

# 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

Décembre 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**

Décembre 2019

Étude réalisée dans le cadre de l'opération  
d'Appui aux Politiques Publiques du BRGM AP18STP002

**J. Billy, Y. Balouin, A. Stepanian, P. Munoz**

**Vérificateur :**

Nom : Carlos Oliveros

Fonction : Expert littoral et risques  
côtiers

Date : 09/12/2019

Signature :



**Approbateur :**

Nom : Ywenn De La Torre

Fonction : Directeur DAT  
Guadeloupe

Date : 10/12/2019

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](mailto:qualite@brgm.fr)



Géosciences pour une Terre durable

**brgm**

**Mots-clés** : dynamique hydro-sédimentaire, étang, littoral, Miquelon.

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

**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., 22 ill., 1 ann..

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

## Synthèse

Dans le Nord-Ouest Atlantique, l'archipel de Saint-Pierre et Miquelon est exposé aux aléas météo-marins en cumulant les impacts des dépressions subarctiques mais également des cyclones remontant la côte Est américaine. Le littoral linéaire d'environ 200 km est soumis à la fois à un recul du trait de côte qui affecte les côtes rocheuses ou sédimentaires ainsi qu'à des phénomènes de submersions marines dans les zones basses où est implantée la population (Saint-Pierre, Miquelon et hameau de Langlade).

Dans l'Anse de Miquelon, on constate depuis plusieurs années le comblement de la partie interne du goulet du Grand Etang, et le recul progressif de la partie sud de l'Anse. Les interactions entre le goulet du Grand Etang et la plage adjacente résultent des flux hydro-sédimentaires qui sont liés d'une part au flux hydrologique oscillant dans le goulet et d'autre part à la dérive littorale et son blocage par le goulet. On constate ainsi une élongation du delta de jusant qui piège le transit sédimentaire vers le nord, et entraîne vraisemblablement un déficit d'apport à la plage de l'Anse de Miquelon.

Dans ce contexte, la **D**irection des **T**erritoires, de l'**A**limentation et de la **M**er (DTAM) de Saint-Pierre et Miquelon a sollicité le BRGM pour la réalisation d'une étude visant à comprendre les mécanismes hydro-sédimentaires en jeu dans le secteur du goulet et à fournir une aide à la gestion durable du site et de l'érosion de l'anse de Miquelon.

L'objectif de ce projet est de déterminer le rôle éventuel du goulet sur l'érosion de l'Anse, en particulier dans sa partie sud. Pour ce faire, le projet s'attache à :

- Analyser les évolutions récentes du goulet, de son delta et de la plage adjacente ;
- A évaluer les transits résultant de la dérive littorale par analyse des états de mer sur la côte aval-transit (sud du goulet), au niveau du delta du goulet et sur la côte amont-transit (nord du goulet) ;
- A définir un modèle conceptuel d'évolution morpho-sédimentaire du site en s'appuyant sur une expertise de terrain, sur les flux sédimentaires estimés et sur les études de l'hydrologie du Grand Etang ([Le Moine et al., 2016](#)) ;
- A proposer des solutions de gestion et d'adaptation à court et moyen terme.

L'analyse des données historiques, ainsi que des données d'observation satellitaires récentes a permis de caractériser une évolution morphosédimentaire cyclique de l'embouchure du Goulet avec une augmentation progressive du delta de jusant qui entraîne la rotation du chenal et l'érosion de la partie sud de l'anse de Miquelon, jusqu'à la rupture naturelle de la flèche qui restitue un chenal plus linéaire et entraîne le transfert de sédiments vers l'anse de Miquelon. Ces mécanismes cycliques résultent principalement de la houle dominante et de la dérive littorale, mais le phénomène de rupture, probablement associé à des écoulements plus intenses dans le goulet pendant les grandes marées, reste difficilement prévisible.

L'étude réalisée a permis d'établir un schéma conceptuel du fonctionnement de l'embouchure qui permet d'émettre des préconisations en terme de gestion du système. Deux options principales sont retenues : laisser l'embouchure évoluer naturellement ou mettre en œuvre une intervention modérée visant à rétablir la position d'équilibre du chenal et à recharger la plage en aval-transit, sans toutefois perturber l'hydrodynamique du système.



# Sommaire

<b>1. Introduction .....</b>	<b>11</b>
1.1. CADRE DE L'ETUDE.....	11
1.2. DYNAMIQUE DES EMBOUCHURES TIDALES .....	11
1.2.1. Les bancs de sable et les chenaux .....	12
1.2.2. Evolution des embouchures.....	12
1.3. LE GRAND ETANG DE MIQUELON.....	13
1.3.1. Géomorphologie et caractéristiques de la zone du Grand Etang de Miquelon	13
1.3.2. L'hydrologie du Grand Etang de Miquelon .....	15
<b>2. Méthodologie et données .....</b>	<b>17</b>
2.1. LES DONNEES .....	17
2.1.1. Base de données IGN : Photographies et LIDAR.....	17
2.1.2. Images satellitaires LANDSAT, SENTINEL et PLEIADES.....	17
2.1.3. Relevés D-GPS et bathymétriques de la DTAM 975.....	18
2.1.4. Données météo-climatiques.....	18
2.2. METHODE D'ANALYSE DES DONNEES.....	18
2.2.1. Morphologie de l'embouchure et position du chenal.....	18
2.2.2. Analyse des données de Houle.....	19
<b>3. Résultats .....</b>	<b>21</b>
3.1. EVOLUTION MORPHOLOGIQUE DE L'EMBOUCHURE DU GRAND ETANG .....	21
3.1.1. Evolution long à moyen-terme (1949-2019) .....	21
3.1.2. Evolution court-terme du rivage entre le Port et le sud de l'anse de Miquelon (2012-2017) .....	24
3.1.3. Evolution court-terme de l'embouchure (2016-2019).....	25
3.2. CONDITIONS HYDRODYNAMIQUES VS EVOLUTION DE L'EMBOUCHURE (2016- 2019)28	
<b>4. Préconisations de gestion .....</b>	<b>31</b>
4.1. GESTION DES EMBOUCHURES TIDALES.....	31
4.2. L'EMBOUCHURE DU GOULET DU GRAND-ETANG.....	32
4.2.1. Le laisser-faire .....	33
4.2.2. Intervention sur le delta de jusant .....	34
4.2.3. Préconisation pour le suivi de l'embouchure .....	35
<b>5. Bibliographie .....</b>	<b>37</b>



## Liste des figures

Illustration 1 : Géomorphologie d'une côte présentant une embouchure tidale constituée d'un chenal principal et de bancs de sable (deltas de flot et de jusant).....	11
Illustration 2 : Morphologie du delta de jusant en fonction de l'influence des vagues Vs l'énergie des marées ainsi que la direction dominante du transport sédimentaire longshore (d'après Oertel, 1975; Davis and FitzGerald, 2004).....	12
Illustration 3 : Modèles conceptuels d'évolution des embouchures (FitzGerald et al., 2001), illustrant une embouchure avec un chenal stable (à gauche), des brèches dans le delta de jusant (au centre) et la migration du chenal externe (à droite). ....	13
Illustration 4 – Photographie du cordon qui borde l'ouest de la lagune (© J.Billy), et de l'embouchure du Goulet de Miquelon (© T.Vergoz CNRS Images).....	13
Illustration 5 – Cartes de localisation du Grand Etang de Miquelon (Bathymétrie réalisée par la DTAM et LIDAR 2014) ainsi que les positions de la ligne de rivage en 1952 et 2017. ....	14
Illustration 6 – Typologie des morphologies de l'embouchure du Goulet de Miquelon (morphologie 2017 – image PLEIADES) .....	15
Illustration 7 – Flux cumulés ( $10^4\text{m}^3$ ) et coefficients de marée lors des campagnes d'acquisition de données réalisées par l'IFREMER en 2014 et 2015 dans le goulet du Grand Etang de Miquelon (Le Moine et al., 2016). ....	16
Illustration 8 – Synthèse des images satellitaires (LANDSAT 5, 7, 8, SENTINEL 2 et PLEIADES) et des photographies IGN (ortho-photographies et photographies aériennes) disponibles sur le site d'étude du Grand Etang de Miquelon. Pour chaque période couverte par les données satellitaires, le nombre d'images récoltées et le pourcentage d'images exploitables sont indiqués. ....	18
Illustration 9 : Comparaison des paramètres hydrodynamiques entre les données de la bouée CANDHIS (au Sud) et COSMIC (à l'Est) entre le 25 février et le 12 mai 2015. ....	19
Illustration 10 : A droite – Fréquence (%) des houles en fonction de la direction et la hauteur significatives des vagues lors de la campagne COSMIC LEG2. A gauche – Répartition mensuelle des Hs moyennes et Hs Max entre 2016 et 2018 issues de la bouée CANDHIS.....	20
Illustration 11 – Evolution de l'embouchure du Grand Etang de Miquelon entre 1949 et 2017. Les tracés représentent la ligne de rivage ainsi que l'axe principal du chenal. ....	21
Illustration 12 – Synthèse de l'évolution de l'embouchure et de la migration du chenal entre 1949 et 2017 par périodes successives. ....	22
Illustration 13 – Compléments sur la position du chenal entre 1984 et 2015 – Images satellitaires LANDSAT 5, 7 et 8. ....	23
Illustration 14 : Position de la limite de végétation entre 2012 et 2017 – profils de terrain DTAM. (Fond de carte PLEIADES 2012 ; Système de coordonnées WGS84 UTM 21N).24	
Illustration 15 : Evolution de la limite de végétation entre 2012 et 2017 de la digue du port de Miquelon au sud de l'anse. T0-T20 sont les transects (tous les 50m) sur lesquels ont été calculés cette évolution.....	25
Illustration 16 : Evolution de l'embouchure, des bancs de sable et du chenal entre Juin 2016 et Janvier 2019 - Images satellitaires SENTINEL (pixel 10 m).....	26
Illustration 17 : Séries temporelles des données de houle (Hs et Hs Max) de la bouée CANDHIS et hauteur d'eau (m, par rapport au ZH) issue du marégraphe de Saint-Pierre, et morphologie du chenal sur la période entre le 15 avril 2016 et le 30 décembre 2017. ....	28

Illustration 18 : Séries temporelles des données de houle (Hs et Hs Max) de la bouée CANDHIS et hauteur d'eau (m, par rapport au ZH) issue du marégraphe de Saint-Pierre, et morphologie du chenal sur la période entre le 21 décembre 2017 et le 19 février 2018. ....	29
Illustration 19 : Séries temporelles des données de houle (Hs et Hs Max) de la bouée CANDHIS et hauteur d'eau (m, par rapport au ZH) issue du marégraphe de Saint-Pierre, et morphologie du chenal sur la période entre le 19 Février et le 18 Septembre 2018. ....	30
Illustration 20 : Modèle conceptuel d'évolution de l'embouchure distinguant 3 principales configurations morphologiques (delta de jusant, en gris). ....	32
Illustration 21 – Schéma conceptuel des processus hydrodynamiques à l'embouchure du Goulet du Grand-Etang de Miquelon et au niveau des plages adjacentes (direction du transport sédimentaire, orientation des crêtes de vague). ....	33
Illustration 22 – Schéma d'interventions possibles sur l'embouchure du Goulet. ....	34

## Liste des annexes

Annexe 1 Niveaux d'eau lors des prises d'images satellites SENTINEL .....	39
---	----



# 1. Introduction

## 1.1. CADRE DE L'ETUDE

Depuis plusieurs années, il est constaté (i) un comblement de la partie interne du Goulet du Grand Etang de Miquelon ainsi que (ii) le recul progressif de la partie sud de l'Anse de Miquelon. L'objectif de ce projet est de déterminer le rôle éventuel de cette embouchure sur l'érosion de la zone sud de l'Anse. Cette étude vise à comprendre et identifier la dynamique de l'embouchure du Goulet de Miquelon à différentes échelles de temps, à la fois à moyen terme (1949-2019) et à court/très court terme (2016-2019), afin de :

- (1) Analyser les évolutions récentes et passées de l'embouchure (chenaux et bancs de sable), ainsi que de la plage adjacente ;
- (2) Voir s'il est possible d'estimer les flux sédimentaires ;
- (3) Définir un modèle conceptuel d'évolution morpho-sédimentaire du site ;
- (4) Proposer des solutions de gestion et d'adaptation à court et moyen terme.

## 1.2. DYNAMIQUE DES EMBOUCHURES TIDALES

Les embouchures tidales sont définies comme **des lieux de communication entre l'océan et les environnements semi-fermés**, comme les lagunes, les baies ou les estuaires. Ces embouchures sont constituées d'un ou de plusieurs **chenaux et de bancs de sable** (Illustration 1). **Ces entités sont très mobiles** et contrôlées par la houle, les courants de marée et les apports sédimentaires (dérive littorale) (Illustration 1 ; Schéma issu de Hayes, 1975, 1979 ; Synthèses sur les embouchures tidales dans Balouin, 2001 ; et Chaumillon, 2005).

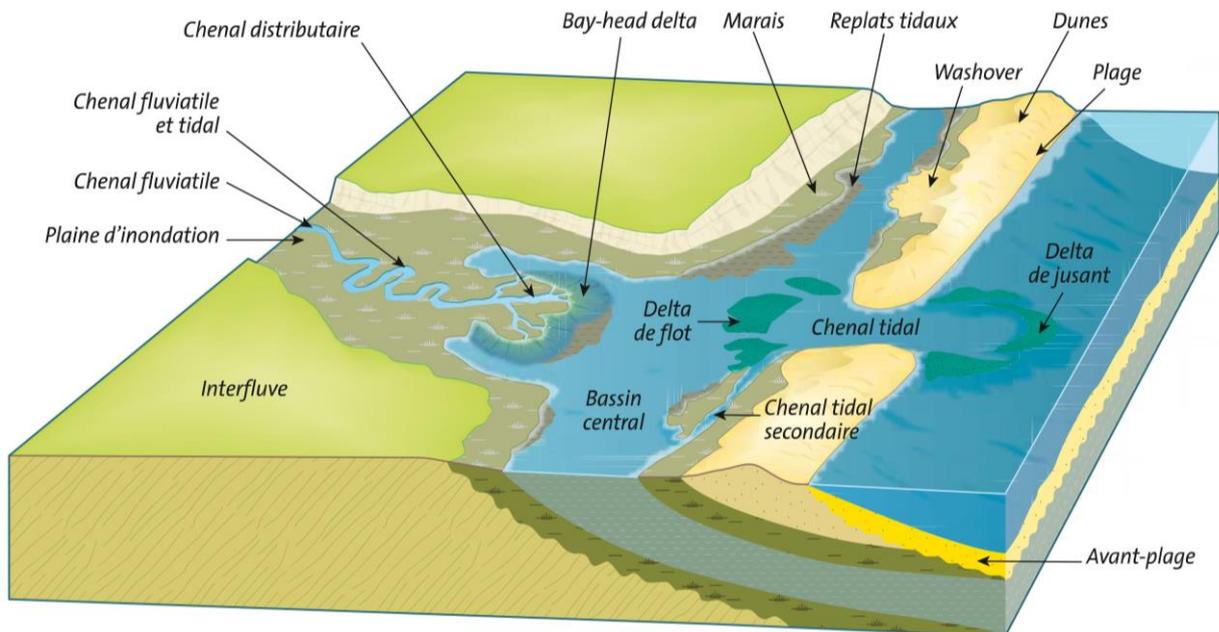
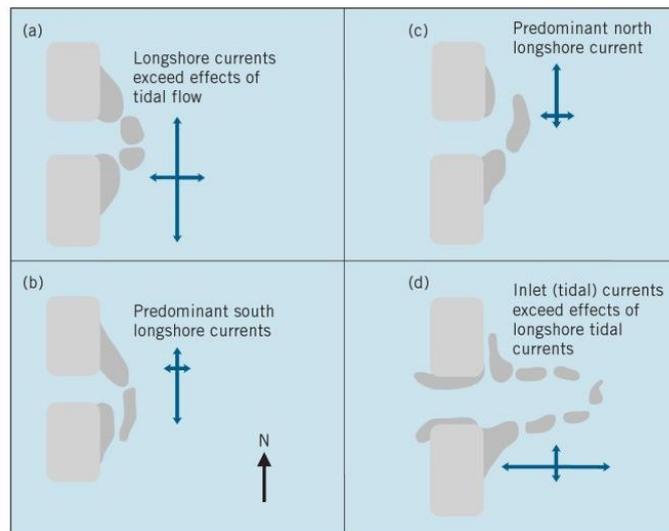


Illustration 1 : Géomorphologie d'une côte présentant une embouchure tidale constituée d'un chenal principal et de bancs de sable (deltas de flot et de jusant).

