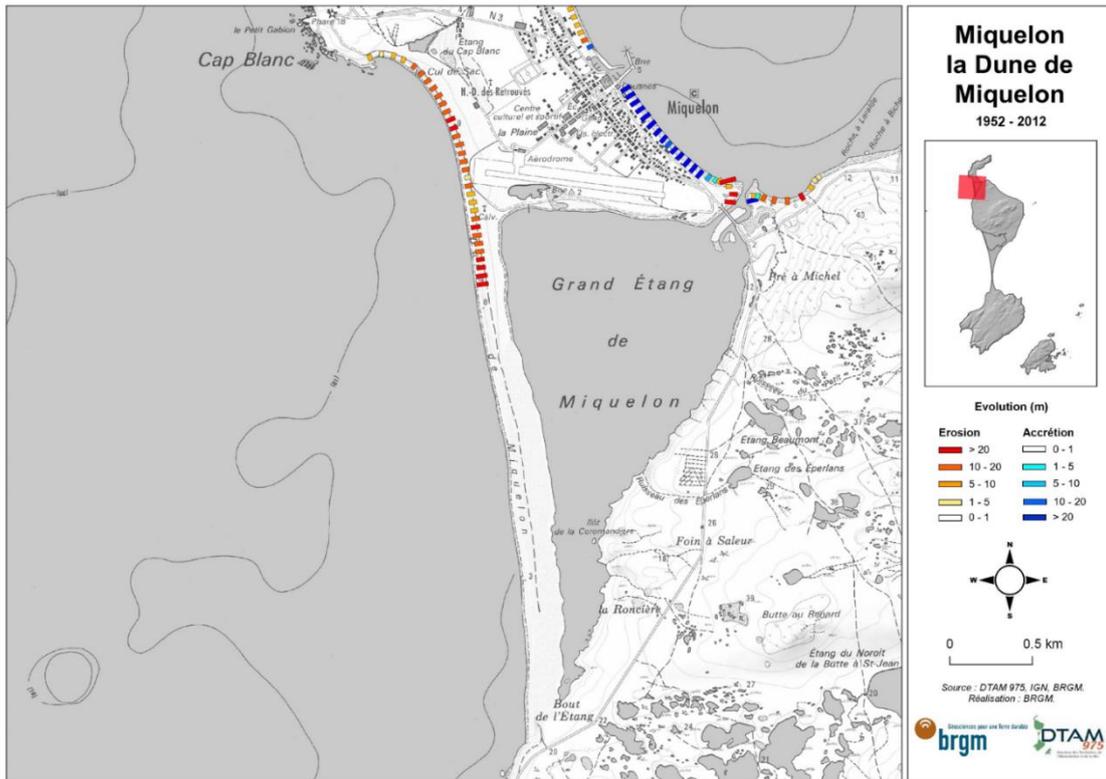


Illustration 51 – Dune de Miquelon, évolution nette en mètre sur la période historique.



Illustration 52 – Dune de Miquelon, taux d'évolution annuel moyen expérimenté en m/ann sur la période historique.

4.5.3. Evolution sur le période récente (2012-2017)

Sur la période récente, les données mettent en évidence une relative stabilité voir une légère avancée du cordon dans la partie nord du site, tandis que la partie sud présente une nette tendance au recul qui s'intensifie en direction du sud en concordance avec ce qui est observé sur la période historique (Illustration 53). Les valeurs de recul sur la partie sud du cordon sont comprises entre 5 et 10 m pour un taux de recul annuel moyen d'environ 1m/an (Illustration 54).

Les évolutions observées sur la période récente sont cohérentes avec le sens général de la dérive littorale à l'échelle du site qui tend à transporter les sédiments en direction du nord sous l'influence des houles dominantes de secteur sud.

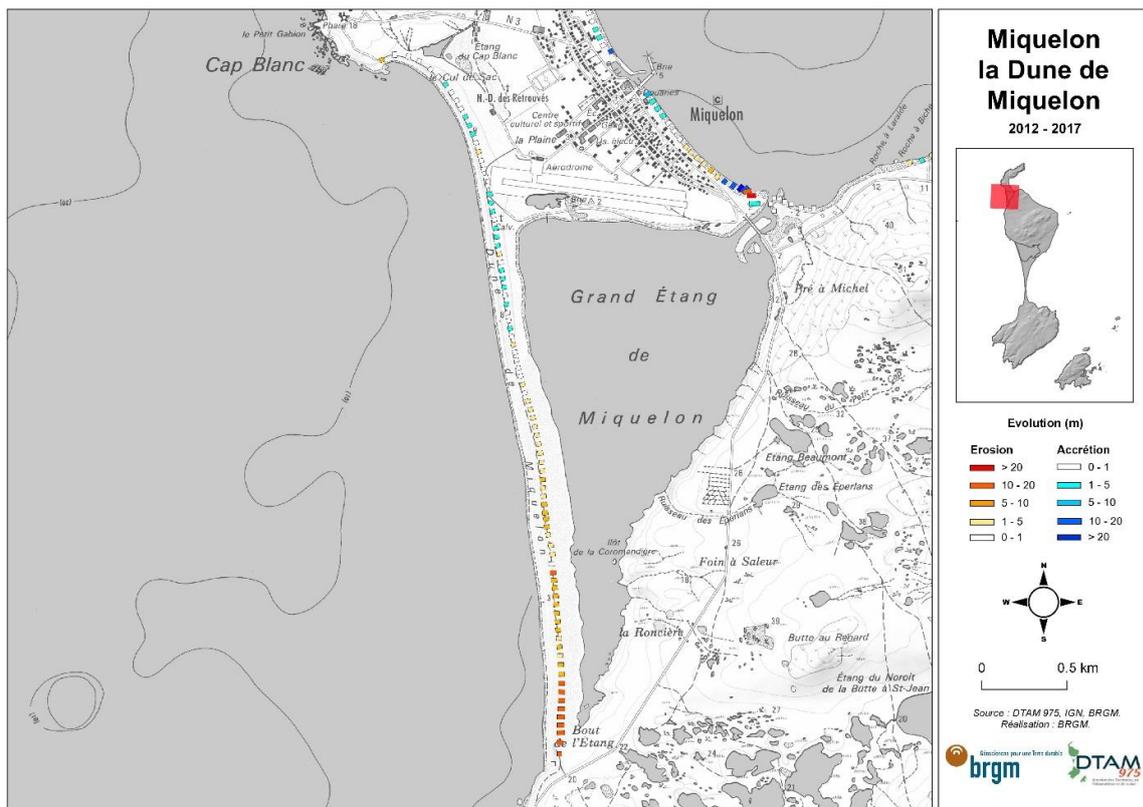


Illustration 53 – Dune de Miquelon, évolution nette en mètre sur la période récente.

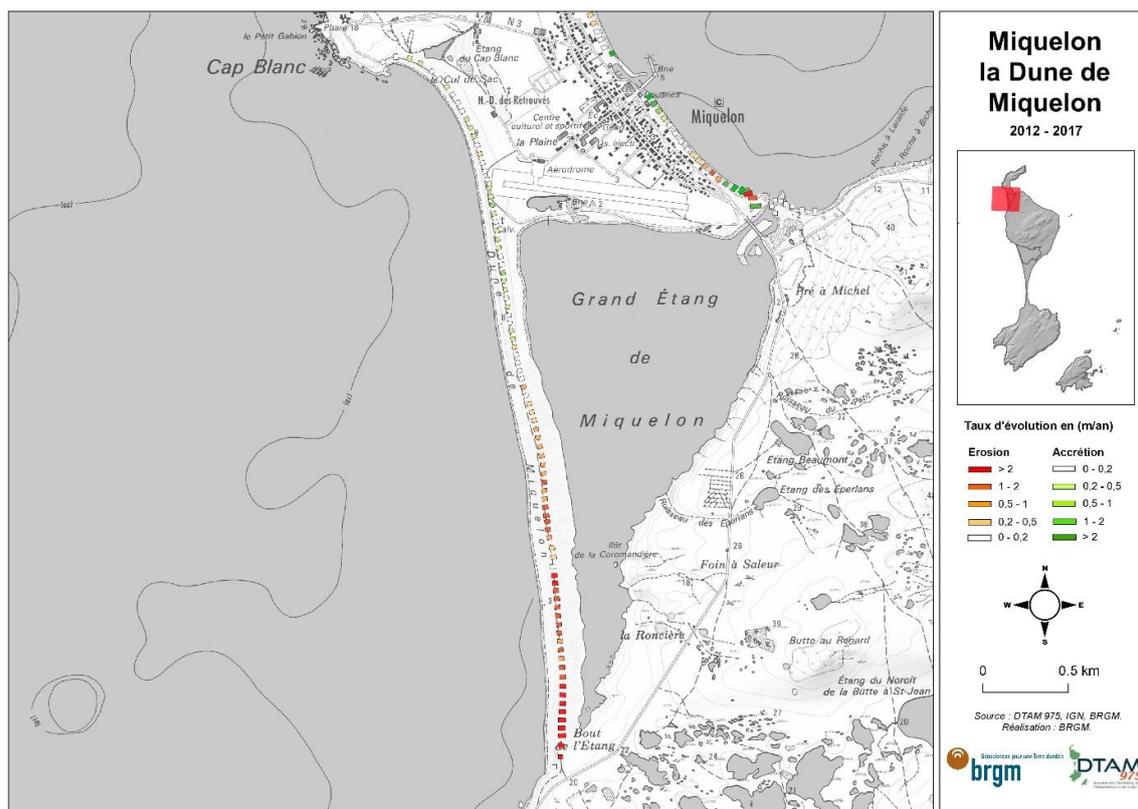


Illustration 54 – Dune de Miquelon, taux d'évolution annuel moyen en m/an sur la période récente.

