



RÉPUBLIQUE
FRANÇAISE

Liberté
Égalité
Fraternité



Géosciences pour une Terre durable

brgm

Document à accès immédiat

Identification de stocks séimentaires en mer et modélisation hydro-sédimentaire le long de la façade ouest de l'isthme de Miquelon-Langlade

Rapport final

2113-21-6766.13.0
BRGM/RP-73067-FR

Version 1 du 24 juin 2024

Étude réalisée dans le cadre des projets d'appui aux politiques publiques

Billy J., Valentini N.

Vérificateur :

Nom : Balouin Yann
Fonction : Expert Littoral
Date : 05/12/2023

Signature :

Approbateur :

Nom : De La Torre Ywenn
Fonction : Directeur Régional
Date : 15/12/2023

Signature :

Le système de management de la qualité et de l'environnement du BRGM
est certifié selon les normes ISO 9001 et ISO 14001.
Contact : qualite@brgm.fr

Avertissement

Ce rapport est adressé en communication exclusive au demandeur, au nombre d'exemplaires prévu.

Le demandeur assure lui-même la diffusion des exemplaires de ce tirage initial.

La communicabilité et la réutilisation de ce rapport sont régies selon la règlementation en vigueur et/ou les termes de la convention.

Le BRGM ne saurait être tenu comme responsable de la divulgation du contenu de ce rapport à un tiers qui ne soit pas de son fait et des éventuelles conséquences pouvant en résulter.

Votre avis nous intéresse

Dans le cadre de notre démarche qualité et de l'amélioration continue de nos pratiques, nous souhaitons mesurer l'efficacité de réalisation de nos travaux.

Aussi, nous vous remercions de bien vouloir nous donner votre avis sur le présent rapport en complétant le formulaire accessible par cette adresse <https://forms.office.com/r/yMqFcU6Ctq> ou par ce code :



Mots clés :

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

Billy J., Valentini N. 2024. Identification de stocks sédimentaires en mer et modélisation hydro-sédimentaire le long de la façade ouest de l'isthme de Miquelon-Langlade. Rapport final V1. BRGM/RP-73067-FR, 92 p.

Synthèse

La répétition d'évènements de tempête sur l'archipel de Saint-Pierre-et-Miquelon au cours de l'hiver 2020-2021 a généré des encoches d'érosion sur la façade ouest de l'isthme de Miquelon-Langlade, conduisant à l'affaissement de plusieurs parties du talus littoral et de la route qui s'y adosse (aux abord des PK16-PK18), ainsi que l'accentuation de l'effet de bord à l'extrémité nord de l'enrochement. Le CEREMA, avec l'appui du BRGM, a formulé des recommandations de remédiations qui ont servi de base de décision sur les actions à mettre en œuvre entre l'Etat et la Collectivité Territoriale (Leclerc et al., 2021). En parallèle de la réfection de la route, un rechargement artificiel en sable (apport externe) sur le littoral attenant à la route est proposé comme préconisation afin de rééquilibrer le budget sédimentaire du secteur ($300\,000\text{ m}^3$).

La DTAM a demandé au BRGM de confirmer la faisabilité d'un tel rechargement en sable. Il s'agit ici de confirmer que la bathymétrie du site est adaptée à une opération de recharge, d'identifier une source d'approvisionnement, mais également en s'appuyant sur des modélisations hydro-sédimentaires et morphodynamiques d'estimer les flux sédimentaires et apporter des éléments pour préciser une stratégie de recharge.

Dans un 1^{er} temps, différentes zones de dépôts sédimentaires ont pu être caractérisées en se s'appuyant sur la base de données de l'Université de Perpignan (le long des deux façades de l'isthme), ainsi que des nouvelles données acquises dans le cadre de cette étude (au large de Miquelon ; iXblue en 2022). Au large de Miquelon, un potentiel intéressant de stocks sédimentaires a été mis en évidence, que ce soit en terme d'épaisseur des dépôts, de volumes estimés ou de granulométrie. Trois zones ont été identifiées dans cette étude dont l'estimation de l'épaisseur des dépôts sédimentaires est comprise entre 8 et 20 m. Deux des zones sont comprises entre 45 et 85 m de profondeur, donc au-delà de la profondeur de fermeture, pour une distance de la côte comprise entre 1 et 3 milles. La 3^{ème} est plus au large mais également plus profonde (80 et 95 m de profondeur). Au vu des connaissances sur le secteur, une activité d'extraction ne devrait pas perturber la dynamique littorale sur les petits fonds ou celle du trait de côte à proximité de Miquelon. Toutefois, les zones de gisements potentiels sont proches des activités de pêches, culture marine (AOT) et de câbles numériques ; à ceci peut également être ajouté le trafic maritime (ferries, plaisance, porte-conteneur). Il est stipulé dans le DSBM (Document Stratégique de Bassin Maritime) que les activités de dragages ne sont pas autorisées à moins de 3 milles nautiques de la côte. De plus, une opération de dragage à des profondeurs supérieures à 80 mètres rendra plus difficile la faisabilité de l'extraction de sédiments (difficultés techniques et coûts). Ces critères rendent donc difficile une extraction de sédiment sur ces zones (conflits d'usages, répercussions environnementales liées à une activité d'extraction, utilisation raisonnable des ressources). En se basant sur les éléments de connaissances concernant les stocks sédimentaires, leur localisation ainsi que le DSBM : aucune des zones identifiées ne réponds aux critères pour être un gisement pour de l'extraction de sédiments marins, même si certains secteurs ont un potentiel intéressant.

Dans un 2nd temps, la base de données de vague rétrospective IOWAGA (Ifremer), filtrée des événements cycloniques, a été utilisée dans cette étude. Ces données ont permis de produire une estimation fiable du transit sédimentaire le long de la façade Ouest de l'isthme. Une classification statistique des familles de vagues a permis d'identifier 12 classes de vagues caractéristiques du site. Afin de pouvoir déterminer la dynamique hydro-sédimentaire et notamment le flux de sédiments longitudinal, un travail de modélisation (modèle de vague spectrale SWAN) a été réalisé pour propager ces 12 classes de vagues sur la zone d'étude. En termes de dynamique sédimentaire, le transit littoral évalué à partir de la formule de Kamphuis

(2002) indique (i) pour le Nord de l'isthme un transit de l'ordre de 67 000 m³/an vers le sud, qui diminue progressivement autour de 16 000 m³/an ; puis (ii) devient faible au niveau du secteur central, le plus étroit de l'isthme (sur un linéaire côtier de 2 km) ; et (iii) s'inverse au sud de ce secteur, où l'on trouve un transport vers le Nord, de l'ordre de 10 000 m³/an.

Dans un 3^{ème} temps, une quantification des évolutions morphologiques lors de certains événements tempétueux a été effectuée en utilisant un MNT construit avec les nouvelles acquisitions bathymétriques produites par IXblue. C'est le modèle morphodynamique XBeach qui a été employé dans cette étude. Deux configurations de rechargement ont été mise en place : un rechargement de l'avant-côte (configuration A) et un de la plage (configuration B). Leur conception a été établie en fonction des recommandations du rapport d'étude du CEREMA (300 000 m³ sur un secteur de 1.5 à 2 km de long ; Leclerc et al., 2021). Quatre scénarios hydrodynamiques de tempête (réelles) ont été modélisés avec XBeach, pour différentes périodes de retour. Le 1^{er} scénario est caractérisé par une succession de trois tempêtes ayant chacune une période de retour (p. r.) autour de 1 an. Le 2nd scénario est caractérisé par une tempête ayant une période de retour de 5 ans, le 3^{ème} scénario par une tempête ayant une période de retour de 10 ans, et le 4^{ème} est caractérisé par la succession de quatre tempêtes ayant atteints l'archipel entre novembre 2020 et Février 2021.

Les 8 modélisations montrent des pertes de sédiment importantes dans la zone de rechargement. Néanmoins, les scénarios de rechargement de la plage montrent des pertes moins importantes (25 à 50%) que ceux simulés pour le rechargement de l'avant-côte (jusqu'à 80%). Un focus a été fait sur un profil de la partie nord de l'enrochement, afin de comparer l'effet d'un rechargement par rapport à un contexte dit « naturel » pour un scénario correspondant à la série de tempête de l'hiver 2020-2021. La simulation dans un contexte dit « naturel » met en lumière la formation d'un important talus d'érosion (2m de haut). Même si dans le cadre des modélisations XBeach l'ouvrage est considéré comme une surface non-érodable, ce talus d'érosion a sûrement dû déstabiliser l'enrochement localisé à proximité directe. Ici encore, le rechargement de plage semble plus favorable en jouant un rôle tampon plus protecteur.

Pour conclure, il est important de rappeler que les solutions de rechargements de plage ou d'avant-côte sont amenées à être renouvelées pour garder leur fonction dans le temps (la durée dépendant de l'occurrence des tempêtes). Le rechargement sédimentaire de la façade ouest de l'isthme doit en outre s'accompagner d'une stratégie de gestion durable de l'ensemble de l'isthme englobant la gestion dunaire des Buttreaux, les deux façades sur tout leur linéaire et les usages associés.

Sommaire

Synthèse	3
1. Introduction.....	11
2. Bases de données existantes et nouvelles aquisitions	13
2.1. Bases de données existantes	13
2.2. Acquisition de données bathymétrique, sédimentaires et sismique marine - Assistance à la DTAM.....	16
2.2.1. <i>Bathymétrie</i>	16
2.2.2. <i>Sismique marine</i>	17
2.2.3. <i>Echantillons sédimentaires</i>	19
2.2.4. <i>Livraison des données</i>	20
3. Avant-côte et stocks sédimentaires en mer	21
3.1. Caractérisation sédimentaire des sédiments de surface	21
3.2. Zone au large de Miquelon	23
3.3. Façade ouest de l'isthme	29
3.4. Zone à l'est de l'isthme	33
3.5. Synthèse	36
4. Contraintes réglementaires et techniques dans les zones sources potentielles	37
4.1. Cadre et préconisation.....	37
4.2. Identification du potentiel des stocks sédimentaires en mer et Reflexion sur les ressources en local.....	40
4.2.1. <i>Au large de Miquelon</i>	40
4.2.2. <i>Le long de la façade Est de l'isthme</i>	42
4.2.3. <i>Diagnostique préliminaire sur les zones sources potentielles</i>	43
5. Estimation du transit sédimentaire le long de la façade ouest de l'isthme	44
5.1. Méthode et modélisation.....	44
5.1.1. <i>Conditions de vagues au large</i>	44
5.1.2. <i>Point Nord</i>	47
5.1.3. <i>Point Ouest</i>	48
5.1.4. <i>Point Sud</i>	50
5.2. Classification statistique des familles de vagues au large du site d'Étude	52
5.2.1. <i>Principe de la classification statistique</i>	52
5.2.2. <i>Résultats généraux à l'ouest et au sud</i>	54
5.3. Modélisation des états de mer à la côte	56
5.3.1. <i>Principe</i>	56
5.3.2. <i>Détermination des vagues de référence au large de la zone d'étude</i>	58
5.3.3. <i>Quantification de la dynamique hydro-sédimentaire sur le secteur</i>	59
5.4. Synthèse sur l'estimation du transit sédimentaire.....	63
6. Modélisation de scénarios de recharge.....	64
6.1.1. <i>Modèle morphodynamique XBeach</i>	64
6.1.2. <i>Mise en œuvre de XBeach le long de la façade Ouest de l'isthme</i>	66
6.1.3. <i>Scénarios de recharge</i>	68
6.1.4. <i>Configuration du scénario A : Rechargement de l'avant-plage</i>	70
6.1.5. <i>Configuration du scénario B : Rechargement de plage</i>	70
6.1.6. <i>Tempêtes modélisées</i>	71

7. Conclusion	86
7.1. Identification des stocks sédimentaires en mer	86
7.2. Modélisation morphodynamique	86
8. Bibliographie	89

Liste des figures

Illustration 1 : Localisation de l'isthme et topo-bathymétrie de la zone d'étude (LiDAR 2014 et bathymétrie DTAM 2018).....	11
Illustration 2 : A) Encoche d'érosion et B) travaux sur l'isthme de Miquelon-Langlade suite aux tempêtes de février–mars 2021 (source : photo et extrait du vol drone DTAM 2021).	12
Illustration 3 : Plan de position des données marines: profils sismique (en gris profils acquis lors des campagnes de 2011 et 2012) et des bennes (rond bleu) de la base de données de l'université de Perpignan (carte issue des travaux de Billy, 2014).....	13
Illustration 4: Carte de la répartition sédimentaire de surface sur l'avant côte des façades Est et Ouest de la barrière de Miquelon-Langlade. (issu des travaux de Billy, 2014).....	14
Illustration 5 : Carte sédimentaire le long de la façade Est de l'archipel (Gouletquer et al., 2011 - IFREMER).....	15
Illustration 6 : Représentation schématique d'une acquisition par sonar multifaisceaux (à gauche, extrait du rapport de mission iXblue, 2023) et photographie du DriX, drone maritime autonome de surface, lors de la campagne de mesure sur l'archipel de Saint-Pierre-et-Miquelon en juillet 2022 (à droite ; © Romain Barbot)	16
Illustration 7 : A) Localisation des lignes DRIX ; B) Bathymétrie des façades est et ouest de l'isthme (SMF et inversion bathymétrie par imagerie satellitaire, maille 5 m).	17
Illustration 8 : Principe de fonctionnement et illustration d'un système Sparker (extrait du rapport de mission iXblue, 2023).....	18
Illustration 9 : Plan de position des profils sismique THR et des points des 40 points de prélèvements.	18
Illustration 10 : Exemple d'un profil sismique transversal (X08), exagération verticale x 11.....	19
Illustration 11 : Photographies A) du système utilisé pour l'acquisition des prélèvements sédimentaires, et B) d'un exemple de prélèvement sédimentaire sur la zone au large de Miquelon (PR27) (extrait du rapport de mission iXblue, 2023).....	20
Illustration 12 : Points de prélèvements et répartition des classes granulométriques pour les échantillons en mer et sur le pourtour de la lagune (représentation des pourcentages de chaque gamme granulométrique).....	22
Illustration 13 : Répartition des classes granulométriques (représentation des pourcentages de chaque gamme granulométrique) sur le domaine de la plage et sur le pourtour de la lagune du Grand Barachois.	22
Illustration 14 : Profils sismique transversal X06 A. Traité et B. interprété (R1 en vert, R2 en violet, accumulation sédimentaire en jaune et localisation des prélèvements sédimentaires ; Illustration 12).....	23
Illustration 15 : Profils sismique longitudinal L03 A. Traité et B. interprété (R1 en vert, R2 en violet, accumulation sédimentaire en jaune et localisation des prélèvements sédimentaires ; Illustration 12).....	24

Illustration 16 : Vue 3D des profils sismiques A) Interprétation des profils en distinguant (i) le fond de la mer (en rouge), (ii) le réflecteur R1 (en vert) qui représente la limite entre le substrat rocheux et les dépôts sédimentaires, et (iii) le réflecteur R2 (violet), limite entre deux unités sédimentaires. B) MNT du réflecteur R1 (en milliseconde temps double) ; (exagération verticale x5, cellule 1 km ; réalisée sous DELPH RoadMap).	25
Illustration 17 : Visualisation 3D des profils sismiques longitudinaux (L01-L06) et transversaux (X01-X10) ainsi que les points de prélèvements sédimentaires. La bathymétrie de la zone est générée grâce à l'interprétation des profils sismiques (exagération verticale x5, cellule 1 km ; réalisée sous DELPH RoadMap).	26
Illustration 18 : Epaisseurs sédimentaires le long de chaque profil de sismique réflexion au large de Miquelon (vitesse des ondes dans les sédiments de 1700 m/s).	27
Illustration 19 : MNT de la morphologie et topographie (m) du toit du substrat généré grâce à l'interprétation des profils sismiques (Illustration 16), et mise en évidence des zones d'accumulation sédimentaire (vitesse dans le sédiment : 1700 m/s) et d'affleurement du substrat rocheux (exagération verticale x5, cellule 1 km ; réalisée sous DELPH RoadMap).	27
Illustration 20 : MNT de l'épaisseurs des accumulations sédimentaires au large de Miquelon (vitesse des ondes dans les sédiments de 1700 m/s) et superposition des résultats granulométriques des prélèvements sédimentaires (Illustration 12). En pointillés les zones A à E pour le calcul des volumes des sédiments (estimation).	28
Illustration 21 : Exemple de quatre profils de l'avant-côte (répartis tous les 3 km) extraits de la bathymétrie de 2022 (Illustration 7) illustrant les variations morphologiques de la façade Ouest de l'Isthme.	29
Illustration 22 : Exemple d'un profil sismique type le long de la façade Ouest de l'isthme, illustrant la morphologie du substrat rocheux et la fine couche de dépôt sédimentaire le drapant (Billy et al., 2013).	29
Illustration 23: Synthèse de l'investigation de l'avant-côte le long de la façade Ouest de l'isthme : localisation des données, cartographie de l'épaisseur sédimentaire et du substrat rocheux affleurant le long de l'avant côte, et dynamique du trait de côte entre 1949-2011 (Billy et al., 2013).	30
Illustration 24 : Evolution du trait de côte le long de la façade Ouest de l'isthme sur la période historique entre chaque cliché disponible (1949, 1978, 1985, 1990, 2000, 2005 et le données GPS de 2011 ; (Robin et al., 2013)).	31
Illustration 25 : Evolution du trait de côte le long de l'Isthme de Miquelon-Langlade, évolution nette (à gauche) et taux d'évolution annuel moyen (à droite) sur la période historique (1949-2012, en haut) et récente (2012-2017, en bas ; Moisan and Laigre, 2019).	32
Illustration 26 : Schéma préliminaire de fonctionnement de la dynamique sédimentaire (à gauche) proposé dans l'étude de Billy et al., 2013 ; et estimation du transport sédimentaire annuel moyen (m^3 , formule de Van Rijn, 1993 ; à droite ; réalisée par Robin, 2007)	33
Illustration 27 : Coupe Mer-Terre-Mer au centre de l'isthme de Miquelon-Langlade. Les profils bruts (en haut ; géoradar et sismique marine) et interprétés (en bas), représentent une vision Ouest-Est des dépôts émergés et immersés (unités UU, MU, LU et FSST) sur une substratum rocheux (bedrock) ; (issu des travaux de Billy, 2014).	34
Illustration 28: Profils sismiques bruts (en haut) et interprétés (en bas) enregistrés le long de deux sections Sud-Nord (longitudinales ; AA' et BB') à l'Est de la barrière. Trois unités sismiques recouvrent le substrat rocheux et représentent les dépôts induits par la transgression marine: LU ('lower unit' en rouge), MU ('middle unit' en violet) et UU ('upper unit' en jaune), qui correspondent respectivement à l'unité la plus profonde, intermédiaire et supérieure du cortège.	34

Illustration 29: Répartition spatiale des unités sismiques FSST (en bleu), LU (en rouge), MU (en violet) et UU (en jaune) et l'épaisseur des unités LU, MU et UU.	35
Illustration 30 : Estimation des épaisseurs sédimentaires le long de la façade Est. A) avec la même échelle des épaisseurs que pour les dépôts au large de Miquelon ; B) avec une échelle de couleur adaptée aux dépôts de la zone. En pointillés les zones F et G pour le calcul des volumes des sédiments (Tableau 2).	36
Illustration 31 : Extrait du DSBM de Saint Pierre-et-Miquelon, représentant les zones de concessions aquacoles en rade de Miquelon (à gauche), zone de pêche de saumon et câble numérique (à droite).....	38
Illustration 32 : Extrait du DSBM de l'Archipel sur l'extraction de matériaux marins.....	38
Illustration 33 : Synthèse des impacts directs de l'extraction de granulat marin (source IFREMER).	39
Illustration 34 : Synthèse des zones de stocks potentiels en sédiments au large de Miquelon (zone C, D, E ; Illustration 20) et le long de la façade Est de l'Isthme (zone G ; Illustration 30), avec les activités et contraintes du territoire (identifiées dans le DSBM ; Illustration 31).	41
Illustration 35. Emprise du modèle IOWAGA-ATNW (image https://sextant.ifremer.fr) avec un exemple de distribution spatiale de Hs.	45
Illustration 36. Localisation des points d'extraction des données de vagues.....	45
Illustration 37. Comparaison des hauteurs caractéristiques des vagues Hs, entre observations à la bouée 97501 et données issues du modèle IOWAGA forcé par les vents CFSR pour l'année 2012-1020.....	46
Illustration 38. À droite, rose des vagues. La valeur de Hs est sur l'axe radial. L'enveloppe des points de la série temporelle est représentée par la ligne noire en pointillés. La fréquence d'occurrence des couples (Hs, Dp) est représentée par l'échelle de couleur (min=0,02‰) avec une discrétisation de 5° pour Dp et 10 cm pour Hs. Dp est en convention nautique (i.e. indique la provenance des vagues). À droite, diagramme bivarié (Tp,Hs ; même symbologie). Pour la fréquence d'occurrence, Tp est discrétisé toutes les 0,2 s et Hs tous les 10 cm.....	47
Illustration 39. Valeurs de retour de Hs pour le point au Nord. Seuil statistique = 4.7m. Méthode d'ajustement: maximum de vraisemblance (ML) ; extrait des résultats du Tableau 4.	48
Illustration 40. À gauche, rose des vagues. La valeur de Hs est sur l'axe radial. L'enveloppe des points de la série temporelle est représentée par la ligne noire en pointillés. La fréquence d'occurrence des couples (Hs, Dp) est représentée par l'échelle de couleur (min=0,02‰) avec une discrétisation de 5° pour Dp et 10 cm pour Hs. Dp est en convention nautique (i.e. indique la provenance des vagues). À droite, Diagramme bivarié (Tp,Hs). Même symbologie que l'Illustration à gauche. Pour la fréquence d'occurrence, Tp est discrétisé toutes les 0,2 s et Hs tous les 10 cm.....	49
Illustration 41. Valeurs de retour de Hs pour le point Ouest. Seuil statistique = 6.1m. Méthode d'ajustement: maximum de vraisemblance (ML) ; extrait des résultats du Tableau 5.	50
Illustration 42. À gauche, rose des vagues. La valeur de Hs est sur l'axe radial. L'enveloppe des points de la série temporelle est représentée par la ligne noire en pointillés. La fréquence d'occurrence des couples (Hs, Dp) est représentée par l'échelle de couleur (min=0,02‰) avec une discrétisation de 5° pour Dp et 10 cm pour Hs. Dp est en convention nautique (i.e. indique la provenance des vagues). À droite, diagramme bivarié (Tp,Hs ; même symbologie). Pour la fréquence d'occurrence, Tp est discrétisé toutes les 0,2 s et Hs tous les 10 cm.....	51
Illustration 43. Valeurs de retour de Hs pour le point Sud. Seuil statistique = 6.9m. Méthode d'ajustement: maximum de vraisemblance (ML) ; extrait des résultats du Tableau 6.	51

Illustration 44. Regroupement des différentes vagues selon la méthode k-moyennes, avec initialisation par algorithme MDA, point à l'Ouest du site d'étude.	54
Illustration 45. Répartition annuelle des différents types de vagues au point au Sud de l'Archipel. Les lignes en pointillé définissent les limites des 12 classes (seulement pour visualisation, elles sont calculées comme moyenne mobile).	55
Illustration 46. Répartition annuelle des différents types de vagues au point à l'ouest de l'Archipel. Les lignes en pointillé définissent les limites des 12 classes (seulement pour visualisation, elles sont calculées comme moyenne mobile).	56
Illustration 47. A gauche, la grille employée pour la modélisation des états de mer dans SWAN. À droite, données utilisées pour la construction du modèle bathymétrique.	57
Illustration 48. Comparaison des données mesurées par la bouée CANDHIS avec le modèle IOWAGA et les résultats de la simulation SWAN lors de tempêtes en janvier 2014.	58
Illustration 49. Évaluation du transport sédimentaire sur la façade ouest de l'Isthme en utilisant la formule de Kamphuis, 2002: résultats du taux de transport sédimentaire potentiel annuel. En rouge, la direction de dérive résiduelle est orientée vers sud, en vert vers le nord.	61
Illustration 50. Évaluation du transport sédimentaire en utilisant la formule de Kamphuis, 2002 et LCHF: résultats du taux de transport sédimentaire potentiel annuel le long de la façade ouest de l'Isthme. Zoom sur quelques profils représentatifs dans le secteur des Buttreaux. En rouge, la direction de dérive résiduelle est orientée vers sud, en vert vers le nord.	62
Illustration 51. Budget de sédiments mobilisable dans le domaine et couches des formations rocheuses apparentes (zones non érodables) ; données interpolées issues des travaux de Billy, 2014.	67
Illustration 52. Grille de calcul de long de la façade Ouest de l'isthme, sur fond de Google Map. Les résolutions spatiales, selon la direction parallèle (longshore) et perpendiculaire (cross-shore), sont montrées, la grille de calcul superposé en blanc, avec une échelle réduite (x8).	68
Illustration 53. Type de rechargement, dune, plage, avant-plage. Profils cross-shore (Van Rijn et al., 2011).	69
Illustration 54. Scénario de rechargement de l'avant-plage modélisé. Trois profils transversaux représentatifs sont extraits (bleu, rouge et vert) de la zone simulée.	70
Illustration 55. Scénario de rechargement de plage modélisé. Trois profils transversaux représentatifs sont extraits (bleu, rouge et vert) de la zone simulée.	71
Illustration 56. Caractéristiques d'une succession de 3 tempêtes avec une période de retour de 1 an chacune.	72
Illustration 57. Évolution morphologique du rechargement de l'avant-plage pour une succession de 3 tempêtes de 1 an de période de retour, calculée sur trois profils de la grille Xbeach, secteur des Buttreaux (Simulation 1-A).	73
Illustration 58. Évolution du volume total pour le scénario de rechargement de l'avant-plage au cours du temps de la simulation (succession de 3 tempêtes de 1 an de période de retour ; Simulation 1-A).	73
Illustration 59. Évolution morphologique du rechargement de plage pour une succession de 3 tempêtes de 1 an de période de retour, calculée sur trois profils de la grille Xbeach, secteur des Buttreaux (Simulation 1-B).	74
Illustration 60. Évolution du volume total pour le scénario de rechargement de plage au cours du temps de la simulation (succession de tempêtes de 1 an de période de retour ; Simulation 1-B).	74

Illustration 61. Caractéristiques d'une tempête avec période de retour de 5 ans.	75
Illustration 62. Évolution morphologique du rechargeement de l'avant-plage pour une tempête de 5 ans de période de retour, calculée sur trois profils de la grille XBeach, secteur des Buttreaux (Simulation 1-A).	75
Illustration 63. Évolution du volume total pour le scénario de rechargeement de l'avant-plage au cours du temps de la simulation (tempête de 5 ans de période de retour ; Simulation 2-A).....	76
Illustration 64. Évolution morphologique du rechargeement de plage pour une tempête de 5 ans de période de retour, calculée sur trois profils de la grille XBeach, secteur des Buttreaux (Simulation 2-B).	76
Illustration 65. Évolution du volume total pour le scénario de rechargeement de plage au cours du temps de la simulation (tempête de 5 ans de période de retour ; Simulation 2-B).	77
Illustration 66. Caractéristiques d'une tempête avec période de retour de 10 ans.	77
Illustration 67. Évolution morphologique pour le scénario de rechargeement de l'avant-plage pour une tempête de 10 ans de période de retour, calculée sur trois profils de la grille XBeach, secteur des Buttreaux (Simulation 3-A).	78
Illustration 68. Évolution du volume total de rechargeement de l'avant-plage au cours du temps de la simulation (tempête de 10 ans de période de retour ; Simulation 3-A).	78
Illustration 69. Évolution morphologique pour un scénario de rechargeement de plage pour une tempête de 10 ans de période de retour, calculée sur trois profils de la grille XBeach, secteur des Buttreaux (Simulation 3-B).....	79
Illustration 70. Évolution du volume total de rechargeement de plage au cours du temps de la simulation (tempête de 10 ans de période de retour ; Simulation 3-B).....	79
Illustration 71. Caractéristiques de la succession de tempêtes, nov. 2020 à fév. -2021, correspondant à des tempêtes de période de retour autour ou inférieur à 1 an chacune.	80
Illustration 72. Évolution morphologique du scénario de rechargeement de l'avant-plage pour une succession de 4 tempêtes , celles de nov. 2020 à fév. 2021, calculée sur trois profils de la grille XBeach, secteur des Buttreaux (Simulation 4-A).....	81
Illustration 73. Évolution du volume total de rechargeement de l'avant-plage au cours du temps de la simulation (succession de 4 tempêtes nov. 2020 à fév. 2021 ; Simulation 4-A).....	81
Illustration 74. Évolution morphologique du scénario de rechargeement de plage pour une succession de 4 tempêtes, celles de nov. 2020 à fév. 2021, calculée sur trois profils de la grille XBeach, sur le secteur d'étude ; Simulation 4-B)	82
Illustration 75. Évolution du volume total de rechargeement de plage au cours du temps de la simulation (succession de 4 tempêtes nov. 2020 à fév. 2021 ; Simulation 4-B).....	82
Illustration 76. Localisation du profil n#549, situé à l'extrême nord de l'ouvrage de protection.	84
Illustration 77. : évolution morphologique du profile n#549, au nord du PK16 pour un scénario de topo-bathymétrie (a) sans rechargeement, (b) avec rechargeement de l'avant-plage et (c) avec rechargeement de plage.	85

1. Introduction

L'isthme de Miquelon-Langlade est un cordon sédimentaire de 12 km de long en forme de Y, reliant les deux îles éponymes. La partie nord-ouest de l'isthme, les Buttereaux, est bordée d'un côté par l'océan et de l'autre par la lagune du Grand-Barachoïs. Cette zone se caractérise d'une part par la présence de dunes végétalisées qui peuvent s'élever jusqu'à 15-20 m de haut, mais également par sa largeur réduite comprise en 50 et 200 m (Illustration 1).