### 1.2.1. Les bancs de sable et les chenaux

Dans le cadre d'environnements semi-fermés de type lagunaire et définis par une embouchure étroite, les principaux bancs de sable que l'on observe sont dits des **deltas tidaux** (Harris, 1988; Harris and Jones, 1988; Dyer and Huntley, 1999, *Illustration 1*). Ils comprennent les **deltas de jusant et de flot**, localisés de part et d'autre de l'embouchure tidale (Hayes, 1975). Le delta de jusant est à la fois contrôlé par les courants de jusant et par la houle (*Illustration 2*). Le delta de flot est essentiellement contrôlé par les courants de marée. Les morphologies des deltas et de l'embouchure varient en fonction de la prédominance de l'action des houles ou des courants de marées, ainsi que de la direction du transport sédimentaire le long de la côte (*les grandes typologies de morphologies sont présentés ci-dessous ; Oertel, 1975; Hubbard et al., 1979*).



*Illustration 2 : Morphologie du delta de jusant en fonction de l'influence des vagues Vs l'énergie des marées ainsi que la direction dominante du transport sédimentaire longshore (d'après Oertel, 1975; Davis and FitzGerald, 2004)*

Pour les **embouchures dominées par la marée**, les deltas de jusant sont caractérisés par des **accumulations sédimentaires parallèles au chenal principal qui s'étendent vers le large** (Hayes, 1975; Boothroyd, 1978; FitzGerald, 1996; FitzGerald et al., 2001; *Illustration 2d*). Pour les embouchures dominées par la houle, les chenaux sont multiples et de tailles moins importantes.

### 1.2.2. Evolution des embouchures

Les embouchures tidales ont une **morphologie très variable dans le temps**, qui est notamment **conditionnée par le volume d'eau qui est échangé au niveau de la passe lors des marées** (le volume entrant et sortant dans la lagune entre la basse mer et la pleine mer) **et la dérive littorale**. L'orientation du chenal principal sera donc contrôlée à la fois par les apports de sédiments liés à la dérive littorale, et par les courants imposés par la vidange de la lagune lors du jusant.

L'évolution des embouchures tidales peut être catégorisée en trois grands ensembles (*Illustration 3*) :

- (1) Le chenal de l'embouchure est stable, souvent lié à la nature du substrat résistant à l'érosion ; (*Illustration 3, à gauche*)
- (2) L'embouchure est associée à des chenaux multiples et le forçage dominant est la houle ;

- (3) L'embouchure est définie par un chenal unique migrant cycliquement de l'amont vers l'aval du transit sédimentaire et peut induire une brèche dans le delta de jusant (Illustration 3, au centre et à droite).

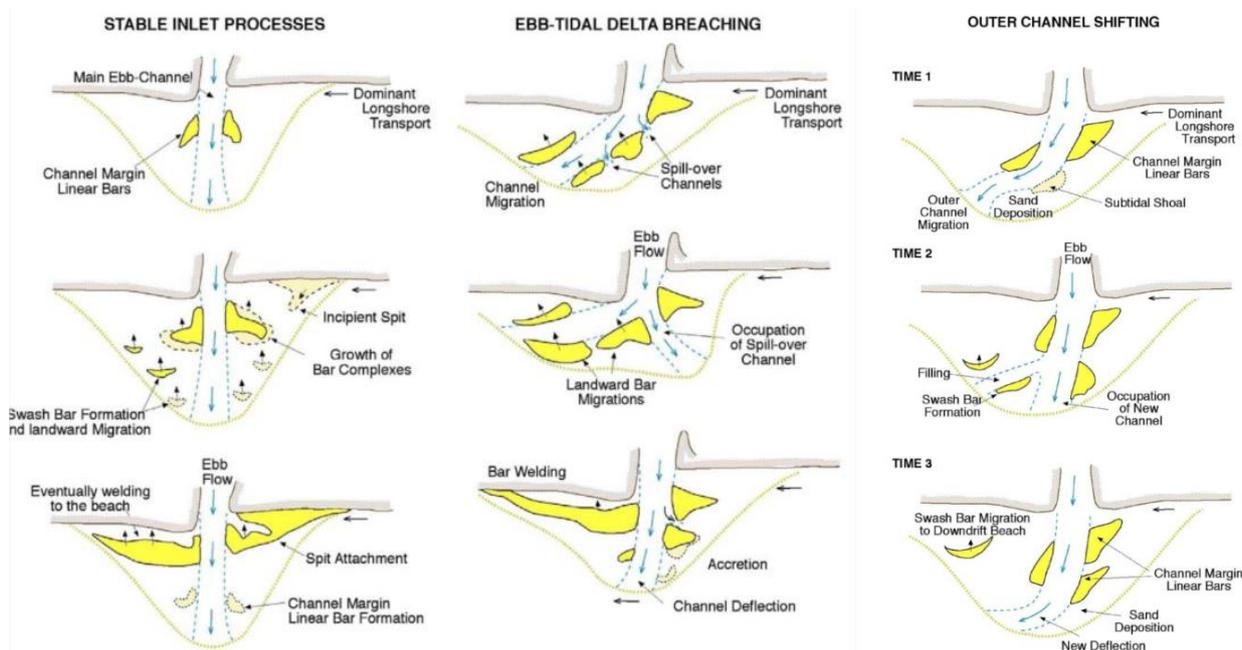


Illustration 3 : Modèles conceptuels d'évolution des embouchures (FitzGerald et al., 2001), illustrant une embouchure avec un chenal stable (à gauche), des brèches dans le delta de jusant (au centre) et la migration du chenal externe (à droite).

### 1.3. LE GRAND ETANG DE MIQUELON

#### 1.3.1. Géomorphologie et caractéristiques de la zone du Grand Etang de Miquelon

Le Grand Etang de Miquelon est une lagune de forme triangulaire d'orientation nord-sud, de 3 km de long, par 1.6 km de large (Illustrations 4 et 5). Au nord, la lagune est bordée par le village de Miquelon et la zone de l'aéroport. Le Grand Etang de Miquelon est bordé à l'ouest par un cordon sédimentaire qui relie les îles du Cap et de Miquelon. Ce cordon de 4 km le long et de 140-200 m de large a une altitude faible qui ne dépasse pas 6 m NGF (Lidar 2014 ; Illustration 4) et peut être franchi par les vagues de tempêtes (Robin, 2007). Il est constitué de sable et de galets et la partie sommitale est colonisée par une végétation basse. Au nord, il est accolé à une plaine de



Illustration 4 – Photographie du cordon qui borde l'ouest de la lagune (© J.Billy), et de l'embouchure du Goulet de Miquelon (© T.Vergoz CNRS Images).

cordons littoraux et est en léger recul depuis 1952 (Illustration 5). Au sud, sur la partie du cordon qui borde la lagune le système littoral est plus mobile. En effet, on constate que le cordon se translate (le cordon roule sur lui-même, phénomène de 'rollover') vers la lagune depuis les années 1950 mais qu'il conserve une largeur similaire (comprise entre 100 et 220 m en 1952). A l'est et au sud, le relief de l'île de Miquelon délimite l'extension de la lagune (Illustration 5).

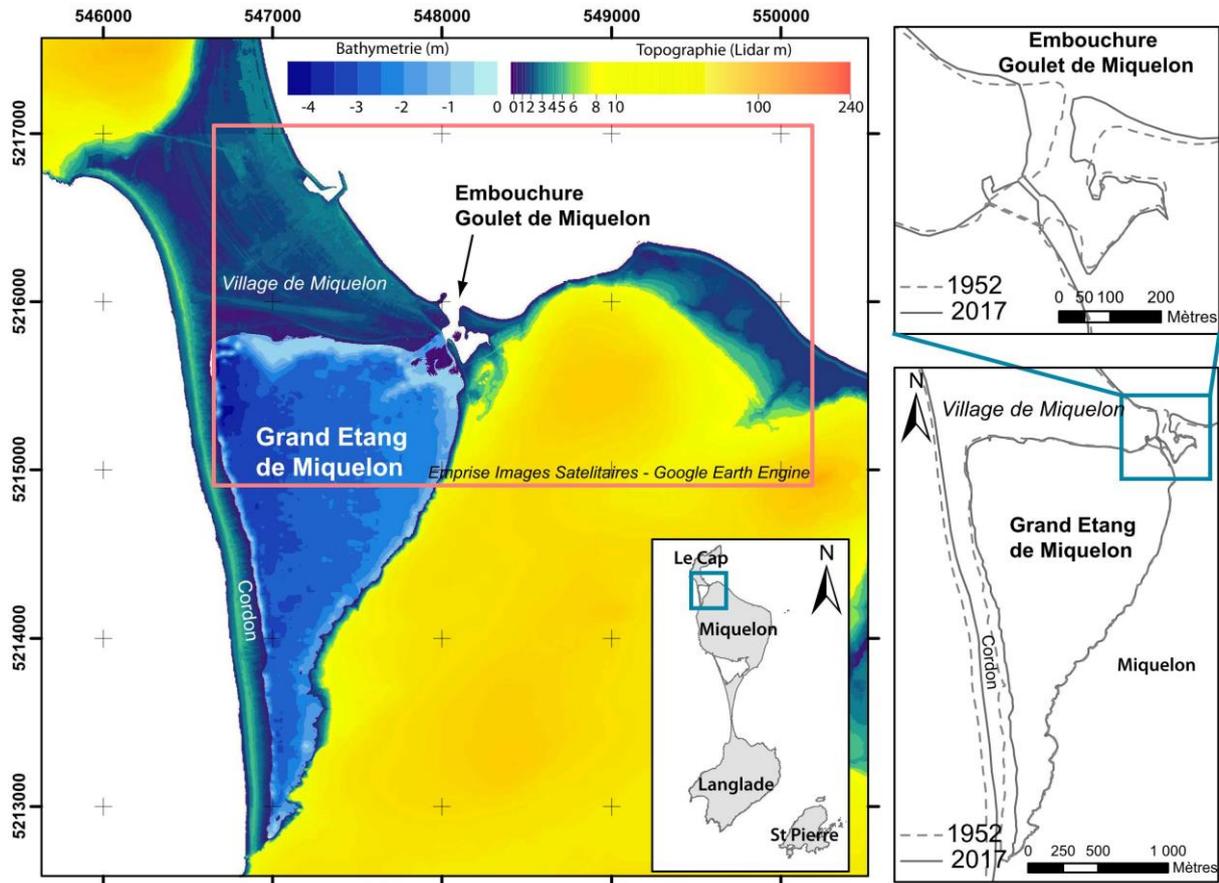


Illustration 5 – Cartes de localisation du Grand Etang de Miquelon (Bathymétrie réalisée par la DTAM et LIDAR 2014) ainsi que les positions de la ligne de rivage en 1952 et 2017.

Au nord-est, l'embouchure du Grand Etang de Miquelon (le Goulet de Miquelon) est une zone ouverte et dynamique qui permet la communication entre la lagune et les eaux de l'océan Atlantique. Le chenal principal est actuellement orienté selon un axe Nord-Est au niveau du pont de Miquelon et Nord-Nord-Ouest sur son extrémité. Il s'étend sur environ 400 m de long et mesure 60 m de large au niveau du pont de Miquelon. Les embouchures sont des zones très dynamiques en constantes évolutions et adaptations face aux forçages météo-marins, houles, vents, débits, apports sédimentaires... L'embouchure du Grand Etang de Miquelon est elle aussi contraintes par ces forçages qui vont influencer son évolution. En effet, cette dynamique se manifeste par des migrations du chenal principal, par l'évolution des plages adjacentes ainsi que par le développement et le déplacement des bancs de sable qui bordent l'embouchure. Une typologie des morphologies de l'embouchure du Goulet est proposée (plages, delta de flot et jusant, Illustration 6).

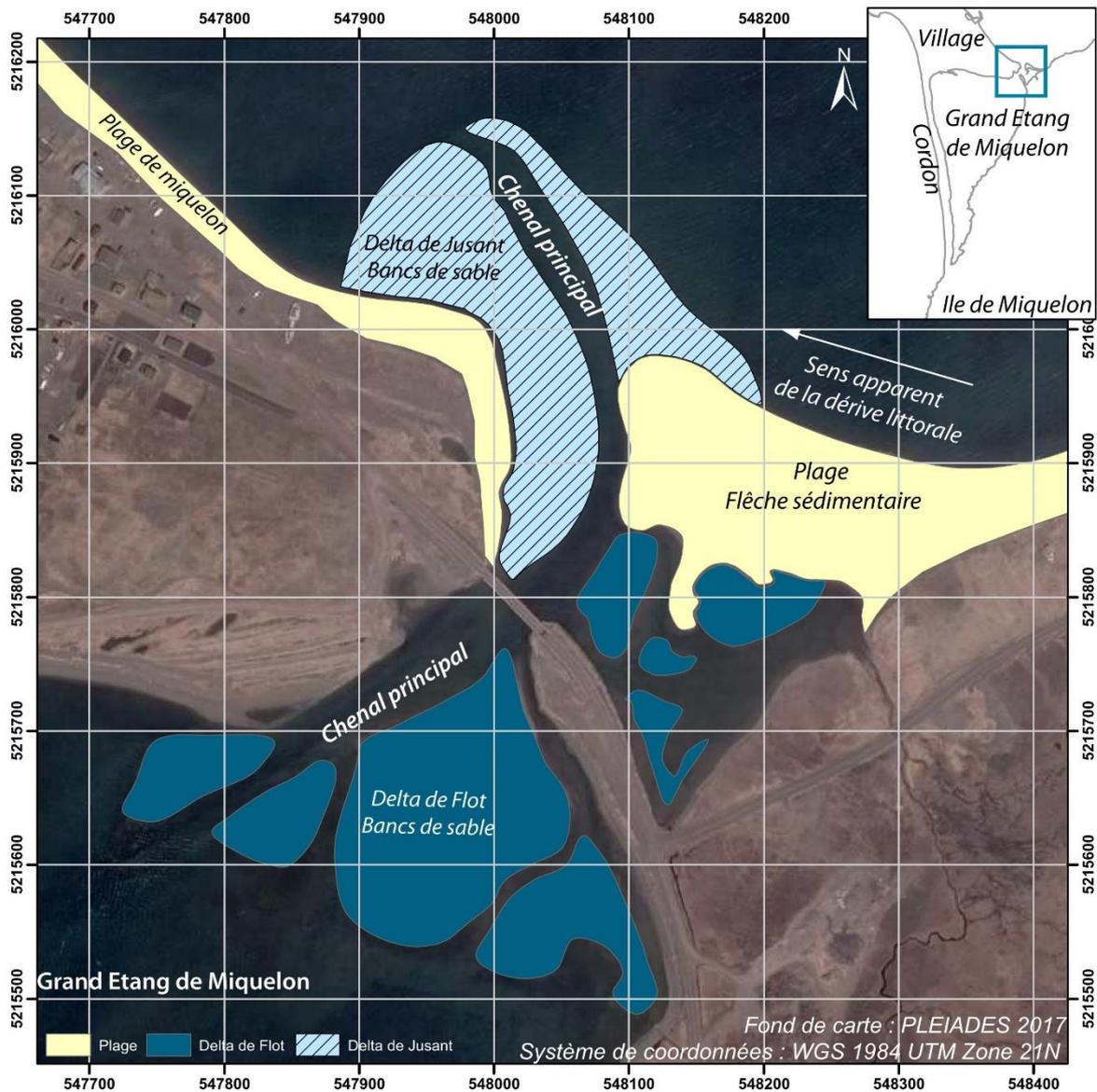


Illustration 6 – Typologie des morphologies de l'embouchure du Goulet de Miquelon (morphologie 2017 – image PLEIADES)

### 1.3.2. L'hydrologie du Grand Etang de Miquelon

L'hydrologie du Grand Etang de Miquelon et le renouvellement des eaux de l'étang a été abordé dans une étude récente de l'IFREMER (projet 2014-2016 ; Le Moine et al., 2016). Le régime de marée est de type semi-diurne et micro- à macro-tidale (marnage moyen de 1.4 m, soit de 1.7 m en vives-eaux, 0.95 m en mortes-eaux et un marnage maximum 2.3 m pendant les plus grandes marées astronomiques ; RAM, SHOM, 2017). La propagation de l'onde de marée au sein de la lagune est peu amortie. Le volume « mort » de la lagune (*i.e.* non-soumis au balancement des marées), considérant une cote des plus basses mers (PBMA) à -0.70 m en dessous du niveau moyen, est estimé à 3.7 millions de m<sup>3</sup>. Le volume maximal lors des plus hautes mers théoriques (+0.70 m au-dessus du niveau moyen) est estimé à 6.7 millions de m<sup>3</sup>. Le volume oscillant estimé est donc de l'ordre de 3 millions de m<sup>3</sup>, ce qui offre une capacité théorique moyen de

renouvellement des eaux de la lagune de 45% du volume maximal. Le Moine et al., 2016, constate une asymétrie marquée entre les temps de marée, avec un flot plus court que le jusant (en moyenne de 4.9h et 7.4h, respectivement).