4.6. DUNE DU CHAPEAU ET DE MIRANDE

4.6.1. Présentation générale du secteur

Les cordons du Chapeau et de Mirande sont situés sur la façade Est de Miquelon. Ces deux cordons s'étendent respectivement sur 2 km et 4 km, ils consistent des barrières sédimentaires étroites (entre 40 et 70 m) de large et peu élevées (entre 2 et 3 m de haut) qui abritent deux Étangs qui ne communiquent pas directement avec la mer (Illustration 55 et Illustration 56 – absence d'embouchure).

Les deux sites sont séparés par le cap rocheux de la Pointe à Chapeau. Ils sont tous les deux exposés aux houles des secteurs sud à est. Ces barrières sont constituées de sable et de graviers, avec une dominance de sable.

Le site du Chapeau est relativement préservé et évolue librement tandis que la dune de Mirande est en grande partie protégée par des ouvrages composés d'enrochements et de gabions discontinus, aménagés sur le sommet du cordon, pour protéger la route d'accès au camping de Mirande. Lors de la visite (Aout 2019) de nombreux ouvrages étaient déstabilisés par affouillement des fondations en raison de l'abaissement de la plage (Illustration 56).



Illustration 55 – Dune de l'Etang à Chapeau le 09/2019: vue générale en direction du nord à gauche et vue depuis le cordon à gauche.



Illustration 56 – Dune de Mirande : vue générale du cordon à gauche et ouvrages de protection destabilisés en haut de plage à droite.

4.6.2. Evolution sur la période historique (1952-2012)

Les données de trait de côte sur la période historique issus de De La Torre et al. (2016) sont manquantes sur le site de la Dune de l'Etang du Chapeau. L'évolution du site sur cette période n'a donc pas pu être analysée.

L'évolution sur la période historique de la Dune de Mirande peut être découpé en trois zone (Illustration 57) : (i) au sud-est le site montre un recul compris entre 10 et 20 m, (ii) au nord-ouest l'évolution du site est plus contrastée avec un secteur qui apparait en avancée d'environ 5 à 10 m et (iii) un autre en recul d'environ 10m à proximité de la Pointe du Chapeau.

Le taux d'évolution annuel moyen de la moitié nord-ouest du site présente une stabilité relative du trait de côte dans ce secteur sur la période historique, alors que la moitié sud-est présente une légère tendance à l'érosion de l'ordre de -0.4m/an (Illustration 58).

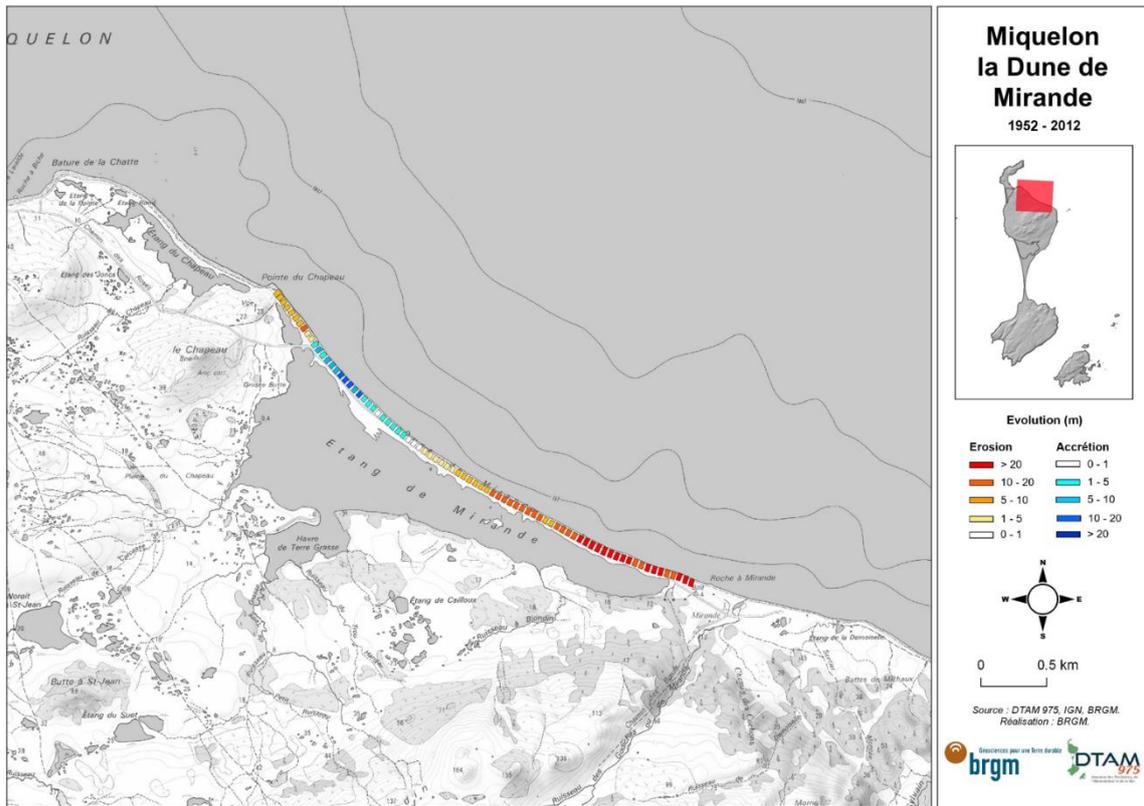


Illustration 57 – Dune de Mirande, évolution nette en mètre sur la période historique.

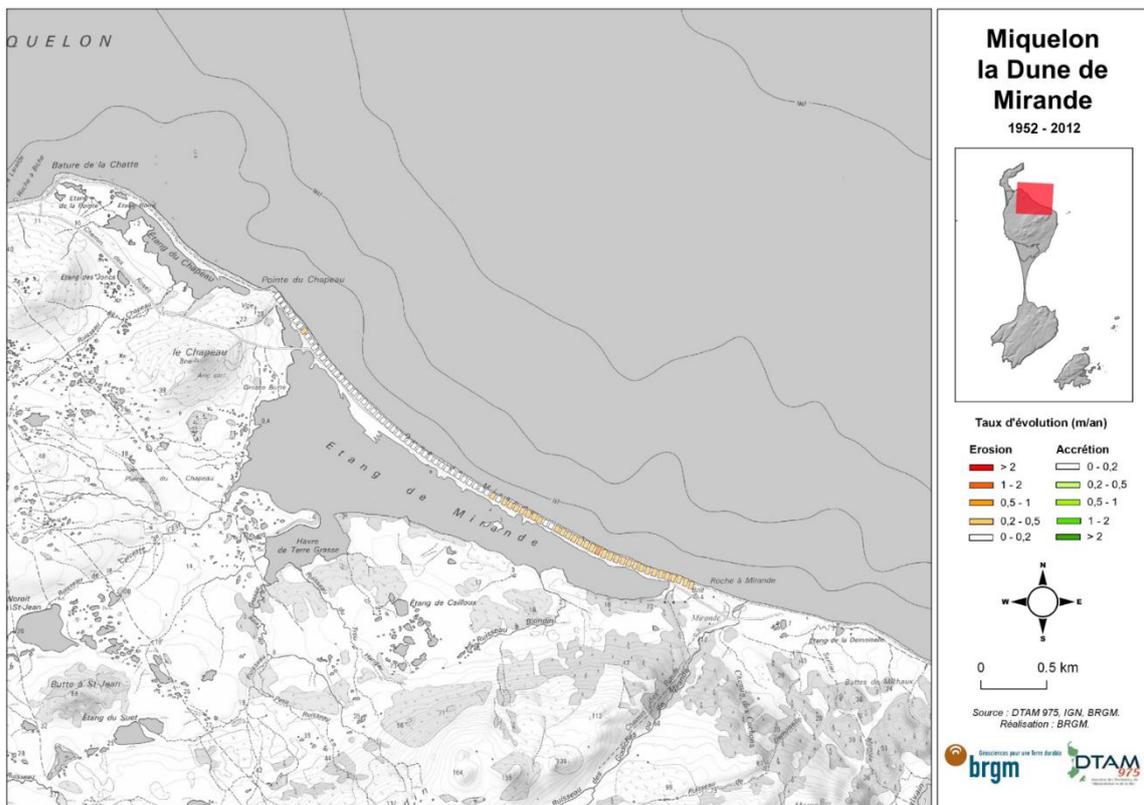


Illustration 58 – Dune de Mirande, taux d'évolution exprimé en m/an sur la période historique.

4.6.3. Evolution sur la période récente (2012-2017)

Pour la dune de l'Etang du Chapeau, les évolutions observées sont relativement de faibles intensités sur la période récente (Illustration 59). Les évolutions laissent principalement apparaître un léger recul sur sa portion située au sud-est de l'ordre de 2 m, caractérisé par un taux de recul annuel moyen fluctuant entre -0.2 et -0.4 m. Les évolutions sur le reste du site ne sont pas significatives et traduisent une stabilité relative, voire une légère avancée localement au niveau de la Batture de la Chatte (tout au nord) pouvant atteindre jusqu'à 3 m (Illustration 60).

Concernant le site de la Dune de Mirande, l'ensemble du site présente un recul d'environ 4 m sur la période récente, les valeurs les plus fortes sont localisées au sud-est et peuvent atteindre entre 5 et 10 m (Illustration 59). Le taux d'évolution annuel moyen traduit une tendance à l'érosion sur l'ensemble du site sur la période récente (Illustration 60).