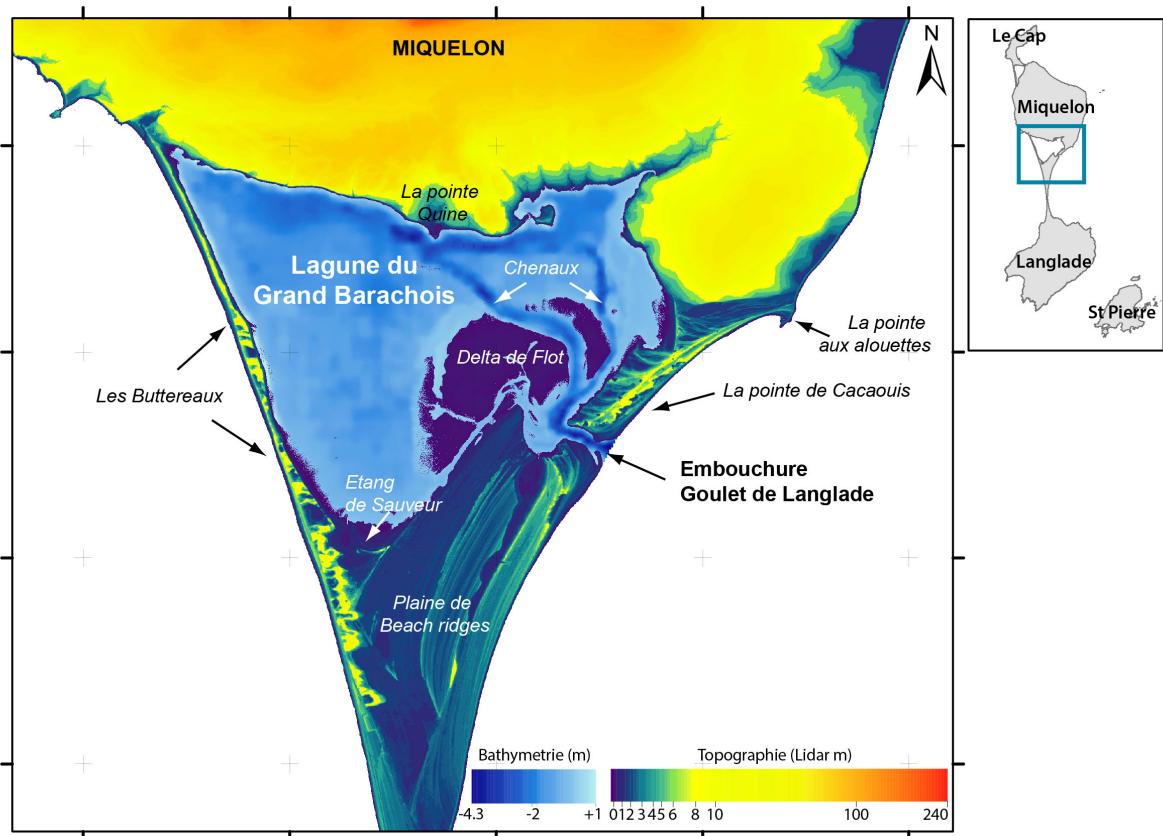


Illustration 1 : Localisation de l'isthme et topo-bathymétrie de la zone d'étude (LiDAR 2014 et bathymétrie DTAM 2018).

La répétition d'évènements de tempête en février et mars 2021, dont 5 caractérisées par des hauteurs significatives maximales de houle de 5 à 6 m et des vents proches de 80 km/h de secteur ouest (De la Torre, 2021) a généré des encoches d'érosion conduisant à l'affaissement de plusieurs parties du talus littoral et de la route qui s'y adosse (aux abord des PK16-PK18 ; Illustration 2). L'accentuation de l'effet de bord à l'extrémité nord de l'enrocement est également constatée. Suite à ces évènements, le CEREMA, avec l'appui du BRGM, a formulé des recommandations de remédiation qui ont servi de base de décision sur les actions à mettre en œuvre entre l'Etat et la Collectivité Territoriale (Michard et al., 2021). La réfection de la route a ainsi été programmée. En parallèle, un rechargement artificiel en sable (apport externe) sur le littoral attenant à la route est proposé comme préconisation afin de rééquilibrer le budget sédimentaire du secteur (300 000 m³ sur un secteur de 1.5 à 2 km de long). Comme souligné dans le rapport du CEREMA, la finalité de la méthode est de créer une zone tampon qui assurerait un rôle protecteur essentiel de la section dégradée en cas de forts évènements de tempête

(protection du pied de l'ouvrage, réduction l'action de la houle). Toutefois, le BRGM rappelle (Billy et De La Torre, 2021) que cela serait une solution temporaire qui ne pourrait pas s'appliquer rapidement (réglementation, financement, études d'impacts etc...) et que la stabilisation du trait de côte doit également s'accompagner d'une stratégie autour de la gestion dunaire des Buttéraux et plus largement une stratégie de gestion à l'échelle de l'isthme.



Illustration 2 : A) Encoche d'érosion et B) travaux sur l'isthme de Miquelon-Langlade suite aux tempêtes de février–mars 2021 (source : photo et extrait du vol drone DTAM 2021).

Suite au rapport Michard et al. (2021), la DTAM a demandé au BRGM de confirmer la faisabilité d'un tel rechargement en sable. Au préalable, différentes incertitudes doivent être levées. Il s'agit :

- **de confirmer que la bathymétrie du site** est adaptée à une opération de rechargement. Les données actuelles sont peu précises et des incertitudes pèsent sur les pentes associées, les morphologies d'avant-côte, la localisation des pointements rocheux, etc. Dans le cas de pentes trop élevées le risque étant que le sable rechargé soit transporté trop en profondeur;
- **d'estimer les flux sédimentaires**, transits sédimentaires le long de la côte et transversal à la côte, qui seront des éléments clés pour anticiper un rechargement ;
- **d'identifier une source d'approvisionnement**. Les carrières à terre ayant été d'ores et déjà exclues, le site source est à rechercher en mer dans une zone qui ne devra pas perturber la dynamique du littoral adjacent et contenant des matériaux en quantité et nature adaptées ;
- **d'apporter des éléments pour préciser une stratégie de rechargement**, en se basant sur la proposition du CEREMA (cubage), à savoir le site de dépôt, les scénarios possibles de rechargement, préconiser des périodes plus propices du rechargement selon la saison.

Ainsi, ce programme d'étude a pour but:

- (1) d'accompagner la DTAM pour la réalisation du marché et le suivi des nouvelles acquisitions de données bathymétriques, sismiques et de prélèvements sédimentaires en mer ;
- (2) de caractériser les dépôts d'avant-côte et identifier des potentiels stocks sédimentaires en mer ;
- (3) d'estimer le transit sédimentaire le long de la façade ouest de l'isthme ;
- (4) de réaliser des modélisations hydro-sédimentaires/morphodynamiques de l'isthme lors d'événements tempétueux ;
- (5) de modéliser deux scénarios de rechargements et leurs évolutions pour différents événements ou succession d'événements tempétueux.

2. Bases de données existantes et nouvelles acquisitions

Pour les besoins de l'étude, des données de géophysique marine (bathymétrie et sismique marine) et sédimentaires sont requises. La majeure partie des données existantes qui permettent de qualifier l'avant côté de l'archipel provient de la base de données de l'Université de Perpignan ; laboratoire UMR-CNRS CEFREM, qui compte des profils de sismique marine et des échantillons sédimentaires réalisés le long des deux façades de l'isthme.

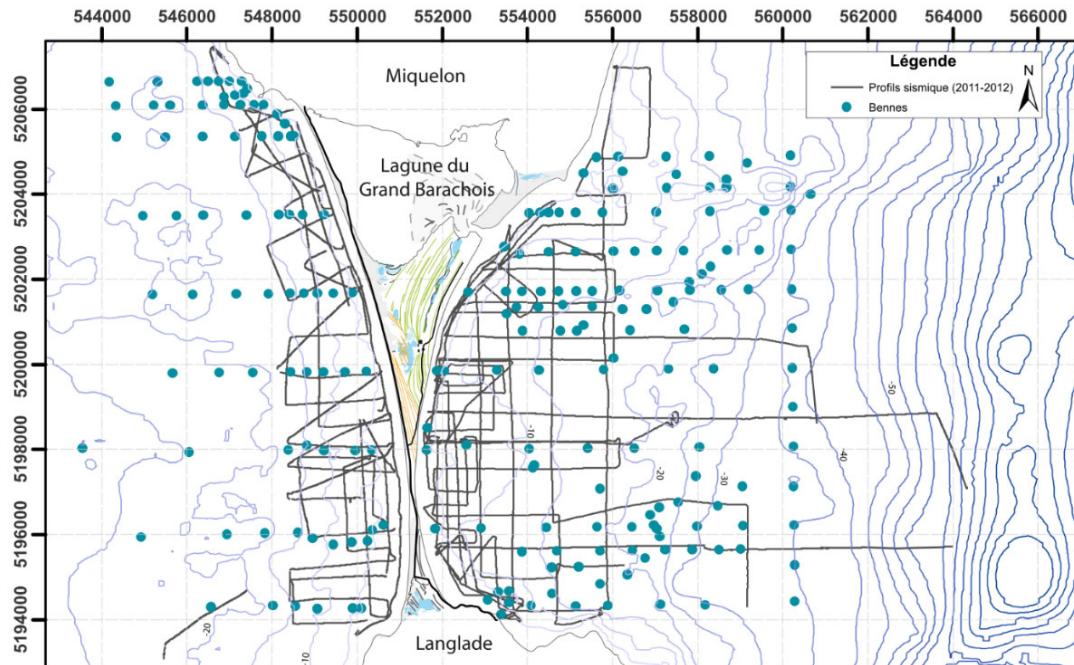
Pour répondre aux objectifs du projet, l'acquisition de données complémentaires est nécessaire, notamment :

1. Des données bathymétriques de l'avant-côte de l'isthme, nécessaire pour modéliser la dynamique hydro-sédimentaire et pour tester des scénarios de recharge (chapitres 4 et 5) ;
2. Des données de sismique marine et sédimentaires, pour rechercher une ou plusieurs zones potentielles de stocks de sédiments (chapitre 3).

Ces nouvelles données ont été acquises en totalité par la société iXblue en juillet 2022 (bathymétrie) et octobre 2022 (sismique marine et échantillons sédimentaires).

2.1. BASES DE DONNEES EXISTANTES

Le CEFREM a réalisé en 2011 et 2012, trois campagnes d'acquisition de données le long des façades est et ouest de l'isthme. Celles-ci ont permis de collecter au total 330 km de profils de sismique marine THR le long des deux façades de l'isthme (Billy, 2014). Le matériel utilisé est un sondeur bi-fréquences INNOMAR SES 2000 Compact de type Chirp (4-12 kHz, fréquence réglée à 6 kHz), connecté à une génératrice et un GPS pour la localisation.



L'interprétation de ces profils a permis la caractérisation de l'avant-côte de l'isthme et l'identification de différentes unités sédimentaires (c.f. sections 3.3 et 3.4 ci-après).

La base de données du CEFREM compte également un grand nombre de points de prélèvements sédimentaires de surface (par bennes), issus des travaux de (Billy, 2014; Robin, 2007), qui permettent de caractériser les dépôts le long des deux façades de l'isthme (avant-côte ; Illustration 3) et sur la partie plage (Robin et al., 2013). Les données collectées lors de ces travaux ont permis de réaliser une carte de nature des fonds de part et d'autre l'isthme (Illustration 4). L'ensemble de ces données a été mis à disposition pour ce travail.

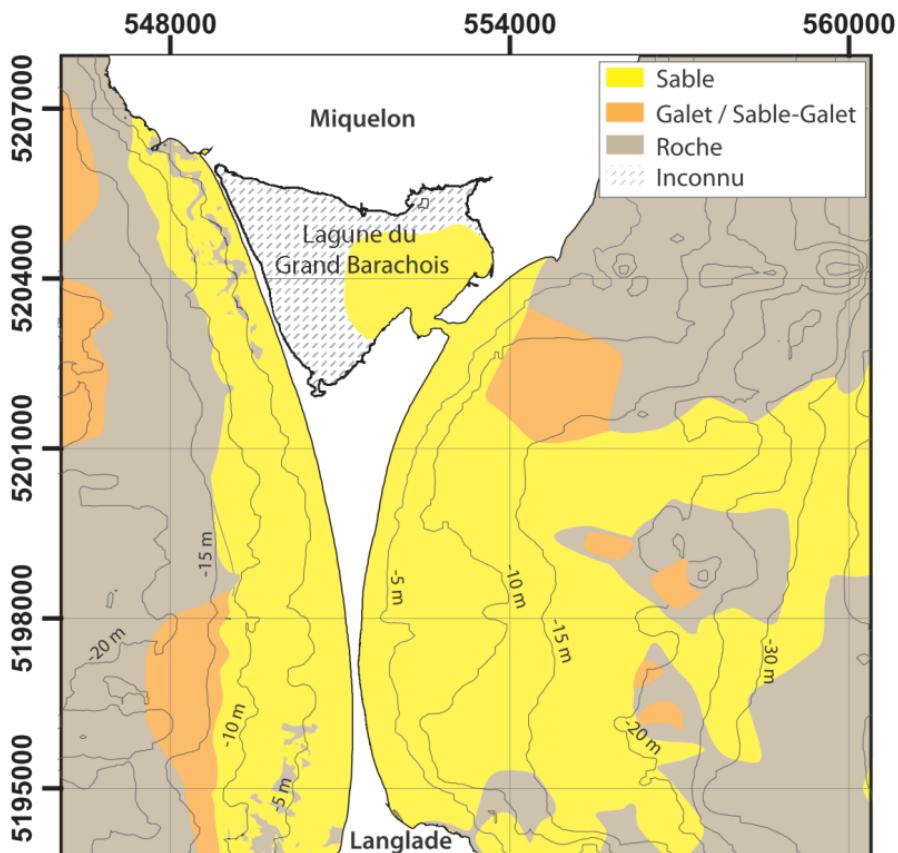


Illustration 4: Carte de la répartition sédimentaire de surface sur l'avant-côte des façades Est et Ouest de la barrière de Miquelon-Langlade. (issu des travaux de Billy, 2014).

L'IFREMER a également réalisé une carte sédimentaire au large de Miquelon et Langlade, le long de la façade Est (Illustration 5 ; Gouilletquer et al., 2011). Cette carte réalisée dans le cadre d'une étude pour le développement de la filière aquacole sur l'archipel, est une donnée précieuse pour les connaissances de l'avant-côte, car c'est la seule carte sédimentaire qui couvre une aussi grande surface et jusqu'à des profondeurs pouvant atteindre 60 à 90 m. Cette carte est notamment la seule source de données concernant l'avant-côte au large de Miquelon.

Identification de stocks sédimentaires en mer et modélisation hydro-sédimentaire le long de la façade ouest de l'isthme de Miquelon-Langlade

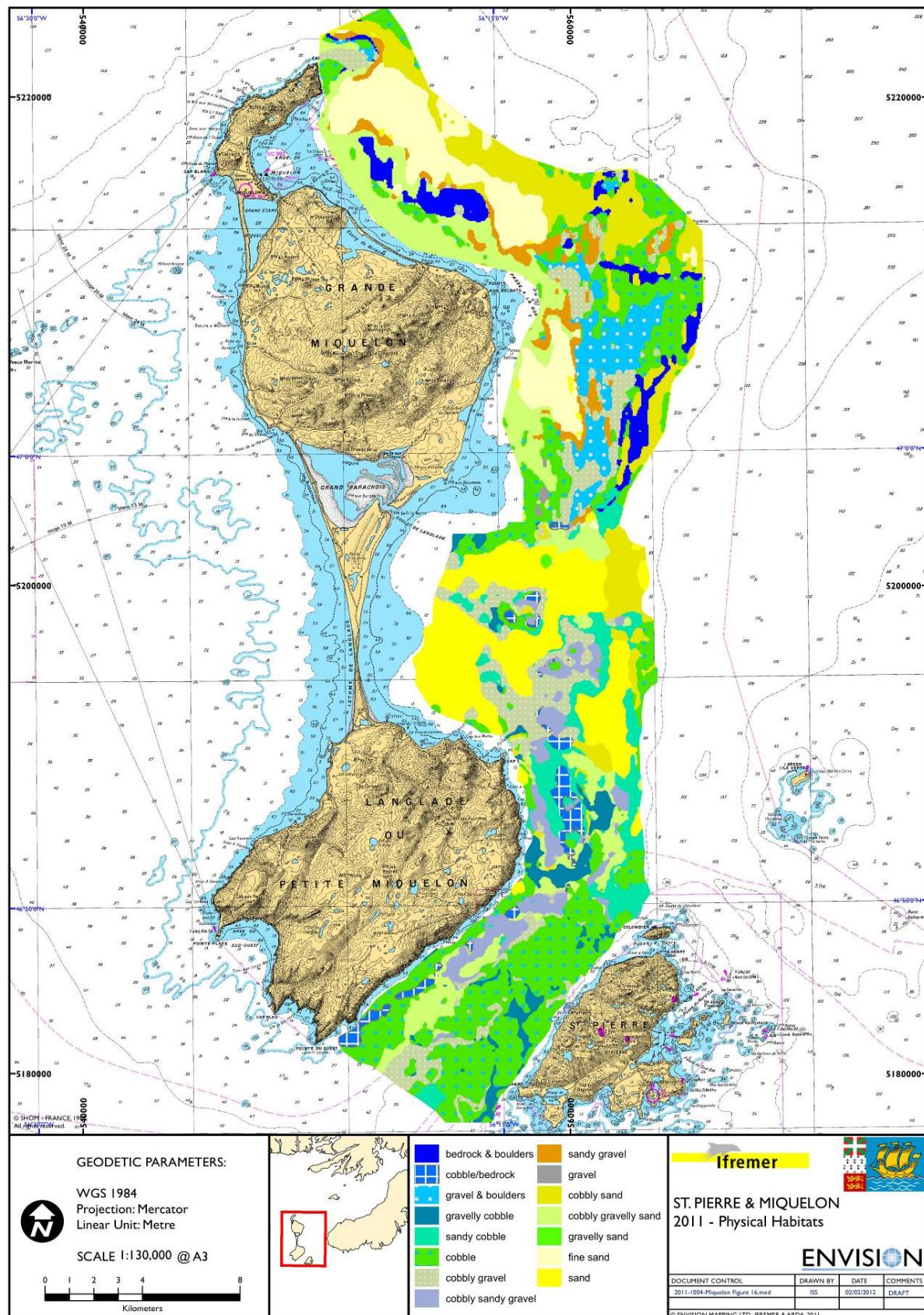


Illustration 5 : Carte sédimentaire le long de la façade Est de l'archipel (Gouletquer et al., 2011 - IFREMER)

2.2. ACQUISITION DE DONNEES BATHYMETRIQUE, SEDIMENTAIRES ET SISMIQUE MARINE - ASSISTANCE A LA DTAM

2.2.1. Bathymétrie

Les sonars multifaisceaux (*MBES, MultiBeam Echo Sounder*) sont des systèmes acoustiques qui permettent d'obtenir de façon précise des relevés topographiques du relief sous-marin. Un sondeur multifaisceaux mesure simultanément la profondeur selon plusieurs directions déterminées par les faisceaux de réception du système. Ces faisceaux forment une fauchée perpendiculaire à l'axe du navire¹. La largeur de fauchée du sonar dépend de la profondeur d'eau (plus le fond de la mer sera profond plus la fauchée sera grande) de l'ordre de 5 à 7 fois la profondeur (Illustration 6A). Dans le cas de cette étude, le sondeur a été fixé sous un drone maritime autonome de surface (DriX développé par la société iXblue, Illustration 6B). Ainsi pour obtenir une carte de l'ensemble de la zone d'étude, les profils réalisés par le DriX seront plus rapprochés vers les petits fonds (10 à 5 m de profondeur) et plus espacées vers 20 m de profondeur (Illustration 7A). Le DriX permet la réalisation de levés même par forte condition de mer, sans perte de qualité de la donnée. En utilisant les informations fournies par la centrale inertielles, les faisceaux sont corrigés en fonction du mouvement du drone maritime de surface.

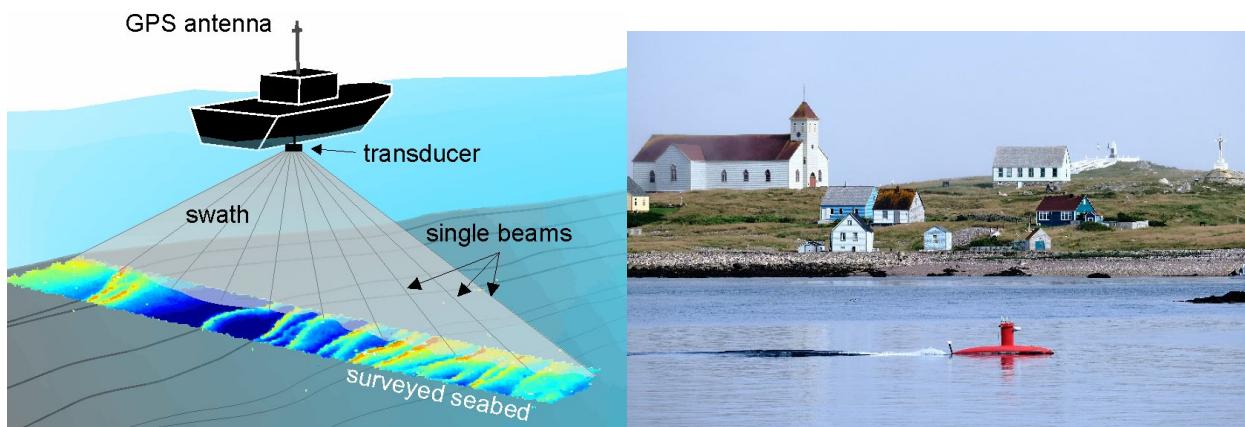


Illustration 6 : Représentation schématique d'une acquisition par sonar multifaisceaux (à gauche, extrait du rapport de mission iXblue, 2023) et photographie du DriX, drone maritime autonome de surface, lors de la campagne de mesure sur l'archipel de Saint-Pierre-et-Miquelon en juillet 2022 (à droite ; © Romain Barbot)

Pour les faibles profondeurs d'eau (entre 0 et -7 m), une seconde méthode a été utilisée pour obtenir la bathymétrie reposant sur un traitement d'images satellites (SDB ; *Satellite-derived bathymetry*). La méthode SDB consiste à utiliser des capteurs optiques embarqués sur des satellites pour cartographier les zones situées sous le niveau de l'eau. Cette technique utilise une compilation d'images de données satellitaires acquises grâce à des missions européennes telles que "Sentinel 2" ou "Pléiades". La mesure de la profondeur de l'eau repose sur un traitement des images satellites et se base sur la réflectance.

¹FOF, sondeurs multifaisceaux pour les fonds marins : <https://www.flotteoceanographique.fr/Nos-moyens/Outils-des-navires/Equipements-des-navires/Equipements-acoustiques/Sondeurs-multifaisceaux-pour-les-fonds-marins>

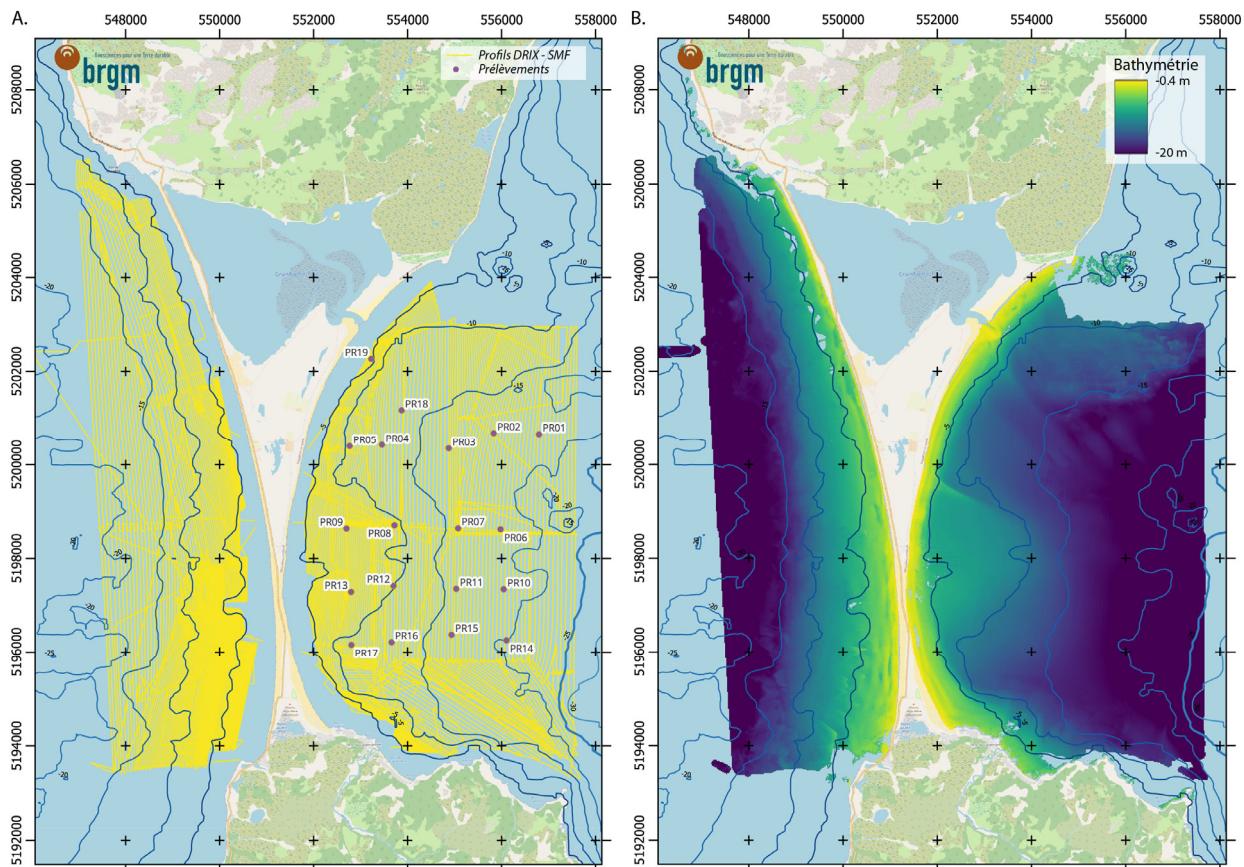
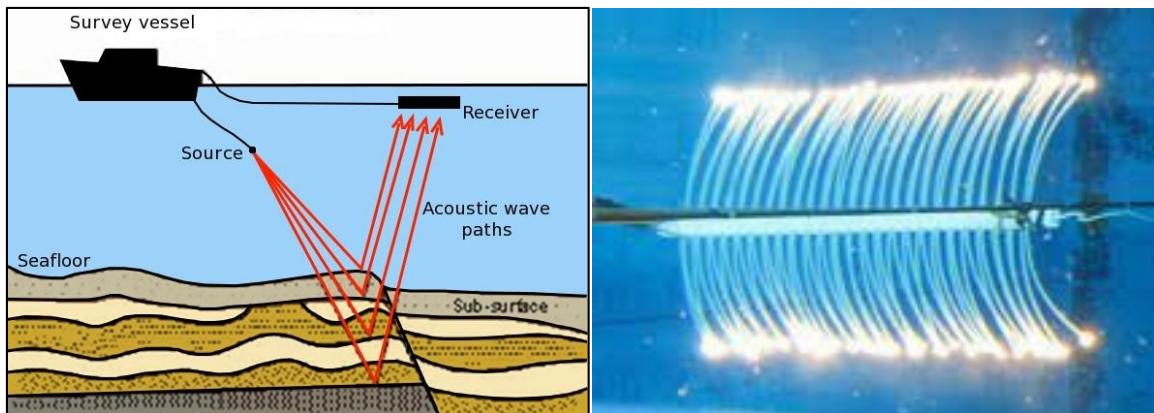


Illustration 7 : A) Localisation des lignes DRIX ; B) Bathymétrie des façades est et ouest de l'isthme (SMF et inversion bathymétrique par imagerie satellitaire, maille 5 m).

Toutefois, la qualité des images satellites varie, et la mesure de la profondeur d'eau peut être affectée par la présence de nuages ou de sédiments dans la colonne d'eau. Cela peut expliquer pourquoi les données SBD ont été filtrées à certains endroits et retirées de l'ensemble des données. Un patch a également été appliqué sur les haut fonds rocheux au nord de la façade est, qui n'ont pas pu être caractérisés par la méthode SBD. Les données SBD ont été vérifiées par rapport aux données bathymétriques MBES - Drix. Le niveau de SBD a été ajusté pour correspondre au niveau de bathymétrie (pour plus de détails se référer au rapport de mission iXblue, 2023).

2.2.2. Sismique marine

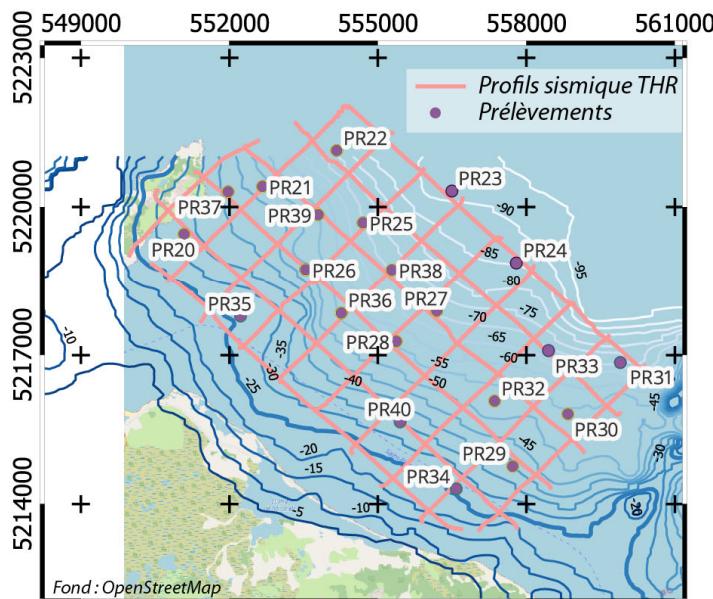
Afin de caractériser l'avant-côte au large de Miquelon, il a été choisi de réaliser une acquisition de sismique réflexion très haute résolution (THR). Le système utilisé se compose d'une source de type Sparker qui émet un courant (étincelles créées par un courant à haute tension), et d'une flûte sismique réceptrice monotrace (Illustration 8). La source sparker et la partie active de la flûte sont tractées et situées à l'arrière du bateau (vitesse 5 nœuds en moyenne). La puissance délivrée au cours de l'acquisition était de 100J, la cadence de tir de 400 ms et la fenêtre d'enregistrement de 250 ms.



Afin de fournir une vision d'ensemble de la zone étudiée (Illustration 9, zone de 50 km²), un carroyage régulier a été préalablement défini, avec un intervalle de 1 km entre chaque profil sismique. Ainsi 6 profils longitudinaux (d'environ 10 km de long chacun) et 10 profils transversaux (d'environ 5 km de long chacun) ont été enregistrés. Une attention particulière a été faite pendant la campagne d'acquisition afin que les croisements entre les profils soient bien perpendiculaires.

L'ensemble des profils sismique a été livré en version brute et corrigée de la marée et de la houle par IXblue. Afin d'améliorer l'interprétation, des filtres, un atténuateur de multiple du fond de la mer et des correcteurs de gain ont été appliqués (Illustration 10). Ces traitements complémentaires et l'interprétation des profils sismiques ont été réalisés par le BRGM, grâce au logiciel DELPH Seismic Interpretation et visualisés spatialement (3D) sous DELPH Road Map (v5.0).

A. Zone au large de Miquelon



B. Zone à l'est de l'isthme

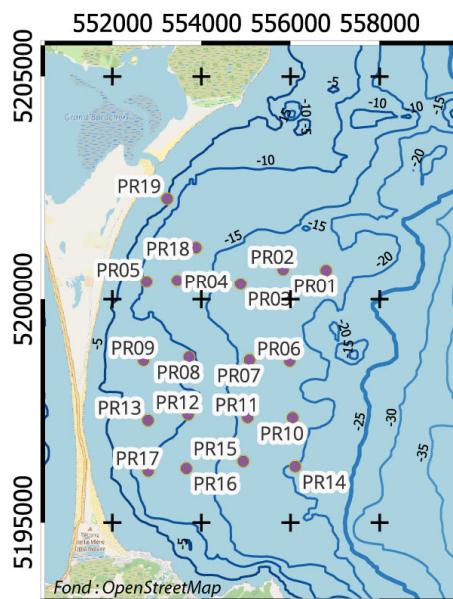


Illustration 9 : Plan de position des profils sismique THR et des points des 40 points de prélèvements.

L'échelle verticale des profils sismiques est en seconde temps double (mstd), c'est-à-dire le temps de parcours de l'onde acoustique réfléchie sur une interface (ex : fond marin) entre

l'émission (source Sparker) et la réception par les hydrophones (flûte sismique). La vitesse de propagation des ondes acoustiques dans l'eau de mer est en moyenne de 1500 m/s, ce qui permet de faire une conversion des temps double en profondeur (m) (Illustration 10).