L'analyse des flux<sup>1</sup> entrant et sortant de la lagune en 2014 et 2015 montrent qu'ils sont (i) corrélés au coefficient de marée ; (ii) que les flux de flots sont négativement corrélés à la pression atmosphérique (c'est-à-dire que le flux est plus important avec des faibles pressions atmosphériques) ; mais que (iii) l'influence de la force et/ou la direction des vents n'est pas clairement comprise et devrait être investiguée davantage.

L'analyse des flux montre que sur les deux périodes étudiées il y a régulièrement plus de flux sortant qu'entrant par le Goulet lors des battements de marées. En effet, sur la période étudiée en 2014, il y a eu 65 occurrences (marées) dont les flux entrants étaient supérieurs aux flux sortants et 95 occurrences dont les flux entrants étaient inférieurs aux flux sortants ; alors qu'en 2015 il y en a eu respectivement 9 et 234 (Illustration 7 ; Le Moine et al., 2016). La cause n'est pour l'instant pas connue, mais l'hypothèse émise dans le rapport de Le Moine et al. (2016) pour expliquer cette anomalie entre les flux de flot et de jusant serait la présence de phénomènes de percolation d'eaux marines depuis l'océan sous le cordon dunaire à l'ouest. Cette hypothèse n'a pour l'instant pas pu être vérifiée, ni enregistrée, et nécessiterait une investigation spécifique au niveau du cordon, et au niveau de l'embouchure pour contrôler les flux. Le phénomène d'asymétrie entre les flux flot/jusant n'est pour l'instant pas clairement compris et est probablement le résultat combiné de plusieurs facteurs météo-marins (vents, coefficients, hydrologie, saisonnalité...).

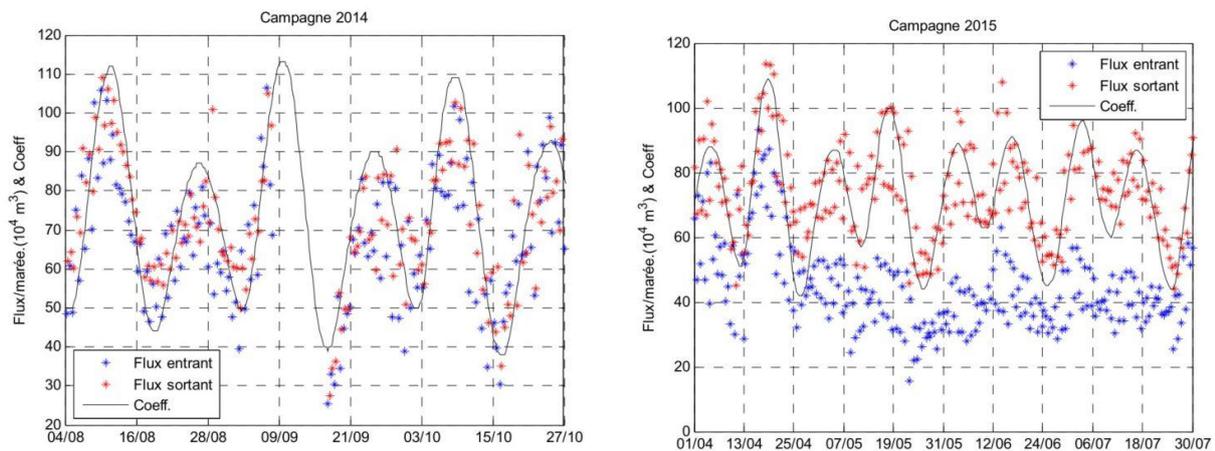


Illustration 7 – Flux cumulés ( $10^4 m^3$ ) et coefficients de marée lors des campagnes d'acquisition de données réalisées par l'IFREMER en 2014 et 2015 dans le goulet du Grand Etang de Miquelon (Le Moine et al., 2016).

<sup>1</sup> Le flux est le volume total (entrant ou sortant) lors d'un cycle de marée : flot = entre BM et PM ; jusant entre PM et BM. Ces volumes sont calculés dans Le Moine et al. (2016) à partir des vitesses mesurées dans le goulet.

## 2. Méthodologie et données

L'analyse morphologique de l'évolution de l'embouchure et de l'orientation du chenal du Goulet du Grand Etang de Miquelon a été réalisée en couplant des données d'imageries satellitaires, les ortho-photographies de l'IGN, le Lidar 2014 de l'archipel ainsi que des données de terrain de relevés de la position du trait de côte et la bathymétrie de la lagune, réalisées par la DTAM 975. Des données météo-climatiques de houle, de vent et de marée permettront d'alimenter les connaissances sur la dynamique du site. L'ensemble de ces données permettent d'analyser : (1) l'évolution moyen-terme des morphologies principales (limite du rivage, position de l'embouchure) entre 1949 et 2019, et (2) les variations court- à très court-terme entre 2016 et 2019.

### 2.1. LES DONNEES

#### 2.1.1. Base de données IGN : photographies et LIDAR

Trois ortho-photographies de l'IGN sont disponibles sur l'archipel de 1952, 2000 et 2005 (résolution = 0,5 m). Plusieurs photographies aériennes hautes résolutions sont également disponibles sur le site de l'IGN '*remonter le temps*' (<https://remonterletemps.ign.fr>). Ainsi les prises de vue de 1949, 1978, 1985 et 1990 ont été téléchargées et géo-référencées afin d'alimenter le jeu d'images hautes résolutions disponibles sur le site d'étude.

Le levé topographique LIDAR 2014 réalisé par l'IGN couvre l'ensemble de l'archipel et fournit des informations complémentaires sur les géomorphologies et la topographie des zones de plages et de l'embouchure.

#### 2.1.2. Images satellitaires LANDSAT, SENTINEL et PLEIADES

Les images satellitaires couvrant les 35 dernières années (1984-2019) sont désormais accessibles gratuitement. L'ensemble des images acquises par les satellites LANDSAT (5, 7, et 8 ; résolution = 30 mètres) et SENTINEL 2 (résolution = 10 mètres) ont été extraites depuis le serveur Google Earth Engine (<https://earthengine.google.com/>) à l'aide d'un script Python CoastSat (Vos et al., 2019) sur la zone du Goulet du Grand Etang de Miquelon (emprise des images - *Illustration 5*). La captation de ces données représente un très grand nombre d'images (550 images) acquises à un intervalle de temps régulier. Toutefois il est important de noter qu'environ 50 % de ces images ne sont pas exploitables en raison de conditions météorologiques défavorables (ex : nuages) qui empêchent la prise de vue du sol. La répartition des images et les principales caractéristiques sont détaillées *Illustration 8*.

Du fait des dimensions de l'embouchure et de la zone étudiée (1300 x 600 m), les images satellites LANDSAT 5, 7 et 8 vont permettre d'apporter des éléments sur les grandes tendances d'évolution de l'embouchure dont l'orientation du chenal entre 1984 et 2016. Les images SENTINEL 2, de plus haute résolution, vont quant à elles permettre de caractériser l'évolution avec davantage de détails sur la période récente 01/2016-03/2019.

Des images très haute résolution acquises par le satellite PLEIADES (résolution = 0,5 mètres) en 2012 et 2017 viennent renforcer le jeu de données. Ces images PLEIADES seront utilisées de la même manière que les photographies de l'IGN.

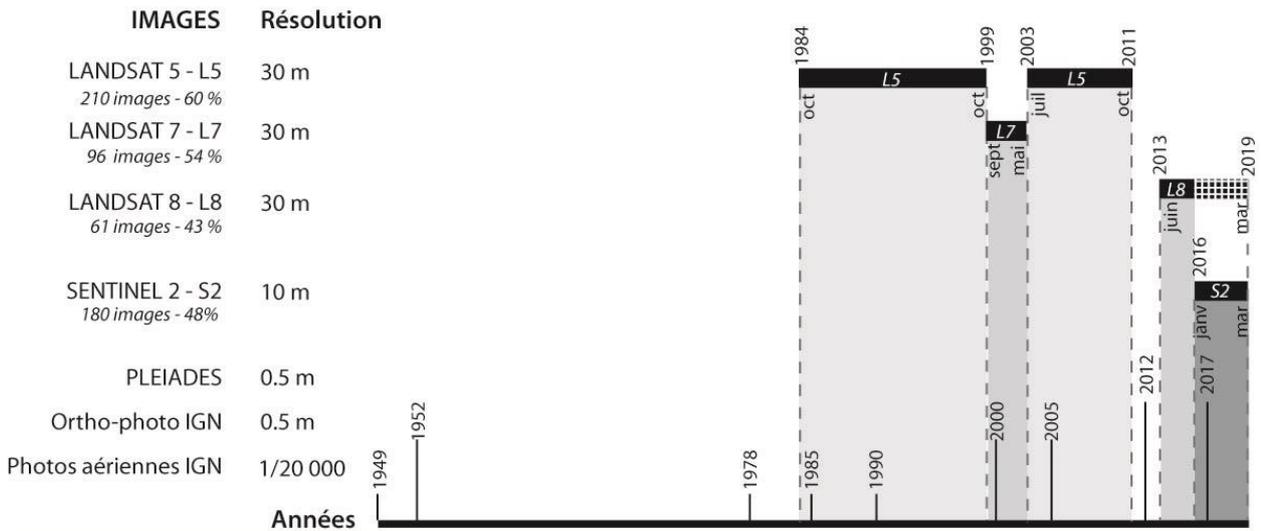


Illustration 8 – Synthèse des images satellitaires (LANDSAT 5, 7, 8, SENTINEL 2 et PLEIADES) et des photographies IGN (ortho-photographies et photographies aériennes) disponibles sur le site d'étude du Grand Etang de Miquelon. Pour chaque période couverte par les données satellitaires, le nombre d'images récoltées et le pourcentage d'images exploitables sont indiqués.

### 2.1.3. Relevés D-GPS et bathymétriques de la DTAM 975

Plusieurs données de suivis de l'état du littoral de l'archipel sont disponibles :

- Les traits de côte des années 2012, 2013, 2015, 2016 et 2017. L'indicateur du trait de côte pris sur le terrain est la limite de végétation.
- La bathymétrie de la lagune du Grand Etang de Miquelon réalisée par la DTAM 975 en 2014 (MNT disponible avec un maillage régulier de 0.5 m et 1 m, Le Moine et al., 2016).

### 2.1.4. Données météo-climatiques

Les données météo-climatiques rassemblent des données de :

- (1) **Houle** issues CANDHIS (depuis 2011 pour la bouée de Saint-Pierre N°97501 ; données toutes les 30min; <http://candhis.cetmef.developpement-durable.gouv.fr/>);
- (2) **Courants** issues de mesures ADCP pour la façade Nord (18/09 – 18/11/2015) et pour la façade Est (29/01-12/05/2015) issues du projet COSMIC réalisé par l'IFREMER (données toutes les 2 heures);
- (3) **Vent** (vitesse moyenne en km/h et direction) de 2016 à 2018 issue du site METEOCIEL (<http://www.meteociel.fr/previsions/69132/miquelon.htm>);
- (4) **Niveau de la mer** issues du marégraphe de Saint Pierre (SHOM, site SONEL <https://www.sonel.org/?page=maregraphe&idStation=3166>).

## 2.2. METHODE D'ANALYSE DES DONNEES

### 2.2.1. Morphologie de l'embouchure et position du chenal

Les données IGN et PLEIADES permettent d'avoir une image haute résolution de l'embouchure entre 1949 et 2017 (9 images - Illustration 9). Afin de caractériser sa morphologie et sa mobilité au cours du temps, la limite sable/eau a été digitalisée. Dans le cadre de cette étude, ce choix

n'est pas bloquant malgré des clichés pris à des heures de marée différentes. En effet, la zone présente un estran réduit (marnage moyen 1.4 m et marnage maximum 2.3 m) et la limite sable sec/sable humide n'est pas clairement visible sur les clichés en noir et blanc. De plus, cet indicateur est plus probant que la limite de végétation, qui ne se focaliserait que sur les zones stables de haut de plage et non pas la mobilité sédimentaire des zones dynamiques de l'embouchure, qui dans notre cas nous intéressent directement. Cette limite sable/eau est adéquate et suffisante dans le cadre de cette étude pour identifier les évolutions morphologiques à grande échelle de l'embouchure.

Les clichés permettent par transparence de voir la position du chenal (pixel plus foncés). Ainsi la position du chenal principal sera également digitalisée afin de voir son évolution au cours du temps. Les images LANDSAT, bien que de plus basse résolution, permettent également de pouvoir identifier la zone du chenal et l'embouchure (différences de couleur des pixels), leur digitalisation permettra d'apporter des éléments complémentaires sur la période 1984-2016.

## 2.2.2. Analyse des données de Houle

Les données concernant la direction et la hauteur significative des vagues ( $H_s$ ) de la bouée CANDHIS (au sud de Saint-Pierre) et de la campagne COSMIC (sur la façade Est – Leg 2) sont confrontées (Illustration 9). Cela permettra de voir si les données de la bouée CANDHIS qui s'étendent sur une plus longue durée peuvent être représentatives des houles qui frappent la façade Est de l'Archipel et donc Miquelon village et l'embouchure du Grand Etang de Miquelon.

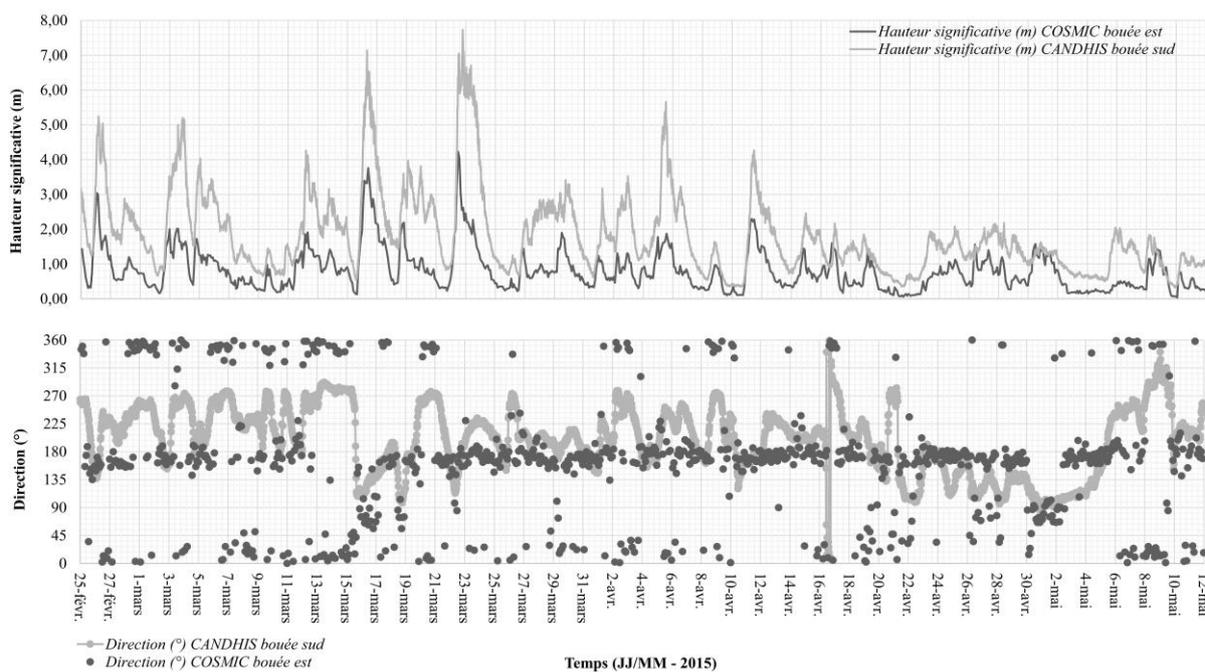


Illustration 9 : Comparaison des paramètres hydrodynamiques entre les données de la bouée CANDHIS (au Sud) et COSMIC (à l'Est) entre le 25 février et le 12 mai 2015.

L'analyse statistique entre les données CANDHIS et COSMIC Leg2 sur la même période permet de déterminer des coefficients de corrélation ( $R^2$ ) entre les deux jeux de données qui sont de 0,74 (74 %) pour la hauteur significative des vagues ( $H_s$ ) et de 0,10 (10%) pour leur direction. Ainsi on considère que la variabilité des  $H_s$  au cours du temps est concordante entre les deux bouées. Ainsi, il sera donc possible de se baser sur les données CANDHIS pour avoir une représentation

de la variabilité de la hauteur des vagues qui touche Miquelon. L'analyse pluriannuelle entre 2016 et 2018 des Hs montre une variabilité saisonnière en terme de hauteur des vagues (Illustration 10) avec des Hs moyennes mensuelles plus élevées l'hiver (décembre à mars) compris entre 1.5 et 3 m et des moyennes maximales atteignant 5 m, alors que la période estivale a des valeurs de Hs moyennes comprises entre 1 et 1.5 m et maximales autour de 3 m.