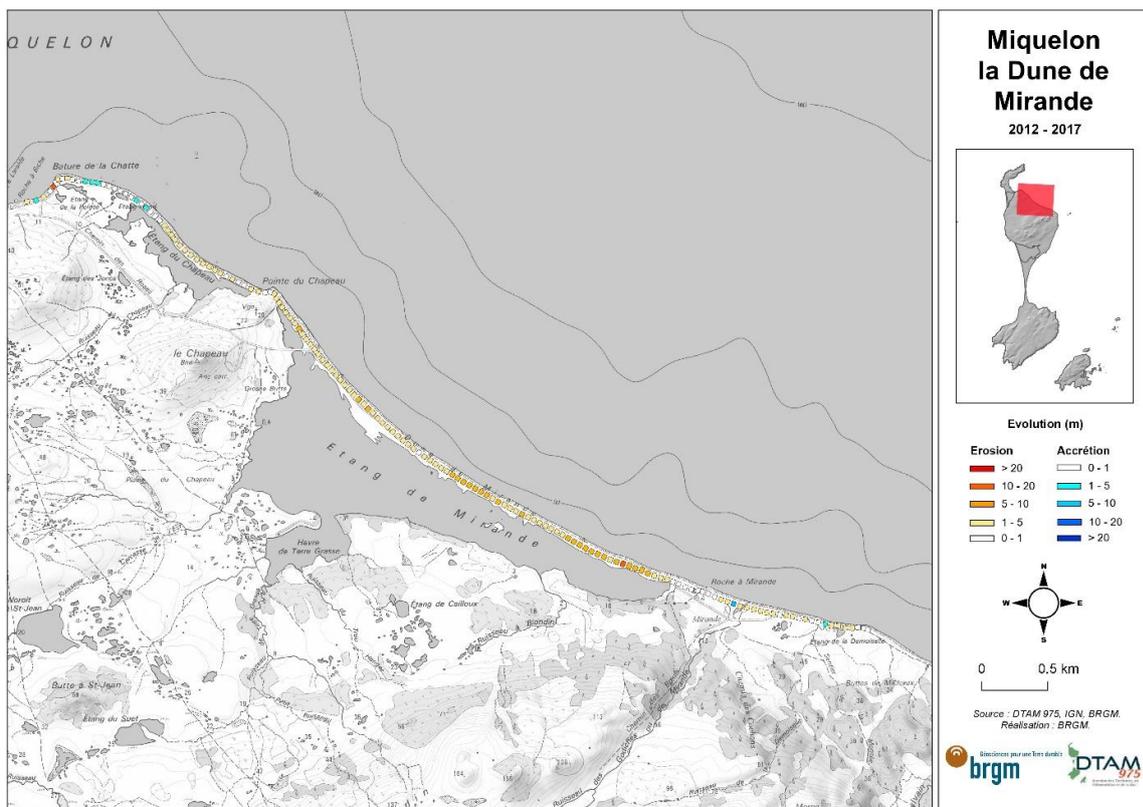


Illustration 59 – Dunes de l'Etang du Chapeau et de Mirande, évolution nette en mètre sur la période récente.

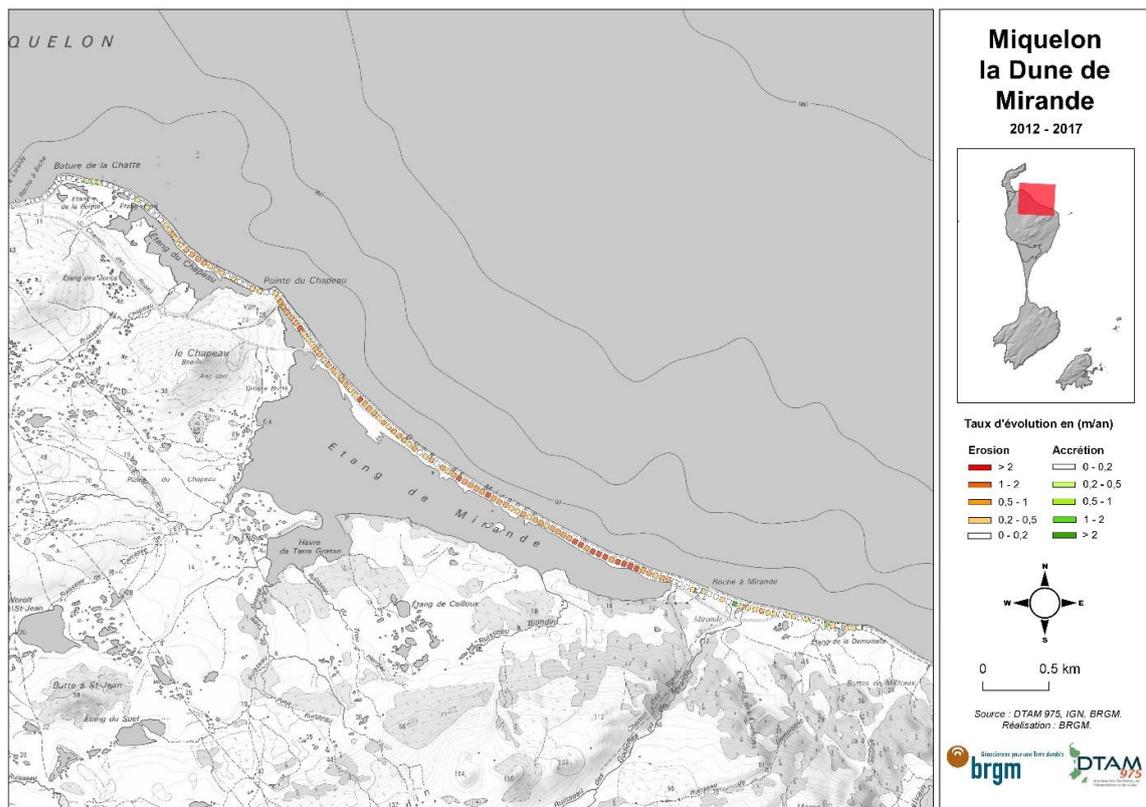


Illustration 60 – Dunes de l'Etang du Chapeau et de Mirande, taux d'évolution sur la période récente.

4.7. ISTHME DE MIQUELON-LANGLADE

4.7.1. Présentation générale du site

Les anciennes îles de Miquelon et Langlade sont reliées depuis la fin du XVIII^e siècle par un isthme en forme de Y (double tombolo) qui s'étend sur 12 km de long, dont la largeur varie de plusieurs kilomètres à seulement 150 m dans la partie centrale la plus étroite. Le nord de l'isthme abrite la lagune du Grand Barachois dont l'exutoire se situe au nord-est du site (Goulet de Langlade). L'isthme de Miquelon-Langlade est une structure sédimentaire complexe (Billy, 2014) qui regroupe des dunes paraboliques, des cordons sédimentaires, des flèches sédimentaires, des marres. La partie centrale de l'isthme est composée d'une série de cordons sédimentaires constitués de sable et de galets (5 km²) qui se sont mis en place au cours des 3 000 dernières années. Les formations dunaires sont particulièrement étendues aux extrémités nord (les Buttereaux) et sud du site. L'isthme constitue la formation littorales la plus remarquable de l'archipel (Illustration 61 et Illustration 62).

La façade occidentale du site est beaucoup plus exposée (houles du large), toutefois la façade orientale qui est plus protégée est tout de même soumise à l'influence des houles de secteur sud par réfraction.

La route qui relie Miquelon à Langlade constitue le principal enjeu en terme de recul du trait de côte dans ce secteur. Localement, elle est directement menacée et plusieurs aménagements de protection ont été réalisés pour la maintenir et la protéger (enrochement et gabions). Des actions de stabilisation du cordon dunaire, au niveau des formes d'érosion apparentes (siffle vent et caoudeyre), ont également été mis en œuvre localement afin de favoriser le développement de

la végétation et piéger les sédiments transportés par le vent. On retrouve par exemple ce type d'action dans le secteur des Buttereaux sur la partie nord de la façade occidentale de l'Isthme.



Illustration 61 – Façade occidentale de l'isthme de Miquelon-Langlade le 09/2019, en haut :vue générale du l'isthme vers le sud et du massif dunaire des Buttereaux avec l'île de Langlade en arrière plan, en bas à gauche : perré en enrochement pour la protection de la route, en bas à droite : point de vue sur la dune des Buttereaux vers le nord du site.



Illustration 62 – Façade orientale de l'isthme de Miquelon-Langlade le 09/2019, à gauche : massif dunaire au Nord du site, à droite : haut de plage au Centre du site.

4.7.2. Evolution sur la période historique (1952-2012)

Sur la période historique, la partie nord dans le secteur des Buttereaux, présente un recul net d'environ 30 m, pouvant atteindre 60 m localement dans la partie centrale du secteur (Illustration 63).

Le reste de la façade occidentale présente une tendance générale à l'avancée du trait de côte avec une valeur moyenne d'environ 10 m entre 1952 et 2012. Les valeurs les plus importantes en termes d'avancée se situent au niveau de la partie la plus étroite de l'isthme et peuvent atteindre localement 30 m.

L'analyse du taux d'évolution annuel moyen permet de d'identifier quatre secteurs distincts par rapport aux tendances observées sur l'ensemble de la période historique (Illustration 63) :

- le secteurs des Buttereaux en érosion (-0.5 m/an) ;
- un secteur intermédiaire relativement stable entre le sud des Buttereaux et la plaine de la Chapelle
- la partie la plus étroite de l'isthme qui présente une tendance assez marquée à l'avancée du trait de côte de l'ordre de 20 m pour une moyenne de +0,40 m/an ;
- l'extrémité sud qui présente une légère avancée comprise entre 5 et 10 m pour une moyenne de +0,15 m/an.