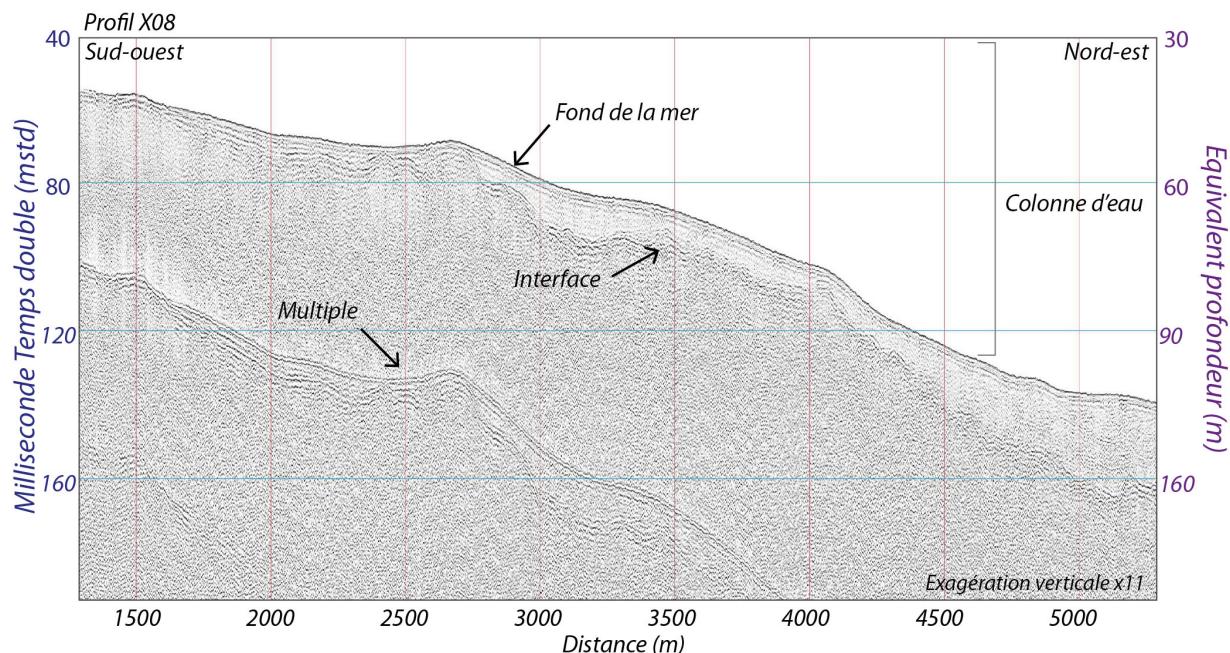


Illustration 10 : Exemple d'un profil sismique transversal (X08), exagération verticale x 11.

La campagne ISTHMIQ22 a été sauvegardée dans la base de données SISMER de l'IFREMER, qui répertorie les campagnes en mer et un DOI lui a été attribué (<http://dx.doi.org/10.17600/18003506>). Les métadonnées de la campagne, mises en forme selon les standards européens et du BRGM, et les données sismiques sont également bancarisées dans la Base de données géophysiques du BRGM. Ces métadonnées pourront être ainsi dans un proche futur consultable sur le portail européen SeaDataNet (<http://www.seadatanet.org/>).

2.2.3. Echantillons sédimentaires

Quarante points de prélèvement ont été pré-identifiés (Illustration 9) sur deux zones (c.f. rapport de mission (iXblue, 2023)) : (1) à l'est de l'isthme (PR01-PR19), afin de compléter le jeu de données existant, (2) au large de Miquelon (PR20-PR40). Les échantillons ont été prélevés à l'aide d'une benne (Illustration 11A).

- A l'est de l'isthme, sur les 19 points de prélèvement pré-identifiés, 17 ont permis la collecte de sédiment et 2 ont été infructueux (PR16 et PR17, probablement liés à des difficultés d'utilisation du système).
- Au large de Miquelon, sur 21 points de prélèvement pré-identifiés, 14 ont permis la collecte de sédiment et 7 n'ont pas permis la collecte de sédiments, notamment en raison de la présence possible d'un fond dur (PR34, PR35, PR40) et de la présence à certains endroits d'un fort courant et d'une profondeur atteignant 100 m (PR23, PR24, PR31, PR33) rendant le système de grappin difficile à opérer (toucher et traîner sur le fond).

Les échantillons ont été analysés par un système de granulomètre laser à pas variable (entre 0.010 et 250 µm) par la société Eurofins.

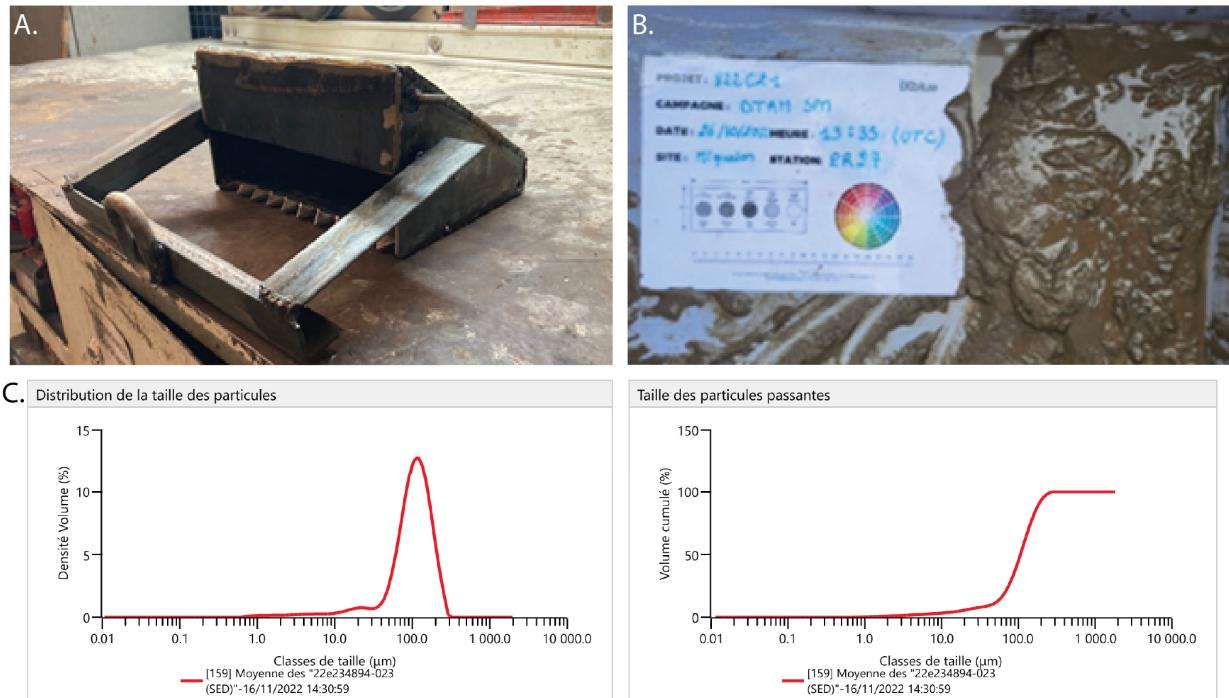


Illustration 11 : Photographies A) du système utilisé pour l'acquisition des prélèvements sédimentaires, et B) d'un exemple de prélèvement sédimentaire sur la zone au large de Miquelon (PR27) (extrait du rapport de mission iXblue, 2023)

2.2.4. Livraison des données

Cette phase du projet a suscité de nombreux échanges et une collaboration étroite entre :

- la DTAM et le BRGM sur la phase d'accompagnement pour la réalisation de la partie technique pour l'appel d'offre (*fin 2021 – jan. 2022*) et la consultation des réponses à l'appel d'offre (*mars 2022*);
- entre la DTAM, iXblue et le BRGM sur la phase de préparation de la mission, lors de la réalisation de la campagne, à l'issue des traitements et pour la livraison des données (*mai 2022 à février 2023*).

L'ensemble des données a été livré au BRGM au format numérique, ainsi qu'une sauvegarde sur disque dur. Les données seront remises en main propre par le BRGM à la DTAM pour archivage en local des données et métadonnées (*prévu au printemps 2024*). Le rapport synthétisant l'opération d'acquisition de données de iXblue, a été remis à la DTAM au 1^{er} trimestre 2023.

3. Avant-côte et stocks sédimentaires en mer

Dans l'optique de caractériser l'avant-côte et les stocks sédimentaires en mer, pour des besoins en sable en vue d'un rechargeement, trois zones seront étudiées : (i) la zone au large à l'est de Miquelon et (ii) la façade est de l'isthme, qui correspondent à des zones potentielles de stocks sédimentaires ; et (iii) la façade ouest de l'isthme, qui serait la zone cible pour les dépôts de sédiments.

On distinguera dans un premier temps la caractérisation des sédiments de surface des trois zones, puis l'analyse de la géologie de l'avant-côte (unités sismiques, géométries, zones d'accumulation sédimentaires, épaisseurs estimées, etc.)

3.1. CARACTERISATION SEDIMENTAIRE DES SEDIMENTS DE SURFACE

L'ensemble des données de caractérisation des prélèvements sédimentaires de l'avant-côte au haut de plage, ainsi que sur le pourtour de la lagune du Grand Barachois, a été rassemblé dans une base de données unique. Elle regroupe les données (i) des travaux de Robin (2007), c'est-à-dire des prélèvements de 2003 (*récupération d'archives papier*), 2004, 2005 ; (ii) des travaux de Billy (2014) c'est-à-dire des prélèvements de 2011 et 2012 ; (iii) des travaux du BRGM de 2018 et les données nouvellement acquises par iXblue en 2022.

Pour la partie avant côte cela représente 234 points de prélèvements sur l'avant-côte, 22 sur le pourtour du Grand Barachois et 145 sur la partie plage et isthme. Des analyses ont été réalisés sur la totalité des échantillons, soit par granulométrie par tamisage soit par granulométrie laser. Toutefois, le protocole utilisé n'est pas identique et la précision (le nombre de classe granulométrique) diffère en fonction des différentes campagnes. Ainsi afin de rendre les données homogènes et comparables à la lecture des données, une compartimentation des granulométries a été réalisée afin de caractériser les sédiments fins, les différents sables et les sédiments plus grossier, en se basant sur le découpage illustré ci-dessous (Tableau 1)

Tableau 1 : Nomenclature pour la classification granulométrique des échantillons sédimentaires.

Sédiments fins		Sables fins, moyens à grossiers				Sables grossiers à Graviers				Roche
0 – 100 µm		100 - 500 µm				0.5 mm à 10 mm				
63 v	63	100	150 / 160	200	250	500	1000	2000	2000 ^	Benne vide

Les données de chaque échantillon sont représentées sous forme de diagramme en camembert sous SIG (Illustration 12 et Illustration 13). Cette représentation permet de pouvoir identifier rapidement la typologie des sédiments de surfaces des zones d'intérêts. Ainsi on constate que l'avant-côte de la façade ouest de l'isthme est assez homogène et constitué majoritairement de sable compris entre 100 et 160 µm (pic modal à 125 µm). Le long de la façade est, on retrouve une distributions plus hétérogène des sédiments de surface avec des sables moins triés près du rivage, présentant une composition mixte de sable fins, moyen à grossier (pic modal à 160 µm), puis des sables fins, vers le large, avec des granulométries comprises entre 100 et 160 µm (pic modal à 125 µm). Au large de Miquelon, les dépôts sédimentaires en surface sont caractérisés par des sables présentant une composition mixte de sable fins, moyen à grossier. Plus la profondeur augmente et plus les sables très fins sont présents (63 µm ou inférieur à 63 µm).

Identification de stocks sédimentaires en mer et modélisation hydro-sédimentaire le long de la façade ouest de l'isthme de Miquelon-Langlade

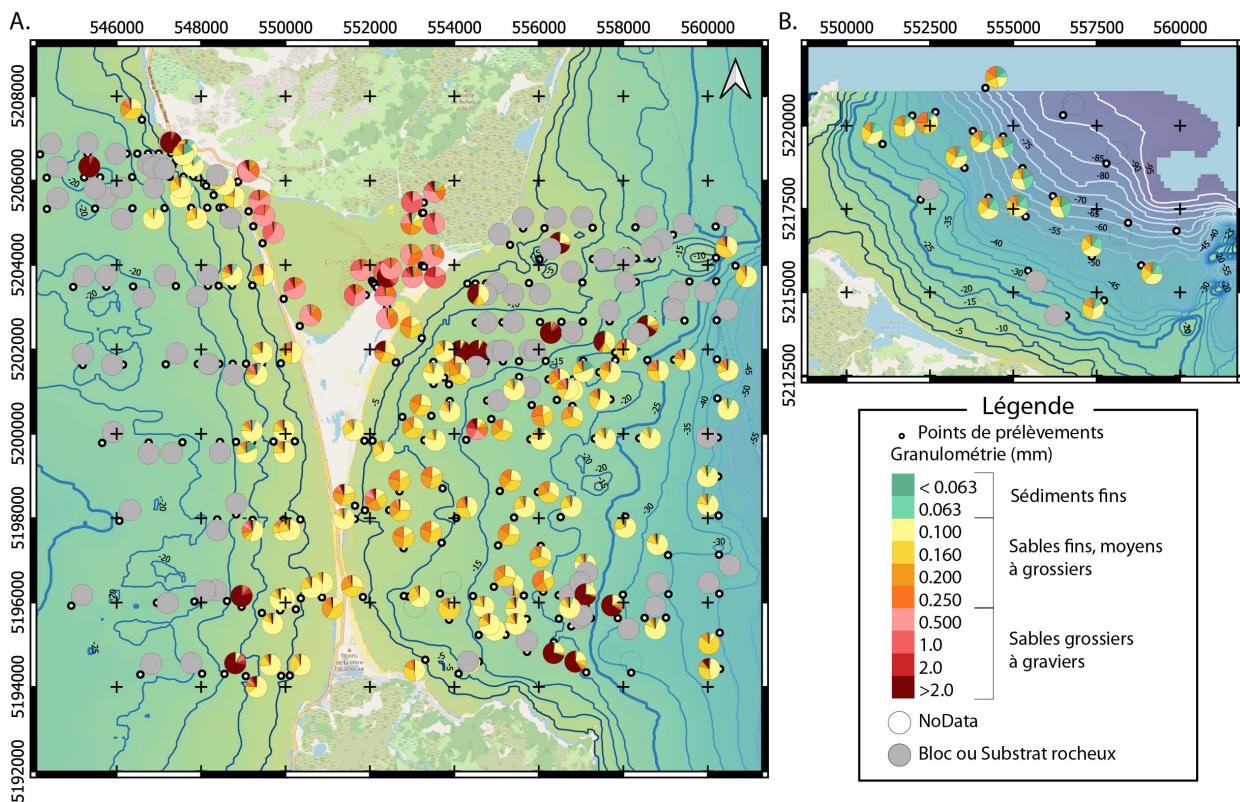


Illustration 12 : Points de prélèvements et répartition des classes granulométriques pour les échantillons en mer et sur le pourtour de la lagune (représentation des pourcentages de chaque gamme granulométrique).

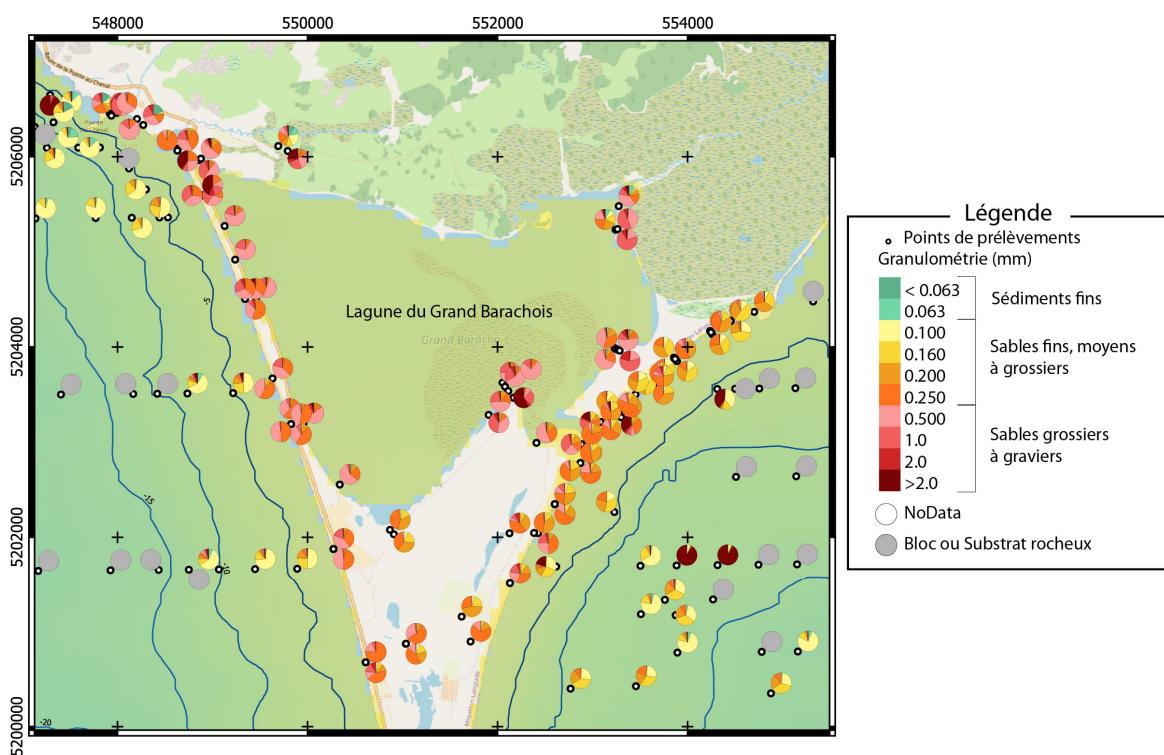


Illustration 13 : Répartition des classes granulométriques (représentation des pourcentages de chaque gamme granulométrique) sur le domaine de la plage et sur le pourtour de la lagune du Grand Barachois.

Sur le pourtour de la lagune du Grand Barachois, les sédiments analysés ont une signature bien distincte de celle de l'avant-côte et sont caractérisés par des sables plus grossiers (pic modal à 500 µm). En ce qui concerne la caractéristique des sédiments de plage, les analyses indiquent des granulométries correspondant à des sables moyens à grossiers. Les sédiments de plage sont d'ailleurs plus grossiers au droit de la zone des Buttereaux (au nord-ouest) que sur les plages proches de l'embouchure du goulet et de la flèche des cacaouis (nord-est).

3.2. ZONE AU LARGE DE MIQUELON

Au large de Miquelon, l'interprétation des données de sismique marine (*sous DELPH seismic Interpretation et visualisées sous DELPH Road Map*) permet de distinguer avec confiance trois réflecteurs. En partant du plus profond on distingue:

- (i) le réflecteur R1, interface entre 2 faciès sismiques distincts, l'un réfléctif et l'autre dit « transparent » ;
- (ii) le réflecteur R2, interface entre 2 faciès sismiques dits « transparents » ;
- (iii) le fond de la mer.

Deux profils types sont représentés en exemple ci-dessous, le profil transversal X06 et le profil longitudinal L03 respectivement sur les Illustration 14 et Illustration 15.

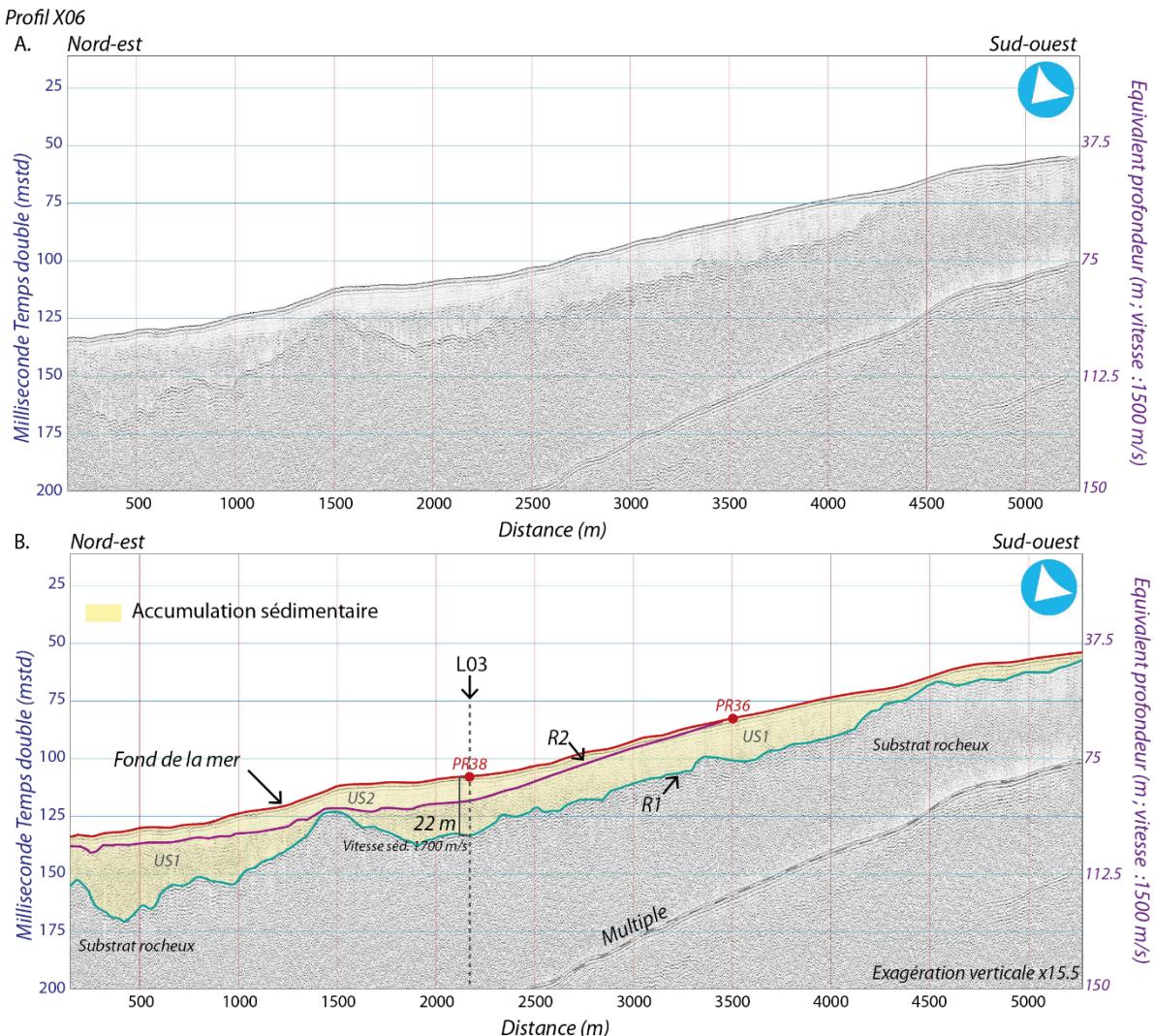


Illustration 14 : Profils sismique transversal X06 A. Traité et B. interprété (R1 en vert, R2 en violet, accumulation sédimentaire en jaune et localisation des prélèvements sédimentaires ; Illustration 12).

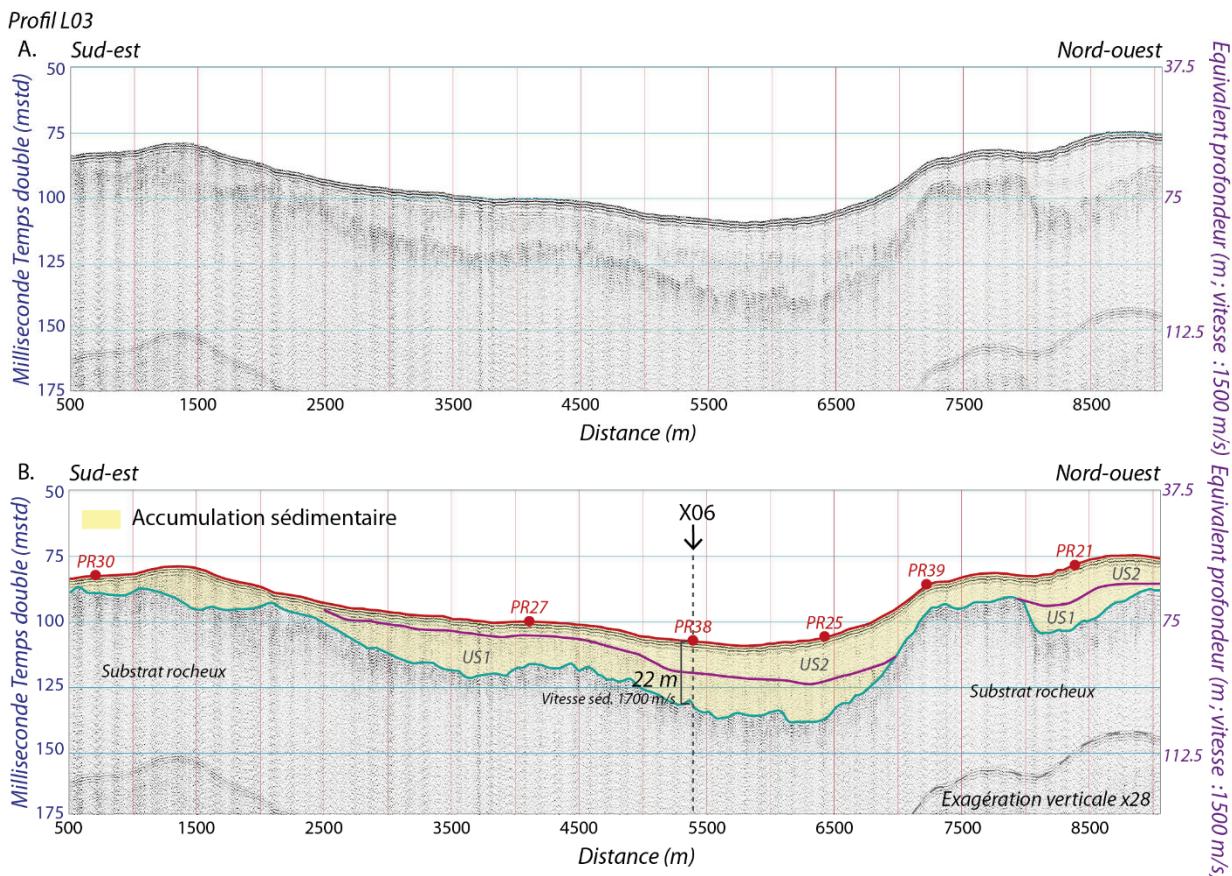


Illustration 15 : Profils sismique longitudinal L03 A. Traité et B. interprété (R1 en vert, R2 en violet, accumulation sédimentaire en jaune et localisation des prélèvements sédimentaires ; Illustration 12).

Le réflecteur R1 (en vert) est identifiable sur l'ensemble du jeu de données. R1 est continu et délimite un faciès sismique réfléctif (socle acoustique) et un faciès sismique qui peut être caractérisé comme « transparent ». Le socle acoustique, est ici interprété comme zones rocheuses en accord avec l'absence de prélèvements de sédiments par bennes lorsqu'il affleure (PR34, PR35 et PR40 ; Illustration 12). Au-dessus, le faciès dit « transparent » est une unité sismique peu réfléctrice caractérisée par l'absence de réflecteurs bien individualisés, ou par des réflecteurs de très faibles amplitudes. Ce faciès est souvent le marqueur de formations homogènes, interprété ici comme sédiments meubles sableux (Illustration 14 et Illustration 15). L'unité sismique au-dessus de ce réflecteur R1 est ici considérée comme des dépôts sédimentaires (en jaune, sur les Illustration 14B et Illustration 15B).

Ce réflecteur R1 est pointé sur l'ensemble des profils (vue 3D sur l'Illustration 16A) et un modèle numérique de terrain peut être généré de ces pointés (en mstd ; Illustration 16B). Ces pointés et le MNT associé (en mstd, généré sous DELPH Road Map) permettent de visualiser la variabilité morphologique du toit du substrat sur l'ensemble des 50 km² de zone étudiée.

Au sein des dépôts sédimentaires on peut distinguer une 2nd réflecteur R2. Le réflecteur R2 (en violet) n'est pas identifiable sur l'ensemble de la zone d'étude, notamment sur la partie sud et à l'ouest (vue 3D sur l'Illustration 16A). Sur les profils où il est visible, il est caractérisé par un réflecteur continu qui symbolise la limite entre deux faciès dits « transparents ». Cela veut donc dire que les dépôts sédimentaires présents au large de Miquelon peuvent être discréétisés en deux unités sédimentaires distinctes. L'unité sédimentaire US1, entre le réflecteur R1 et R2, s'est déposé en premier puis l'unité sédimentaire US2, au-dessus du réflecteur R2, est venue draper les dépôts plus anciens.

Identification de stocks sédimentaires en mer et modélisation hydro-sédimentaire le long de la façade ouest de l'isthme de Miquelon-Langlade

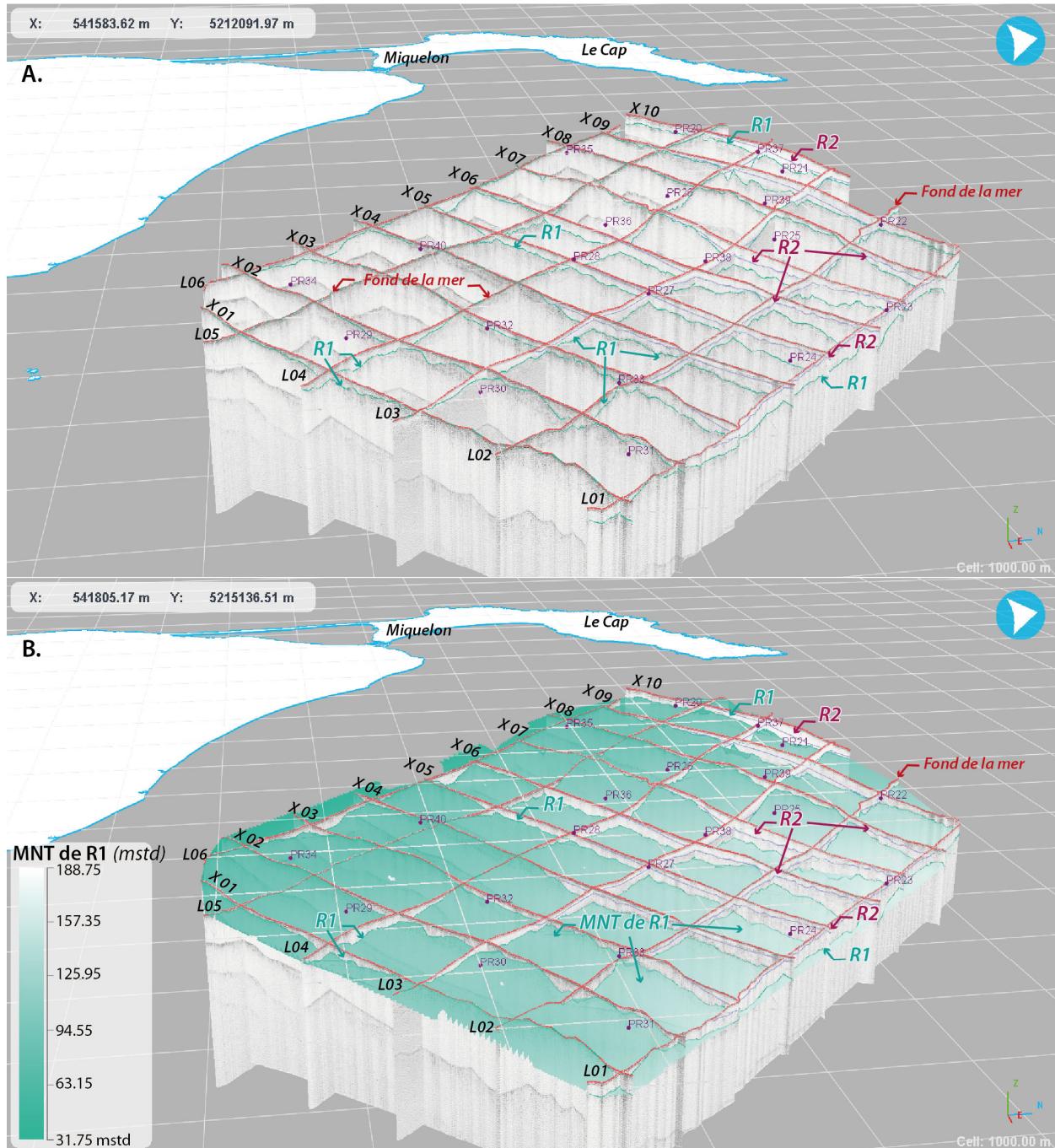


Illustration 16 : Vue 3D des profils sismiques A) Interprétation des profils en distinguant (i) le fond de la mer (en rouge), (ii) le réflecteur R1 (en vert) qui représente la limite entre le substrat rocheux et les dépôts sédimentaires, et (iii) le réflecteur R2 (violet), limite entre deux unités sédimentaires. B) MNT du réflecteur R1 (en milliseconde temps double) ; (exagération verticale x5, cellule 1 km ; réalisée sous DELPH RoadMap).