En ce qui concerne la direction de la houle, les données sont peu transposables, et ne seront donc pas prises en compte en l'état actuel. Ceci s'explique par la localisation des deux bouées, celle de CANDHIS étant protégée par Saint-Pierre au Nord, est moins affectée par les houles de direction Nord (0-45° et 315-360°, Illustration 9). Les houles provenant du Sud sont dominantes pour les deux bouées (Sud pour COSMIC Illustrations 9 & 10, et Sud à Sud-Est pour CANDHIS). On peut quand même noter que lorsque la bouée CANDHIS enregistre des houles de direction Est (270° - Illustration 9) cela coïncide avec des directions de houles Nord pour la bouée COSMIC-Leg2.

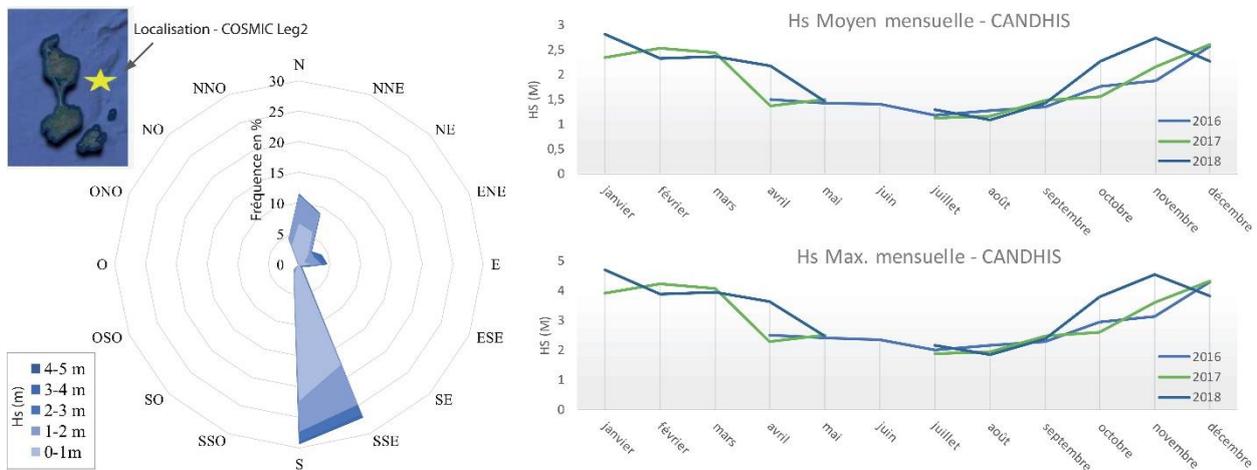


Illustration 10 : A droite – Fréquence (%) des houles en fonction de la direction et la hauteur significatives des vagues lors de la campagne COSMIC LEG2. A gauche – Répartition mensuelle des Hs moyennes et Hs Max entre 2016 et 2018 issues de la bouée CANDHIS.

Le flux sédimentaire (le taux de transport) est conditionné par les conditions de vagues, la forme du fond (bathymétrie) et les caractéristiques du sédiment transporté. Pour cette étude les données de houle ne permettent pas de faire une estimation avec une précision satisfaisante du flux sédimentaire.

### 3. Résultats

#### 3.1. EVOLUTION MORPHOLOGIQUE DE L'EMBOUCHURE DU GRAND ETANG

##### 3.1.1. Evolution long à moyen-terme (1949-2019)

Les images hautes résolutions de l'IGN et PLEIADES permettent d'avoir une représentation fine des morphologies de l'embouchure en 1949, 1952, 1978, 1985, 1990, 2000, 2005, 2012 et 2017 (Illustration 11). Sur chaque image, la ligne de rivage (limite terre/mer) et la position du chenal principal ont été identifiées afin de comparer leurs évolutions au cours du temps (Illustration 12).

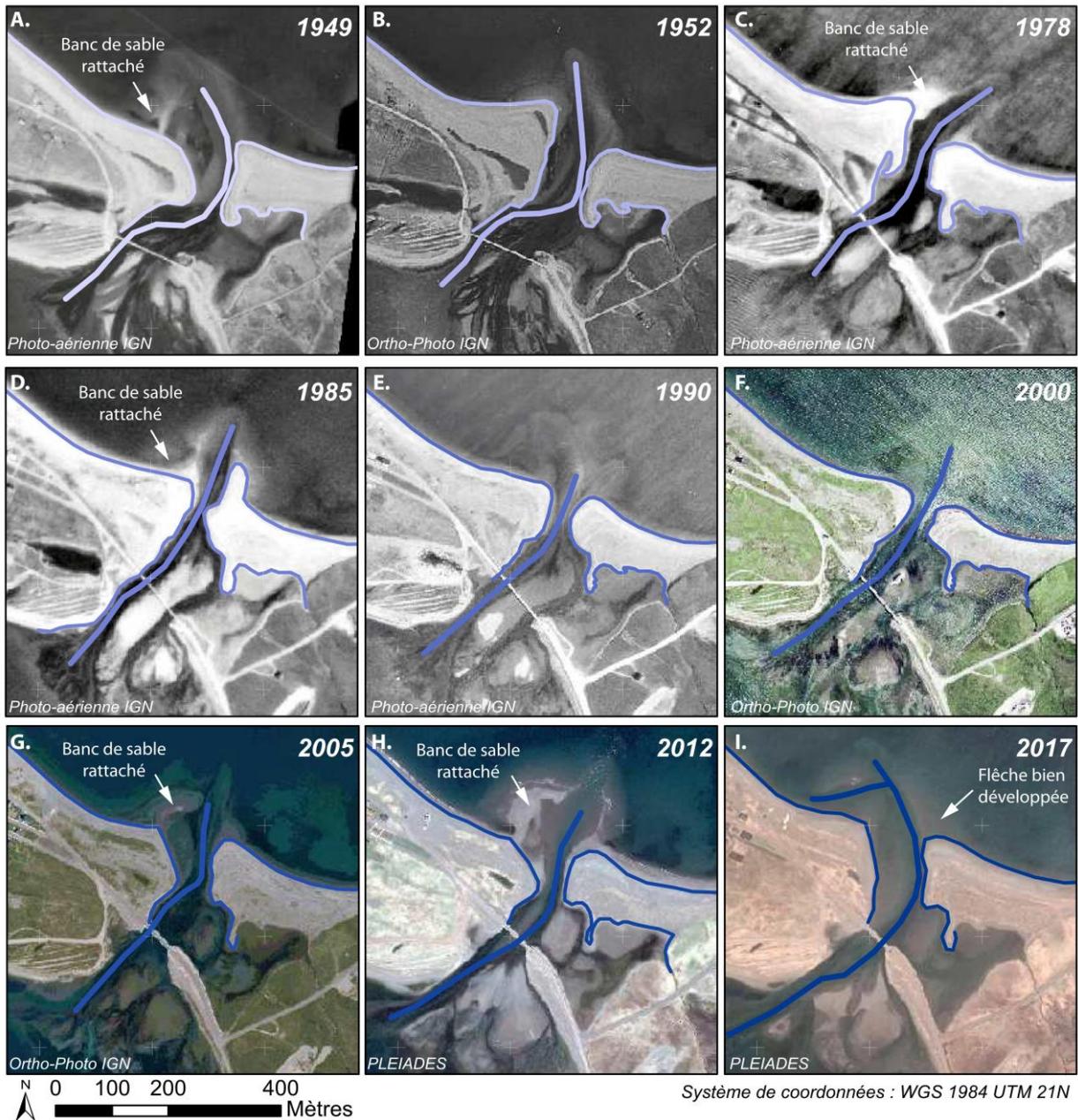


Illustration 11 – Evolution de l'embouchure du Grand Etang de Miquelon entre 1949 et 2017. Les tracés représentent la ligne de rivage ainsi que l'axe principal du chenal.

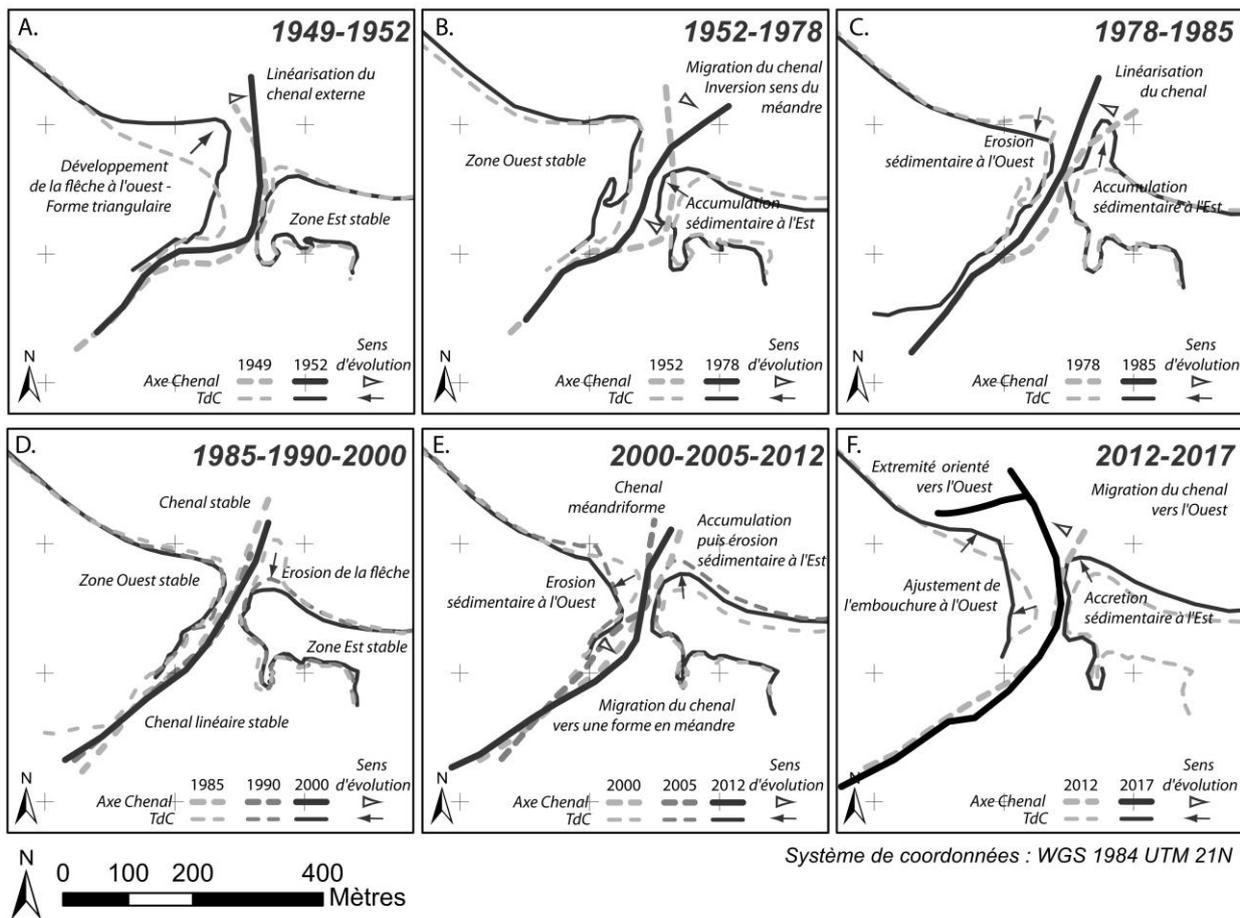


Illustration 12 – Synthèse de l'évolution de l'embouchure et de la migration du chenal entre 1949 et 2017 par périodes successives.

Pour chaque différentiel, trois zones vont être commentées afin de caractériser l'évolution ou la stabilité de l'embouchure : (1) **la ligne de rivage à l'Ouest** et (2) **à l'Est de l'embouchure**, (3) ainsi que **la position du chenal** (Illustration 12). La partie interne du chenal (à l'intérieur de la lagune) est quasiment stable sur toute la période étudiée. La description des évolutions du chenal se concentrera sur sa partie externe (depuis le pont vers l'extérieur de la lagune) et sur sa partie distale (la partie la plus au large).

De 1949 à 1952

La ligne de rivage à l'Ouest de l'embouchure est très différente entre les clichés de 1949 et 1952, alors qu'elle est quasiment identique à l'Est de l'embouchure (Illustration 12A). En effet, sur cette période de 3 ans, on observe une forte accumulation sédimentaire de forme triangulaire qui s'étend jusqu'au chenal. En concordance avec ce dépôt sédimentaire, la partie distale du chenal migre et se linéarise. Ainsi l'orientation de la partie externe du chenal en 1952 est plein Nord.

De 1952 à 1978

On constate qu'entre 1952 et 1978 le chenal arbore une forme 'méandrique' inversée (Illustration 12B). La ligne de rivage à l'ouest de l'embouchure est stable, mais on constate qu'en 1978 un banc de sable est rattaché au sud de l'anse (Illustration 11C). Sur cette période l'évolution du chenal est contrainte par (1) ce banc de sable rattaché à l'anse qui délimite le flanc ouest du chenal et contraint sa partie distale à migrer vers l'est, et (2) la progradation de la zone à l'est de l'embouchure qui va contraindre le chenal externe à migrer vers l'ouest.

### De 1978 à 1985

Entre 1978 et 1995 (Illustration 12C) on constate (1) un recul de la ligne de rivage à l'ouest de l'embouchure, qui est liée à une perte sédimentaire du banc de sable rattaché au rivage, et (2) une accumulation sédimentaire à l'est de l'embouchure (développement d'une flèche sableuse vers le nord). Le chenal se linéarise et a une orientation Nord-Nord-Est.

### De 1985 à 2000

Sur les trois clichés de 1985, 1990 et 2000 on constate que l'embouchure est stable que ce soit en terme de position de la ligne de rivage ou du chenal (Illustration 12D). La seule évolution concerne la disparition de la petite flèche sableuse précédemment identifiée à l'est sur la photo de 1985.

### De 2000 à 2012

Entre 2000, 2005 et 2012 (Illustration 12E) on constate (1) un recul de la ligne de rivage à l'ouest de l'embouchure, et (2) une accumulation sédimentaire à l'Est de l'embouchure (développement d'une flèche sableuse vers le nord). Le chenal retrouve une forme méandriforme.

### De 2012 à 2017

Entre 2012 et 2017 des évolutions sont constatées sur les trois domaines (Illustration 12F). L'accumulation sédimentaire sur la zone à l'est de l'embouchure et de la flèche sédimentaire qui se prolonge vers le large (Illustration 11I) contraignent l'extrémité du chenal à migrer vers l'ouest. A l'ouest de l'embouchure la ligne de rivage s'ajuste (érosion et accrétion).

Les images LANDSAT 5, 7 et 8 vont contribuer à apporter des informations complémentaires sur l'évolution de l'embouchure entre 1984 et 2015, et plus particulièrement sur l'orientation du chenal. Malgré la faible résolution des données LANDSAT (30 m) la différence de couleur des pixels entre la terre/la côte et la mer permet d'identifier clairement l'axe du chenal (Illustration 13). Le chenal externe évolue sur un espace équivalent à 2 pixels, soit sur une largeur maximale de 60 m, et sa partie distale sur un espace équivalent à 5 pixels, soit sur une largeur de 150 m. Ainsi on constate que l'orientation principale du chenal :

- (i) semble être stable et orientée vers le nord entre 1985 et 1995 ;
- (ii) entre 1996 et 1999 la tête du chenal change d'orientation et est dirigée vers le nord-est ;
- (iii) à partir de 2000 le chenal reprend une orientation vers le nord ;
- (iv) et, en 2014 et 2015 la tête du chenal est orienté vers le nord-ouest.

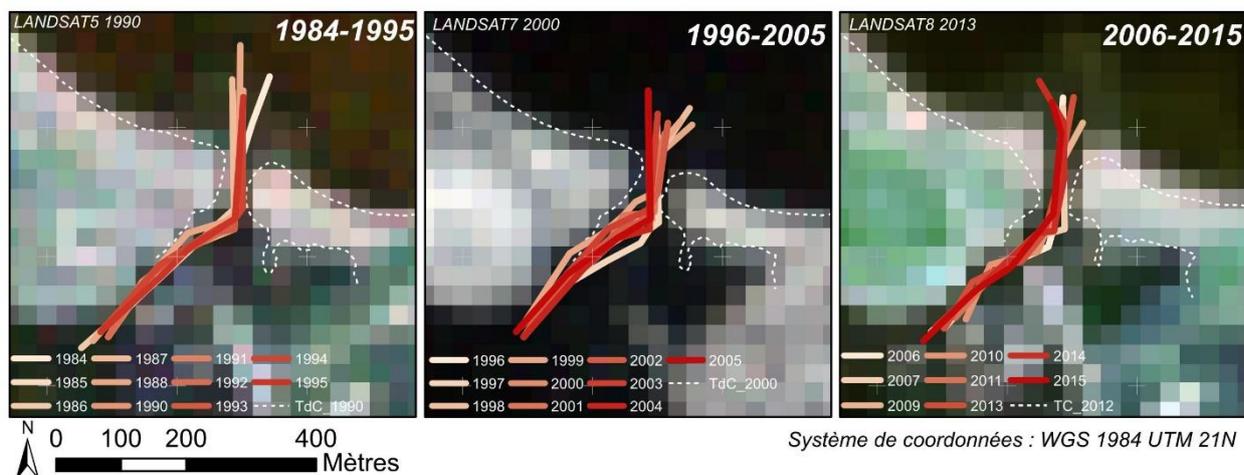


Illustration 13 – Compléments sur la position du chenal entre 1984 et 2015 – Images satellitaires LANDSAT 5, 7 et 8.