Ces observations sont cohérentes avec celles mises en évidence par Billy et al. (2013).

L'évolution de la façade orientale de l'isthme sur la période historique présente une situation inverse par rapport à la façade occidentale. La partie nord, située en face de la ferme de l'ouest, montre une avancé d'environ 5 m entre 1952 et 2012, tandis que le trait de côte a reculé en moyenne de 30 m sur le reste de cette façade sur la même période. Les valeurs de recul les plus importantes sont observées au sud de la plaine de la Chapelle et la partie la plus étroite de l'isthme pouvant atteindre localement entre 50 et 60 m.

Les taux d'évolution annuels moyens traduisent globalement la même dynamique, avec un secteur relativement stable au nord, en face de la ferme de l'ouest, et une nette tendance au recul sur le reste de façade de l'ordre de -0,5 m/an en moyenne.

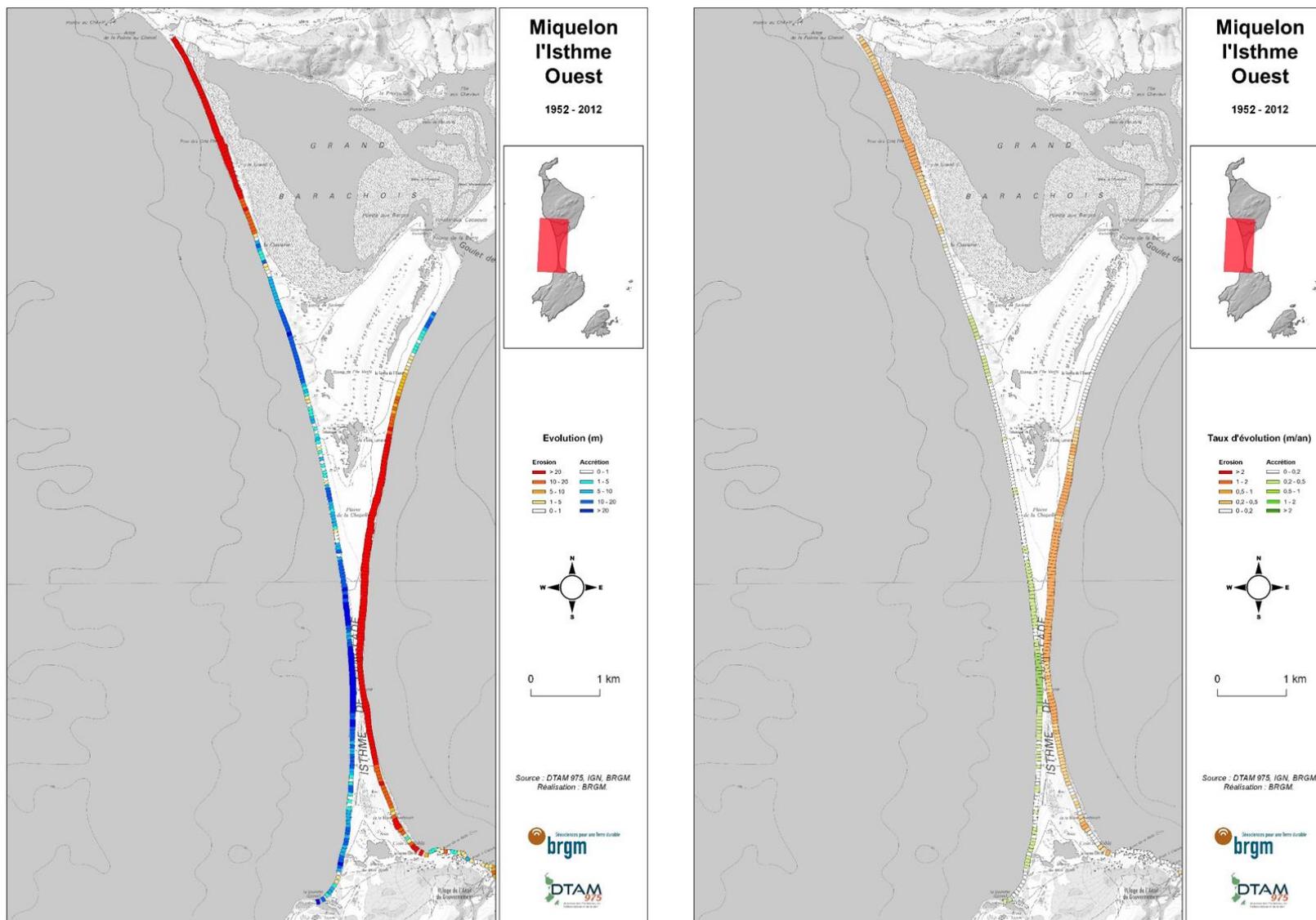


Illustration 63 - Isthme de Miquelon-Langlade, évolution nette en mètre sur la période historique (à gauche) et taux d'évolution annuel en m/an sur la période historique (à droite)

4.7.3. Evolution sur la période récente (2012-2017)

L'évolution du trait de côte sur la période récente est plus homogène et tend vers le recul des deux façades (Illustration 64). Illustration 64).

Sur la façade occidentale, deux secteurs présentent toutefois localement une accrétion, l'extrême nord du secteur des Buttereaux (environ 3 m) et la partie nord de la plaine de la Chapelle (environ 6 m). Les autres segments sont en recul d'environ 6 m dont l'amplitude varie localement avec un maximum autour de 15 m de retrait dans la moitié sud des Buttereaux. Le taux d'évolution annuel moyen sur l'ensemble du site est de -1,1 m/an sur la période récente. La partie située à l'extrême sud du site paraît relativement stable sur la période récente.

Sur la façade orientale, même si le site présente une tendance générale à l'érosion (-1m/an), plusieurs secteurs attestent d'une avancée ponctuelle. C'est le cas par exemple de la pointe de la barre qui progresse 5 à 10 m et du secteur situé en face de la Ferme de l'Ouest où l'avancée avoisine les 3 m. Cependant, en termes de taux annuels d'évolution de ces secteurs présentent une relative stabilité sur la période récente (Illustration 64).

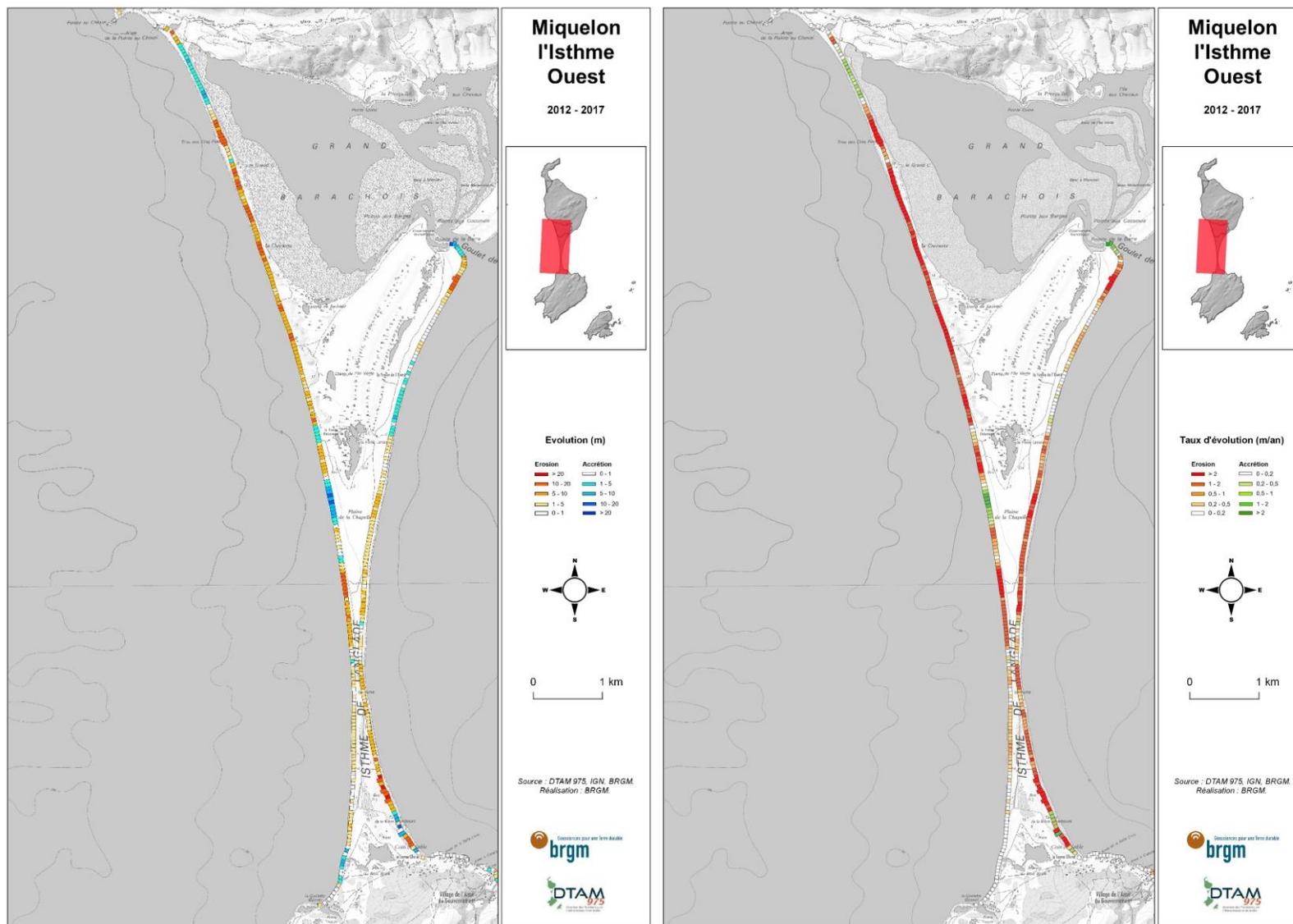


Illustration 64 - Isthme de Miquelon-Langlade, évolution nette (à gauche) et taux d'évolution annuel moyen (à droite) sur la période récente

5. Synthèse des évolutions

Cette partie présente de manière synthétique les indicateurs de l'évolution du trait de côte observés sur la période historique et récente, sur chaque grand ensemble de l'archipel et à l'échelle des sites étudiés :

- l'évolution nette entre la date la plus ancienne et la date la plus récente exprimés en m sur la période d'observation ;
- le taux d'évolution annuel moyen sur la période étudiée exprimés en m/en ;
- le pourcentage de linéaire en érosion, stable ou en avancée.