L'objectif de notre étude n'est pas de reconstituer la mise en place ces unités sédimentaires ni de définir leur contexte de dépôt (ceci serait à réaliser lors de travaux complémentaires), ainsi pour ce travail sur l'étude des stocks sédimentaires au large de Miquelon, nous considérerons ici les dépôts sédimentaires US1 et US2 comme un seul ensemble.

Le pointé du fond de la mer sur l'ensemble des profils (en rouge ; sur l'Illustration 16A) permet de générer un modèle numérique de terrain (MNT, en mstd, Illustration 16B) de l'ensemble de la zone étudiée. En considérant la vitesse de propagation des ondes acoustiques dans l'eau de mer de 1500 m/s, il est ainsi possible de convertir les données en profondeur. Ce traitement fournit ainsi des données basse résolution (un profil tous les 1km) mais précieuses sur la bathymétrie et permet de préciser les variations morphologiques du fond de la mer de la zone (Illustration 17). On constate notamment que la bathymétrie s'approfondie vers le large et vers le nord avec des variations enregistrées entre -25 et -100 m.

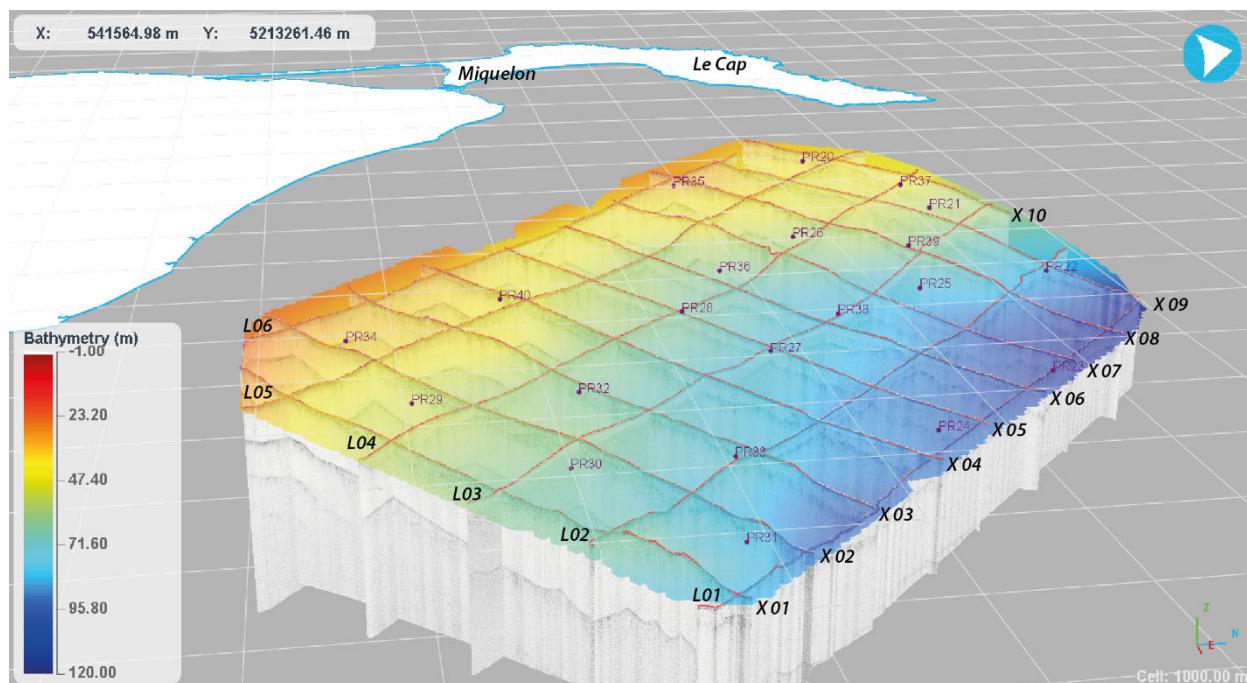


Illustration 17 : Visualisation 3D des profils sismiques longitudinaux (L01-L06) et transversaux (X01-X10) ainsi que les points de prélèvements sédimentaires. La bathymétrie de la zone est générée grâce à l'interprétation des profils sismiques (exagération verticale x5, cellule 1 km ; réalisée sous DELPH RoadMap).

Un différentiel entre la base de l'unité sableuse (R1, en mstd) et son toit (i.e. fond de la mer, en mstd) permet d'obtenir l'épaisseur de sable (en mstd) pour chaque profil. Les épaisseurs en mètre sont ensuite calculées en se basant sur une vitesse de propagation des ondes acoustiques dans le sédiment de 1700 m/s (vitesse arbitraire qui correspond à la vitesse communément utilisée pour le sable fin). Les épaisseurs sédimentaires sont estimées pour chaque profil et représentées spatialement sur l'Illustration 18.

En considérant à la fois les profondeurs du fond de la mer (vitesse de propagation des ondes acoustiques dans l'eau de mer de 1500 m/s) et les épaisseurs de sédiment (une vitesse de propagation des ondes acoustiques dans le sédiment de 1700 m/s), il est possible de déterminer la profondeur en mètre du toit du substrat (Illustration 19). Ainsi, le substrat rocheux est estimé à des profondeur entre -30 et -120 m et qu'il s'approfondi en allant vers le large.

Avertissements :

L'estimation des épaisseurs de sédiments meubles doit être pris avec précaution, car elles sont déterminées par un transformation du temps par une vitesse de propagation unique (Epaisseur (m)= [mstd/2000] * vitesse de propagation en m/s). Une valeur de vitesse moyenne unique ne prend pas en compte l'hétérogénéité sédimentaire dans la zone d'accumulation.

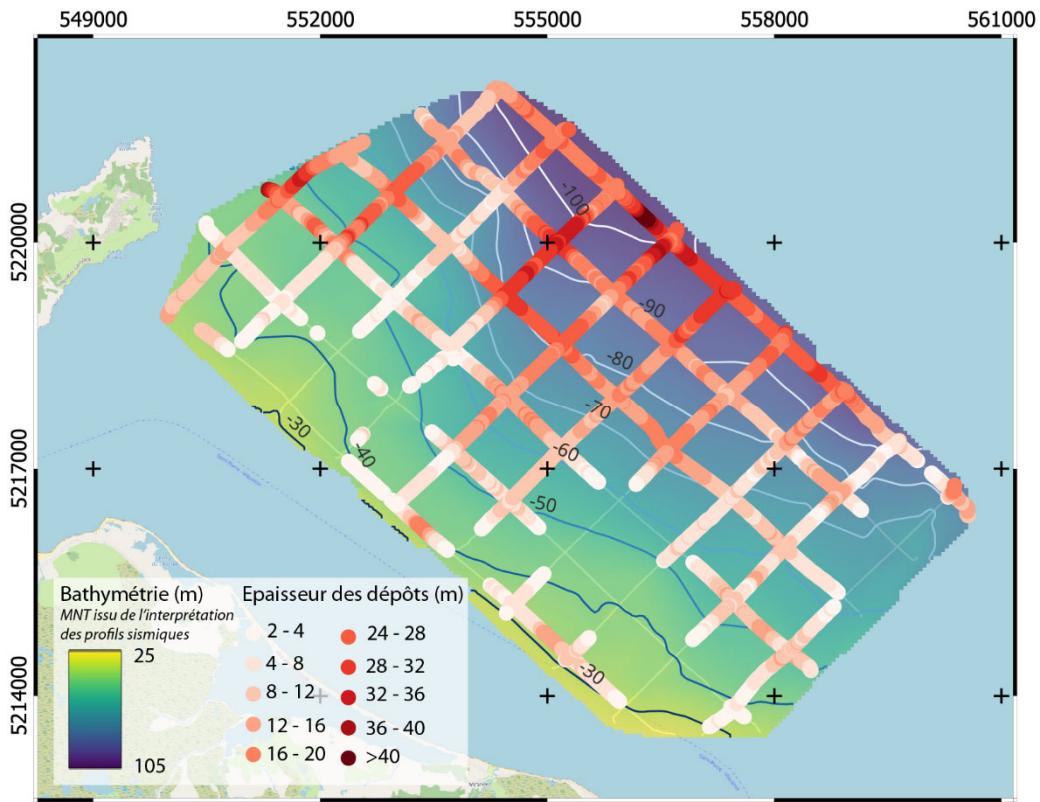


Illustration 18 : Epaisseurs sédimentaires le long de chaque profil de sismique réflexion au large de Miquelon (vitesse des ondes dans les sédiments de 1700 m/s).

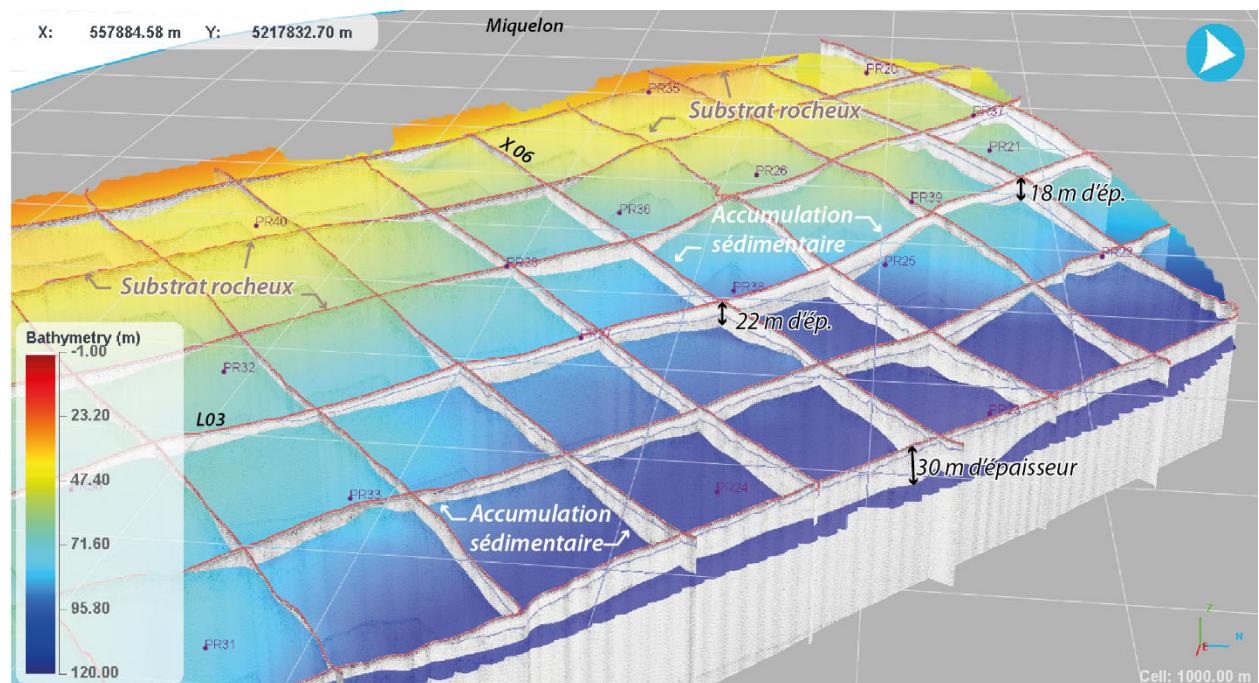


Illustration 19 : MNT de la morphologie et topographie (m) du toit du substrat généré grâce à l'interprétation des profils sismiques (Illustration 16), et mise en évidence des zones d'accumulation sédimentaire (vitesse dans le sédiment : 1700 m/s) et d'affleurement du substrat rocheux (exagération verticale x5, cellule 1 km ; réalisée sous DELPH RoadMap).

L'ensemble de ces traitements permet d'obtenir une carte de l'épaisseur sédimentaire, interpolée, sur de la zone étudiée au large de Miquelon (Illustration 20). Ces analyses montrent qu'il y a des dépôts importants de sédiments au nord, au centre et vers le large de la zone étudiée. On estime qu'il y a entre 5 et 25 m d'épaisseur de dépôts sédimentaire répartis entre -40 et -80 m de profondeur (Illustration 20). Les dépôts sédimentaires peuvent atteindre 30 m d'épaisseur (voir plus ponctuellement) sur la partie la plus distale, c'est-à-dire pour des profondeurs approchant ou dépassant -90 m (Illustration 19). En se basant sur cette analyse (*i.e.* : vitesse des ondes dans le sédiment de 1700 m/s) le volume de sédiment présent sur cette zone peut être estimé. Le calcul a été réalisé à titre indicatif sur deux zones : la zone A, qui comprend l'ensemble des dépôts à partir de 2 m d'épaisseur, et la zone B, qui est considérée comme une zone de stock importante (Tableau 2)

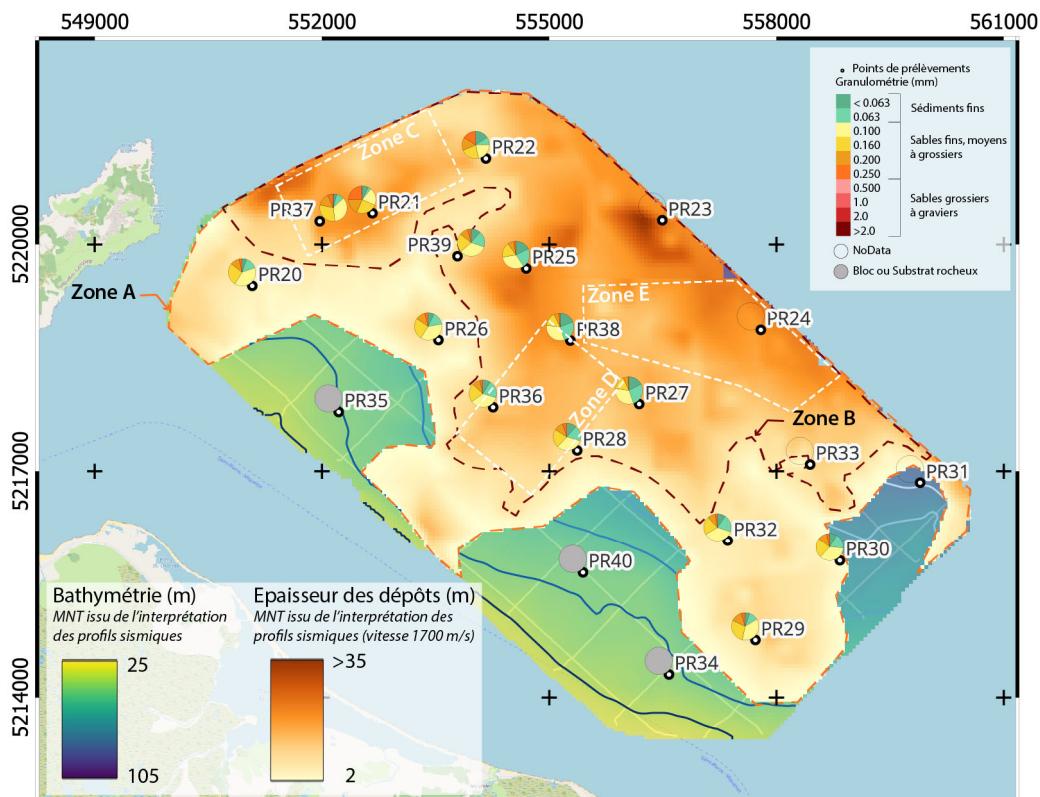


Illustration 20 : MNT de l'épaisseurs des accumulations sédimentaires au large de Miquelon (vitesse des ondes dans les sédiments de 1700 m/s) et superposition des résultats granulométriques des prélèvements sédimentaires (Illustration 12). En pointillés les zones A à E pour le calcul des volumes des sédiments (estimation).

Tableau 2 : Estimation des volumes des dépôts sédimentaires (indicatif)

Secteur	Zone	Surface (km ²)	Volume des dépôts sédimentaires (m ³) - estimation -
Est Miquelon	Zone A	37.6 km ²	408 600 x 10 ³ m ³
	Zone B	22.6 km ²	325 600 x 10 ³ m ³
	Zone C	2.4 km ²	35 400 x 10 ³ m ³
	Zone D	2.5 km ²	32 500 x 10 ³ m ³
	Zone E	3.4 km ²	56 300 x 10 ³ m ³
Est Isthme	Zone F	24.5 km ²	82 700 x 10 ³ m ³
	Zone G	3.0 km ²	14 500 x 10 ³ m ³

3.3. FAÇADE OUEST DE L'ISTHME

L'avant-côte le long de la façade ouest de l'isthme de Miquelon-Langlade, présente des pentes comprises entre 0.6 et 1 % (plus pentu vers le nord ; Illustration 21). Il est caractérisé par la présence de dépôts sédimentaires de faible épaisseur (1 m en moyenne, mais peut atteindre jusqu'à 3 m localement à proximité du rivage). Le substratum rocheux affleure régulièrement, notamment au nord-ouest et au sud-ouest, où des structures de 2-2.5 m d'amplitude peuvent être identifiées (Illustration 22 et Illustration 23). Vers le large, les dépôts de sables s'étendent rarement au-delà de 15 m de profondeur (Illustration 23). Sur la base de ces données de sismique marine, le volume de sédiment présent sur l'avant côte, en 2011, a été estimé à $15\,000 \times 10^3 \text{ m}^3$.

Remarque : Ce descriptif est un résumé des travaux de Billy et al., 2013 et Billy, 2014. Pour plus de détail se référer à ces documents

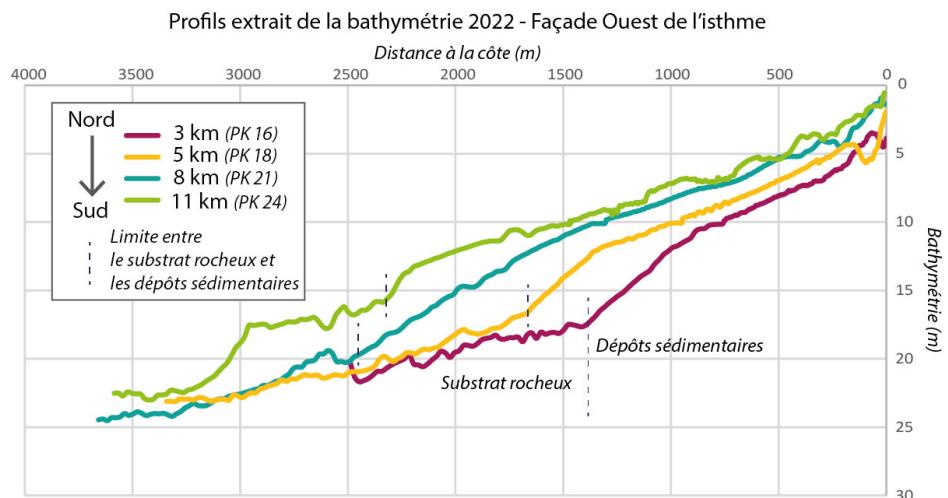


Illustration 21 : Exemple de quatre profils de l'avant-côte (répartis tous les 3 km) extraits de la bathymétrie de 2022 (Illustration 7) illustrant les variations morphologiques de la façade Ouest de l'Isthme.

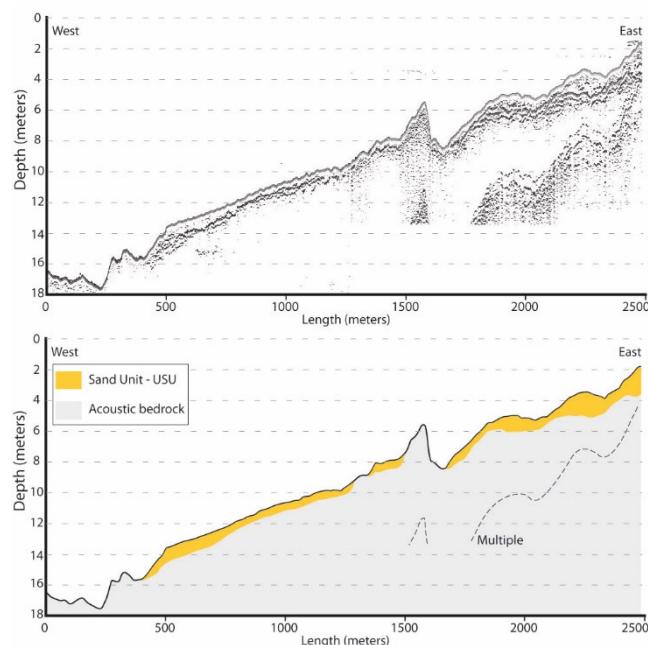


Illustration 22 : Exemple d'un profil sismique type le long de la façade Ouest de l'isthme, illustrant la morphologie du substrat rocheux et la fine couche de dépôt sédimentaire le drapant (Billy et al., 2013).

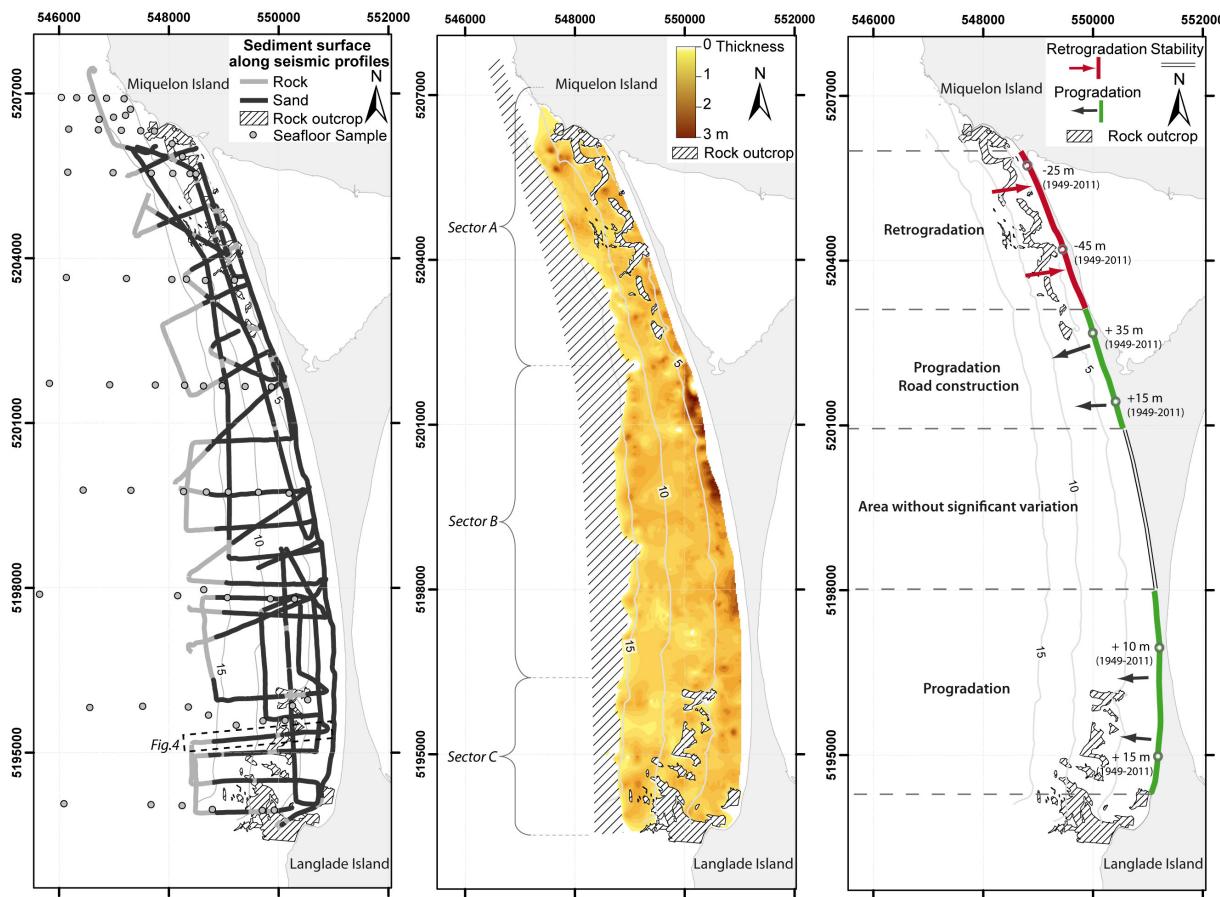


Illustration 23: Synthèse de l'investigation de l'avant-côte le long de la façade Ouest de l'isthme : localisation des données, cartographie de l'épaisseur sédimentaire et du substrat rocheux affleurant le long de l'avant côte, et dynamique du trait de côte entre 1949-2011 (Billy et al., 2013).

Sur la période historique (1949-2011/12), l'évolution résiduelle du trait de côte permet de mettre en évidence quatre secteurs. Au Nord, dans le secteur des Buttereaux (sur une distance de 3 km), on distingue une zone en érosion significative qui présente un recul net de l'ordre de 25-30 m, pouvant atteindre au maximum 45 m voire 60/65 m localement (Illustration 24 ; Illustration 25). L'érosion n'est pas homogène dans le temps, et les principaux reculs ont été identifiés au cours des périodes 1985-1990 et 2005-2011 (Illustration 24 ; Robin et al., 2013). Le reste de la façade occidentale présente une tendance générale à l'avancée du trait de côte ou une situation d'équilibre (Illustration 23, Illustration 24, Illustration 25). L'avancé du trait de côte visible en suivant, entre le 3.2 et 5.5 km, est à imputer à des actions anthropiques et à l'implantation de la route. En effet, la route a été construite au-devant du trait de côte (de la ligne de végétation) de 1949 (Illustration 24 ; Robin et al., 2013).

Entre les kilomètres 5.5 et 8.2, le trait de côte apparaît comme stable sur la période historique. Néanmoins cette apparente stabilité est en partie due à des premières fixations du trait de côte par des enrochements au nord de cette zone. Robin et al. (2013), souligne également qu'il y a une incertitude assez forte sur ces données à cause de difficultés pour visualiser correctement la limite de végétation. Toutefois ce secteur semble relativement stable (Illustration 24, Illustration 25) et est confirmé par les travaux de Moisan et Laigre (2019).

La section sud, jusqu'à 12 km, ne présente pas d'artificialisation du rivage et peut donc être considéré comme ayant subi une évolution « naturelle ». Les valeurs les plus importantes en termes d'avancée se situent au niveau de la partie la plus étroite de l'isthme. En effet, une avancée significative du trait de côte est identifiée dans ce secteur, pouvant dépasser 20 m sur la période 1949-2011/12 (Illustration 24, Illustration 25).

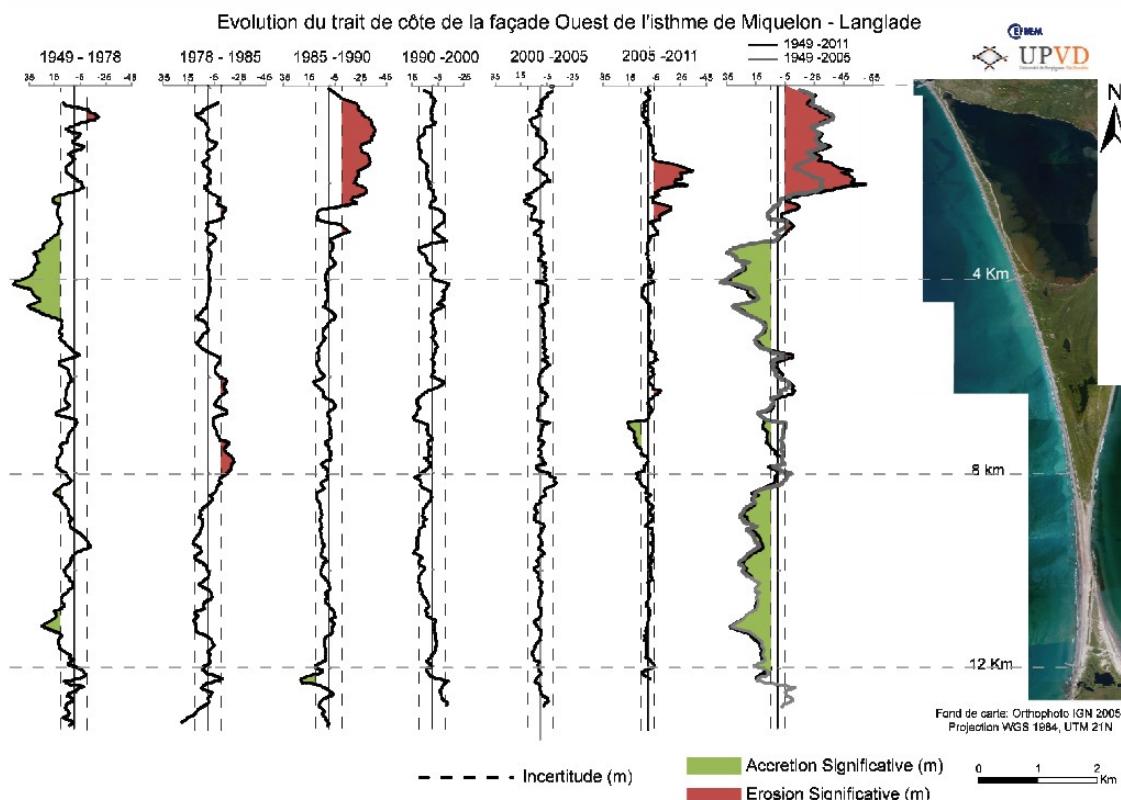


Illustration 24 : Evolution du trait de côte le long de la façade Ouest de l'isthme sur la période historique entre chaque cliché disponible (1949, 1978, 1985, 1990, 2000, 2005 et le données GPS de 2011 ; (Robin et al., 2013)).