### 3.1.2. Evolution court-terme du rivage entre le Port et le sud de l'anse de Miquelon (2012-2017)

L'analyse de l'évolution du trait de côte entre le port de Miquelon et le sud de l'anse a été réalisée en se basant sur les données de terrain relevées par la DTAM marquant la position de la limite de végétation. Cette zone, qui couvre environ 1 km de linéaire, peut être découpée en quatre parties catégorisées par leur évolution entre 2012 et 2017 (Illustrations 14 & 15 ; T0-T20 sont des transects espacés tous les 50m). Du nord vers le sud on observe :

- (1) A partir de la digue du port (T0) et sur environ 350 m (T7) : une avancée de la limite de végétation, prédominante au niveau de la digue du port (de l'ordre de 10 m) ;
- (2) Entre 350 (T7) et 600 m (T12) : une zone qui peut être qualifiée comme étant une zone de stabilité de la limite de végétation ;
- (3) De 600 (T12) à 750 m (T15, bateau Le Muscadin) une zone de recul de la limite de végétation ;
- (4) Au sud, sur toute la zone de l'anse de Miquelon et jusqu'au pont (T20), une zone de mobilité de cette limite qui oscille entre des phases d'avancées et de reculs.

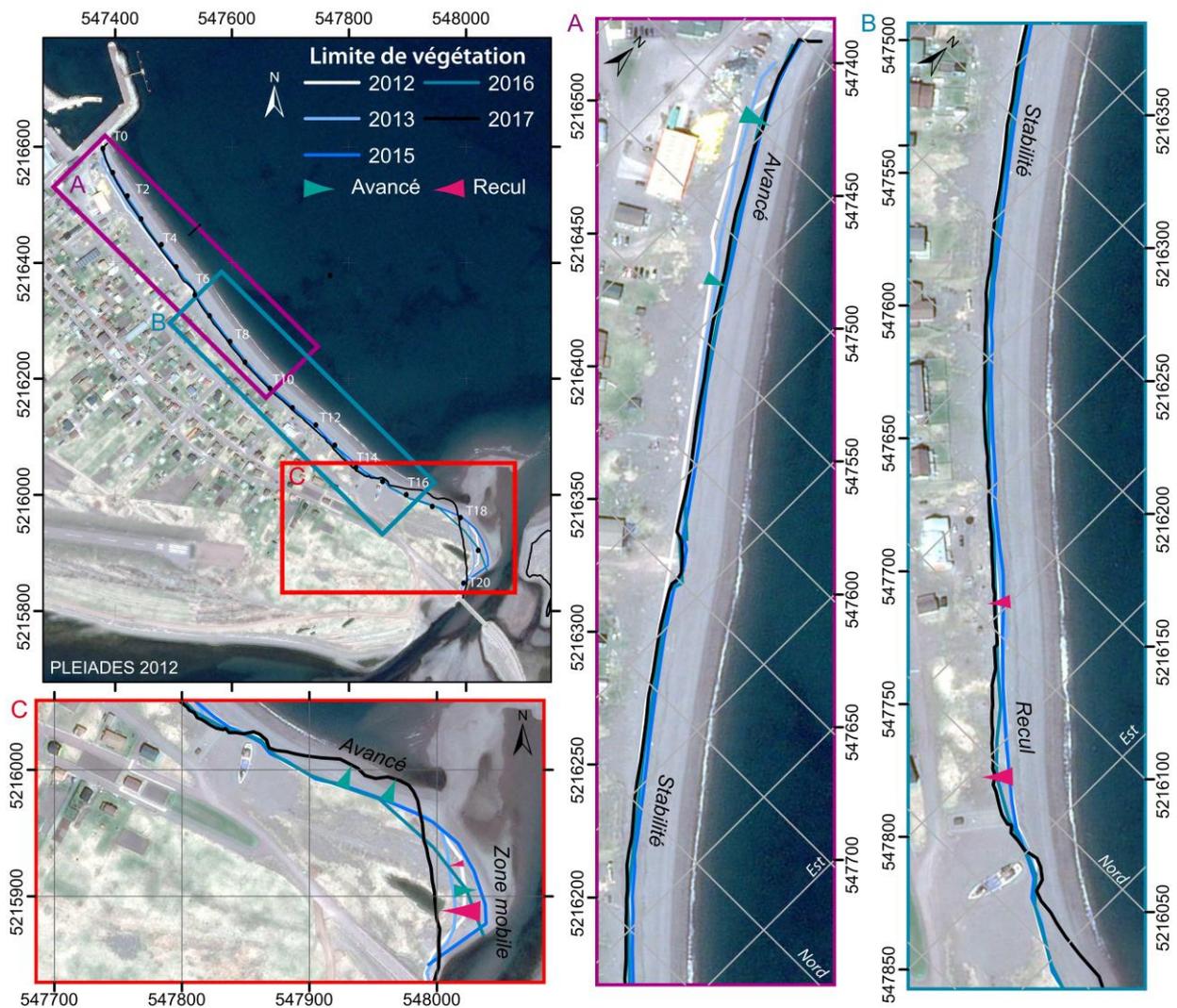


Illustration 14 : Position de la limite de végétation entre 2012 et 2017 – profils de terrain DTAM. (Fond de carte PLEIADES 2012 ; Système de coordonnées WGS84 UTM 21N).

Ainsi, on constate un comportement homogène de la plage de Miquelon entre 2012 et 2017. Cette évolution est liée à la direction du transport sédimentaire, qui remonte vers le nord, et la présence de la digue du port de Miquelon qui stoppe les sédiments et permet le développement, l'avancée, de la plage dans cette zone (Illustration 15).

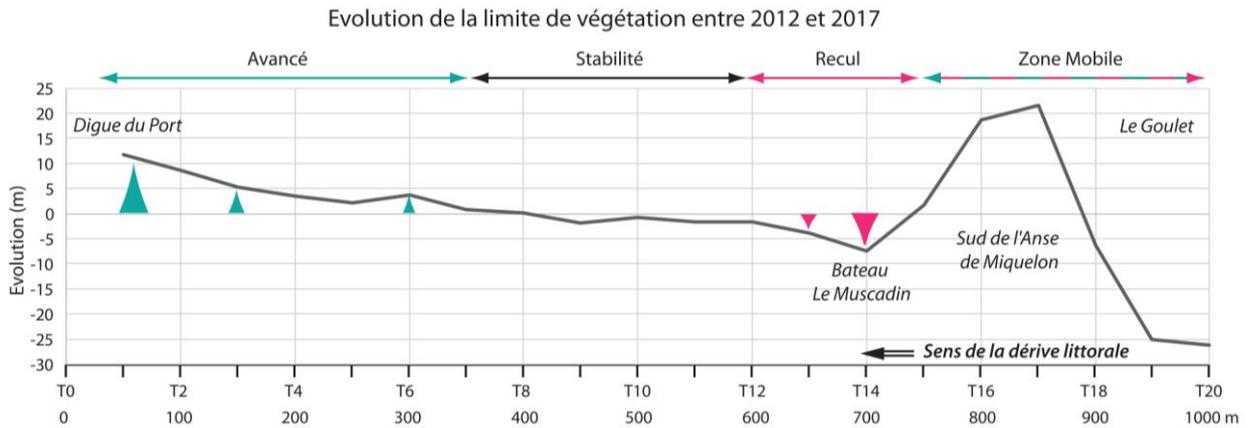


Illustration 15 : Evolution de la limite de végétation entre 2012 et 2017 de la digue du port de Miquelon au sud de l'anse. T0-T20 sont les transects (tous les 50m) sur lesquels ont été calculés cette évolution.

L'évolution du sud de l'Anse de Miquelon est directement liée à l'influence du chenal du Goulet, que ce soit par (1) l'influence des courants oscillants des marées, par (2) l'impact des vagues de beaux temps ou de tempêtes, ou par (3) l'orientation et la position du chenal au cours du temps. De plus, de par la configuration des systèmes d'embouchures, le chenal principal et le delta de jusant vont faire obstacle naturel au transit sédimentaire, bloquant le sédiment provenant de l'amont.

Entre les T18 et T20, il est observé une phase de recul de la limite de végétation entre 2012 et 2013, suivie par une phase d'accumulation entre 2013 et 2015. Ce battement sédimentaire est cantonné entre les T18 et T20 (Illustration 14). De 2015 à 2017 la zone de l'anse entre dans une dynamique différente qui se manifeste par un changement des morphologies avec une érosion le long du chenal (T18-T20) et une accumulation en aval au niveau des T15-T18 (Illustrations 14 & 15). Ainsi au vu des surfaces en évolution, qui semblent concordantes, on peut émettre l'hypothèse que le sédiment érodé sur l'extrémité de l'anse soit venu alimenter la zone aval entre T15 et T18.

### 3.1.3. Evolution court-terme de l'embouchure (2016-2019)

L'analyse géomorphologique de l'embouchure à très court-terme a été réalisée à partir des images satellites SENTINEL 2. Les principales structures permettent d'être identifiées ainsi que leurs évolutions entre 2016 et 2019, comme l'orientation du chenal, la position du delta de jusant, la flèche sableuse. Les évolutions sont décrites et illustrées par une série de 9 images représentatives entre le 19 juin 2016 et le 8 janvier 2019 (Illustrations 16).

#### 19 juin 2016

La partie externe du chenal est rectiligne et orientée vers le Nord. A l'Ouest de l'embouchure, on note la présence d'un banc sableux rattaché à la côte. A l'Est de l'embouchure, la flèche sableuse est peu développée et forme la bordure Est du chenal externe.

#### 29 novembre 2016

Le chenal est contraint par la présence des bancs de sable sur ses deux flancs. Les vagues déferlent sur ces bancs de sable ce qui permet d'identifier facilement leur position. A l'Est de

l'embouchure, la flèche sableuse, qui prend racine au niveau de la plage, s'est développée vers le Nord-Ouest et contraint le chenal à migrer. Le chenal externe a une forme de type 'méandrique' et sa partie distale est orientée plein Ouest. A l'Ouest de l'embouchure, le banc sableux identifié le 19/06/16 semble avoir migré vers la côte.

5 mai 2017

Le chenal externe principal est orienté vers le Nord-Ouest et est contraint sur son flanc Est par une flèche sableuse bien développée rattachée à la plage. On constate que sur la partie distale du chenal il y a un second axe orienté plein ouest. Ainsi, la partie ouest de l'embouchure est marquée par l'apparition d'un chenal longeant la plage de Miquelon et par un banc sableux isolé de la côte.

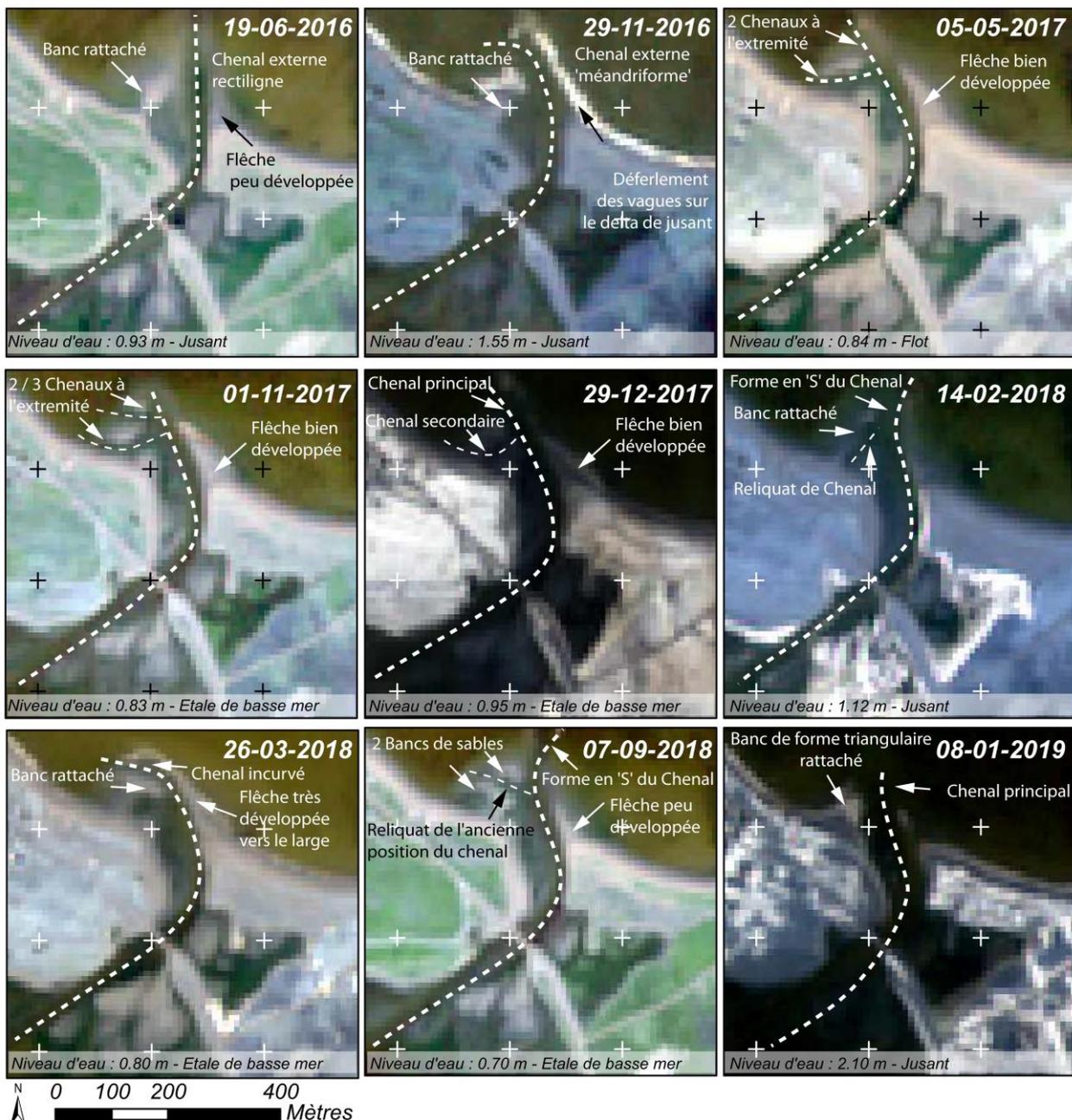


Illustration 16 : Evolution de l'embouchure, des bancs de sable et du chenal entre Juin 2016 et Janvier 2019 - Images satellitaires SENTINEL (pixel 10 m).

1<sup>er</sup> novembre 2017

Le chenal externe est toujours orienté vers le Nord-Ouest et bordé par la flèche sableuse sur son flanc Est, dont l'encrage au niveau de la plage semble être plus développé. La différence principale depuis le 05/05/17 est qu'à l'ouest de l'embouchure le banc de sable précédemment identifié est traversé par un chenal. Ainsi la zone est marquée sur la partie distale par la présence de deux bancs sableux et de trois axes de chenaux.

29 décembre 2017

Seul un chenal secondaire semble encore actif à l'extrémité du chenal principal.

14 février 2018

La partie externe du chenal est orientée vers le Nord-Ouest comme précédemment. Toutefois la partie distale est orientée Nord voir Nord-Nord-Est, ce qui donne une forme en 'S' au chenal. A l'ouest du chenal, un banc sableux rattaché à la côte se développe. On note la présence du reliquat du chenal secondaire, présent depuis Mai 2017, perpendiculaire à la plage de Miquelon.

26 mars 2018

Le chenal est contraint sur son flanc Est et sur toute sa longueur par la flèche sableuse qui s'est nettement développée vers le large. Le chenal est incurvé vers l'Ouest sur sa partie distale et arbore une forme similaire à celle de l'image du 29 novembre 2016. Entre le chenal et l'anse de Miquelon, un banc de sable est toujours visible.

7 septembre 2018

Le chenal externe arbore une forme en 'S' comme sur l'image du 14 février 2018. On constate que la position actuelle du chenal coupe l'ancienne flèche sableuse. La partie distale de l'ancienne flèche est désormais isolée entre le reliquat de l'ancien chenal et la nouvelle position du chenal. Vers l'anse de Miquelon, le banc de sable précédemment identifié est toujours visible.