Bien que l'évolution peut être contrastée au sein d'un même site, ces valeurs permettent d'approcher un bilan sédimentaire et de dégager des grandes tendances concernant l'évolution du littoral sur la période historique et récente à l'échelle de la cellule sédimentaire.

5.1. SAINT-PIERRE

Sur la période historique les sites l'Anse des Savoyards, l'Anse Ravenel, Pointe Blanche et Les Flacous se distinguent par rapport l'évolution du trait de côte (Illustration 65). Sur ces quatre sites le recul moyen observé entre 1952 et 2012 est supérieur ou égal à 10 m. Cependant les tendances d'évolution sont nettement plus modérées et comprises entre -0,1 et -0,3 m/an, traduisant une stabilité relative (Illustration 65).

Site	Evolution nette moyenne (m)	Taux annuel moyen (m/an)	% érosion	% stable	% avancée
Anse à Brossard	-1	0	NC	NC	NC
Anse des Savoyard	-12	-0,2	28%	72%	0%
Anse Duguet	NC	NC	NC	NC	NC
Anse Ravenel	-15	-0,3	43%	57%	0%
Pointe Blanche	-10	-0,1	38%	41%	21%
Les Flacous	-10	-0,1	NC	NC	NC
Anse à l'Allumette	1	0	0%	100%	0%
Anse Bertrand	10	0,2	NC	NC	NC

Illustration 65 – Synthèse des évolutions sur la période historique (1952-2012)

Sur la période récente, les évolutions observées traduisent également une stabilité relative du trait de côte (inférieur à 1 m ; Illustration 66). Cependant, bien que peu significatifs, les taux de recul annuels moyen présentent tous une tendance à l'érosion (entre 0,1 et 0,2 m/an), à

l'exception du site de l'Anse Duguet qui présente une avancée de 2 m et une tendance de +0,6 m/an.

Les tendances mises en évidence sur la période récente sont cohérentes avec les observations réalisées sur terrain. En effet, la plupart de ces sites sont fortement aménagés avec des ouvrages de protection en haut de plage qui figent le position du trait de côte.

Site	Evolution nette moyenne (m)	Taux annuel moyen (m/an)	% érosion	% stable	% avancée
Anse à Brossard	-1	-0,2	NC	NC	NC
Anse des Savoyard	0	-0,1	23%	63%	14%
Anse Duguet	2	0,6	42%	26%	32%
Anse Ravenel	-1	-0.2	43%	52%	4%
Pointe Blanche	-1	-0,1	35%	47%	18%
Les Flacous	0	-0.1	NC	NC	NC
Anse à l'Allumette	-1	-0.2	45%	55%	0%
Anse Bertrand	0	-0.3	NC	NC	NC

Illustration 66 – Synthèse des évolutions sur la période récente (1952-2012)

Les figures suivantes représentent une comparaison, entre la période historique et récente, du pourcentage de linéaire en érosion, stable et en accrétion, selon les classes calculées à partir du taux d'évolution annuel moyen exprimés en m/an (Illustration 67).

Sur les sites du secteur de Saint-Pierre la tendance à la stabilité domine, le pourcentage du linéaire en érosion est relativement constant à l'échelle des sites étudiés entre la période récente et historique. La seule exception concerne le site de l'Anse à l'Allumette où la moitié du linéaire présente une tendance à l'érosion alors qu'il est stable sur la période historique.



Illustration 67 – Synthèse des évolutions observées en m/an entre la période historique et récente à l'échelle des sites étudiés sur Saint-Pierre

5.2. ILE AUX MARINS

Les évolutions observées sur les sites de l'île aux Marins présentent une relative stabilité sur la période historique (Illustration 68).

Site	Evolution nette moyenne (m)	Taux annuel moyen (m/an)	% érosion	% stable	% avancée
Façade est	-2	0	0%	98%	2%
Façade sud	-6	-0.1	11%	89%	0%
Façade ouest	0	0	0%	100%	0%

Illustration 68 – Synthèse des évolutions sur la période historique (1952-2012)

Les évolutions observées sur la période récente, traduisent également une stabilité des sites étudiés sur l'île aux Marins (Illustration 69).

Site	Evolution nette moyenne (m)	Taux annuel moyen (m/an)	% érosion	% stable	% avancée
Façade est	-1	-0.2	29%	68%	2%
Façade sud	0	-0.2	29%	46%	25%
Façade ouest	-1	0	0%	100%	0%

Illustration 69 - Synthèse des évolutions sur la période récente (2012-2017)

Les figures suivantes représentent une comparaison, entre la période historique et récente, du pourcentage de linéaire en érosion, stable et en accrétion, selon les classes calculées à partir du taux d'évolution annuel moyen exprimés en m/an (Illustration 70).

La tendance à la stabilité domine largement l'ensemble des sites de l'île aux Marins. Sur la période récente, l'érosion ne concerne que 30% du linéaire de la façade sud et est de l'île.

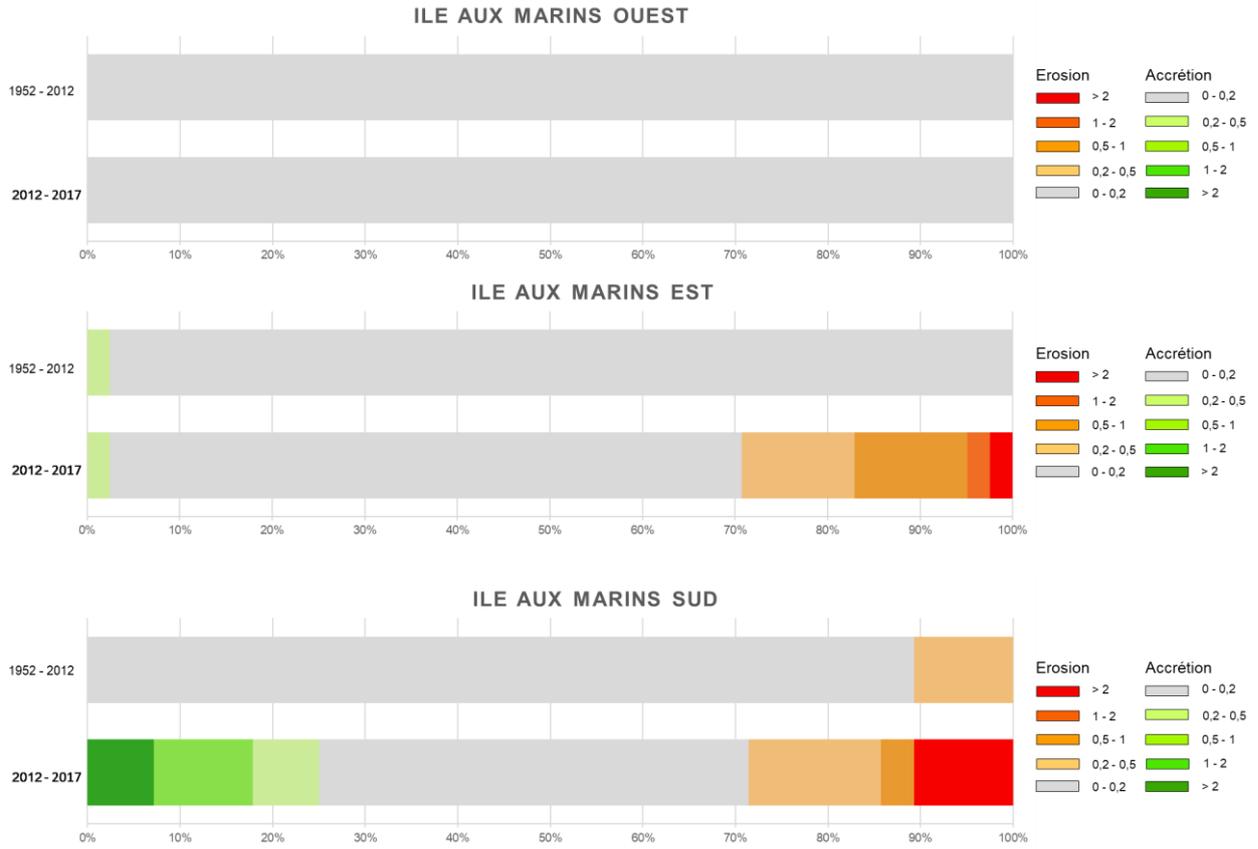


Illustration 70 - Synthèse des évolutions observées en m/an entre la période historique et récente à l'échelle des sites étudiés sur l'île aux Marins

5.3. MIQUELON

Sur la période historique, seuls les sites de la dune de Mirande, la façade orientale de l'isthme de Miquelon et le secteur des Buttereaux présentent une tendance significative à l'érosion (Illustration 71). Le recul moyen de la façade orientale de l'isthme atteint -29 m pour un taux annuel moyen de -0,4 m/an. Concernant le site de la dune de Mirande, l'évolution moyenne nette est de -8 m avec un taux de recul annuel moyen de -0.2 m/an. Les autres sites présentent une stabilité relative de l'évolution du trait de côte sur la période historique.