L'évolution du trait de côte sur la période récente est plus homogène et tend vers le recul des deux façades. Le taux d'évolution moyen entre 2012-2017 sur l'ensemble du site est de -1.1 m/an. Sur la période d'observation Moisan et Laigre (2019) constatent également une avancée du trait de côte au nord-ouest, dans le secteur des Butteraux, ainsi qu'entre les PK 19-20, respectivement de l'ordre de +3 m et +6 m. L'analyse des évolutions entre 2018 et 2023 n'a pour l'instant pas été publiée.

Identification de stocks sédimentaires en mer et modélisation hydro-sédimentaire le long de la façade ouest de l'isthme de Miquelon-Langlade

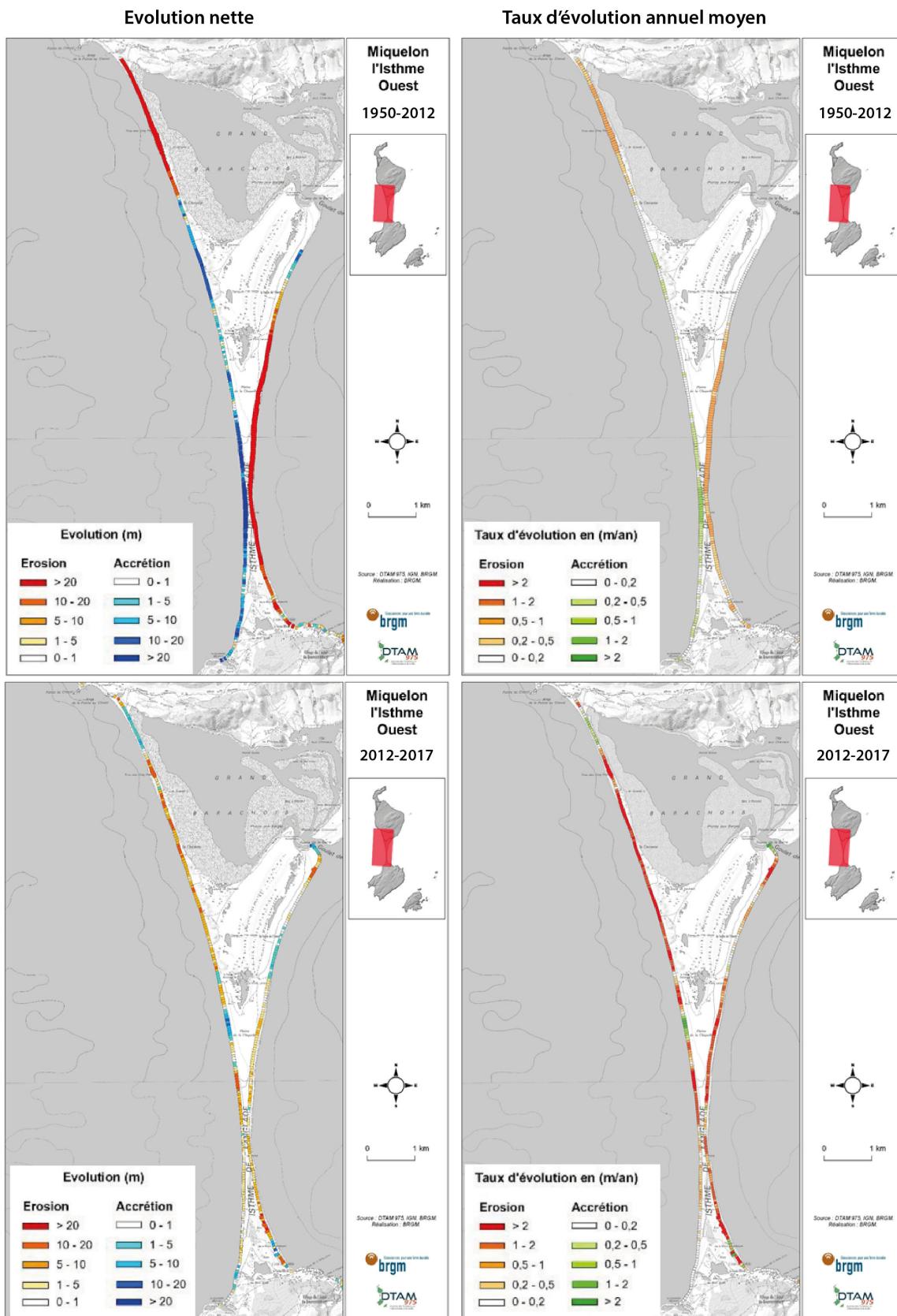


Illustration 25 : Evolution du trait de côte le long de l'Isthme de Miquelon-Langlade, évolution nette (à gauche) et taux d'évolution annuel moyen (à droite) sur la période historique (1949-2012, en haut) et récente (2012-2017, en bas ; Moisan and Laigne, 2019).

Une première approximation de la dynamique de transports sédimentaires a été proposée par Billy et al., 2013, se basant sur les connaissances sur l'édification de l'isthme (sens principaux des dépôts des structures sédimentaires depuis 5 000 ans), de données d'observations et de simulations préliminaire de transport sédimentaires le long de la façade Ouest (Robin, 2007). Ces transports sont théoriques et fluctuent en fonction des formules prises en compte. De plus, il faut considérer qu'actuellement l'apport de sédiments sur le secteur est réduit (*i.e.* pas d'apports des rivières, apport dû au démantèlement des moraines réduit).

Le transport longshore semble être dominant, avec une convergence des directions vers la partie la plus étroite de l'isthme. Les échanges cross-shore sont peu connus, et sans doute limités ou perturbés au droit des pointements rocheux au nord-ouest et au sud-ouest. Ce schéma sera confronté avec les résultats issus des modèles numériques (section 4, ci-dessous), qui permettront de fournir une vision actualisée, modélisée et à plus haute résolution.

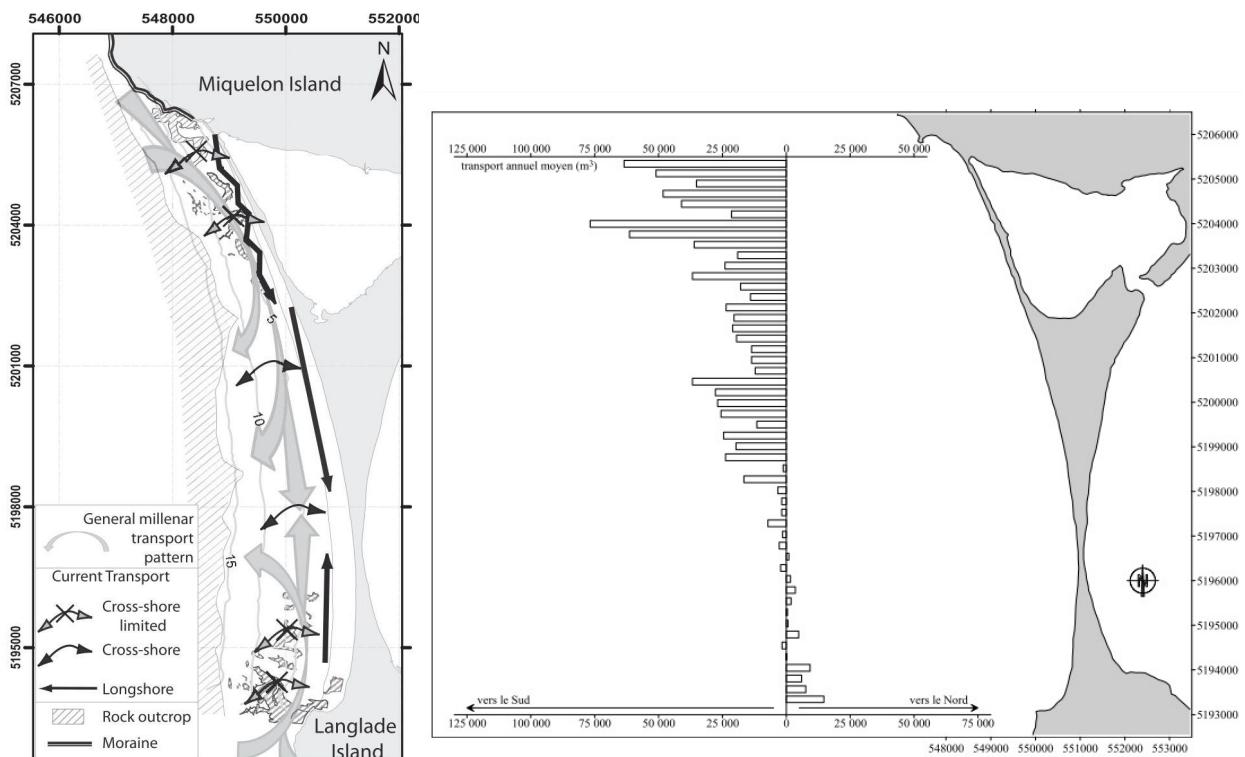


Illustration 26 : Schéma préliminaire de fonctionnement de la dynamique sédimentaire (à gauche) proposé dans l'étude de Billy et al., 2013 ; et estimation du transport sédimentaire annuel moyen (m^3 , formule de Van Rijn, 1993 ; à droite ; réalisée par Robin, 2007) .

3.4. ZONE A L'EST DE L'ISTHME

Une très forte disparité est à noter entre les deux façades de l'isthme (Illustration 27), que ce soit sur la morphologie ou la profondeur du substrat rocheux, ou sur les dépôts sédimentaires.

En effet, le long de la façade Est le toit du substrat n'est pas visible partout notamment dû au manque de pénétration des ondes acoustiques au travers des couches sédimentaires plus épaisses (Billy, 2014). Toutefois, il est parfaitement identifiable lorsque les dépôts le recouvrant sont de plus faible épaisseur (à partir de -15 – -20 m de profondeur) et sur les bordures Nord et Sud de l'isthme. Ainsi, contrairement à la façade Ouest, sa répartition Nord-Sud est hétérogène et montre une remontée brutale aux extrémités (-10 – -15 m de profondeur ; Illustration 28) induisant une forme générale en 'cuvette' de la plateforme interne. Vers le large une rupture de

la pente du substrat est visible entre 5 et 8 km de la côte (Illustration 27) marquant la limite Est du banc de Miquelon. Au-delà, la topographie chute rapidement à -140 m pour former le chenal des Îles Vertes qui sépare l'Archipel de Terre-Neuve.

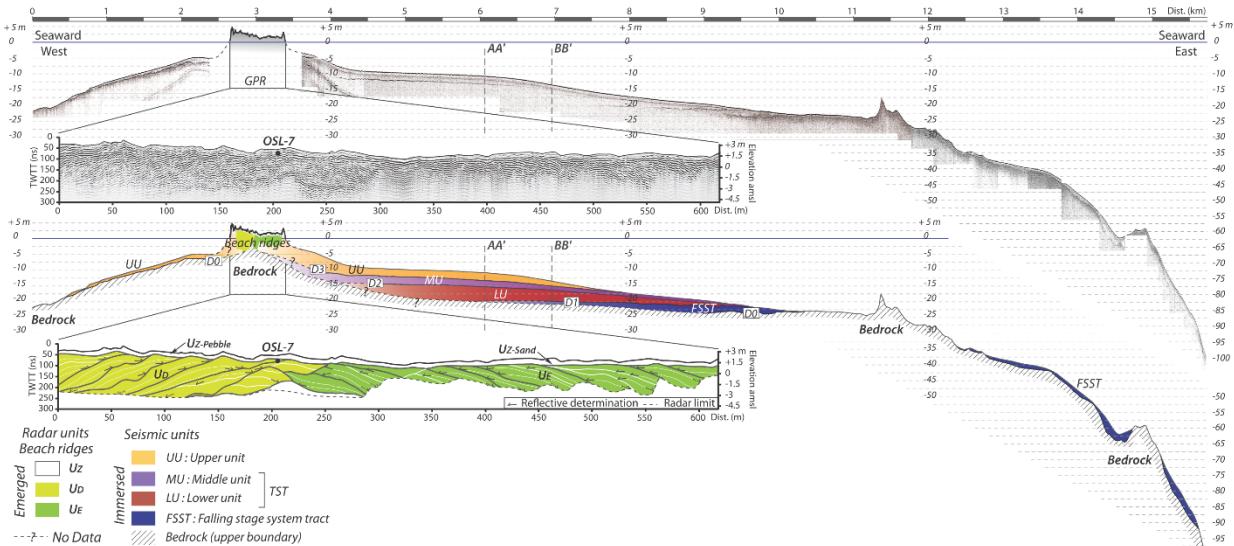


Illustration 27 : Coupe Mer-Terre-Mer au centre de l'isthme de Miquelon-Langlade. Les profils bruts (en haut ; géoradar et sismique marine) et interprétés (en bas), représentent une vision Ouest-Est des dépôts émergés et immersés (unités UU, MU, LU et FSST) sur une substratum rocheux (bedrock) ; (issu des travaux de Billy, 2014).

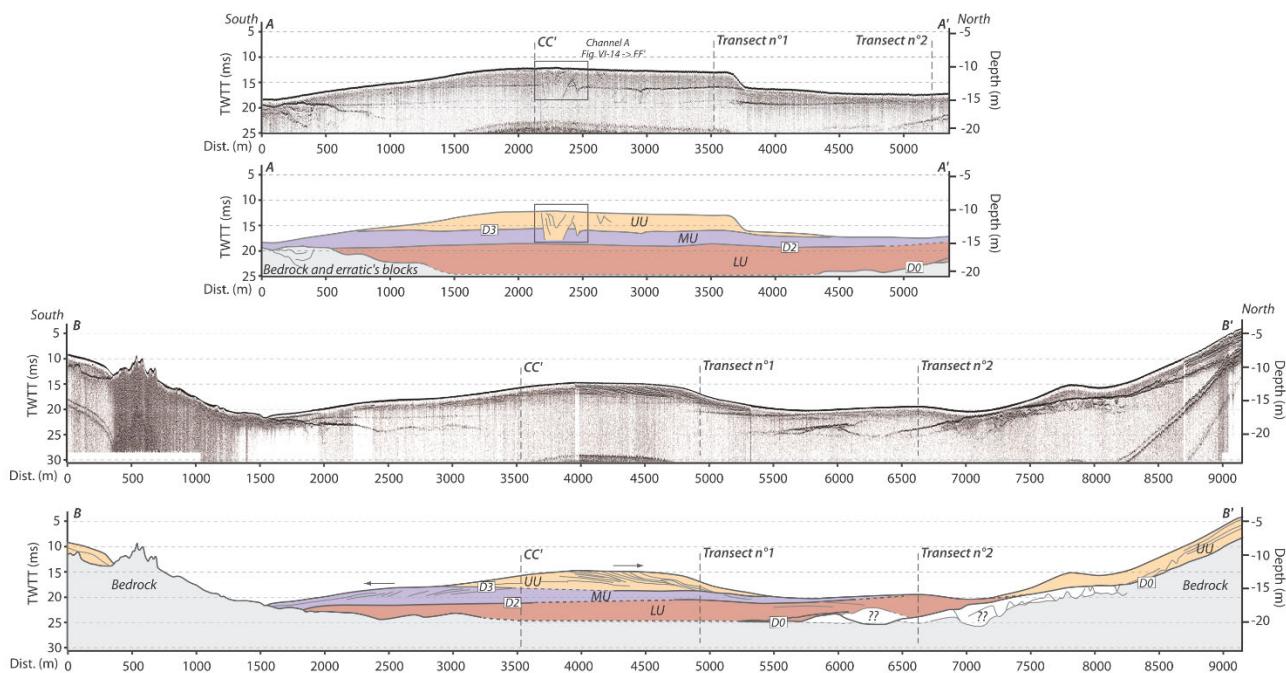


Illustration 28: Profils sismiques bruts (en haut) et interprétés (en bas) enregistrés le long de deux sections Sud-Nord (longitudinales ; AA' et BB') à l'Est de la barrière. Trois unités sismiques recouvrent le substrat rocheux et représentent les dépôts induits par la transgression marine: LU ('lower unit' en rouge), MU ('middle unit' en violet) et UU ('upper unit' en jaune), qui correspondent respectivement à l'unité la plus profonde, intermédiaire et supérieure du cortège.

Quatre unités sédimentaires se superposent et leur histoire de dépôt est à corréler avec les variations du niveau marin depuis 10 000 ans et les phases de développement de l'isthme (Billy et al., 2018). L'épaisseur de chacune des différentes unités sédimentaires est pluri-métrique (Illustration 29, Illustration 28). Un MNT de l'épaisseur des dépôts sur la façade Est n'est pas réalisable avec les données à disposition, car l'interface entre le substratum et les dépôts n'est pas visible sur l'ensemble de la zone. On peut néanmoins aisément supposer qu'au centre de la zone de dépôt, l'épaisseur sédimentaire doit à minima avoisiner les 9 m.

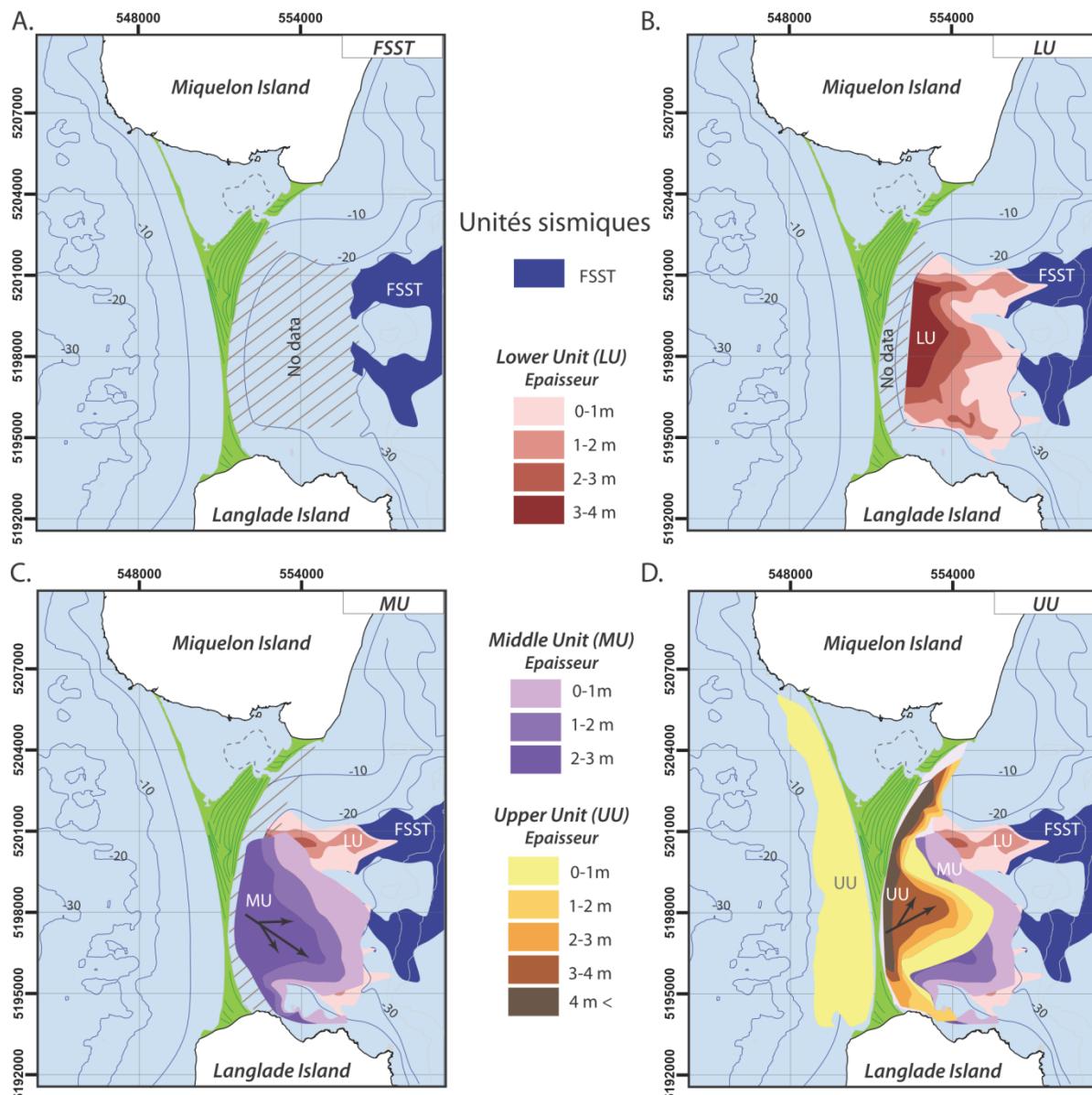


Illustration 29: Répartition spatiale des unités sismiques FSST (en bleu), LU (en rouge), MU (en violet) et UU (en jaune) et l'épaisseur des unités LU, MU et UU.

Une estimation de l'épaisseur sédimentaire est proposée ci-après (Illustration 30) en soustrayant les données de profondeur du substratum connu (Billy, 2014) et celle de la nouvelle bathymétrie (Illustration 7). Le substratum n'étant pas cartographié à proximité du rivage, il n'a donc pas été calculé d'épaisseur de sédiment sur cette zone. Malgré des épaisseurs qui peuvent avoisiner 10 m de dépôts sédimentaires, on constate qu'au regard des stock sédimentaires présents au large de Miquelon (Illustration 20, Tableau 2), ceux-ci sont nettement inférieur (Illustration 30A).

Dans un optique de cibler des zones de gisements potentiels pour l'extraction de granulat, il ne faut pas que la zone soit trop proche du littoral (au-delà de la zone de fermeture morphodynamique) et qu'il y ait un stock sédimentaire suffisant. En respectant ces deux conditions, seule la zone G (Illustration 30B) correspond aux critères (Tableau 2).

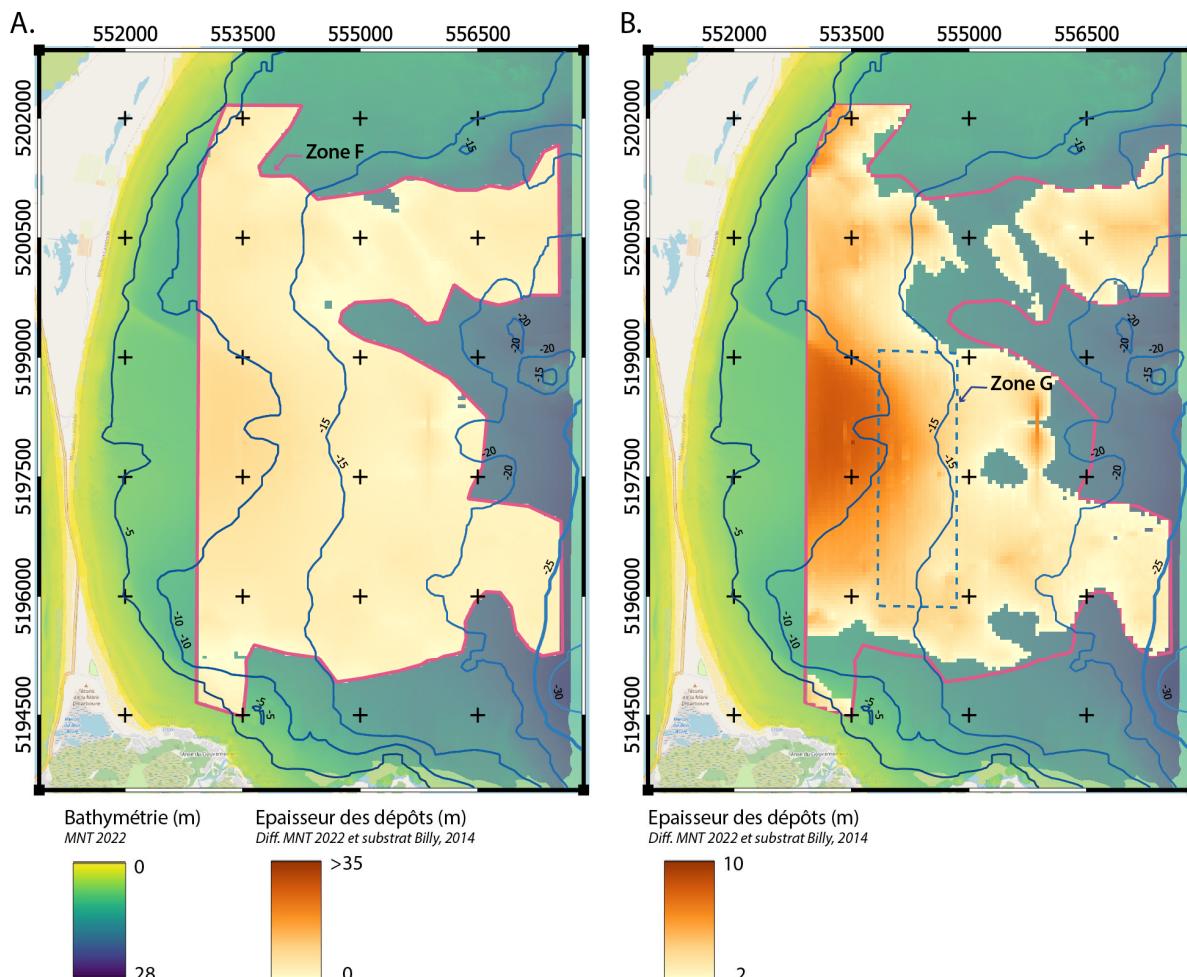


Illustration 30 : Estimation des épaisseurs sédimentaires le long de la façade Est. A) avec la même échelle des épaisseurs que pour les dépôts au large de Miquelon ; B) avec une échelle de couleur adaptée aux dépôts de la zone. En pointillés les zones F et G pour le calcul des volumes des sédiments (Tableau 2).

3.5. SYNTHESE

Pour évaluer la faisabilité d'un rechargeement, la connaissance sur les dépôts sédimentaires présents sur l'avant-côte est indispensable. De nouvelles acquisitions réalisées en 2022 sont venues compléter la base de données existante, qui était exclusivement localisée de part et d'autre l'isthme (Billy, 2014; Billy et al., 2018, 2013; Robin et al., 2013). L'ensemble des données ainsi disponibles permettent de caractériser plusieurs secteurs potentiellement intéressants d'un point de vue volume et caractéristiques des sédiments. On notera ainsi la présence des dépôts sédimentaires d'épaisseur faible à modérée (pluri-métriques) jusqu'à ~15 m de profondeur le long de la façade est de l'isthme (Illustration 30), qui deviennent faible sur la partie la plus distale. On notera surtout la présence des dépôts de sédiments importants au large de Miquelon. Cette présente étude a permis d'estimer qu'il y a entre 5 et 25 m d'épaisseur de dépôts sédimentaire répartis entre 40 et 80 m de profondeur (Illustration 20). Cette zone présente donc un fort intérêt pour être un potentiel secteur de gisements pour de l'extraction de granulats.

4. Contraintes réglementaires et techniques dans les zones sources potentielles

4.1. CADRE ET PRECONISATION

Document stratégique de bassin maritime (DSBM)

Les paragraphes ci-dessous sont extraits du document stratégique de bassin maritime (DSBM) de Saint-Pierre-et-Miquelon et du rapport CEREMA-DTAM sur la situation de l'existant réalisée préalablement pour le DSBM. Les éléments cités ne correspondent pas à une liste exhaustive de la règlementation mais permettent de contextualiser la demande.

« A Saint-Pierre et Miquelon, le décret n°2006-798 du 6 juillet 2006 fixant les règles relatives aux activités de prospection, de recherche et d’exploitation de substances minérales ou fossiles contenues dans les fonds marins du domaine public et du plateau continental ne s’applique pas. Par conséquent, les extractions de granulats marins ne sont pas soumises à l’obtention d’un permis exclusif de recherche, d’un droit exclusif d’exploiter le gisement et d’une autorisation d’ouverture de travaux miniers. Les seules autorisations nécessaires sont un arrêté préfectoral autorisant les extractions de granulats marins et une autorisation d’occupation temporaire du domaine public maritime.

L’État, par le biais du Ministère chargé de l’Énergie, du Développement durable et de l’Énergie, a initié en 2011 une stratégie nationale pour la gestion durable des granulats terrestres et marins et des matériaux et substances de carrières. Cette stratégie a pour ambition de fournir un cadre permettant la sécurité d’approvisionnement et l’accès aux gisements tout en répondant à l’ensemble des enjeux d’aménagement du territoire, dans une logique de développement durable, de gestion économe d’une ressource non renouvelable, et de prise en compte permanente des politiques publiques environnementales, économiques et sociales. » extrait du rapport sur la situation de l’existant (CEREMA - DTAM, 2018)

« Au même titre que les autres outre-mer, le bassin maritime de Saint-Pierre & Miquelon s’inscrit pleinement dans la stratégie nationale pour la mer et le littoral (SNML). Au travers son document stratégique de bassin maritime (DSBM²) l’archipel s’engage dans une démarche de planification dans le but favoriser et sécuriser le développement durable des activités et la coexistence des usages maritimes. » (DSBM SPM 2018)

Au sein de l’axe 1 : *Développement durable de l’économie et des activités du bassin maritime*, différentes zones de pêche au saumon et de concessions aquacoles (AOT ; Illustration 31) sont localisées dans la rade de Miquelon. Il est rappelé dans ce document que « **le dragage et le chalutage sont interdits dans la zone des 3 milles et sur les portions du câble numérique** » (Illustration 31B). Il est également inscrit que « **la gestion raisonnée de l’exploitation de granulat marin** » est un enjeu identifié et qu’il faut « **anticiper les interactions avec les autres activités** » (Illustration 32). Ainsi toute opération devra respecter les contraintes locales, sociétales, environnementales et législatives.

² <https://www.saint-pierre-et-miquelon.developpement-durable.gouv.fr/le-document-strategique-de-bassin-maritime-dsbm-a825.html>

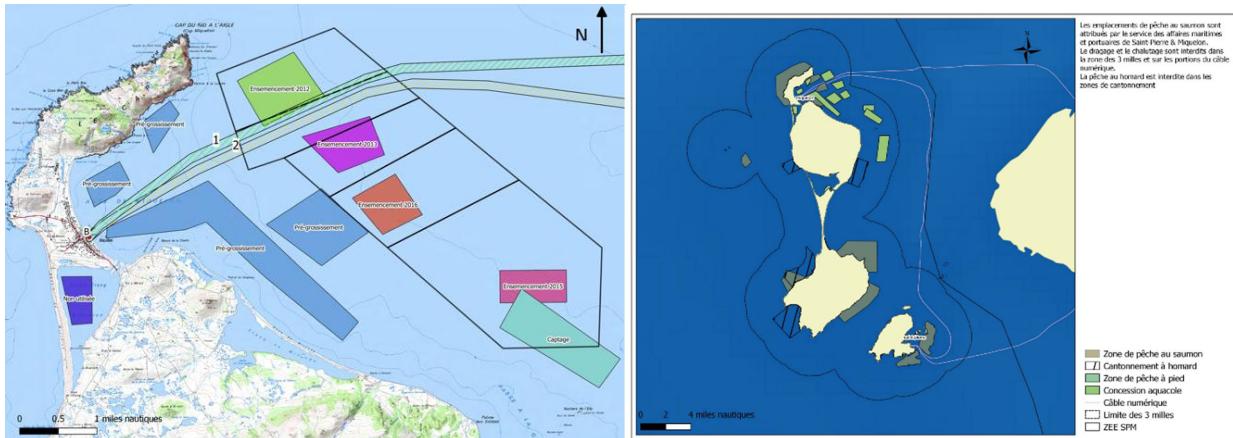


Illustration 31 : Extrait du DSBM de Saint Pierre-et-Miquelon, représentant les zones de concessions aquacoles en rade de Miquelon (à gauche), zone de pêche de saumon et câble numérique (à droite).