8 janvier 2019

Le chenal est orienté vers le Nord-Ouest et sa partie distale se linéarise. Entre le chenal et l'anse de Miquelon, les deux bancs de sable précédemment identifiés semblent avoir fusionné. Cette structure sédimentaire est connectée avec le sud de l'Anse et arbore une forme triangulaire.

L'analyse de l'embouchure à trois échelles de temps (i) **moyen terme sur la période 1949-2017 via les photographies IGN et PLEIADES**, (ii) **court terme sur la période 2012-2017 via les levés de trait de côte DGPS**, et (iii) **très court terme sur la période 2016-2019 via les images SENTINEL**, montrent toutes une **dynamique et une mobilité de l'embouchure**, que ce soit de la ligne de rivage de part et d'autre de l'embouchure, des bancs de sable qui constituent le delta de jusant, ou la position du chenal externe et de sa partie la plus distale.

**Différentes structures** sont identifiées de manière **récurrentes au cours du temps, mais sans cyclicités temporelles clairement établies**, comme :

- (i) Le **développement d'une flèche sédimentaire à l'Est du chenal qui est rattachée à la plage et qui se développe vers le large et contraint le flanc Est du Chenal** ;
- (ii) Le **développement d'un banc de sable à l'Ouest du chenal, qui par la suite est rattaché à la plage et fini par s'accoler complètement sur la zone sud de l'Anse de Miquelon** ;
- (iii) La **mobilité du chenal externe qui oscille entre une orientation vers le Nord** (soit de forme linéaire soit en forme de 'S') **et qui migre vers l'ouest** (forme méandriforme dont la partie distale peut être courbée en direction de la plage).

### 3.2. CONDITIONS HYDRODYNAMIQUES VS EVOLUTION DE L'EMBOUCHURE (2016-2019)

Les conditions hydrodynamiques, l'influence de la houle, des marées et du transport sédimentaire vont influencer l'évolution du système de l'embouchure. L'évolution de l'embouchure entre mi-2016 et début 2019 montre trois cycles de migration du chenal vers l'ouest (Illustration 16) qui ont des temporalités très différentes (Illustrations 17 à 19). Les données hydrodynamiques, moyennant des hypothèses sur la direction de la houle, sont mises en relation avec les évolutions morphologiques de l'embouchure observées (Illustrations 17 à 19). Ainsi, on part de deux hypothèses qui sont (i) qu'une houle oblique va entraîner une accumulation sédimentaire et un développement du delta de jusant vers le nord-ouest, dans le sens de la dérive littorale, (ii) qu'un

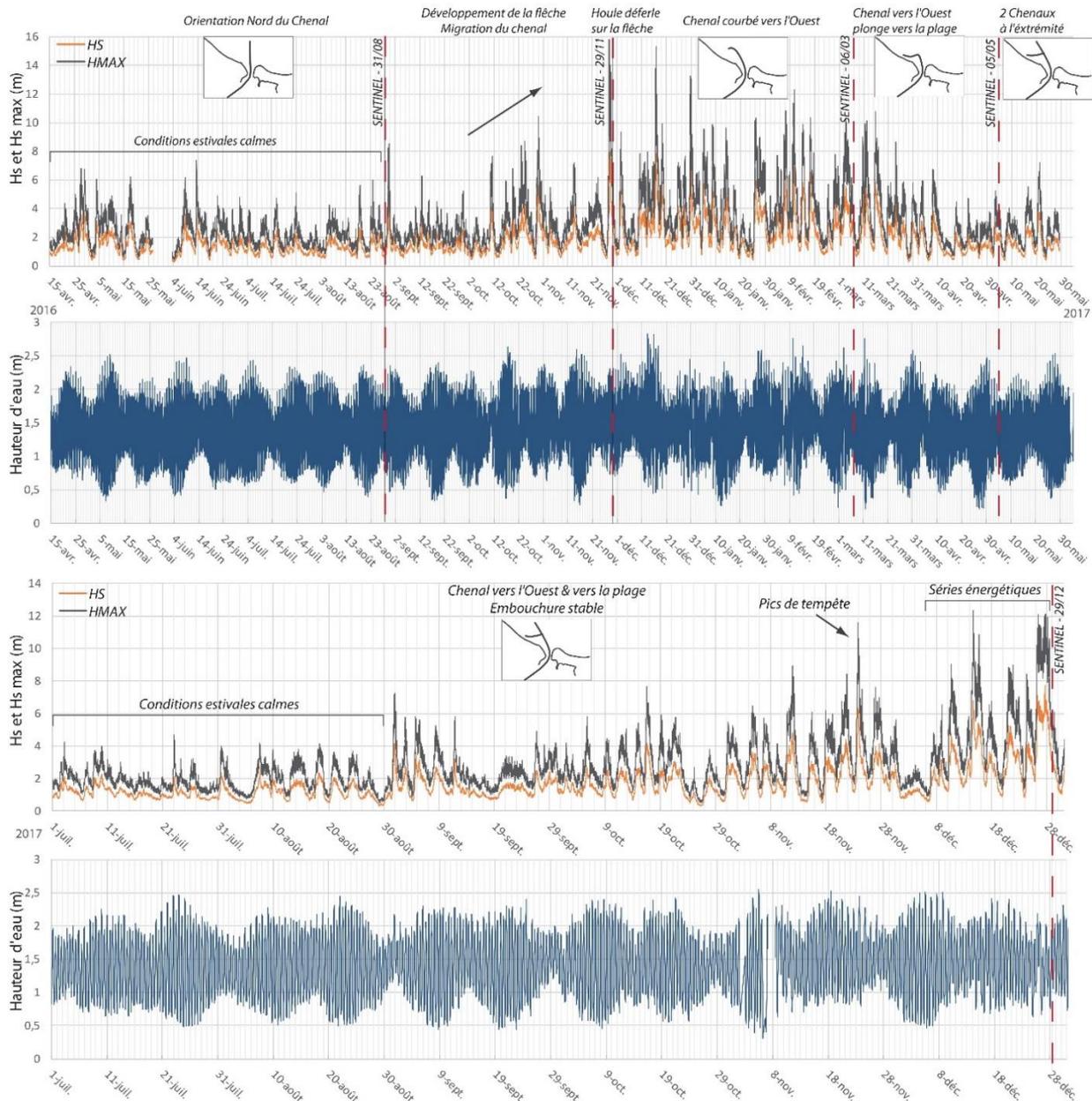
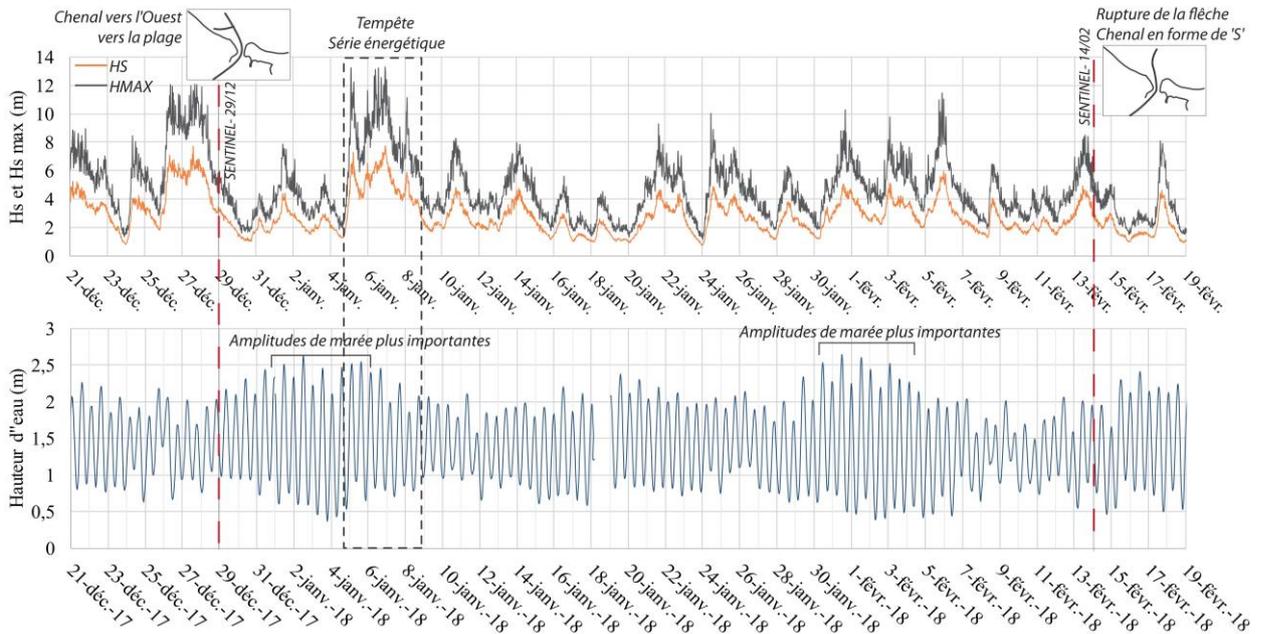


Illustration 17 : Séries temporelles des données de houle (Hs et Hs Max) de la bouée CANDHIS et hauteur d'eau (m, par rapport au ZH) issue du marégraphe de Saint-Pierre, et morphologie du chenal sur la période entre le 15 avril 2016 et le 30 décembre 2017.

fort coefficient de marée, en l'absence de houle, pourrait favoriser les courants dans le goulet, et la rupture éventuelle du delta.

Entre juin et fin août 2016 l'embouchure est stable avec une orientation de chenal vers le Nord. Au cours de cette période les conditions hydrodynamiques peuvent être caractérisées comme des conditions estivales 'classiques' (calmes ; [Illustration 17](#)). Entre septembre et fin novembre on constate le développement de la flèche sédimentaire dans le sens de la dérive littorale, qui contraint le chenal à migrer vers l'Ouest. Les conditions hydrodynamiques sont plus énergétiques que précédemment notamment sur le mois d'octobre. Entre décembre 2016 et mars 2017 la tête du chenal est courbée vers l'ouest et les conditions hydrodynamiques sont fortes dues aux houles hivernales. La flèche sédimentaire, alimentée par la dérive littorale, est donc bien en place. A partir de mars 2017, l'extrémité du chenal est coudée et plonge vers la plage de Miquelon. A partir de mai 2017, le chenal a deux extrémités visibles toutes les deux orientées vers l'ouest. L'équilibre entre les conditions hydrodynamiques et le transit sédimentaire lié à la dérive littorale maintiennent l'embouchure dans cette position jusqu'à la fin 2017 ([Illustrations 16 & 17](#)).

Une modification importante de l'embouchure s'opère entre le 29 décembre 2017 et le 14 février 2018 ([Illustrations 16 & 18](#)) qui marque la transition entre la fin d'un 1<sup>er</sup> cycle et le début d'un 2<sup>ème</sup>. En effet, le chenal rompt la flèche sédimentaire, il a une forme en 'S' et son extrémité est dirigée vers le Nord. Il n'y a pas d'images utilisables entre ces deux dates qui permettraient de préciser la période de rupture. Entre ces deux dates il y a deux périodes où les amplitudes des marées sont plus importantes (hauteur d'eau atteignant 2.5 m ZH ; [Illustration 8](#)). Il est probable que lors d'une de ces deux périodes, combinées avec des conditions de houle modérées, les courants de jusant dans le Goulet aient favorisé la rupture de la flèche.



*Illustration 18 : Séries temporelles des données de houle (Hs et Hs Max) de la bouée CANDHIS et hauteur d'eau (m, par rapport au ZH) issue du marégraphe de Saint-Pierre, et morphologie du chenal sur la période entre le 21 décembre 2017 et le 19 février 2018.*

Entre le 14 février et le 26 mars 2018, on constate un développement rapide de la flèche qui contraint le chenal à migrer vers l'ouest et à arborer une forme courbée sur son extrémité ([Illustrations 16 & 19](#)). Le chenal retrouve rapidement une forme classique, on peut considérer que l'on entre dans un 3<sup>ème</sup> cycle. En effet, au cours du printemps 2018 (dès avril), le chenal traverse la flèche et retrouve une forme légèrement en 'S' d'orientation le Nord/Nord-Est. Les

conditions hydrodynamiques sur la période estivale maintiennent cette configuration. Toutefois à partir du mois de juillet, on peut voir apparaître sur certaines images (09/07 ou 07/09, en fonction des conditions de prises de vue) une 2<sup>nd</sup>e extrémité du chenal vers l'Ouest. Début Janvier 2018, le chenal arbore toujours une forme 'S' orientée vers le Nord.

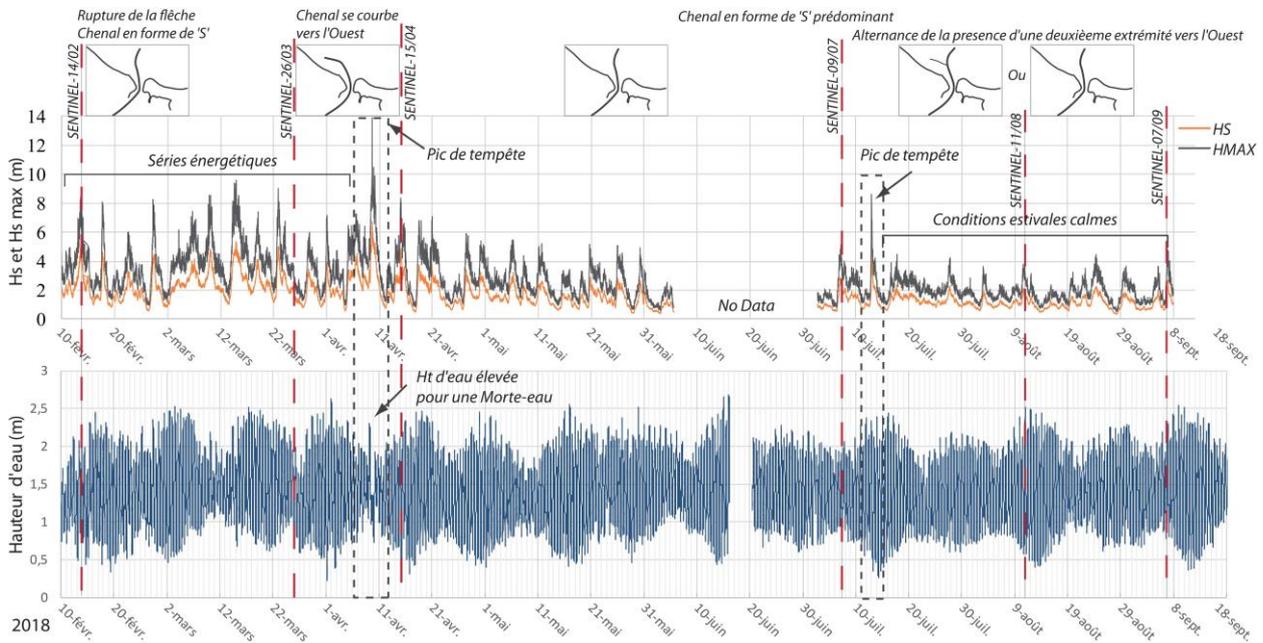


Illustration 19 : Séries temporelles des données de houle (Hs et Hs Max) de la bouée CANDHIS et hauteur d'eau (m, par rapport au ZH) issue du marégraphe de Saint-Pierre, et morphologie du chenal sur la période entre le 19 Février et le 18 Septembre 2018.

La confrontation des données morphologiques et hydrodynamiques montre **que l'embouchure est très dynamique même à de courtes échelles temporelles**. L'embouchure s'adapte en fonction des conditions météo-marines et des flux hydro-sédimentaires, et est en constante évolution. Le chenal principal retrouve régulièrement sa forme 'naturelle' prédominante (légèrement en forme de 'S' d'orientation principale Nord).

On constate que :

- (i) **quelle que soit la forme du chenal**, il garde une configuration plutôt **stable pendant les périodes estivales**, qui présentent des conditions de houles plus calmes et plus régulières ;
- (ii) **une cyclicité de mobilité du chenal** est mise en évidence (phase de croissance de la flèche sédimentaire à l'ouest, de migration du chenal vers l'ouest, puis de rupture de la flèche), et **peut s'opérer sur des périodes très courtes** (exemple entre le 14 février et le 26 mars 2018) ;
- (iii) ces phases de **développement vers l'ouest du système**, c'est-à-dire dans le sens de la dérive littorale, sont **plutôt bien corrélées avec les conditions de houle**.
- (iv) **les phases de rupture de la flèche** sont plus complexes à corréliser avec les forçages (Hs, Hs max et hauteur d'eau). En effet le basculement du chenal et la rupture de la flèche sont induits par le dépassement du seuil d'équilibre du système. La rupture de la flèche est une conséquence de l'adaptation de l'embouchure pour atteindre des conditions d'équilibre et est donc le résultat de l'action combinée des différents facteurs hydro-sédimentaires qui contraignent le système ;
- (v) la **mobilité naturelle du système de l'embouchure** induit un **transit sédimentaire naturel entre l'est et l'ouest de l'embouchure** par accroissement de la flèche, puis rupture de la partie terminale de la flèche, qui va progressivement migrer, s'accoler et donc **nourrir le sud de l'anse de Miquelon**.