L'évolution de la dune de Miquelon et l'Etang à Chapeau n'a pas pu être analysée car les données sur la période historique sont incomplètes.

Site	Evolution nette moyenne (m)	Taux annuel moyen (m/an)	% érosion	% stable	% avancée
Anse de Miquelon	-1	0	9%	72%	19%
Dune de Miquelon	NC	NC	NC	NC	NC
Dune de l'Etang du Chapeau	NC	NC	NC	NC	NC
Dune de Mirande	-8	-0.2	42%	58%	0%
Façade occidentale de l'isthme de Miquelon-Langlade	1	0	23%	44%	33%
Façade orientale de l'isthme de Miquelon-Langlade	-29	-0.4	73%	27%	0%

Illustration 71 - Synthèse des évolutions sur la période historique (1952-2012)

Sur la période récente, les tendances annuelles moyennes sont nettement plus significatives (Illustration 72). Des valeurs de moyennes de recul atteignant 1 m/an sont notamment observées sur les deux façades de l'isthme de Miquelon-Langlade avec des reculs moyens compris entre -4 et -3 m. Le secteur de Mirande présente également une tendance au recul d'environ -0.5 m/an avec un recul moyen de -4 m observé sur la période récente.

Par ailleurs, même si la tendance est moins significative, les sites de la Dune de Miquelon et de l'Etang à Chapeau présentent également une légère tendance à l'érosion sur la période récente.

Le site de l'Anse de Miquelon présente à l'inverse une tendance à l'avancée de 0,2 m/an et une évolution de +1 m en moyenne sur la période récente.

Site	Evolution nette (m)	Taux annuel moyen (m/an)	% érosion	% stable	% avancée
Anse de Miquelon	1	0,2	23%	49%	28%
Dune de Miquelon	-1	-0,2	31%	50%	19%
Dune de l'Etang du Chapeau	-1	-0,1	32%	52%	16%
Dune de Mirande	-4	-0,5	80%	17%	3%
Façade occidentale de l'Isthme de Miquelon-Langlade	-4	-1,1	69%	21%	10%
Façade orientale de l'isthme de Miquelon Langlade	-3	-1	75%	16%	9%

Illustration 72 - Synthèse des évolutions sur la période récente (2012-2017)

Les figures suivantes représentent une comparaison, entre la période historique et récente, du pourcentage de linéaire en érosion, stable et en accrétion, selon les classes calculées à partir du taux d'évolution annuel moyen exprimés en m/an (Illustration 73).

Sur la période récente, la tendance à l'érosion est dominante sur le linéaire des sites de la Dune de Mirande et l'Isthme de Miquelon-Langlade (70 à 80% du linéaire en érosion). Par ailleurs, sur les sites de Mirande et de la façade occidentale de l'isthme de Miquelon-Langlade, une augmentation significative du linéaire présentant une tendance à l'érosion est observée entre la période historique et récente.

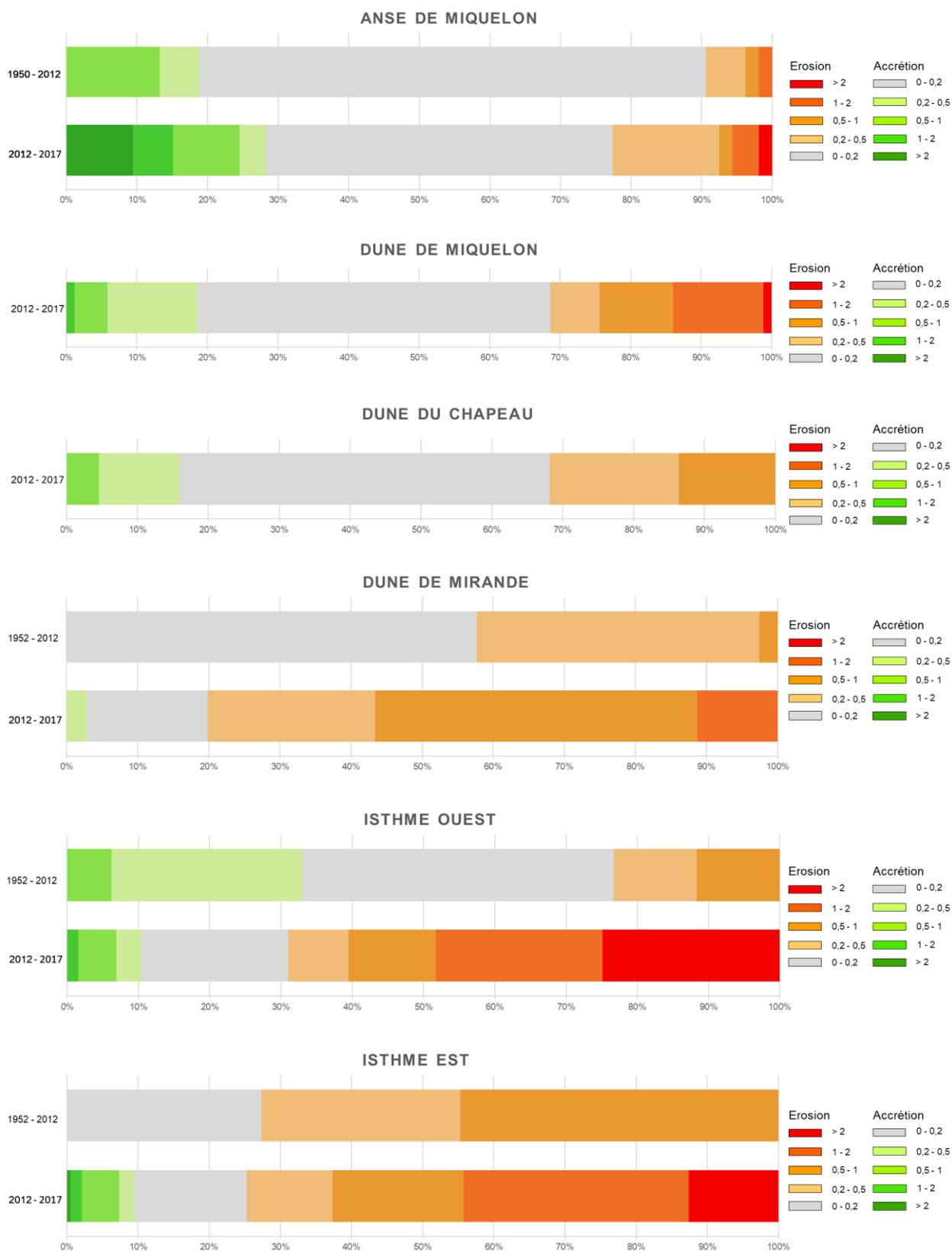


Illustration 73 - Synthèse des évolutions observées en m/an entre la période historique et récente à l'échelle des sites étudiés sur Miquelon

6. Recommandations et perspectives de développement du réseau de suivi

A partir de l'analyse de l'évolution historique et des échanges avec la DTAM sur le terrain, des recommandations et des pistes de développement pour le réseau de suivi du littoral de l'archipel de Saint-Pierre et Miquelon sont présentées dans cette partie.

6.1. PROTOCOLE DE SUIVI

Actuellement 23 sites sont suivis par la DTAM sur l'ensemble de l'archipel. Le nombre et l'étendue des sites étant important, le suivi demande un effort sur le terrain considérable ce qui explique que la fréquence d'acquisition des données soit irrégulière. Afin de suivre plus régulièrement les sites, il est proposé d'ajuster la périodicité des suivis en fonction des évolutions observées.

Par exemple, sur les sites de Saint-Pierre et de l'Île aux marins, qui présentent une relative stabilité, un suivi tous les 2 ou 3 ans est recommandé. Par contre, concernant les sites de Miquelon (Anse de Miquelon, Dune de Miquelon, Anse du Chapeau et Anse de Mirande et Isthme de Miquelon-Langlade) un suivi annuel s'impose. Sur certains sites complètement artificialisés, il est recommandé d'arrêter le suivi morphologique tel qu'il est réalisé actuellement mais de réaliser à la place un suivi des ouvrages et de leurs désordres apparents, plus adapté aux besoins. Il s'agit notamment du site de Pointe Blanche et la partie nord du cordon de Savoyard sur l'île de Saint-Pierre.

Par ailleurs, il est également proposé d'alléger le nombre de profils topographiques de plage à suivre par rapport aux profils théoriques de référence actuellement levés. Un maximum d'un profil tous les 500 m est recommandé sur Miquelon, voir 1 km sur l'Isthme de Miquelon-Langlade qui est très étendu. Le suivi du trait de côte doit se limiter aux côtes basses meubles, en effet l'analyse de la position du trait de côte pour les côtes rocheuses et les champs de blocs présente beaucoup d'incertitude par rapport à la position du trait de côte et peu d'intérêt concernant l'évolution du stock sédimentaire.

Enfin, au cours des campagnes de suivi, les identifiants de références associés au type de levé (trait de côte ou profil de plage), au site et au numéro de profil doivent impérativement être indiqués dans le carnet de terrain du GPS afin de faciliter le traitement et la bancarisation des données.