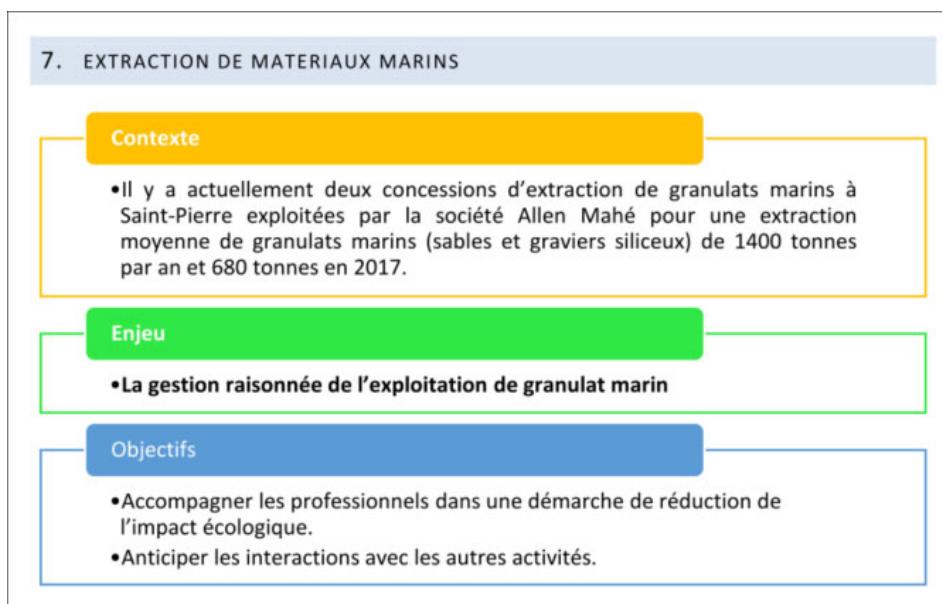


Illustration 32 : Extrait du DSBM de l'Archipel sur l'extraction de matériaux marins.

Extraction des granulats

Le paragraphe ci-dessous est extrait du rapport 2022 sur l'économie bleue en France

« L'extraction des granulats marins est réalisée par des navires extracteurs de type dragues aspiratrices en marche (DAM ; Illustration 33), c'est-à-dire à élinde traînante. La méthode d'extraction consiste prélever le gisement [...] grâce aux passages successifs du navire sur le site d'extraction à vitesse réduite (environ 2 nœuds)³. La France suit les préconisations du Conseil International pour l'Exploration de la Mer (CIEM) et n'autorise pas le criblage des granulats sur le navire en vue de leur classement granulométrique afin d'éviter d'augmenter la turbidité autour du navire. »

La souille correspond au creusement d'un fond initialement plat ou de l'arasement d'un banc de sable.

³ [Les principes d'exploitation - Sables et graviers en mer](#)

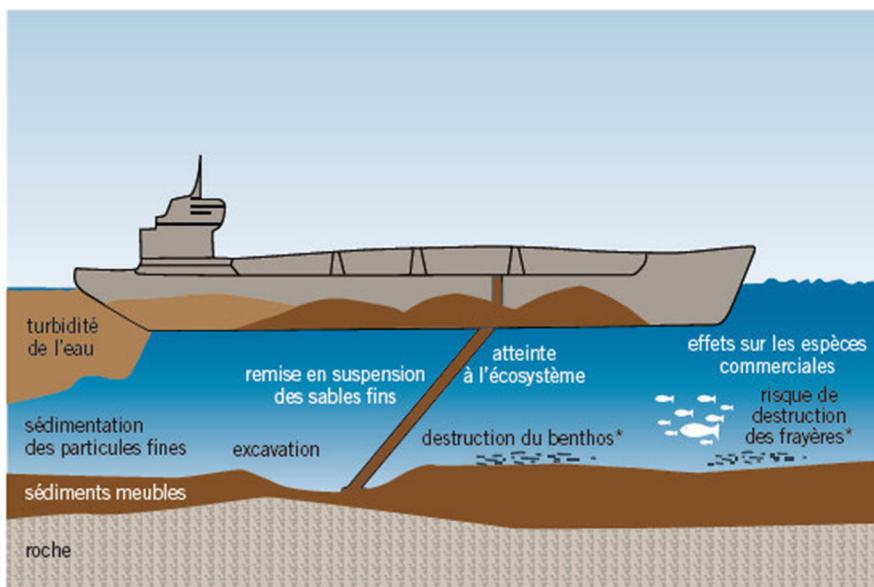


Illustration 33 : Synthèse des impacts directs de l'extraction de granulat marin (source IFREMER⁴).

Les conséquences environnementales et les mesures pour éviter les effets sur le trait de côte

Les études de l'Ifremer⁵, la synthèse de Latteux (2008) et le rapport Artelia-CEREMA-UNPG (2021)⁶, cité dans le rapport sur l'économie bleue en France (2022)⁷ dont un extrait est présent ci-dessous, font notamment références à des mesures pour éviter/limiter les effets sur le trait de côte.

« L'érosion côtière est un phénomène naturel qui peut être exacerbé par les activités anthropiques limitant les échanges sédimentaires voire réduisant les apports à la côte. Dans ce cadre, il est à noter que les extractions de granulats marins sont des actions perturbatrices du milieu marin au même titre que d'autres activités ou que la construction d'ouvrages côtiers ou de barrages fluviaux. Des études effectuées en France et au Royaume-Uni, dans les années 1970/80 sur les différents processus hydro-sédimentaires en jeu dans l'évolution du trait de côte ont permis de définir des critères simples à mettre en place lors de l'activité d'extraction de granulats marins afin d'éviter d'éventuels impacts :

- Positionner à bonne distance : placer la souille d'extraction au large de la zone de déferlement, au-delà de la profondeur de fermeture morphodynamique ;
- Adapter la géométrie de la souille : éviter de creuser les souilles perpendiculairement au littoral ;
- Encadrer la profondeur : il s'agit de limiter la profondeur de la souille pour que l'écart de célérité des vagues entre fonds naturels et fond de la souille reste acceptable.
- Localiser la souille en dehors de la zone active de transport afin d'éviter l'interception du transport longitudinal et transversal par la souille. »

⁴ Illustration sur https://csem.morbihan.fr/dossiers/atlas_env/pressions/carrieres_mines.php

⁵ Voir aussi la publication Ifremer – UMR GEO-OCEAN : [Effets sur la stabilité du littoral - Geo-Ocean](#)

⁶ <https://www.unicem.fr/wp-content/uploads/2021/07/trait-de-cote-rapport-etude-unpg-202106.pdf>

⁷ <https://www.gouvernement.fr/sites/default/files/contenu/piece-jointe/2023/04/09-l-economie-bleue-en-france-2022-granulats-marins.pdf>

4.2. IDENTIFICATION DU POTENTIEL DES STOCKS SEDIMENTAIRES EN MER ET REFLEXION SUR LES RESSOURCES EN LOCAL

En prenant en compte les résultats issues des analyses des études précédentes sur la façade Est de l'Isthme (i.e. Billy, 2014; et résumé en dans la section 3.4), et les nouvelles données acquises lors de ce projet au large de Miquelon (section 3.2), des zones de dépôts sédimentaires ont pu être identifiées (Illustration 20 et Illustration 30).

Afin d'identifier les zones qui pourraient être potentiellement des gisements (Illustration 34), nous avons pris en compte plusieurs points importants :

- Que la zone ne soit pas trop proche du littoral pour ne pas impacter la dynamique actuelle ou déséquilibrer le littoral ce qui entraînerait une déstabilisation/recul du trait de la côte ;
- Qu'il y ait une compatibilité de granulométrie entre la zone de prélèvements et la zone de dépôts ;
- Qu'il y ait une épaisseur suffisante de sédiments ;
- Que la zone ciblée n'impacte pas les activités déjà présentes sur l'avant-côte.

Nous avons également pris en compte la distance à la côte ainsi que les profondeurs.

4.2.1. Au large de Miquelon

Au large de Miquelon on constate qu'il y a un potentiel intéressant de stocks sédimentaires, que ce soit en terme d'épaisseur des dépôts, de volumes estimés ou de granulométrie. Un focus a été fait sur 3 zones (Tableau 2):

- La zone C d'une surface de 2.4 km², comprise entre 45 et 85 m de profondeur. Les épaisseurs des dépôts sédimentaires sont estimées entre 10 et 18 m et le volume associé est estimé à $35\ 400 \times 10^3$ m³;
- La zone D d'une surface de 2.5 km², comprise entre 55 et 80 m de profondeur. Les épaisseurs des dépôts sédimentaires sont estimées entre 8 et 15 m et le volume associé est estimé à $32\ 500 \times 10^3$ m³;
- La zone E d'une surface de 3.4 km², comprise entre 80 et 95 m de profondeur. Les épaisseurs des dépôts sédimentaires sont estimées entre 10 et 20 m et le volume associé est estimé à $56\ 300 \times 10^3$ m³.

On constate qu'en terme de granulométrie des dépôts superficiels, la zone C, la plus au nord, est caractérisée par des sables moyens à fins. La zone D, a une signature proche mais comporte une gamme granulométrique plus étendue vers les particules fines (inférieur à 100 µm). Sur la zone E, aucun prélèvement n'a pu être réalisé car la bathymétrie était trop élevée, la caractérisation granulométrique de la couche superficielle de sédiment de la zone n'est donc pas connue avec précision. Les points de prélèvements les plus proches (PR38 et PR27 ; Illustration 20) seront assimilés comme point de références, et indique une signature proche de celle de la zone D avec une proportion de sable fin inférieur à 100 µm présente à 50 %.

Remarque : il est rappelé ici que les valeurs d'épaisseur et d'estimation des volumes sont indicatives et que ces estimations sont réalisées en se basant sur une vitesse moyenne des ondes dans le sédiment de 1700 m/s. De plus, les granulométries réalisées sur les échantillons renseignent sur le type de sédiment sur le fond de la mer, des variations granulométriques peuvent être présentes au sein du dépôt. En l'absence de carottage ceci ne peut être vérifié.

Ce secteur au large de Miquelon est soumis à une activité de pêche au saumon et de culture marine (AOT ; Illustration 31). De plus c'est également une zone où passent deux câbles numériques en connexion avec Terre-Neuve et Saint-Pierre (Illustration 34B).

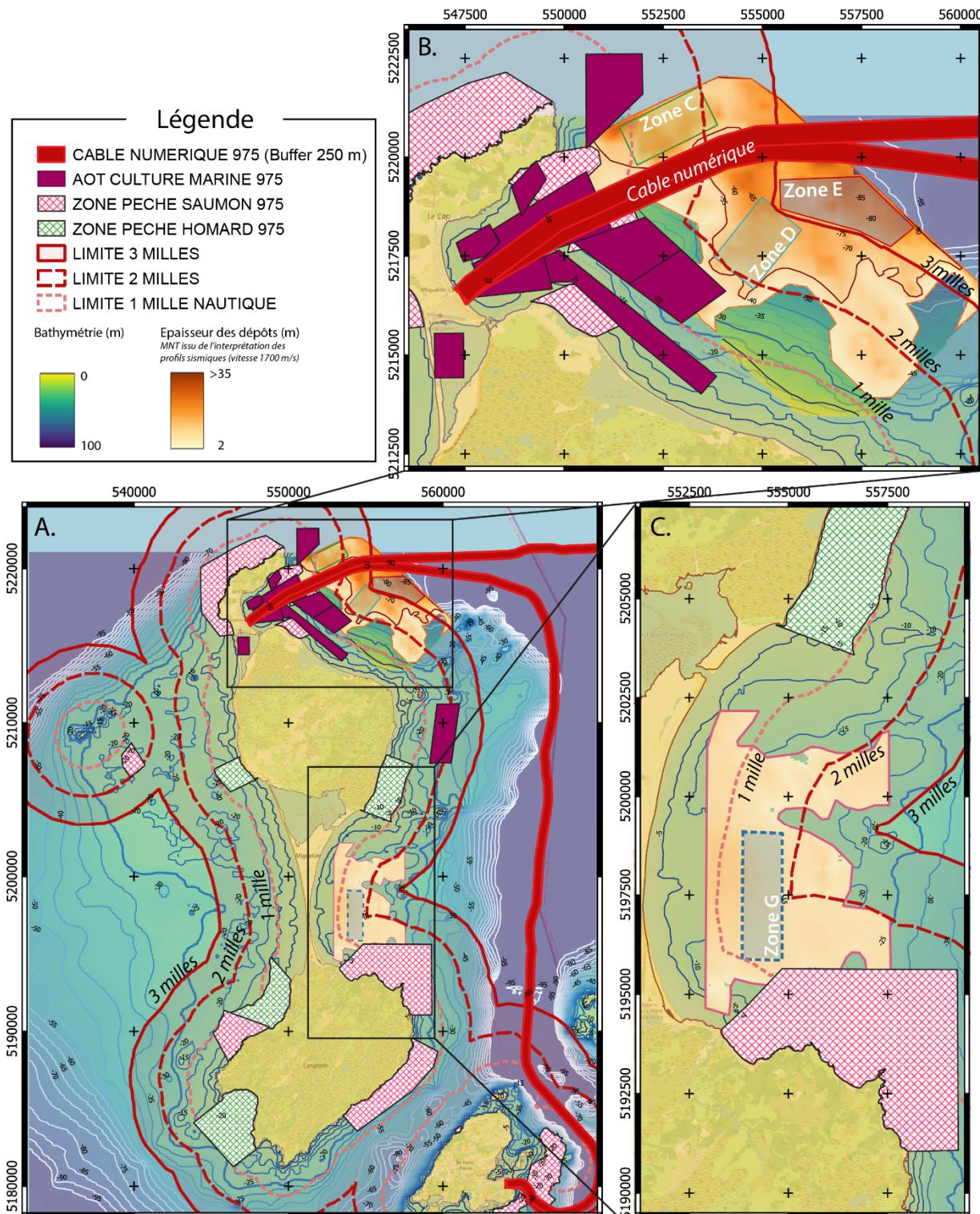


Illustration 34 : Synthèse des zones de stocks potentiels en sédiments au large de Miquelon (zone C, D, E ; Illustration 20) et le long de la façade Est de l'Isthme (zone G ; Illustration 30), avec les activités et contraintes du territoire (identifiées dans le DSBM ; Illustration 31).

Ainsi, on constate que les zones de gisements potentiels, identifiées précédemment, sont proches des activités (pêches, culture marine et câbles). A ceci peut également être ajouté le trafic maritime (ferries, plaisance, porte-conteneur). Sur l'illustration ci-dessus une zone tampon de 250m a été apposé sur le tracé du câble, cette valeur sera à adapter en fonction des distances de sécurités à prendre en compte. Ces éléments devront être pris en considération pour qu'il n'y ait pas de conflits d'usages ou de répercussion environnementales liées à une activités d'extraction (turbidité de l'eau, impact sur le milieu, perturbation des courants, etc).

Les trois zones sont à bonne distance de la côte (supérieur à 45 m de profondeur), et au vu des connaissances sur le secteur, une activité d'extraction ne devrait pas perturber la dynamique littorale sur les petits fonds ou celle du trait de côte à proximité de Miquelon. Toutefois, il est stipulé dans le DSBM que les activités de dragages ne sont pas autorisées à moins de 3 milles nautiques de la côte. La zone C se situe entre 1 et 2 milles nautiques, la zone D entre 2 et 3 milles et la zone E au-delà de 3 milles. Ces éléments seront donc à prendre en compte avec la réglementation en vigueur sur l'Archipel.

Bien que la zone E présente un potentiel stock sédimentaire intéressant, il est important de noter que c'est une zone profonde (entre 80 et 95 m de profondeur) qui entraînerait des difficultés pour la faisabilité de l'extraction de sédiments (difficultés techniques et/ou coûts).

4.2.2. Le long de la façade Est de l'isthme

Le long de la façade Est de l'Isthme, trois unités sédimentaires se superposent et constituent un dépôt en forme de lobe. Malgré la superposition de ces dépôts, l'épaisseur est modérée et surtout mal connue à proximité du littoral. Ces dépôts sédimentaires sont en connexion direct avec l'avant-côte et la dynamique sédimentaire de cette façade. Un focus a été fait sur un secteur (Tableau 2 ; Illustration 30) :

- La zone G d'une surface de 3.0 km², comprise entre 12 et 17 m de profondeur. Les épaisseurs des dépôts sédimentaires sont estimées entre 3 et 7 m et le volume associé est estimé à $14\ 500 \times 10^3$ m³. La gamme granulométrique des sédiments de surface est proche de celle de la façade Ouest avec une proportion plus importante de sable moyen (150 µm ou plus).

Au-delà de 2 milles nautiques, la couverture sédimentaire est restreinte, ou alors il n'y a peu/pas de données disponibles.

Sur le secteur sud-est de la façade Est de l'isthme, la zone est soumise à une activité de pêche au saumon (Illustration 31). Ce secteur de pêche est à proximité directe de la zone G (Illustration 34B). En terme d'activité sur la zone, on peut également ajouter le trafic maritime (navette vers Langlade, plaisance).

4.2.3. Diagnostique préliminaire sur les zones sources potentielles

En se basant sur les éléments de connaissances concernant les stocks sédimentaires, leur localisation ainsi que le DSBM (Tableau 3) : aucune des quatre zones identifiées ne répond aux critères pour être un gisement pour de l'extraction de sédiments marins, bien que certaines représenterait des gisements potentiellement intéressants. Une analyse sur les activités devrait être menée pour apporter des éléments complémentaires à notre simple analyse. De plus, nous rappelons que cette analyse ne tient pas compte des potentiels impacts d'un activité d'extraction sur la zone, l'environnement, l'écosystème ou les répercussions sur d'autres activités économiques sur ces sites.

Tableau 3 : Bilan sur la réflexion autour des potentiels sites sources en se basant uniquement sur les connaissances sur le stock, les connaissances sur la dynamique littoral et le DSBM.

Zone	Stock potentiel	Distance à la côte (Référence : 3 milles nautiques – DSBM)	Profondeur	Risque lié à la proximité du littoral	Activité à proximité (risque)	BILAN
Est Miquelon - Zone C	+++	1-2 milles	45-85 m	Faible (proximité du Cap rocheux)	Risque Fort (Activités + câble)	-
Zone D	+++	2-3 milles	40-80 m	Faible (profondeur élevée)	Risque Fort (Activités + câble)	-
Zone E	+++	Sup. 3 milles	Sup. 80 m (difficulté pour l'extraction)	Faible (distance à la côte et profondeur élevée)	Risque Fort (Activités + câble)	-
Est de l'Isthme - Zone G	+ Attention à la proximité du substrat, forme hétérogène mal connue	1-2 milles	12-17 m Proximité du littoral, ordre de grandeur de la profondeur de fermeture supposée	Forte Faibles profondeurs + faibles distances à la côte, impact possible sur les échanges sédimentaires à la côte et la dynamique d'évolution du trait de côte	Risque Fort (Activités de pêche)	---

Rappel : Il est rappelé que le présent rapport ne substitue pas à une étude d'impact, mais permet d'apporter des éléments de connaissances sédimentaires sur l'avant-côte de la rade de Miquelon, et de part et d'autre l'isthme. A ce titre, il ne présente pas l'état zéro du site d'un point de vue écologique et environnemental, ni du suivi préalable du site sur ces thématiques.

5. Estimation du transit sédimentaire le long de la façade ouest de l'isthme

Une première analyse du transport sédimentaire le long de la façade ouest de l'isthme a été réalisée par Robin (2007). Elle indique un transport sédimentaire convergent vers la partie la plus étroite de l'isthme (Illustration 26 ; utilisation des formules de Bailard, 1981; Bijker, 1967; Van Rijn, 1993 ; modèle numérique UNIBEST-LT). Cette étude ainsi que celles de Pechon (E.D.F., 1989) ont proposé des estimations du transport résiduel annuel de sédiment, respectivement pour l'ensemble de la façade ouest de l'isthme et le secteur des Buttereaux. Les estimations de flux disponibles issues des simulations antérieures sont qualitatives, considérées parfois comme surestimées par les auteurs, et assez hétérogènes bien que du même ordre de grandeur (de l'ordre de dizaine de millier de mètre cube par an). La quantification de ce transport sédimentaire n'a toutefois pas été prouver par des mesures de terrain.

Ainsi, on constate la nécessité d'établir des scénarios actualisés sur les forçages et leurs statistiques avec plus de 15 ans de données supplémentaires, un travail plus spécifique sur les régimes de vagues, ainsi que de préciser les estimations de transit sédimentaire de ce secteur. Pour cela, les estimations seront réalisées en utilisant les formules et méthodes récentes les plus adéquats pour ce type d'environnement. De plus, afin de considérer des flux de long de l'isthme, l'emprise de calcul sera élargie en considérant l'ensemble de la façade Est de l'Archipel, et ainsi mieux appréhender les interactions et les flux venant du Nord.

5.1. METHODE ET MODELISATION

Afin de permettre une estimation fiable du transit sédimentaire le long de la façade ouest de l'isthme, il est nécessaire de :

- (i) Constituer une base de données consistante et rétrospective (*hindcast*) des états de mer générée par un modèle de vagues, validée et filtrée des événements cycloniques. Cette base de données est essentielle pour combler les lacunes inhérentes aux observations existantes en matière de durée et de distribution géographique ;
- (ii) Réaliser des statistiques précises sur le climat des vagues (directement exploitées dans cette section § 5.1.1), ainsi que de fournir des données extrêmes indispensables pour aborder efficacement la modélisation morphodynamique des scénarios de rechargement de plage (§ 6).
- (iii) Calculer les paramètres nécessaires aux formules empiriques grâce à l'implantation et à la validation du modèle SWAN

5.1.1. Conditions de vagues au large

Les données de vague proviennent de la base de données IOWAGA (*grille ATNW : Atlantic North-West* ; Illustration 35). C'est une base de données rétrospectives (*hindcast*) des états de mer générée par le modèle de vagues WAVEWATCH-III et forcée par les vents CFSR (*Climate Forecast System Reanalysis*) sur la grille Nord-Ouest Atlantique sur la période 1990-2016, soit sur une période de 26 ans. Elles sont enregistrées avec une résolution spatiale de 10 minutes et une résolution temporelle de 3 heures. Cependant, en raison d'une absence de données pour les trois derniers mois de l'année 1992, les données exploitées ici concerneront uniquement 24 ans.

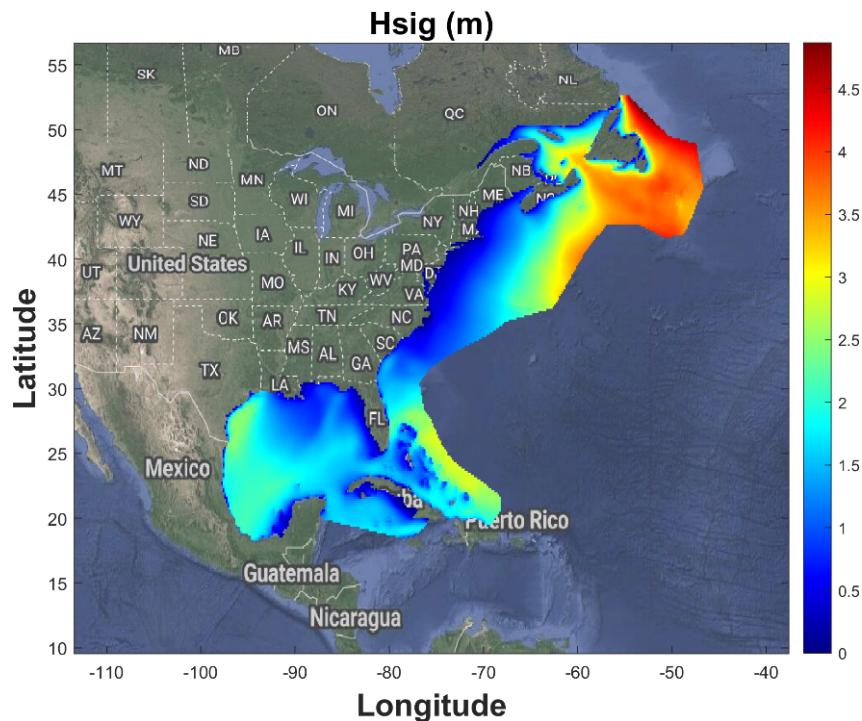


Illustration 35. Emprise du modèle IOWAGA-ATNW (image <https://sextant.ifremer.fr>) avec un exemple de distribution spatiale de H_s .

Les analyses ont été faites en se basant sur la même méthodologie que celle utilisée dans l'étude VULIT sur la vulnérabilité du littoral de Saint-Pierre-et-Miquelon réalisée par De la Torre et al., 2016. Ainsi, trois points d'intérêt ont été identifiés autour de l'archipel : au nord, à l'ouest et au sud (voir Illustration 36). En raison de la résolution spatiale, il n'a pas été possible de considérer des points à l'est de l'archipel.

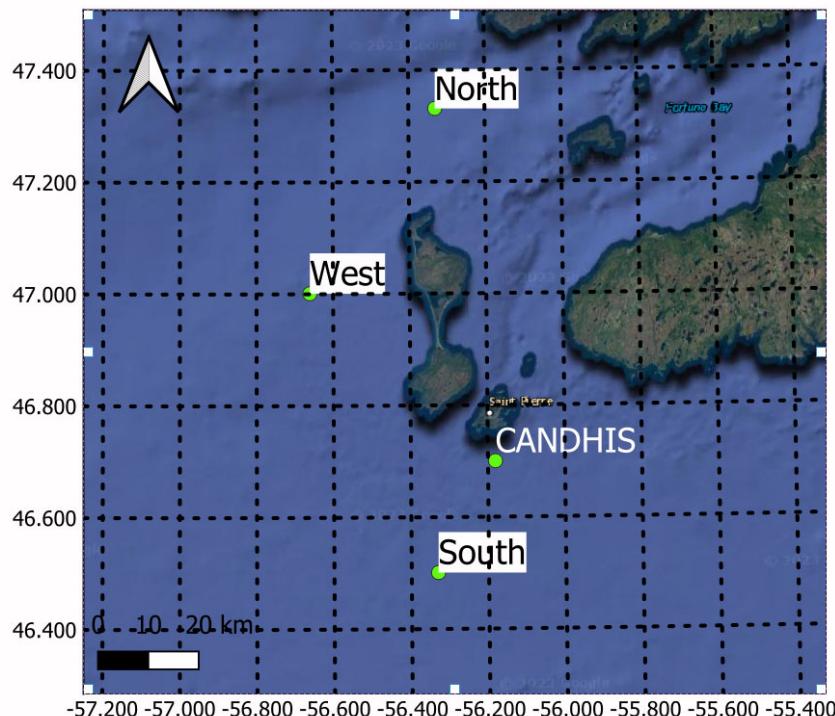


Illustration 36. Localisation des points d'extraction des données de vagues.

La comparaison de résultats du modèle, en termes de hauteur significative de vagues, avec les données de la bouée 97501 localisée au Sud-Est de l'Île de Saint-Pierre donne des résultats concordants (Illustration 37), avec de biais autour de 10 cm et des écarts quadratiques moyens (RMSD) inférieurs à 40 cm. Ce qui permet d'être confiant sur l'utilisation des données du modèle pour représenter les houles autour de l'archipel.

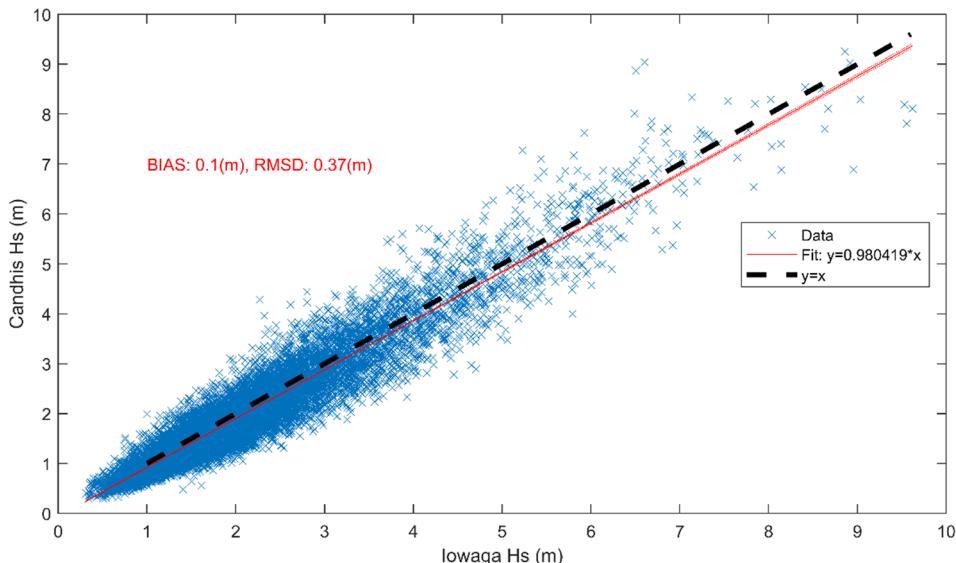


Illustration 37. Comparaison des hauteurs caractéristiques des vagues Hs, entre observations à la bouée 97501 et données issues du modèle IOWAGA forcé par les vents CFSR pour l'année 2012-1020.

Avant d'entreprendre l'analyse des valeurs extrêmes des vagues, il est impératif d'ôter des séries temporelles les données relatives aux vagues cycloniques. En effet, ces dernières requièrent un traitement distinct, étant donné que les phénomènes à l'origine des cyclones diffèrent de ceux engendrant les houles saisonnières. Pour ce faire, la base de données IBTrACS (*International Best Track Archive for Climate Stewardship*⁸) a été utilisée afin d'identifier les cyclones qui ont approché Saint-Pierre-et-Miquelon. Cela nous a permis de retirer de la série temporelle originale toutes les périodes susceptibles d'avoir été influencées par ces cyclones. Une zone de +/-5° en latitude et longitude a été considérée, centrée sur l'Archipel. Depuis le début de série temporelle de données sur les vagues en 1990, 65 cyclones ont traversé cette zone.

Pour les extrêmes, la méthode d'ajustement statistique utilisée est décrite dans Bernardara et al. (2014) et dans le rapport BRGM Bulteau et al. (2013). Il s'agit d'ajuster une loi GPD⁹ par une méthode à deux seuils. La loi GPD est recommandée en général pour des échantillons de type POT (Peaks-Over-Threshold), indépendants et identiquement distribués. Tout d'abord, un *seuil physique* est choisi au-delà duquel seuls les pics de Hs sont conservés. Ce seuil doit être choisi de manière à sélectionner un nombre moyen de pics par an comparable au nombre annuel de tempêtes sur le site d'étude. Il doit également permettre de sélectionner à la fois des tempêtes extrêmes et modérées. Le seuil doit permettre de prendre en compte un nombre moyen d'événements suffisant, au moins égal à 2/3. Un critère temporel de 72 heures minimum entre chaque pic a été imposé afin d'assurer l'indépendance des pics.

Dans un deuxième temps, un *seuil statistique* est déterminé au-delà duquel la loi GPD est ajustée aux données. Deux outils visuels sont couramment utilisés pour aider à choisir le meilleur seuil : le graphique de la durée de vie résiduelle moyenne et le graphique des paramètres d'échelle et

⁸ <https://www.ncei.noaa.gov/products/international-best-track-archive>

⁹ GPD : Generalized Pareto Distribution

de forme modifiés. Pour ces deux outils, on recherche le seuil au-delà duquel la courbe devient respectivement linéaire ou constante. Une fois le seuil déterminé, la méthode d'estimation des paramètres de la loi est choisie parmi trois méthodes classiques : le maximum de vraisemblance, la méthode des moments et la méthode des moments pondérés. Des tests statistiques (χ^2 et Kolmogorov-Smirnov) et visuels (graphiques de probabilité-probabilité et quantile-quantile) ont permis de valider les lois ajustées et de choisir la méthode d'estimation la plus appropriée.