## 4. Préconisations de gestion

### 4.1. GESTION DES EMBOUCHURES TIDALES

En raison des problématiques d'érosion accrue sur les littoraux situés en aval-transit des embouchures tidales, les besoins d'exploitation des deltas de jusant et des chenaux s'est accélérée ces dernières décennies. Les **embouchures tidales sont souvent associées à des rivages adjacents dynamiques et complexes** contrairement aux plages ouvertes. Les processus côtiers complexes sont étroitement liés aux mécanismes de contournement de l'embouchure (by-pass), comme l'ont démontré des études sur la migration des bancs de deltas (Sexton and Hayes, 1982). Dean (1990) a analysé les tendances érosives des plages le long de la côte atlantique de la Floride et a attribué l'érosion des plages aux processus d'embouchures et aux impacts anthropiques sur ces systèmes (par exemple, dragage ou stabilisation) à près de 85%.

L'ingénierie des embouchures via des structures rigides (endiguements) et des pratiques d'ingénierie souples, telles que le dragage ou les rechargements de plage constituent une approche courante pour lutter contre l'érosion côtière (Dean, 1988, 1993; Dean and Work, 1993; Brunn and Gerritsen, 2005). De nombreuses études ont été menées sur la quantification des volumes totaux de sédiments littoraux contenus dans les systèmes d'embouchure et leur application pour des rechargements (Douglas et al., 2003; Brunn and Gerritsen, 2005; Finkl et al., 2006; Fontolan et al., 2007; Beck and Legault, 2012; Oost et al., 2014; Houston and Dean, 2016; Schrader et al., 2016; Houston, 2017).

**La gestion des sédiments au niveau des embouchures tidales** est axée sur la **morpho-dynamique des structures de dépôt**, ou puits de sédiments : les deltas de jusant et de flot, les flèches sableuses, les dépôts de franchissements... Ces morphologies piègent et stockent les sédiments transportés par la dérive littorale et peuvent potentiellement servir de sources dans un schéma de gestion globale des sédiments. Les deltas de jusant en particulier constituent la zone de dépôt la plus dynamique : (1) ils représentent d'énormes réservoirs de sable, (2) ils réduisent l'énergie incidente sur les plages et (3) ils régulent le processus de by-pass du sédiment d'amont vers l'aval.

**L'exploitation des deltas de jusant n'est toutefois pas sans conséquences.** Walton et Adams (1976) ont établi une corrélation entre ces volumes et le prisme de marée, qui implique que des modifications du prisme de marée (dragage du chenal par exemple), devraient augmenter le potentiel de piégeage des sédiments littoraux dans un delta de marée en expansion, ayant une incidence sur les mécanismes de by-pass. Bruun (1995) souligne que l'approfondissement du chenal au travers du delta de jusant **peut modifier considérablement le mécanisme de bypass**, ce qui a été vérifié par Ridderinkhof et al. (2016), **impactant ainsi la réponse à l'érosion le long des plages adjacentes.**

Finkl (2012) affirme qu'il existe peu de données post-exploitation pour évaluer les impacts sur le système littoral de l'extraction du sable et que peu d'études ont quantifié avec précision le taux de récupération, probablement en raison de l'incertitude du volume à l'équilibre des deltas d'embouchure, de la disponibilité du sable, fréquence des tempêtes, dimensions et profondeur de la fosse d'extraction. Le risque de surutilisation des deltas d'embouchure est élevé et de multiples extractions se succédant rapidement peuvent considérablement aggraver les problèmes de bypass, d'érosion et de sédimentation entre l'embouchure et sur les plages adjacentes.

Dombrowski et Mehta (1996), à partir de l'étude des embouchures de Floride ont émis plusieurs considérations relatives à l'extraction de sable sur les deltas :

- **La quantité de sédiment disponible** (au-dessus du profil bathymétrique adjacent) et sa proximité avec l'emplacement du rechargement) **sont les principaux critères de sélection du site**, suivies de la **compatibilité des sédiments** et des **impacts physiques et écologiques** du projet.
- Les deux principales préoccupations concernant les impacts physiques sont le **taux de reconstitution des sédiments du delta de jusant** et **les effets potentiels sur les plages adjacentes du fait des vagues et des courants de marée modifiés**.

Garel et al. (2014) ont examiné les effets d'une réduction massive d'un delta sur la capacité de celui-ci à diminuer l'énergie des vagues sur le littoral. Afin de limiter les effets collatéraux sur l'embouchure du Guadiana au Portugal, ils ont préconisé un rechargement dans la zone de divergence de la dérive littorale sur la côte aval-transit de l'embouchure.

Parmi les conclusions que l'on peut tirer de ces études, on peut noter :

- Les mécanismes de by-pass aux embouchures sont liés à l'interaction entre la dérive littorale et le prisme de marée ;
- **Souvent, ces mécanismes présentent une certaine cyclicité temporelle** (pas toujours régulière) et **entraînent des phases de recul puis d'avancée des littoraux adjacents**;
- **L'extraction de sables sur un delta de jusant et/ou dans le chenal peut avoir des conséquences importantes** : diminution de la réduction naturelle de l'énergie des vagues ; augmentation du prisme de marée qui peut générer un piégeage plus important du sédiment sur le delta, entraînant un déséquilibre sur les côtes amont et aval-transit de l'embouchure.

#### 4.2. L'EMBOUCHURE DU GOULET DU GRAND-ETANG

L'analyse des évolutions récentes de l'embouchure permet d'avoir une meilleure compréhension des processus hydrodynamiques et des directions du transport sédimentaire (Illustrations 20 & 21). Elle a également mis en évidence une cyclicité relativement rapide des mécanismes de by-pass sédimentaires de part et d'autre du chenal, avec régulièrement des ruptures de la flèche sédimentaire en amont-transit, le réalignement du chenal vers une orientation nord, et la migration des bancs de sable qui viennent s'accoler à l'extrémité de l'Anse.

**Le cycle de migration du chenal est un phénomène naturel qu'il faut maintenir.** Il permet **naturellement l'apport en sédiment sur la zone du sud de l'Anse de Miquelon**. C'est ce même sédiment qui est ensuite repris et remobilisé sur la plage de Miquelon jusqu'à la digue du port de Miquelon (Illustration 15) et qui permet l'équilibre du système.

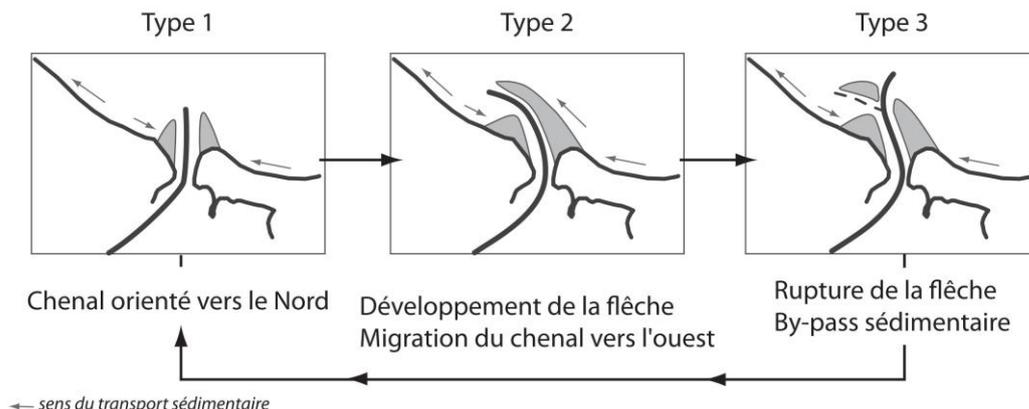


Illustration 20 : Modèle conceptuel d'évolution de l'embouchure distinguant 3 principales configurations morphologiques (delta de jusant, en gris).

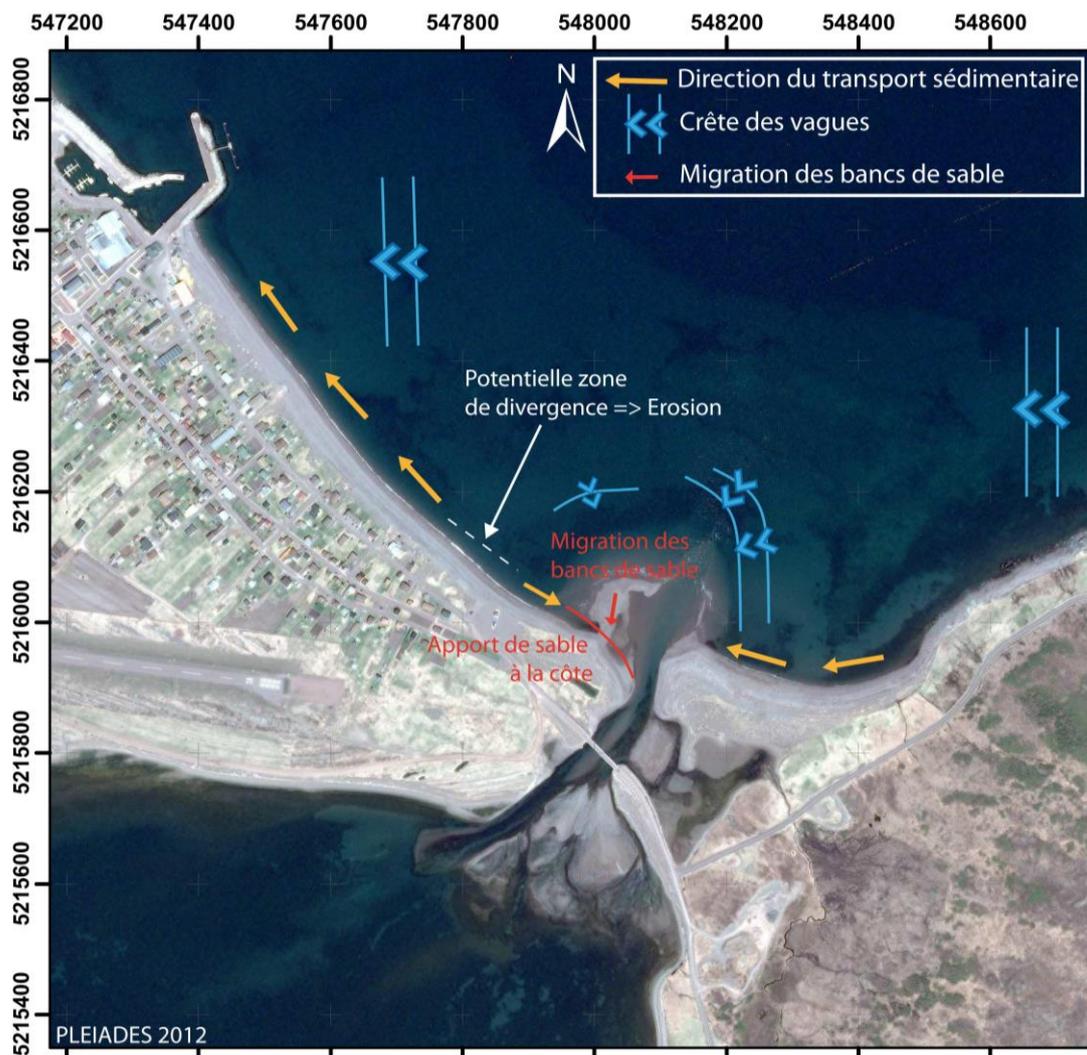


Illustration 21 – Schéma conceptuel des processus hydrodynamiques à l'embouchure du Goulet du Grand-Etang de Miquelon et au niveau des plages adjacentes (direction du transport sédimentaire, orientation des crêtes de vague).

En conséquence, deux stratégies peuvent être préconisées :

- (1) Le laisser-faire : le caractère cyclique des évolutions implique une régularisation naturelle avec un by-pass sédimentaire au niveau de l'embouchure ;
- (2) L'intervention modérée sur le delta de jusant pour accélérer le cycle naturel sans modifier les processus hydrodynamiques (prisme de marée, rôle dissipateur du delta).

#### 4.2.1. Le laisser-faire

**La cyclicité des variations** de la position du chenal, de la dynamique de dépôts et du transport sédimentaire permettent au **système de s'auto-entretenir** (Illustration 20). On constate que depuis le milieu du 20<sup>ème</sup> Siècle le système de l'embouchure et des plages adjacentes ont un comportement concordants et cohérents. Toutefois, le sable transporté sur la côte en aval-transit (Anse de Miquelon, Illustration 21) n'est pas déposé de manière uniforme ni spatialement, ni temporellement. Au niveau de la rive Nord du Goulet les variations morphologiques (alternance

d'accumulation et d'érosion) sont les plus importantes (entre le T15 et T19 ; Illustrations 12, 14 & 15). Cette zone de mobilité est assez restreinte au regard de l'ensemble de la zone, et peut être caractérisée comme une zone 'non figée dans le temps' ou 'éphémère'. Ainsi malgré une dynamique forte de cette zone, cette mobilité du Sud de l'Anse n'impacte pas directement de zones sensibles comme des habitations ou la route. Au niveau du bateau 'Le Muscadin' (T13-15), on observe un léger recul de la ligne de rivage depuis 2012. Cette zone semble correspondre localement à une zone de divergence des directions du transport sédimentaire, ce qui pourrait expliquer ce recul ciblé et contraint spatialement. Le suivi annuel du trait de côte par la DTAM permettra de voir si cette érosion est chronique, se poursuit, s'accroît, ou à l'inverse si le phénomène se stabilise ou s'inverse dans les années à venir. C'est donc une zone sur laquelle il faudra être vigilant.

#### 4.2.2. Intervention sur le delta de jusant

Comme mis en évidence par les nombreuses études sur le sujet, **l'intervention (prélèvement) sur le delta de jusant doit (i) rester modérée et (ii) ne pas modifier les processus hydro-sédimentaires**. L'avantage principal de cette stratégie est de pouvoir **choisir la zone de dépôt du sable prélevé**, et ainsi de **mieux positionner les rechargements sur les zones déficitaires** (Illustrations 22).

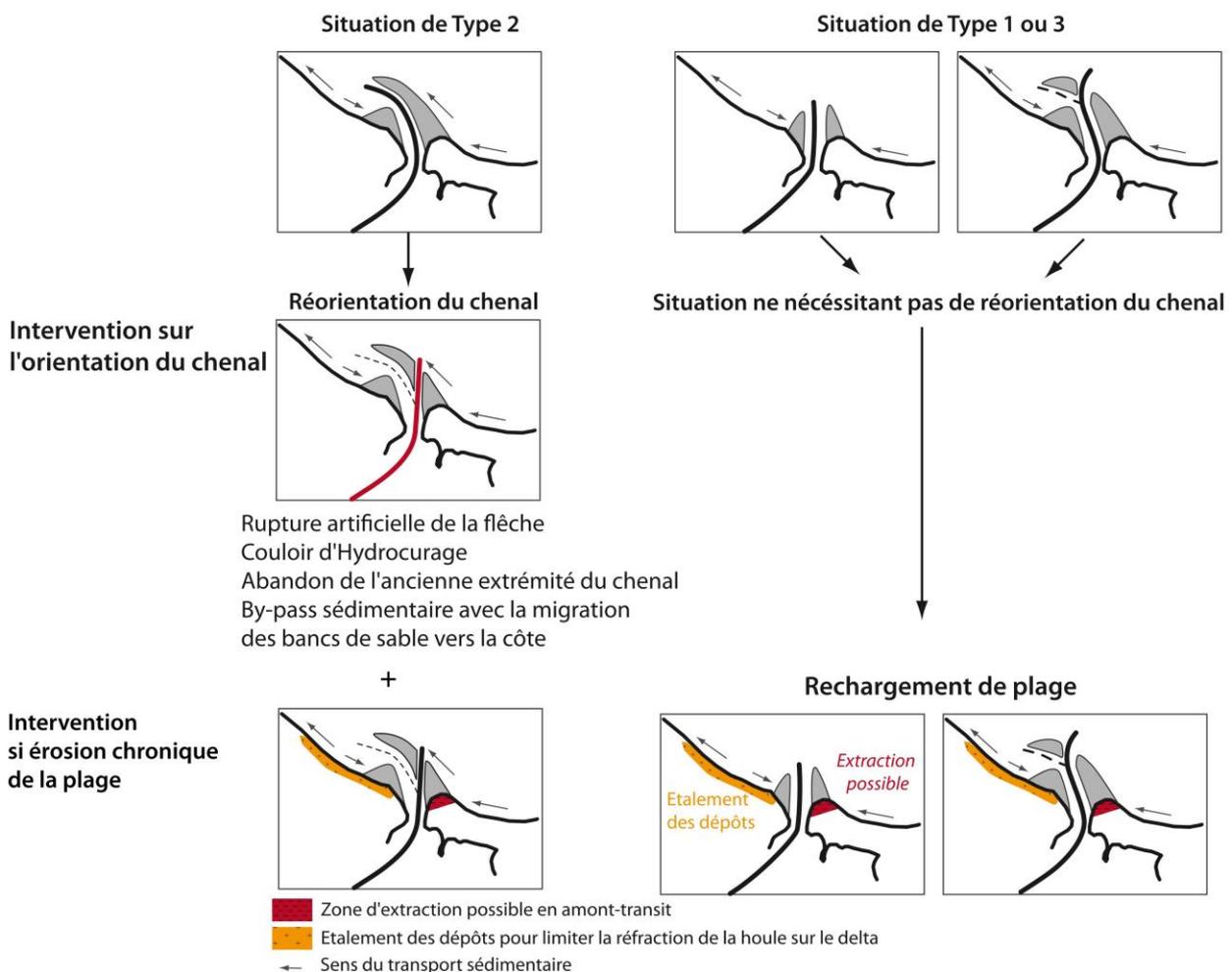


Illustration 22 – Schéma d'interventions possibles sur l'embouchure du Goulet.