Le tableau suivant résume les recommandations en termes de fréquence d'acquisition et de nombre de profil de référence théorique à suivre pour chaque site étudié (Illustration 74).

Ensemble	Sites	Linéaire concerné (m)	Nombre de profils théorique actuel	Nombre de profil théorique de référence recommandé	Fréquence
Miquelon	Anse de Miquelon	3 000	28	6	Annuelle
	Dune de Miquelon	4 000	18	8	Annuelle
	Dune du Chapeau	2 000	7	4	Annuelle
	Dune de Mirande	4 0000	36	8	Annuelle
	Façade occidentale de l'isthme de Miquelon-Langlade	12 000	42	12	Annuelle
	Façade orientale de l'isthme de Miquelon-Langlade	9 000	16	9	Annuelle
Saint-Pierre	Anse à Bertrand	150	7	1 profil central	2 à 3 ans
	Anse à l'Allumette	500	4	2	2 à 3 ans
	Les Falcous	100	4	1 profil central	2 à 3 ans
	Pointe Blanche	600	9	/	Arrêter le suivi (site artificialisé)
	Anse Ravenel	250	14	2 profil au niveau du cordon abritant l'étang	2 à 3 ans
	Anse Duguet	500	18	4	2 à 3 ans
	Anse de Savoyard	100	22	1 profil central au niveau de la partie sud du cordon non protégée et arrêter le suivi de la partie nord trop artificialisée	2 à 3 ans (arrêter le suivi sur la partie nord enrochée)
	Anse à Brossard	100	3	1 profil central	2 à 3 ans
Ile aux Marins	Façade Ouest	800	13	4	2 à 3 ans
	Façade Sud	800	5	4	2 à 3 ans
	Façade Est	300 (flèche de galet) et 300 (isthme de l'Anse de Tréhouart)	13	4 profils sur la flèche de galet 2 profils central sur l'Isthme de l'Anse de Tréhouart	2 à 3 ans

Illustration 74 – Synthèse des recommandations concernant le protocole de suivi

Afin de veiller à la reproductibilité des mesures il est également nécessaire d'identifier des indicateurs de la position du trait de côte invariants entre chaque campagne de mesure utilisés par les agents en charge du suivi. Par exemple selon les environnements rencontrés sur l'archipel de Saint-Pierre et Miquelon les indicateurs recommandés sont:

- la limite de végétation de haut de plage ;
- l'escarpement de haut de plage dans les secteurs dépourvus de végétation et en érosion ;
- le pied des ouvrages de protection.

Du point de vue de l'acquisition des données sur le terrain et afin de gagner en efficacité sur les sites très étendus rencontrés à Miquelon notamment, il est recommandé, sous réserve de respecter les conditions de sécurité et d'accessibilité des sites (éviter les zones végétalisées), d'utiliser un véhicule motorisé de type quad pour réaliser les levés de trait de côte (Illustration 75).



Illustration 75 - Quad utilisé par le Réseau d'Observation du Littoral en Corse pour le levé du trait de côte dans la plaine côtière orientale (BRGM)

6.2. SUIVIS COMPLEMENTAIRES PRECONNISES

6.2.1. Suivi par drone

La DTAM s'est équipée depuis 2018 d'un drone permettant de réaliser des prises de vue aériennes (Illustration 76).

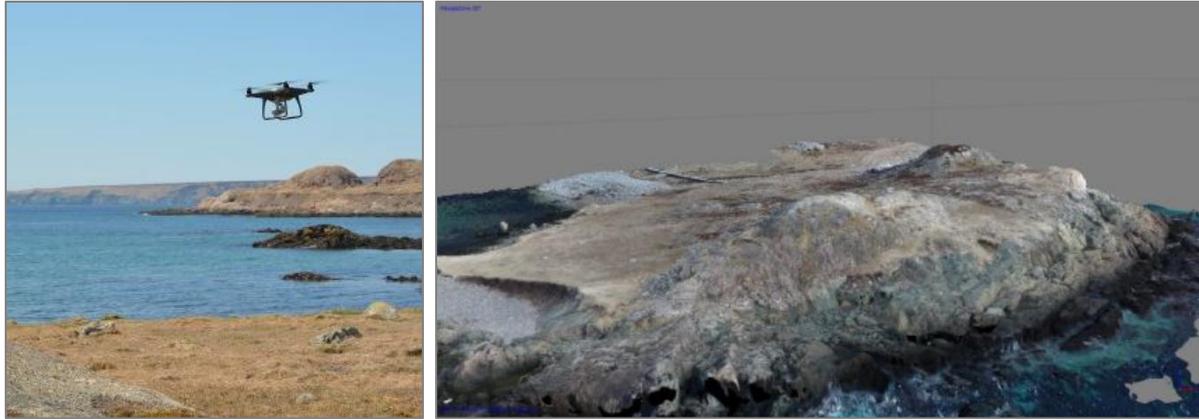


Illustration 76 - Drone de la DTAM à gauche et modélisation de la pointe Diamant par photogrammétrie à droite (source DTAM)

Des sites non suivis actuellement, dans les environnements de falaises meubles (moraine glaciaire) par exemple, peuvent présenter à l'avenir un intérêt si des enjeux sont menacés ou afin d'améliorer les connaissances sur l'évolution de ces formations. Pour ce type d'environnement, parfois difficile d'accès pour des raisons de sécurité liées à l'instabilité des versants, il est recommandé de réaliser un suivi par drone.

Un suivi photographique par drone pourrait également être réalisé tous les 2 ans au niveau de l'Isthme de Miquelon-Langlade afin d'évaluer l'état des formations dunaires, identifier les zones de fragilité dans les cordons (siffle vent et caoudeyre), les dégradations liées aux usages (notamment au sud de l'isthme) ou évaluer l'efficacité des actions de gestion de stabilisation du cordon.

Ce type de suivi peut aussi représenter un intérêt afin de réaliser des modèles numériques de surface par photogrammétrie (Illustration 76) permettant de calculer des bilans sédimentaires et d'analyser le transit des sédiments sur les côtes basses meubles par différentiel entre deux périodes d'acquisition. Cependant, cela nécessite de prendre des points de calage et de contrôle topographiques pour recalibrer le modèle dans le référentiel géodésique local afin de pouvoir comparer les données entre chaque campagne de mesure.

6.2.2. Suivi vidéo haute fréquence

Un suivi par haute fréquence par imagerie vidéo pourrait également être expérimenté dans les sites présentant une variabilité importante tel que le goulet de la lagune du Grand Etang de Miquelon. Des dispositifs photographiques autonomes à bas coût, inférieur à 500€, peuvent être utilisés à ce titre afin de réaliser des observations journalières de la morphologie du goulet par exemple (Illustration 77). Cependant ce type d'outil nécessite la disponibilité d'un support stable situé sur un point haut. Par ailleurs, même si les résultats sont très probants notamment en Guadeloupe ou en Corse, ce type de dispositif n'a pour l'instant pas été testé dans un contexte

climatique similaire à celui de Saint-Pierre et Miquelon (températures négatives, vent important et ensoleillement limité).



Illustration 77 - Dispositif de suivi par imagerie vidéo de type SolarCam®, utilisé en Guadeloupe pour le suivi des échouages de sargasse et de l'évolution du trait de côte

6.2.3. Suivi bathymétrique

Pour ce type d'environnement, il serait également intéressant de poursuivre les suivis bathymétriques au niveau des embouchures et des lagunes du Grand Etang de Miquelon et du Barachois au moins une fois tous les 5 ans (Illustration 78). Ce type de suivi permettrait de quantifier la sédimentation dans les lagunes, la mobilité des bancs de sable et des chenaux.

Le levé bathymétrique ne doit pas nécessairement être exhaustif pour être réalisé à une fréquence plus importante (1 à 2 ans). Par exemple, il pourrait se limiter à 4 à 5 profils croisés représentatifs ou dans un secteur d'intérêt particulier (goulet du Grand Etang par exemple).



Illustration 78 – Suivi bathymétrique des lagunes du Grand Etang de Miquelon (à gauche) et du Grand Barrachois (à gauche) réalisé par la DTAM

6.2.4. Suivi hydrodynamique

Il est important de poursuivre les suivis de l'état de mer à partir du houlographe et des niveaux d'eau grâce au marégraphe afin de caractériser les événements extrêmes auxquels l'archipel est

soumis mais aussi évaluer les effets du changement climatique sur l'élévation locale du niveau de la mer (couplage GPS permanent avec le marégraphe).

6.2.5. Suivi post-événement

Des suivis post-tempêtes, sous réserve des contraintes d'accessibilité des sites et des conditions météorologiques, peuvent également être réalisés. Ces observations, accompagnées de photographies au sol ou par drone, peuvent prendre la forme suivante :

- estimation des niveaux d'eau des terrains inondés en cas de submersion (coordonnées X, Y, Z au niveau du sol et hauteur d'eau estimée ou mesurée),
- relevé des dommages au bâti et aux infrastructures,
- estimation visuelle de l'impact de l'érosion sur les cordons littoraux et coordonnées géographiques des brèches apparentes le cas échéant
- relevés cartographiques des secteurs ayant subi des franchissements de paquets de mer par-dessus les cordons littoraux et les structures de protection.

Des fiches de suivi ou des applications sur smartphone spécialement dédiées peuvent être utilisées le cas échéant afin de faciliter l'organisation de la remontée d'information des observations réalisées sur le terrain par les agents de la DTAM ou de la collectivité.

6.3. GESTION, CAPITALISATION ET DIFFUSION DES DONNEES

6.3.1. Archivages des données d'acquisition

Il est important de veiller rigoureusement à l'archivage des données en indiquant le nom du site et la date de la campagne. Un relevé des problèmes éventuellement rencontrés sur le terrain peut également être indiqué dans une fiche dédiée afin de tracer les informations associées à chaque campagne.