Une description de la méthodologie permettant de choisir un seuil optimal tout en réduisant la subjectivité de l'opérateur est décrite dans le rapport Bulteau et al. (2013).

Enfin, les intervalles de confiance sont calculés par la méthode du bootstrap paramétrique telle que décrite dans Mazas and Hamm (2011).

5.1.2. Point Nord

L'analyse des données brutes (après exclusion des périodes cycloniques) montre que les vagues proviennent le plus souvent du sud-ouest (Illustration 38). De plus, ce secteur est également celui qui génère les hauteurs de vague significatives les plus élevées. L'Illustration 38 représente la relation hétéroscédastique entre la hauteur de vague significative (H_s) et la période de pic (T_p) : plus H_s est élevée, plus la dispersion des T_p est faible. Ainsi, pour les vagues les plus élevées, les T_p se situent entre 10 et 14 secondes (rapport VULIT, De la Torre et al., 2016). Pour ce qui concerne l'analyse d'extrême, pour ce point d'étude le premier seuil a été choisi à 4.1 m, ce qui correspond à un nombre moyen d'événements par an d'environ 8.

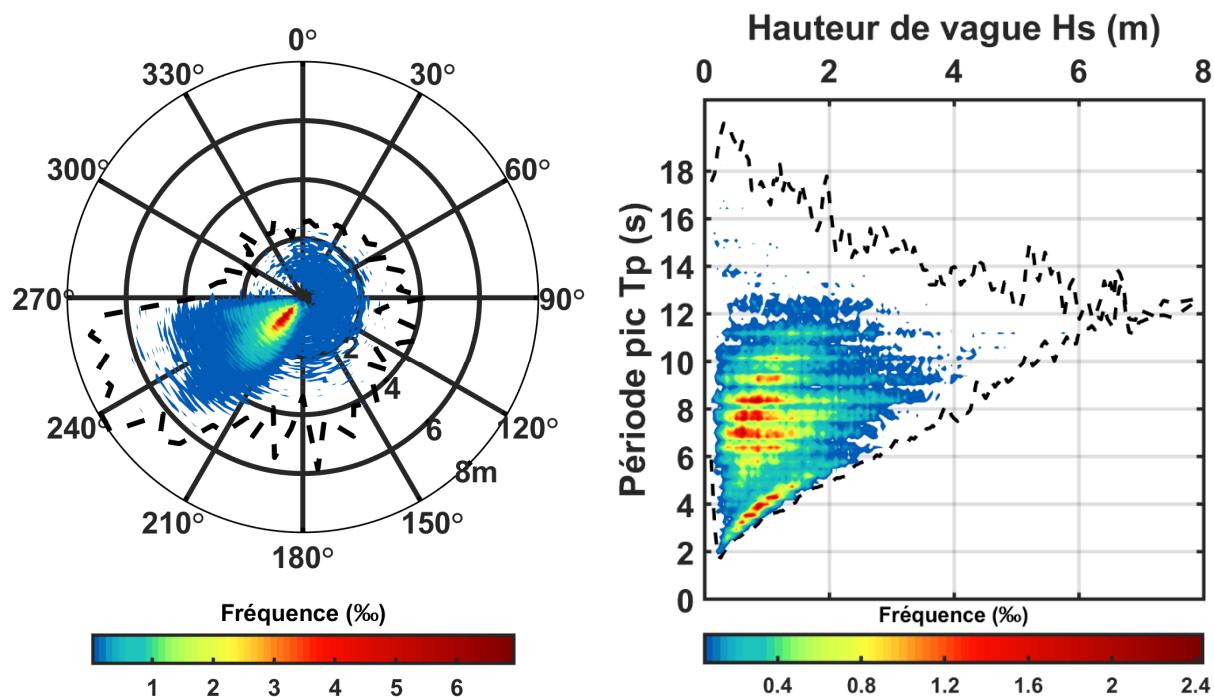


Illustration 38. À droite, rose des vagues. La valeur de H_s est sur l'axe radial. L'enveloppe des points de la série temporelle est représentée par la ligne noire en pointillés. La fréquence d'occurrence des couples (H_s , D_p) est représentée par l'échelle de couleur (min=0,02%) avec une discréttisation de 5° pour D_p et 10 cm pour H_s . D_p est en convention nautique (i.e. indique la provenance des vagues). À droite, diagramme bivarié (T_p , H_s ; même symbologie). Pour la fréquence d'occurrence, T_p est discréttisé toutes les 0,2 s et H_s tous les 10 cm.

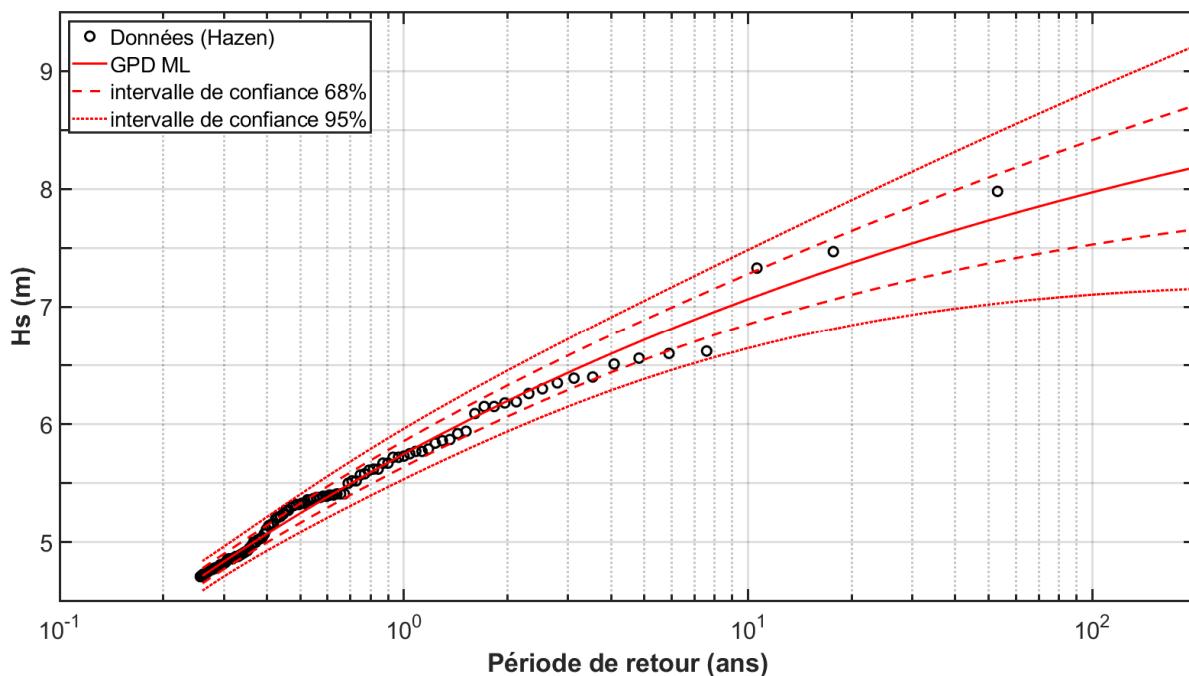


Illustration 39. Valeurs de retour de H_s pour le point au Nord. Seuil statistique = 4.7m. Méthode d'ajustement: maximum de vraisemblance (ML) ; extrait des résultats du Tableau 4.

Tableau 4 : Période de retour des H_s (m) et intervalles de confiance associés (70% et 95%) pour le point Nord.

PERIODE 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	6,20	6,07	6,33	5,94	6,46
5	6,72	6,55	6,89	6,39	7,05
10	7,07	6,85	7,28	6,65	7,48
20	7,37	7,10	7,65	6,84	7,91
50	7,73	7,37	8,10	7,02	8,45
100	7,97	7,53	8,41	7,10	8,84
200	8,18	7,66	8,71	7,15	9,22

5.1.3. Point Ouest

L'analyse des données brutes (après exclusion des périodes cycloniques) montre que les vagues proviennent le plus souvent du sud-ouest et de l'ouest (Illustration 40). Ces secteurs sont également responsables des vagues les plus imposantes en termes de hauteur. L'Illustration 40, à droite, met en lumière la corrélation hétéroscédastique entre H_s et T_p . Par conséquent, pour les vagues les plus hautes, les périodes pics se situent dans une fourchette de 10 à 14 secondes (rapport VULIT, De la Torre et al., 2016).

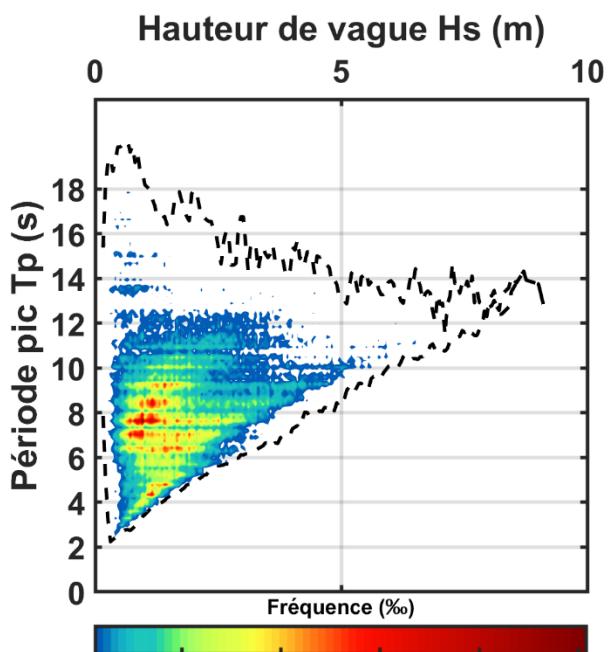
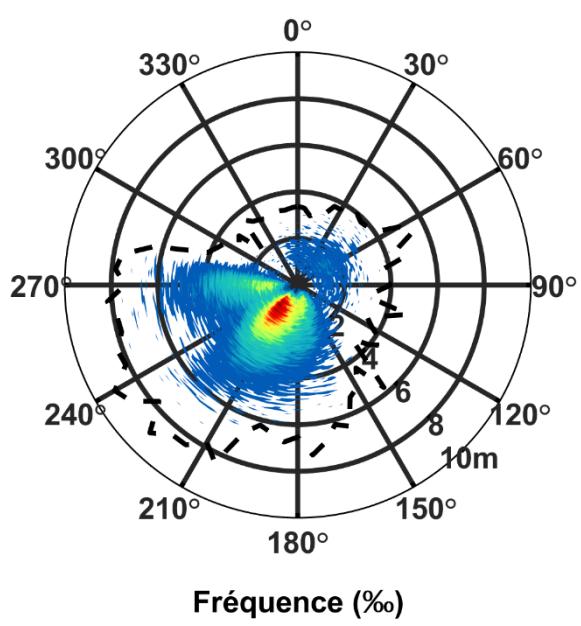


Illustration 40. À gauche, illustration d'un couple de vagues. La valeur de H_s est sur l'axe radial. L'enveloppe des points de la série temporelle est représentée par la ligne noire en pointillés. La fréquence d'occurrence des couples (H_s, D_p) est représentée par l'échelle de couleur ($\min=0,02\%$) avec une discrétisation de 5° pour D_p et 10 cm pour H_s . D_p est en convention nautique (i.e. indique la provenance des vagues). À droite, Diagramme bivarié (T_p, H_s). Même symbolique que l'illustration à gauche. Pour la fréquence d'occurrence, T_p est discrétisé toutes les $0,2$ s et H_s tous les 10 cm.

Le procédé employé est identique à celui exposé pour le point Nord. Un seuil physique a été défini afin de sélectionner en moyenne 9-10 événements par an. Ensuite, le seuil statistique a été fixé à 6.1 mètres (environ 3,7 événements par an) et les paramètres de la loi GPD ont été évalués via la méthode de maximum de vraisemblance (voir Illustration 41 et Tableau 5).

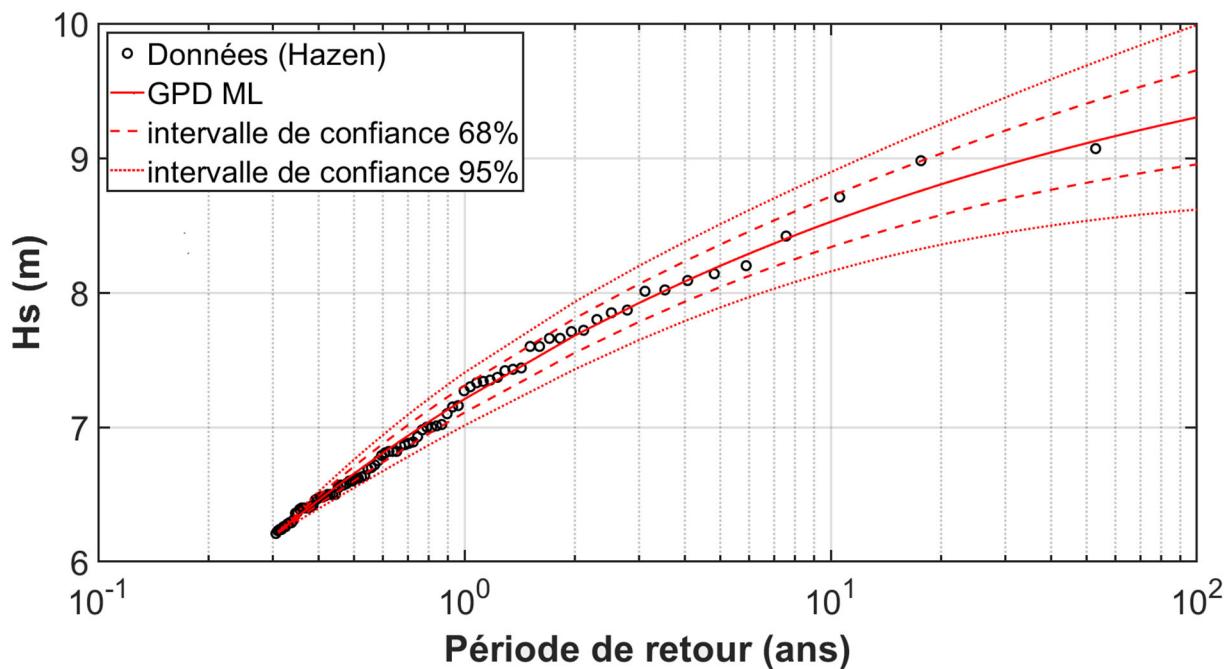


Illustration 41. Valeurs de retour de Hs pour le point Ouest. Seuil statistique = 6,1 m. Méthode d'ajustement: maximum de vraisemblance (ML) ; extrait des résultats du Tableau 5.

Tableau 5 : Période de retour des Hs (m) et intervalles de confiance associés (70% et 95%) pour le point Ouest.

PERIODE 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	7,68	7,43	7,93	7,55	7,81
5	8,20	7,89	8,51	8,04	8,36
10	8,53	8,16	8,89	8,34	8,71
20	8,80	8,36	9,25	8,58	9,03
50	9,11	8,53	9,69	8,82	9,40
100	9,30	8,62	9,99	8,95	9,65
200	9,47	8,67	10,27	9,06	9,87

5.1.4. Point Sud

L'examen des données brutes (après avoir exclu les périodes cycloniques) révèle que les vagues proviennent principalement du sud-ouest et de l'ouest (voir Illustration 42). On observe également une plus grande diversité de directions d'origine des vagues par rapport aux deux autres points examinés. Cette diversité s'explique par la situation géographique du point d'étude, qui est plus ouvert sur l'océan, dans le secteur sud. Le secteur ouest-sud-ouest demeure celui qui engendre les hauteurs de vagues significatives les plus élevées. L'Illustration 42, à droite, met en évidence la corrélation hétéroscédastique entre Hs et Tp. Par conséquent, pour les vagues les plus hautes, les périodes pics se situent entre 10 et 14 secondes.

Le protocole employé pour les extrêmes est identique à celui exposé avant. Un seuil physique a été défini pour sélectionner en moyenne 8-9 événements par an. Ensuite, le seuil statistique a été établi à 6,9 mètres (environ 3,2 événements par an) et les paramètres de la loi GPD ont été estimés via la méthode du maximum de vraisemblance (voir Illustration 43 et Tableau 6).

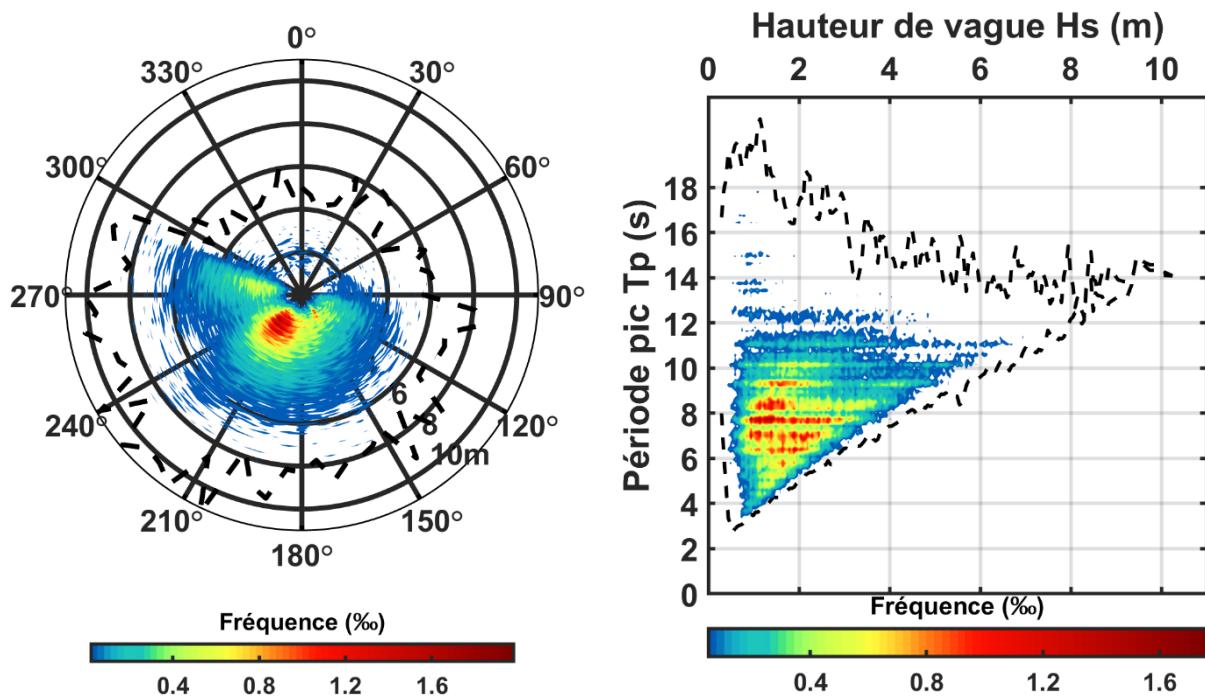


Illustration 42. À gauche, rose des vagues. La valeur de H_s est sur l'axe radial. L'enveloppe des points de la série temporelle est représentée par la ligne noire en pointillés. La fréquence d'occurrence des couples (H_s, D_p) est représentée par l'échelle de couleur ($\min=0,02\%$) avec une discréttisation de 5° pour D_p et 10 cm pour H_s . D_p est en convention nautique (i.e. indique la provenance des vagues). À droite, diagramme bivarié (T_p, H_s ; même symbologie). Pour la fréquence d'occurrence, T_p est discréttisé toutes les $0,2\text{ s}$ et H_s tous les 10 cm .

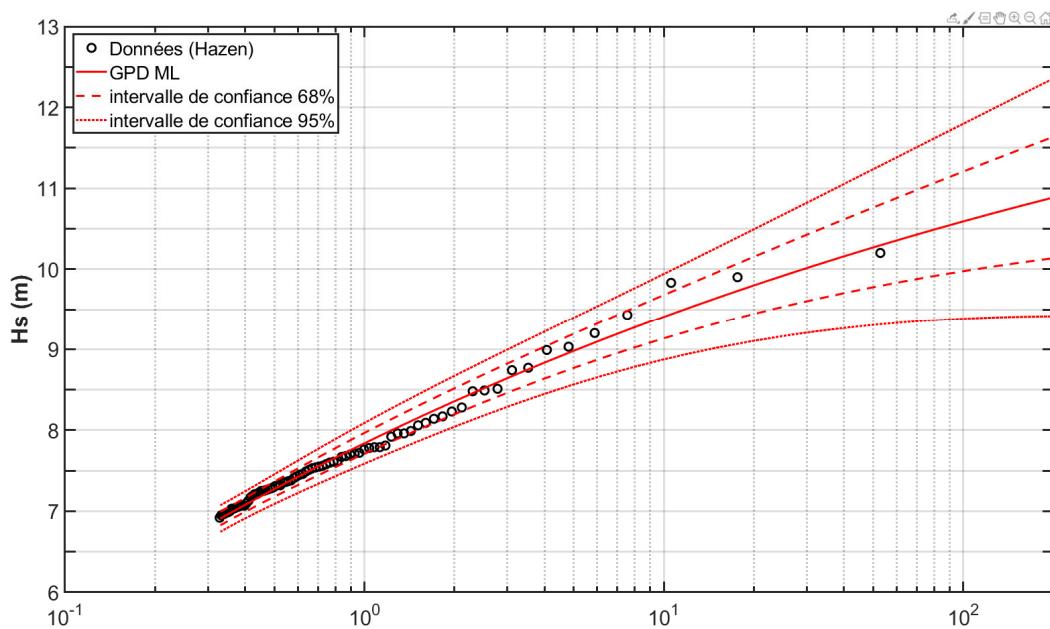


Illustration 43. Valeurs de retour de H_s pour le point Sud. Seuil statistique = 6.9 m . Méthode d'ajustement: maximum de vraisemblance (ML); extrait des résultats du Tableau 6.

Tableau 6 : Période de retour des Hs (m) et intervalles de confiance associés (70% et 95%) pour le point Sud.

PERIODE 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	8,36	8,20	8,52	8,04	8,67
5	8,98	8,77	9,19	8,56	9,39
10	9,41	9,13	9,68	8,87	9,94
20	9,80	9,44	10,15	9,10	10,49
50	10,27	9,77	10,76	9,30	11,23
100	10,59	9,97	11,21	9,38	11,80
200	10,89	10,14	11,64	9,42	12,36

Pour l'analyse spécifique des vagues cyclonique, se référer au rapport VULIT, De la Torre et al., 2016.

5.2. CLASSIFICATION STATISTIQUE DES FAMILLES DE VAGUES AU LARGE DU SITE D'ÉTUDE

5.2.1. Principe de la classification statistique

Comprendre et prédire l'évolution de la morphologie côtière, évènementielle ou long-terme, revêt une importance cruciale en ingénierie côtière en raison de ses implications pour la sécurité côtière, l'environnement et l'économie. Par exemple, la morphodynamique côtière influence l'apparition des courants de retour, impactant la sécurité des baigneurs, la protection des terres contre les submersions et l'érosion côtière, ainsi que sur les bâtiments et le développement des écosystèmes côtiers. Souvent, des modèles morphodynamiques basés sur les processus sont utilisés pour prédire l'évolution côtière. Ces modèles prennent en compte une large gamme de processus côtiers tels que les vagues, les courants, le transport de sédiments et la morphologie, ce qui engendre un niveau de complexité élevé et, par conséquent, un effort de calcul considérable.

À mesure que la complexité et le coût de calcul augmentent, il est nécessaire de réduire/simplifier les processus ou les données d'entrée pour obtenir des temps de calcul réalisables dans les applications en ingénierie. Dans un contexte morphodynamique, la réduction des données d'entrée peut être définie comme la sélection d'un ensemble réduit de *conditions de forçage représentatives* permettant d'obtenir des approximations précises de l'évolution morphologique à moyen et long terme (classification statistique). Une méthode de réduction des données d'entrée robuste devrait préserver une certaine variabilité naturelle de l'environnement pour être en mesure de représenter avec précision l'ensemble complet des conditions. Dans les environnements côtiers, les vagues sont généralement les principales conditions de forçage (c'est-à-dire pour les côtes dominées par les vagues). Une modélisation précise de la morphodynamique proche du rivage nécessite la sélection de conditions de vagues représentatives qui capturent la variation à la fois de la hauteur, de la période et de la direction des vagues, y compris lors des événements extrêmes.

Principalement, il existe deux catégories de méthodes de réduction des données d'entrée liées aux vagues : les méthodes de regroupement et de classification.

Les méthodes de regroupement divisent les conditions des vagues en groupes, utilisant parfois un objectif spécifique de pondération, comme le transport de sédiments. Les méthodes de

classification regroupent les conditions des vagues en fonction de leur similitude statistique. En plus de la sélection des conditions de vagues représentatives, le nombre, la durée et la séquence des conditions de vagues peuvent affecter également la performance de la méthode. La séquence des conditions de vagues fait référence à l'ordre dans lequel les conditions de vagues représentatives se produisent dans le modèle.

Les données de vagues utilisées dans ce contexte sont caractérisées par une hauteur significative H_s , une période pic, T_p , et une direction de pic, D_p . Dans la présente étude, les flux de sédiments longshore induits par les vagues seront calculés à partir de la formule de Kamphuis (2002). La formule de Laboratoire Central d'Hydraulique de France (LCHF) a été aussi utilisée pour pouvoir mieux comprendre et affiner le calcul des composants du transport.

Ainsi, au lieu de classer les triplets habituels (H_s, T_p, D_p) , les triplets $(H_s^{2.5}, T_p, D_p)$, plus représentatifs des potentiels de flux de sédiment longshore, ont été adoptés. Plusieurs algorithmes ont été évalués afin de permettre la meilleure classification. Le travail de De Queiroz et al. (2019) qui a testé plusieurs méthodes de classification et regroupement, a été ici employé. Les résultats montrent comme parmi toutes les méthodes de regroupement, les méthodes des K-Moyennes, avec initialisation de clusters par l'algorithme de Dissimilarité Maximale (MDA) ont tendance à offrir de meilleures performances que les autres. Donc l'algorithme de regroupement appelé Crisp K-Moyennes (CKM) a été utilisé, avec initialisation des groupes par MDA (De Queiroz et al., 2019; Le Cozannet et al., 2011).

L'algorithme de Dissimilarité Maximale (MDA) crée un sous-ensemble de k-centroïdes qui représente toute la diversité des données de vagues en maximisant la diversité entre les vecteurs du sous-ensemble. Pour mesurer la dissimilarité entre les vecteurs, l'Algorithme MaxMin de Floyd et al. (1999) a été employé (comme dans De Queiroz et al., 2019). Le premier centroïde est la condition de vague la plus éloignée de toutes les autres données de vagues. Après que le premier centroïde soit exclu de l'ensemble de données, le deuxième centroïde est la condition de vague la plus éloignée du premier centroïde. Les centroïdes suivants sont les conditions de vagues ayant la plus grande distance parmi les distances minimales des conditions de vagues restantes par rapport aux centroïdes précédents.

La méthode des k-means classique (CKM) est l'une des méthodes de regroupement les plus largement utilisées. Elle commence avec k centroïdes initiaux définis dans ce cas avec MDA avec des poids basés sur la distance des conditions de vagues grâce à l'algorithme k-means (Arthur et al., 2017). Ensuite, chaque condition de vague est attribuée au groupe auquel elle est la plus proche. La CKM utilise une fonction d'appartenance rigide, ce qui signifie que les conditions de vagues ne peuvent appartenir qu'à un seul groupe. Ensuite, les centroïdes sont mis à jour en prenant la moyenne des conditions de vagues constituant les groupes. Cette procédure est répétée de manière itérative jusqu'à ce que la différence entre les centroïdes actuels et précédents soit inférieure à un critère de précision.

L'identification du régime de vagues est ensuite basée sur la valeur du barycentre et un critère saisonnier. Cette étape permet de disposer des caractéristiques moyennes des vagues susceptibles d'atteindre le littoral, associées à leur récurrence en pourcentage de la durée de la chronique traitée. Lors de la classification, 12 familles de vagues ont été jugées statistiquement représentatives. Les paramètres obtenus après classification sont exprimés toujours en termes de paramètres : H_s, T_p, D_p .

5.2.2. Résultats généraux à l'ouest et au sud

La classification a donc été réalisée à partir de l'analyse des 25 ans de données (1990-2016, hors 1992) issues du modèle de vagues IOWAGA-ATNW (CFSR). Comme les vagues affectant l'archipel sont issus d'influences d'origine Ouest et Sud, la classification des données de vagues a été réalisée en deux points au large de la zone d'étude (à l'Ouest et au Sud, localisation sur l'Illustration 36). L'Illustration 44 présente les résultats de la classification des 12 classes à l'Ouest de l'Archipel. Les caractéristiques des familles de vagues (C1-C12) obtenues au sud et à l'ouest sont présentées dans le Tableau 7 et Tableau 8. La répartition de ces différentes familles de vagues au cours d'une année pour chacun des points est représentée en Illustration 45 et Illustration 46.

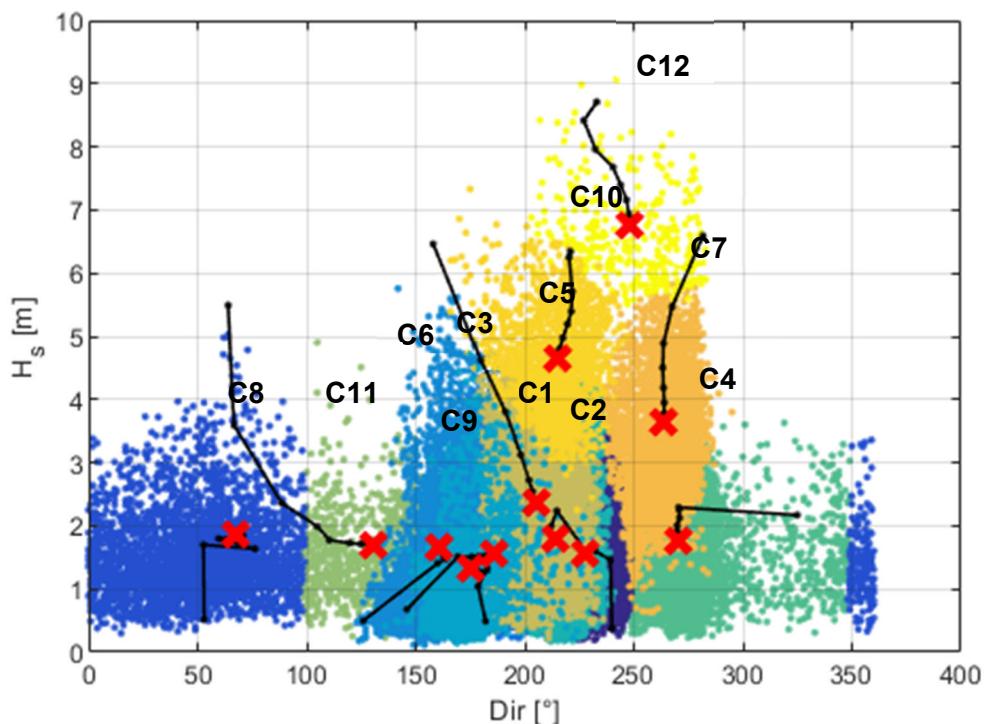


Illustration 44. Regroupement des différentes vagues selon la méthode k-moyennes, avec initialisation par algorithme MDA, point à l'Ouest du site d'étude.