Pour toute intervention, les précautions suivantes doivent être prises :

- **Ne pas impacter le delta** - condition respectée si le prélèvement est essentiellement concentré sur la flèche sédimentaire en amont transit.
- **Ne pas augmenter le prisme de marée** - condition respectée si la profondeur d'extraction est limitée dans la zone sous le niveau des plus basses eaux.

D'autre part, il est important de prendre en compte la dynamique de l'embouchure. En effet, l'étude de l'évolution moyen-terme et surtout court-terme du système, entre 2016 et 2019, a montré que les **cycles de mobilités pouvaient être très rapides**, tout **particulièrement pendant les périodes hivernales**. D'autre part, on constate que **quelle que soit la forme du chenal**, il garde une configuration plutôt **stable pendant les périodes estivales** (conditions de houles plus calmes et plus régulières). Ainsi, si une intervention est envisagée que ce soit pour le réaligement du chenal vers une orientation Nord (accélérer le passage entre le Type 2 et le Type 3 ou vers le Type 1; [Illustration 20](#)) ou le rechargement de la plage ([Illustration 22](#)), il apparaît qu'il serait plus propice de réaliser ce type d'interventions pendant des périodes de stabilité de l'embouchure, c'est-à-dire les périodes estivales.

#### 4.2.3. Préconisation pour le suivi de l'embouchure

Cette embouchure est dynamique. Qu'il soit envisagé ou non une intervention, **il est important de comprendre et de suivre son évolution**.

##### Suivi de l'embouchure et de son évolution naturelle

L'élaboration d'un **carnet de bord des évolutions observées de l'embouchure** pourrait être envisagé pour ce site. Ce type de suivi est **facile à mettre en place, peu coûteux, et réalisable par les agents de terrain locaux**. Ce suivi permettrait d'avoir une solide base de données sur la rythmicité de l'embouchure, les dates des ruptures de la flèche, la réorientation du chenal et de pouvoir regarder les conditions météo-marines concordantes avec les événements. Ces informations, qui sont faciles à renseigner en temps réel, sont généralement inexistantes et/ou difficiles à récupérer à posteriori, mais sont **primordiales pour une gestion adaptée**.

Ainsi, un carnet de bord des évolutions observées de l'embouchure qui serait constitué de 'fiche type' à remplir par événement marquant pourrait être élaboré. Ces fiches devront renseigner le type d'évènement (par exemple : rupture de la flèche, réaligement du chenal, présence de deux chenaux, chenal orienté plein ouest, accollement du banc de sable ...), la date, les conditions météo-marines / marées observées, des remarques par l'observateur sur le terrain, ... accompagnées des prises de vues photographiques pour illustrer le phénomène décrit, et/ou de croquis à main levée.

##### Suivi de l'embouchure si intervention

**Si une intervention est réalisée il est indispensable de conduire en parallèle un suivi régulier et précis de l'adaptation et de la réorganisation du milieu** la plus précise possible.

Ce suivi devra prendre en compte **à minima des levés topo-bathymétriques** avec:

T0 – un **état avant travaux** (avant prélèvement)

T1 – un **état juste après les travaux** (de la zone prélevée et de la zone engraisée, avec une estimation du volume de sédiment déplacé, et la localisation/orientation du chenal)

Tn – des levés **fréquents post-travaux**

Ces levés consisteraient, par exemple, en la réalisation d'un maillage de la zone au D-GPS avec des profils transversaux et longitudinaux réguliers permettant de pouvoir produire un modèle numérique de terrain (MNT) de la topographie de la plage. Il serait également intéressant de réaliser des levés bathymétriques réguliers sur l'avant côte. La répétition de ces levés permettra

de réaliser des différentiels topographiques et/ou topo-bathymétriques, et ainsi de voir comment le système s'adapte et comment le sédiment se remobilise au cours du temps.

La DTAM étant équipée d'un drone, le suivi post-intervention pourrait être accompagné de **prises de vue par drone de la zone de l'embouchure (plages, chenal, bancs de sable)**. Ces clichés géo-référencés sont d'un fort soutien pour la compréhension du système et les évolutions de la partie marine, surtout si l'intervention consiste à réorienter l'axe du chenal.

## 5. Bibliographie

- Balouin, Y., 2001. Les embouchures mésotidales et leur relation avec les littoraux adjacents - Exemple de la Barra Nova, Sud Portugal.
- Beck, T.M., Legault, K.R., 2012. Dredging optimization of an inlet system for adjacent shore protection projects using CMS and GENCADE. Proc. Coast. Eng. Conf. <https://doi.org/10.9753/icce.v33.management.34>
- Boothroyd, J.C., 1978. Mesotidal Inlets and Estuaries BT - Coastal Sedimentary Environments, in: Davis, R.A. (Ed.), . Springer US, New York, NY, pp. 287–360. [https://doi.org/10.1007/978-1-4684-0056-4\\_7](https://doi.org/10.1007/978-1-4684-0056-4_7)
- Brunn, P., Gerritsen, F., 2005. TIDAL INLETS ON LITTORAL DRIFT SHORES. J. Coast. Res. 305–451.
- Bruun, P., 1995. The Development of Downdrift Erosion. J. Coast. Res. 11, 1242–1257.
- Chaumillon, E., 2005. Stratigraphie sismique, morphologie et évolution des vallées incisées, des embouchures et des bancs de sables tidaux (exemples issus des côtes de Charente-Maritime) 139.
- Davis, R.A., FitzGerald, D., 2004. Beaches and Coasts. Blackwell.
- Dean, R.G., 1988. Sediment Interaction at Modified Coastal Inlets: Processes and Policies BT - Hydrodynamics and Sediment Dynamics of Tidal Inlets, in: Aubrey, D.G., Weishar, L. (Eds.), . Springer New York, New York, NY, pp. 412–439.
- Dean, R.G., 1990. Channel entrances: impacts on coastal erosion. Proceeding 53rd Meet. Coast. Eng. Res. board, Fort Lauderdale/Dania, FL, 5-7 June 1990. CERC Final report, Vicksburg, Mississippi 51–53.
- Dean, R.G., 1993. NoSystems, Terminal structures at ends of littoral. J. Coast. Res. SI No 18.
- Dean, R.G., Work, P.A., 1993. Interaction of navigation entrances with adjacent shorelines. J. Coast. Res. 18, 91–110.
- Dombrowski, M.R., Mehta, A.J., 1996. EBB Tidal Delta Evolution of Coastal Inlets. Coast. Eng., Proceedings. <https://doi.org/doi:10.1061/9780784402429.253>
- Douglas, S.S., Bobe, A., Chen, Q.J., 2003. Tha amount of sand removed from Americ'a beaches by engineering works. Coast. sediments 03 CD-ROM,.
- Dyer, K.R., Huntley, D.A., 1999. The origin, classification and modelling of sand banks and ridges. Cont. Shelf Res. 19, 1285–1330. [https://doi.org/10.1016/S0278-4343\(99\)00028-X](https://doi.org/10.1016/S0278-4343(99)00028-X)
- Finkl, C.W., 2012. Pitfalls of Ebb-Shoal Mining BT - Pitfalls of Shoreline Stabilization: Selected Case Studies, in: Cooper, J.A.G., Pilkey, O.H. (Eds.), . Springer Netherlands, Dordrecht, pp. 37–52. [https://doi.org/10.1007/978-94-007-4123-2\\_3](https://doi.org/10.1007/978-94-007-4123-2_3)
- Finkl, C.W., Benedet, L., Campbell, T., 2006. Beach nourishment experience in the United States: status and trends in the 20th century. Shore Beach 74, 8–16.
- FitzGerald, D., Kraus, N.C., Hands, E.B., 2001. Natural mechanisms of sediment bypassing at tidal inlets. ERDC/CHL CHETN-IV-30, U.S. Army Eng. Res. Dev. Center, Vicksburg, MS. 10.
- FitzGerald, D.M., 1996. Geomorphic variability and morphologic and sedimentologic controls on tidal inlets. J. Coast. Res. SI 23, 47–72.
- Fontolan, G., Pillon, S., Delli Quadri, F., Bezzi, A., 2007. Sediment storage at tidal inlets in northern Adriatic lagoons: Ebb-tidal delta morphodynamics, conservation and sand use

- strategies. *Estuar. Coast. Shelf Sci.* 75, 261–277. <https://doi.org/10.1016/J.ECSS.2007.02.029>
- Garel, E., Sousa, C., Ferreira, Ó., Morales, J.A., 2014. Decadal morphological response of an ebb-tidal delta and down-drift beach to artificial breaching and inlet stabilisation. *Geomorphology* 216, 13–25. <https://doi.org/10.1016/J.GEOMORPH.2014.03.031>
- Harris, P.T., 1988. Large-scale bedforms as indicators of mutually evasive sand transport and the sequential infilling of wide-mouthed estuaries. *Sediment. Geol.* 57, 273–298. [https://doi.org/10.1016/0037-0738\(88\)90034-6](https://doi.org/10.1016/0037-0738(88)90034-6)
- Harris, P.T., Jones, M.R., 1988. Bedform movement in a marine tidal delta: Air photo interpretations. *Geol. Mag.* 125, 31–49. <https://doi.org/10.1017/S0016756800009353>
- Hayes, M.O., 1975. Morphology of sand accumulations in estuaries. *L.E. Cronin Estuarine*, 3–22.
- Hayes, M.O., 1979. Barrier island morphology as a function of tidal and wave regime., in: Leatherman, S.P. (Ed.), *Barrier Islands*. pp. 1–27.
- Houston, J.R., 2017. Shoreline Change in Response to Sea-Level Rise on Florida's West Coast. *J. Coast. Res.* 33, 1243–1260.
- Houston, J.R., Dean, R.G., 2016. Erosional impacts of modified inlets, beach encroachment, and beach nourishment on the east coast of Florida. *J. Coast. Res.* 32(2), 13–16.
- Hubbard, D.K., Oertel, G., Nummedal, D., 1979. The role of waves and tidal currents in the development of tidal-inlet sedimentary structures and sand body geometry: examples from North Carolina, South Carolina and Georgia. *J. Sed. Pet.* 49, 1073–1092.
- Le Moine, O., Geairon, P., Robert, S., Coudray, S., Fiandrino, A., Goragner, H., Gouletquer, P., 2016. Hydrologie du Grand Etang de Miquelon Rapport final.
- Oertel, G.F., 1975. Ebb-tidal deltas of Georgia estuaries. L.E. Cronin (eds.), *Estuar. Res. Acad. Press. New York* 2, 267–276.
- Oost, A.P., Wang, Z.B., Groot, A.V. De, Duren, L.A. Van, 2014. Preparing for climate change : a research framework on the sediment-sharing systems of the Dutch , German and Danish Wadden Sea for the development of an adaptive strategy for flood safety. *Deltares, Wageningen, the Netherlands* No. 120915.
- Ridderinkhof, W., Hoekstra, P., van der Vegt, M., de Swart, H.E., 2016. Cyclic behavior of sandy shoals on the ebb-tidal deltas of the Wadden Sea. *Cont. Shelf Res.* 115, 14–26. <https://doi.org/10.1016/J.CSR.2015.12.014>
- 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 (Manche). Université de Caen.
- Schrader, M.H., Douglas, C., Lillycrop, L.S., 2016. Regional Sediment Management Strategies for the Vicinity of St . Augustine Inlet , St . Johns Coastal and Hydraulics Laboratory.
- Sexton, W.J., Hayes, M.O., 1982. Natural Bar-Bypassing of Sand at a Tidal Inlet. *Coast. Eng., Proceedings*. <https://doi.org/doi:10.1061/9780872623736.090>
- SHOM, 2017. Références Altimétriques Maritimes.
- Vos, K., Splinter, K.D., Harley, M.D., Simmons, J.A., Turner, I.L., 2019. CoastSat: A Google Earth Engine-enabled Python toolkit to extract shorelines from publicly available satellite imagery. *Environ. Model. Softw.* 122, 104528. <https://doi.org/10.1016/J.ENVSOFT.2019.104528>
- Walton, T.L., Adams, W.D., 1976. Capacity of Inlet Outer Bars to Store Sand. *Coast. Eng., Proceedings*. <https://doi.org/doi:10.1061/9780872620834.112>

## **Annexe 1**

# **Niveaux d'eau lors des prises d'images satellites SENTINEL**



Récapitulatifs des niveaux d'eau lors des prises d'images satellites SENTINEL pour l'embouchure de Miquelon entre 2016 et 2018 (en orange les dates représentées sur l'illustration 16). Niveaux d'eau au marégraphe de Saint-Pierre, par rapport au zéro hydrographique (ZH) à Saint-Pierre.

Date	Niveau d'eau (m)	Date	Niveau d'eau (m)
13 avril 2016	1,35 (flot)	15 avril 2018	1,36 (jusant)
30 avril 2016	1,25 (flot)	23 avril 2018	1,15 (flot)
19 juin 2016	0,93 (jusant)	30 avril 2018	1,39 (jusant)
2 juillet 2016	0,63 (jusant)	8 mai 2018	1,19 (flot)
9 juillet 2016	1,93 (étale haute-mer)	10 mai 2018	0,81 (étale basse mer)
22 juillet 2016	2 (jusant)	13 mai 2018	0,72 (étale basse mer)
31 août 2016	1,01 (jusant)	15 mai 2018	1,30 (jusant)
29 novembre 2016	1,55 (jusant)	18 mai 2018	2,09 (étale haute mer)
26 décembre 2016	1,28 (jusant)	28 mai 2018	0,89 (jusant)
18 janvier 2017	1,77 (flot)	4 juin 2018	1,95 (étale haute mer)
19 mars 2017	1,42 (flot)	7 juin 2018	1,33 (flot)
15 avril 2017	1,86 (étale haute mer)	12 juin 2018	0,84 (jusant)
5 mai 2017	0,84 (flot)	22 juin 2018	1 (étale marée basse)
18 mai 2017	1,55 (flot)	27 juin 2018	1,32 (jusant)
25 mai 2017	1,04 (jusant)	7 juillet 2018	1,20 (flot)
14 juin 2017	1,98 (étale haute mer)	9 juillet 2018	0,78 (étale marée basse)
27 juin 2017	2,11 (étale haute mer)	1 août 2018	2 (étale marée haute)
21 août 2017	1,04 (jusant)	11 août 2018	1,15 (jusant)
15 septembre 2017	1,02 (étale basse mer)	13 août 2018	1,99 (étale haute mer)
17 septembre 2017	0,81 (étale basse mer)	26 août 2018	1,39 (jusant)
30 septembre 2017	1,17 (étale basse mer)	31 août 2018	2,09 (étale haute mer)
7 octobre 2017	1,92 (étale haut mer)	2 septembre 2018	1,79 (flot)
1 novembre 2017	0,83 (étale basse mer)	7 septembre 2018	0,7 m (étale basse mer)
16 novembre 2016	1,14 (jusant)	10 septembre 2018	1,5 (jusant)
29 décembre 2017	0,95 (étale basse mer)	30 septembre 2018	2,13 (étale haute mer)
14 février 2018	1,12 (jusant)	7 octobre 2018	0,8 (marée basse)
4 mars 2018	2,36 (étale haute mer)	22 octobre 2018	0,98 (étale basse mer)
26 mars 2018	0,8 (étale basse mer)	21 décembre 2018	1,09 (jusant)
10 avril 2018	1,29 (étale haute mer)	8 Janvier 2019	2.10 (jusant)



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](http://www.brgm.fr)

**Direction régionale Guadeloupe**

Parc d'activités Colin - La Lézarde, Petit Bourg  
97170 Petit-Bourg, Guadeloupe

Tél. : 05 90 41 35 48 - [www.brgm.fr](http://www.brgm.fr)