Les données brutes associées aux levés doivent également être archivées. Par exemple, pour chaque déploiement de la base GPS en mode RTK, il est très important d'importer les fichiers « .job » et « .t02 » associés aux antennes GNSS mobile et la base TRIMBLE®. En effet, avec ces fichiers, en cas de mauvaise manipulation ou d'erreur de paramétrage au moment de l'acquisition, il sera toujours possible de corriger les données ultérieurement par post-traitement à partir d'un logiciel dédié.

6.3.2. Capitalisation et diffusion des données

La DTAM s'est récemment dotée du portail d'information géographique « GEOSPM² » (Illustration 79). Ce portail vise à partager l'information et la rendre accessible au grand public en application de la directive européenne INSPIRE.

Ce portail permet aux utilisateurs de télécharger, visualiser et croiser différents types de données thématiques. Il serait donc intéressant de partager les données d'observation de la dynamique du littoral de l'archipel de Saint-Pierre et Miquelon sur cet outil afin de sensibiliser les acteurs de l'aménagement du territoire et le grand public au phénomène d'érosion.

² <https://www.geospm.com/accueil>

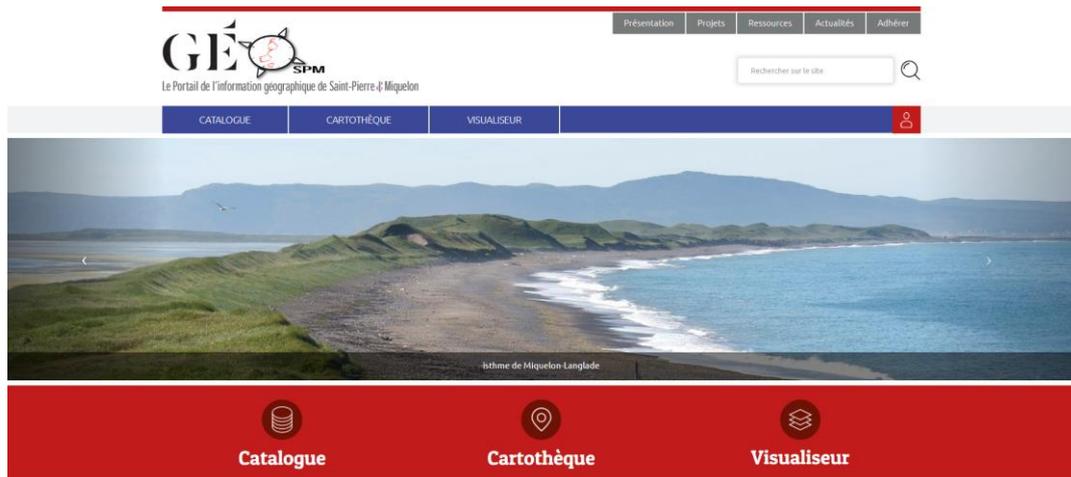


Illustration 79 – Portail d'information géographique de Saint-Pierre et Miquelon

7. Conclusion

Sur la base d'un protocole élaboré par le CETE, la DTAM réalise un suivi topographique régulier du littoral de Saint-Pierre et Miquelon depuis 2012. A ce titre la DTAM a adhéré depuis 2018 au réseau national des observatoires du trait de côte.

Les sites suivis concernent l'ensemble des côtes basses meubles de l'archipel pour un total de 23 sites : 14 sites sur Saint-Pierre et 9 sites sur Miquelon. Soit un linéaire côtier suivi du trait de côte représentant 13 km à Saint-Pierre, dont 121 profils de plage et 41 km à Miquelon comprenant 156 profils de plage.

Les données acquises sur la période récente (2012-2017) ont été traitées et analysées afin d'interpréter les résultats en termes de dynamique du trait de côte. Les données sur la période historique (1952-2012), issues de la photo-interprétation des campagnes aérienne de l'IGN par De La Torre et al. (2016), ont également été utilisées afin de comparer les évolutions du trait de côte sur les deux périodes.

Le secteur de l'isthme de Miquelon-Langlade est le plus affecté par l'érosion. Le taux de recul annuel moyen sur la période récente est estimé à environ -1 m/an dans ce secteur et des valeurs supérieures à -2m/an sont localement atteintes. Les sites de la Dune du Chapeau et de Mirande présentent également une tendance à l'érosion sur la période historique et récente de l'ordre de -0.2 m/an, bien que les aménagements de protection tendent à ralentir le recul du trait de côte sur le site de Mirande. Les observations réalisées sur la Dune de Miquelon indiquent aussi une tendance significative à l'érosion sur la période récente, comprise entre -1 et -2 m/an, dans la moitié sud du site.

Concernant les sites étudiés à Saint-Pierre et l'Île aux Marins, même si des évolutions significatives sont identifiées localement sur la période historique, les observations sur la période récente indiquent une relative stabilité.

A partir de l'analyse du protocole élaboré par le CETE, du retour d'expérience de la DTAM sur les premières années d'acquisition des données et sur la base de l'analyse des premiers résultats, des recommandations techniques et des perspectives de développement de ce réseau de suivi du littoral sont proposées.

A propos du protocole de suivi, il s'agit principalement d'adapter la fréquence d'acquisition selon les évolutions observées et de réduire le nombre de profils de plage de référence à suivre. Des suivis complémentaires, pourront être menés afin d'améliorer les connaissances sur l'évolution de certains sites (suivi photogrammétrique par drone, imagerie vidéo ou bathymétrique par exemple, suivi-post tempête).

Enfin, d'autres recommandations concernent la gestion des données ainsi que leur diffusion sur le portail d'information géographique « GEOSPM » afin de les rendre accessibles aux acteurs de l'aménagements du territoire et du grand public.

8. Bibliographie

BILLY J., ROBIN N., CERTAIN R., HEIN C., BERNE S. (2013) – Barrier shoreline evolution constrained by shoreface sediment reservoir and substrate control : The Miquelon-Langlade Barrier, NW Atlantic. *Journal of Coastal Research*, Special Issue N°65, 2089-2094.

BILLY J. (2014) - Morphologie et architecture d'une barrière composite paraglaciale : l'Isthme de Miquelon-Langlade (Saint-Pierre et Miquelon, France, N-O Atlantique). Thèse de doctorat de l'Université de Perpignan, 323 p.

BILLY J., BALOUIN Y., STEPANIAN A., MUNOZ P. (2019) – Etude des interactions hydro-sédimentaires entre le Goulet du Grand Etang et le sud de la baie de Miquelon. Rapport final. BRGM/RP-69436-FR, 46 p.

BLEIN O., RABU D., COURBOULEIX S., AUDRA J.C. (2015) – Carte géologique de Saint-Pierre et Miquelon à l'échelle du 1/50 000. BRGM éditions.

BOURBAN E. et JOUANNEAU J.C. (2011) - Assistance sur la mise en place du suivi des érosions marines pour le compte de la DTAM Saint-Pierre et Miquelon. Rapport du CETE Normandie Centre, 28 pages.

DE LA TORRE Y., FALGUIÈRE S., LE ROY M. (2013) – VULIT SPM1 - Vulnérabilité du littoral de Saint Pierre et Miquelon face aux risques côtiers. Phase 1 : État des lieux de la dynamique côtière et des enjeux. Rapport final. BRGM/RP-62935-FR, 70p.

DE LA TORRE Y., DOURIS L., BULTEAU T., GARCIN M., LECACHEUX S. (2016) – VULIT - Vulnérabilité du littoral de Saint-Pierre et Miquelon face aux risques côtiers. Phase 2 : caractérisation des aléas recul du trait de côte et submersion marine. Rapport final. BRGM/RP-63988-FR, 25 p.

HAN G, LODER JW. SMITH P.C. (1999). Seasonal Mean Hydrography and Circulation in the Gulf of St. Lawrence and on the Eastern Scotian and Southern Newfoundland Shelves. *Journal of Phys. O.*, 1279-1301.

HAN G, LU Z., WANG Z., HELBIG J., CHEN N., De YOUNG B. (2008) - Seasonal variability of the Labrador Current and shelf circulation off Newfoundland. *JGR*, 113.

LAZURE P., LUNVEN M., RODRIGUEZ J. (2011) – Etude de l'hydrodynamique de la Baie de Miquelon. Rapport IFREMER, 29 p.

ROBIN N. (2007) Morphodynamique des systèmes de flèches sableuses : Etude entre les embouchures tidales de l'Archipel de St Pierre et Miquelon et de la côte ouest du Cotentin. Thèse de doctorat de l'Université de Caen, 539 p.

SAFEGE (2006) – Modélisation courantlogique dans l'archipel de Saint-Pierre et Miquelon.

SHOM (2017) - Références altimétriques maritimes : Ports de France métropolitaine et d'outre-mer. 118 p.

THIELER E., HIMMELSTOSS E., ZICHICHI J., ERGUL A. (2009) - The Digital Shoreline Analysis System (DSAS) version 4.0, an ArcGIS extension for calculating shoreline change: U.S. Geological Survey Open-File Report 2008-1278.



Géosciences pour une Terre durable

brgm

Centre scientifique et technique
3, avenue Claude-Guillemin
BP 36009
45060 – Orléans Cedex 2 – France
Tél. : 02 38 64 34 34 - www.brgm.fr

Direction régionale Guadeloupe
Parc d'activités de Colin
La lézarde
97170 – Petit-Bourg – France
Tél. : 05 90 41 35 48