Tableau 7. Classification des vagues au point à l'Ouest du site d'étude.

Classe	Hs (m)	Tp (s)	Dir (°)	%
C1	1,80	8,51	214,2	21,2
C2	1,55	6,69	227,3	18,2
C3	1,55	7,41	186,2	13,3
C4	1,77	6,12	270,1	11,6
C5	2,36	10,94	205,2	11,2
C6	1,66	9,67	161,1	8,4
C7	3,64	8,71	263,9	5,3
C8	1,85	4,89	67,8	4,3
C9	1,34	14,38	174,9	2,3
C10	4,66	11,43	214,9	2,3
C11	1,71	4,83	130,2	1,5
C12	6,77	11,73	248,2	0,5

Tableau 8. Classification des vagues au point au Sud du site d'étude.

Classe	Hs (m)	Tp (s)	Dir (°)	% / 100
C1	1,92	7,18	228,0	20,3
C2	1,89	7,66	191,5	14,9
C3	2,47	9,78	211,9	13,6
C4	1,99	6,45	280,6	10,6
C5	1,88	7,58	150,8	9,6
C6	2,12	9,23	115,9	9,1
C7	2,84	10,26	168,2	7,5
C8	3,89	8,90	272,2	5,8
C9	4,17	12,10	206,7	4,1
C10	1,49	14,24	145,4	2,1
C11	2,23	5,68	73,3	1,9
C12	7,09	11,88	246,8	0,6

L'analyse statistique pour les deux points Sud et Ouest (Illustration 45 et Illustration 46) fait apparaître une saisonnalité bien marquée. On observe ainsi plus régulièrement de la mer de vent et des houles de Sud-Ouest (classes C1 et C2) en période estivale. Des houles bien développées (classes C5 et C6) avec de l'énergie modérée (e.g. Hs 2.36 m, point Ouest ; Tableau 7) sont plus importantes pendant l'hiver. Les classes caractérisées par de l'énergie plus importante (e.g. classe C7 et C10 au point Ouest avec respectivement Hs=3.64 m et 4.66 m; Tableau 7) sont principalement présentes en hiver. Le même constat peut être fait pour des longs swell (C9). La dernière classe (C12) correspond à des conditions qui ont un pourcentage d'occurrence plutôt bas (0.5 %) et correspond à des houles très énergétiques, avec un Hs égal à 6.7 m (Tableau 7).

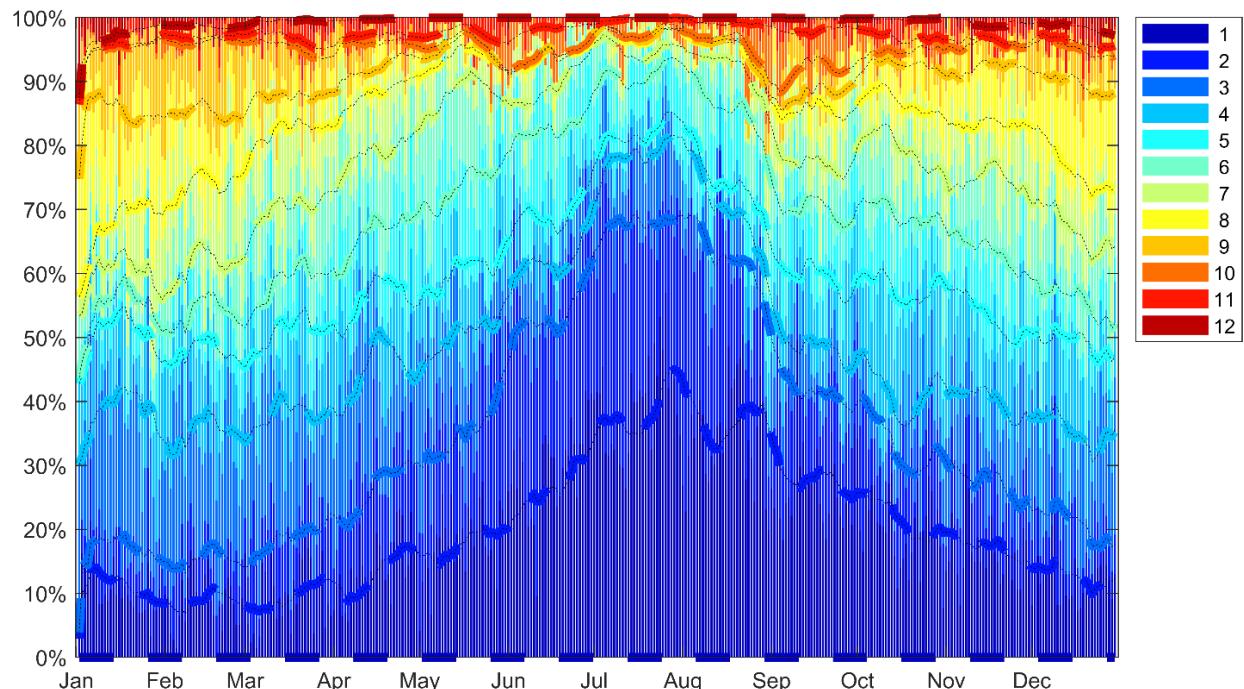


Illustration 45. Répartition annuelle des différents types de vagues au point au Sud de l'Archipel. Les lignes en pointillé définissent les limites des 12 classes (seulement pour visualisation, elles sont calculées comme moyenne mobile).

Les différences les plus importantes entre les deux points sont liées aux directions de provenance des vagues, avec cinq classes caractérisées par le deuxième quadrant (entre 90° et 180°) pour le point au Sud (Tableau 7, Tableau 8). Les classes C5 et C6 par exemple sont caractérisés par des directions autour de 150 et 116° avec des probabilités d'occurrence pendant l'année autour de 10% chacune (respectivement 9.6 et 9.1% ; Tableau 8).

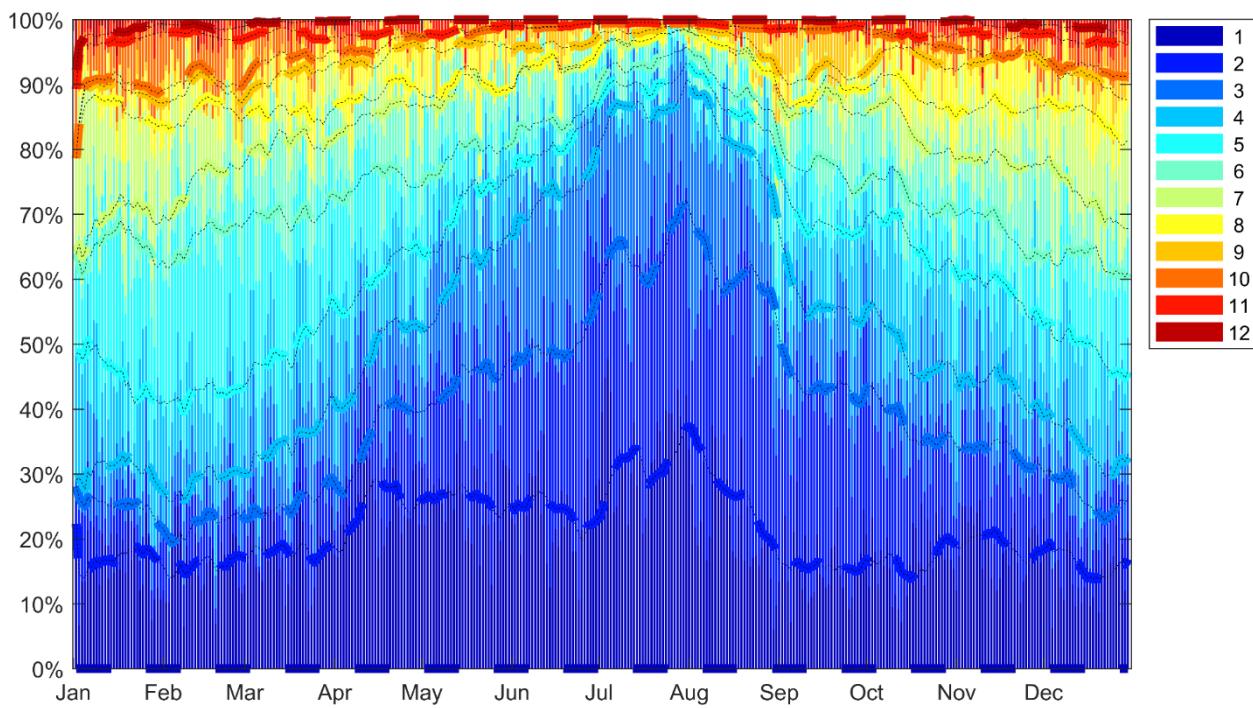


Illustration 46. Répartition annuelle des différents types de vagues au point à l'ouest de l'Archipel. Les lignes en pointillé définissent les limites des 12 classes (seulement pour visualisation, elles sont calculées comme moyenne mobile).

5.3. Modélisation des états de mer à la côte

5.3.1. Principe

L'état hydrodynamique près de la côte a été modélisé à partir des climats de houle au large en utilisant le code SWAN. SWAN est un modèle spectral de vagues basé sur l'équation de bilan de densité d'action des vagues (Booij et al., 1999). La version 41.43 a été utilisée en mode stationnaire pour simuler la propagation et la déformation des vagues depuis le large jusqu'aux rivages moins profonds de l'Archipel. Ce modèle a été configuré pour prendre en compte la friction du fond marin (Madsen et al., 1988), le déferlement des vagues (Battjes and Janssen, 1978) et les interactions non linéaires, dont les interactions à trois ondes en eaux peu profondes (triplets). En raison des dimensions relativement réduites du domaine modélisé, d'autres termes sources tels que l'interaction quadruplet des vagues et la réflexion ont été désactivés respectivement. En raison des caractéristiques stochastiques du vent (magnitude, direction) associées à l'aspect à long terme de cette étude, les contributions liées à la formation d'écume et au vent ont également été désactivées. La discréttisation spectrale a été réalisée avec 40 fréquences allant de $0,7$ à $0,01$ Hz et une discréttisation en direction de 10° . Un spectre de type Jonswap constant a été utilisé le long des frontières au large la grille, au Sud et à l'Ouest de l'Archipel.

La première étape, présentée dans la section 5.1.1, a donc consisté à définir les conditions de vagues au large de l'Archipel. Une fois que le modèle a été mis en place et calibré avec les données de la bouée CANDHIS, la reconstitution des conditions de vagues près de la côte a ensuite été obtenue par modélisation. L'exécution du code SWAN repose sur une grille non structurée (triangles aux dimensions variables). La grille SWAN non structurée employée dans cette étude est représentée dans l'Illustration 47 (à gauche). Le domaine, qui s'étend jusqu'à 20 km autour de Saint-Pierre-et-Miquelon, présente une résolution qui varie entre 100 m au large et 15 m à la côte. La résolution est autour de 25 m à partir de la zone de déferlement. Les paramètres des vagues calculés au point de déferlement seront intégrés dans les formules de transport.

Les données topo-bathymétriques utilisées dérivent d'un assemblage des différentes sources de données : (i) les données proches de la côte proviennent du relevé réalisé en 2022 par iXblue dans le cadre de cette étude (section 2.2 ; Illustration 7 et en turquoise sur Illustration 47 à droite), (ii) les données NONNA du Service hydrographique du Canada¹⁰ sont utilisées dans la zone intermédiaire (en bleu sur l'Illustration 47), et enfin les données GEBCO (2023)¹¹ au large (en vert sur Illustration 47).

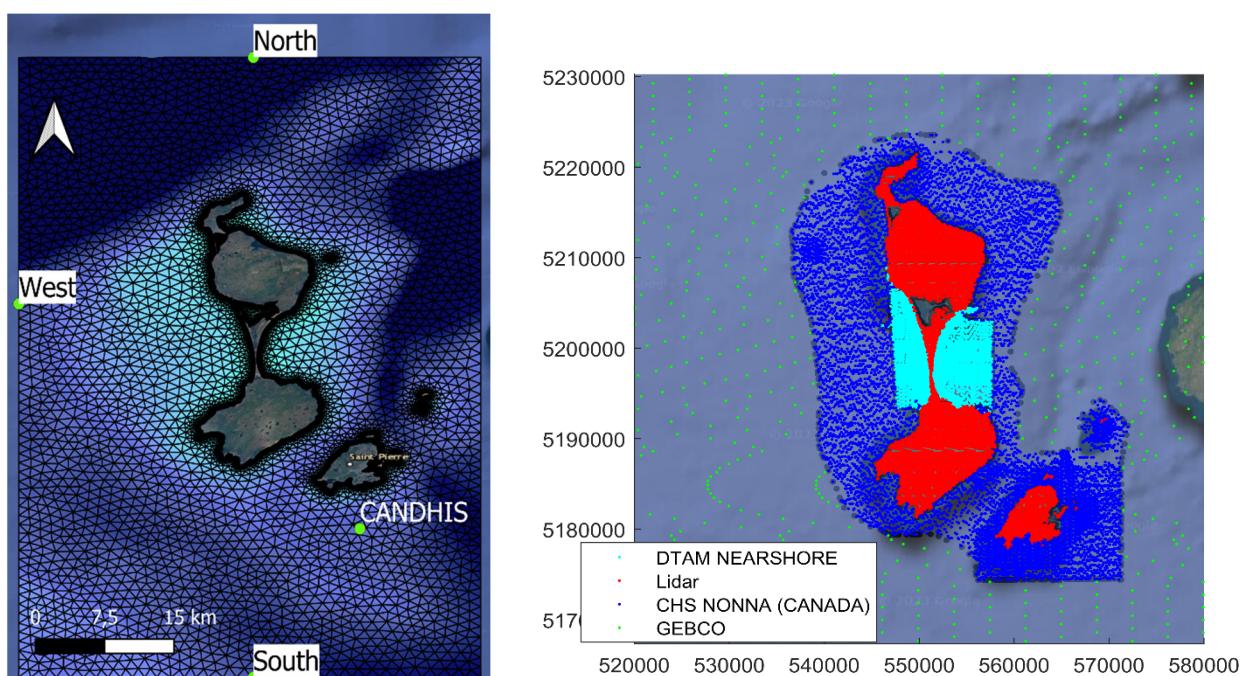


Illustration 47. A gauche, la grille employée pour la modélisation des états de mer dans SWAN. À droite, données utilisées pour la construction du modèle bathymétrique.

Le modèle SWAN mis en place a été validé en considérant quelques tempêtes en utilisant les données de vagues du modèle de hindcast IOWAGA comme forçage au large. Par exemple, les résultats de la simulation SWAN lors d'une tempête en janvier 2014 (courbe rouge sur l'Illustration 48) sont comparés aux données mesurées par la bouée CANDHIS et ceux des sorties du modèle IOWAGA au point le plus proche de la bouée (respectivement les courbes noire et bleue). Concernant la hauteur significative des vagues Hs, on constate que le modèle reproduit convenablement l'évolution temporelle des conditions de vagues, avec néanmoins une légère

¹⁰ NONNA : Canadian Hydrographic Service Non-Navigational Bathymetric Data : <https://open.canada.ca/data/en/dataset/d3881c4c-650d-4070-bf9b-1e00aabf0a1d>

¹¹ GEBCO : The General Bathymetric Chart of the Oceans: <https://download.gebco.net/>

sous-estimation au pic. En moyenne, un biais de 23 cm environ par rapport aux conditions réelles est calculé. Cet accord avec la hauteur significative des vagues mesurée par CANDHIS a été obtenu avec l'indice de déferlement (γ), c'est-à-dire le rapport entre la hauteur maximale individuelle des vagues et la profondeur égal à $\gamma = 0,65$, ce qui se situe dans la plage des valeurs trouvées par Battjes and Stive (1985) entre 0,6 et 0,83. Bien que l'erreur apparaisse importante, cette sous-estimation de l'ordre de 10 cm reste très faible en relatif, rapportée à la hauteur de vagues importantes sur le site (pic de 7 m). La sous-estimation des simulations s'explique notamment par la non-prise en compte des effets du vent local. Quant à la direction des vagues (D_p), les résultats du modèle sont satisfaisants pour ces vagues provenant de Sud-Ouest à l'Ouest (entre 150° et 260°).

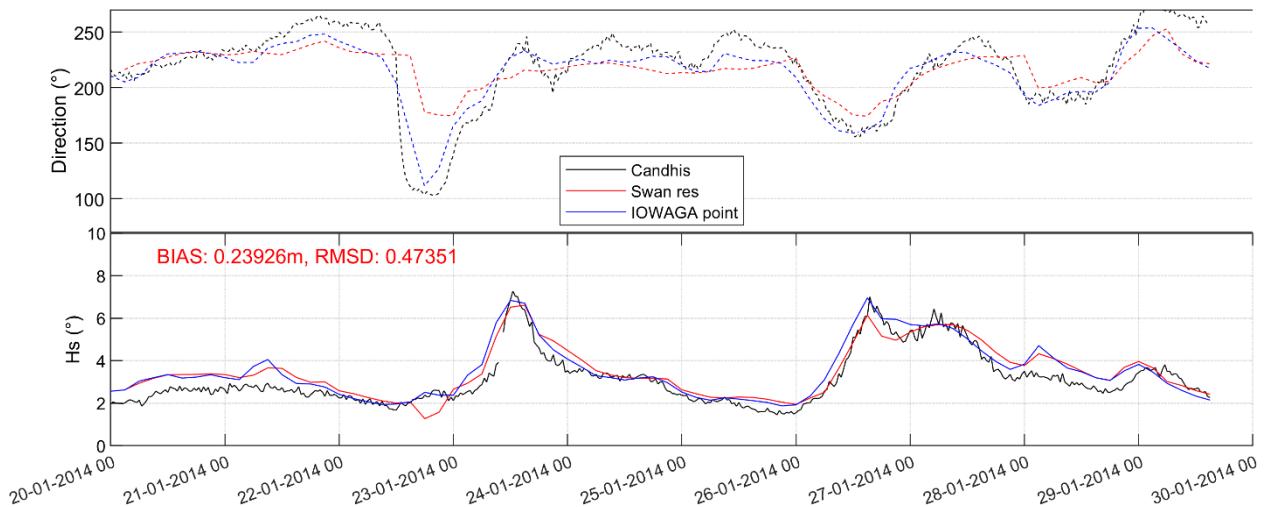


Illustration 48. Comparaison des données mesurées par la bouée CANDHIS avec le modèle IOWAGA et les résultats de la simulation SWAN lors de tempêtes en janvier 2014.

5.3.2. Détermination des vagues de référence au large de la zone d'étude

Afin de pouvoir déterminer la dynamique hydro-sédimentaire et notamment le flux de sédiments longshore, un travail de modélisation a été réalisé pour propager les classes de vagues au large de la zone d'étude. En effet, bien que reproduire les caractéristiques des vagues à la côte soit complexe, au large du site d'étude les caractéristiques peuvent être synthétisées à partir de la classification statistique présentée précédemment (aux deux points, à l'Ouest et au Sud de l'Archipel ; section 5.2.2).

L'objectif est d'évaluer le transport sédimentaire le long de la façade Ouest de l'archipel, et plus particulièrement de l'île de Miquelon-Langlade. Les vagues provenant du Sud, sur la limite du modèle, auront moins (voire pas) d'effets au niveau de la zone d'étude (une légère influence sur la hauteur et la direction des vagues). On retiendra donc que la classification qui donne le régime dominant sur cette façade est celle fournie par le point à l'Ouest. Ce sont donc les pourcentages ainsi que leur fréquences associés aux différentes classes de vagues (12 classes « types » qui regroupent l'ensemble des classes de vague) de ce point qui seront utilisés par la suite (Tableau 7, Illustration 44). Leur période d'apparition dans l'année est aussi un élément considéré par la suite (Illustration 46).

Les conditions au large identifiées précédemment résultent de l'association de classes issues de la classification statistique. Pour chaque condition, les caractéristiques de forçage appliquées aux limites du domaine (limites Ouest et Sud) sont pour les paramètres (H_s , T_p , D_p et Θ ,

l'étalement) les moyennes pondérées par le pourcentage d'occurrence de la classe au cours de l'année.

5.3.3. Quantification de la dynamique hydro-sédimentaire sur le secteur

Ce paragraphe vise à caractériser la dynamique hydro-sédimentaire sur le secteur à partir des simulations des vagues proches de la côte et l'utilisation de formules empiriques.

La mobilité sédimentaire à la côte est contrôlée par des dynamiques à la fois perpendiculaires à la côte (cross-shore) et parallèle à la côte (longshore). D'après les modélisations précédentes, les vagues arrivent à la côte avec des angles d'incidence différents (par rapport à la normale), ce qui va générer un transport parallèle à la côte. À partir de formules empiriques établies dans la littérature, le transport long shore peut être estimé pour chacune des classes d'états de mer identifiés dans les paragraphes précédents (Illustration 44) puis pondérés par la fréquence respective de ces états de mer, de manière à obtenir une estimation du transport longshore moyen annuel résiduel à la côte. Cette évaluation nécessite de connaître les caractéristiques physiques liées au moins à la granulométrie des sédiments, le profil de plage et les conditions de houle.

Pour quantifier le flux longshore, l'analyse consiste à calculer les volumes de sables susceptibles d'être transportés au cours d'une année. Pour ce faire, la méthode utilisée consiste à calculer les volumes de sables déplacés à partir des expressions empiriques. Plusieurs formules empiriques de transport ont été développées dans les années 80'. Quatre formulations théoriques pour calculer le transport sédimentaire littoral sont très communs: la formule CERC (Coastal Engineering Research Center), la formule L.C.H.F. (1979) L.C.H.F. (Laboratoire Central d'Hydraulique de France), la formule de Bailard (1984) et celle de Kamphuis (2002). La formule de Bailard (1984) est une expression dérivée de la formule CERC, qui est très utilisée, historiquement, pour le transport sédimentaire littoral.

La formule Kamphuis (2002) a été élaborée à la suite de travaux du même auteur (Kamphuis et al., 1986; Kamphuis, 1991) en laboratoire et à partir de mesures de terrain. Parmi les nombreuses formules existantes, l'expression de Kamphuis présente l'avantage de moins surestimer les valeurs de transport pour de faibles énergies de vagues par rapport à la formule du CERC par exemple (Bayram et al., 2007). Ces équations sont connues pour donner des résultats raisonnables pour des tailles de particules dans la plage de 200 à 600 µm et pour des pentes de plage de 0,015 à 0,15 (Van Rijn, 1990). Elle permet également d'intégrer des forçages variés et de tenir compte de la granulométrie.

La formule L.C.H.F. a été développée pour calculer les flux sédimentaires sur la côte du Golfe de Gascogne (France) où les conditions peuvent être comparables à celles de la côte ouest de l'Archipel mais avec des plages moins dissipatives. Elle utilise la formulation de Sauvage de Saint-Marc et de Vincent (LCHF) :

$$Q = \frac{K(\gamma_0, d_{50})}{\rho_s - \rho_c} g H_0^2 T f(\alpha_0)$$

D'où, en considérant que le dénominateur est une constante proche de l'unité ($\rho \sim 1025 \text{ kg/m}^3$, $\rho_s \sim 2500 \text{ kg/m}^3$ et $c \sim 0.7$) qui peut être intégrée dans la constante K.

Les travaux du Laboratoire Central d'Hydraulique de France (LCHF) et de J. Larras (1979) les ont conduites à adopter pour la constante de proportionnalité :

$$K(\gamma_0, d_{50}) = 1.8 \frac{10^{-6}}{\gamma_0 \sqrt{d_{50}}}$$

et pour la fonction d'obliquité :

$$f(\alpha_0) = \frac{\sin 7\alpha}{4}$$

L'expression empirique de Kamphuis (2002) :

$$Qlst, m = 2.27 H_{sb} T_p^{1.5} m_b^{0.75} D_{50}^{-0.25} \sin^{0.6}(2\theta_b)$$

$Qlst, m$ est la masse de sédiments transportés sous l'eau par unité de temps (kg/s), H_{sb} la hauteur significative des vagues au déferlement, T_p la période pic (s), m_b la pente de la plage entre la ligne de déferlement et le rivage, et D_{50} la taille du grain médian (m), Van Rijn (2000).

Les flux calculés sont ensuite convertis en m^3/h et rapportés en m^3/an .

Le flux longshore a donc été estimé pour plusieurs profils définis le long de la façade ouest de l'île de Miquelon-Langlade (40 profils le long de la façade localisés sur l'illustration 49), à partir de plusieurs types de données:

- les 12 classes d'états de mer caractéristiques du site, identifiés dans le chapitre précédent (Illustration 46 ; Tableau 7);
- le profil de la plage estimé à partir des profils topo-bathymétriques utilisés en phase de modélisation (Illustration 47). La pente de la plage a été évaluée entre la profondeur au point le point de déferlement et le rivage ;
- la granulométrie donnée par le diamètre médian D50 du point le plus proche aux profils en se basant sur la base de données issue des travaux existants (Billy, 2014; Robin, 2007; Robin et al., 2013) ; (données synthétisées sur les illustrations Illustration 12 et Illustration 13).

L'utilisation de formules empiriques de transport implique de définir rigoureusement l'emplacement du point de déferlement. Smith et al. (2003) ont proposé de le définir comme l'emplacement où l'on observe un rapide déclin de la hauteur des vagues. Dans cette étude, le point de déferlement a été défini comme le point où le rapport Hs/profondeur atteint 0,56, ce qui est intermédiaire entre la valeur de 0,6 proposée par Abadie et al. (2006) pour les plages plus raides du littoral du sud-ouest de la France et la valeur utilisée dans Bertin et al. (2008), pour les plages de St. Trojan, l'Île d'Oléron (0,5). Ce rapport Hs/profondeur de 0,56 correspond à une fraction de l'énergie des vagues dissipée par déferlement supérieure à 6 - 7%. Un tel critère est cohérent avec ces deux travaux de littérature et il corrobore également les conclusions de Bonneton (2001), qui suggèrent un rapport Hs/profondeur moins élevé pour les plages à pente douce.

La direction de la dérive littorale et le volume de sable transportés ($m^3/an/m$) ont d'abord été estimés pour chaque état de mer établi précédemment, C1 à C12 (colonnes de gauche du Tableau 9). 40 profils au total ont été considérés par les analyses, espacés 800-850 m (Illustration 49), la zone d'étude de l'isthme est couverte par 15 profils (P9 à P24). En tenant compte de l'occurrence des différentes situations au cours d'une année, la direction de la dérive littorale résiduelle (vers le nord ou vers le sud) et le volume transporté résiduel (en m^3/an) ont pu être calculés (Illustration 49). Les résultats le long de l'isthme sont présentés ci-dessous (Kamphuis et LCHF ; Illustration 50) et particulièrement sur le secteur des Buttereaux jusqu'à la partie la plus fine de l'isthme sont détaillés dans le Tableau 9.

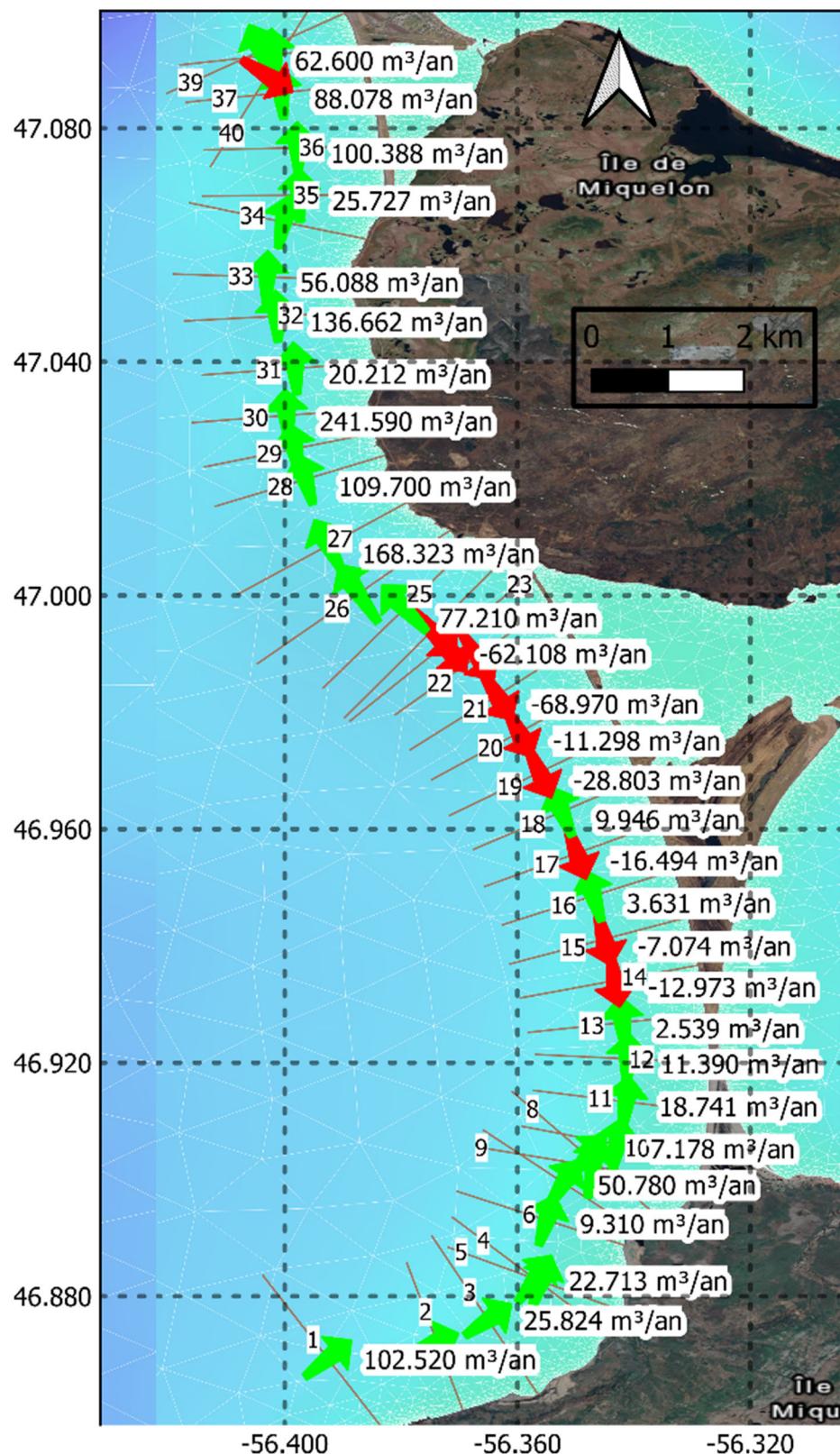


Illustration 49. Évaluation du transport sédimentaire sur la façade ouest de l'Isthme en utilisant la formule de Kamphuis, 2002: résultats du taux de transport sédimentaire potentiel annuel. En rouge, la direction de dérive résiduelle est orientée vers sud, en vert vers le nord.

Si on considère seulement l'isthme, le transit littoral estimé à l'extrême nord de l'isthme serait de l'ordre de 67 000 m³/an vers le sud (convention des signes dans l'Illustration 49, transport négatif si vers le Sud, positive vers le Nord), il diminue progressivement vers le Sud autour de 16000 m³/an. Il devient plutôt faible au niveau du secteur central, le plus étroit de l'isthme, sur un linéaire côtier de 2 km, pour s'inverser au sud de ce secteur, où l'on trouve un transport vers le Nord, de l'ordre de 10000 m³/an. Les taux de transports calculés divergent d'une formule à l'autre (Illustration 50), mais l'ordre de grandeur est cependant le même.

Des campagnes de mesures in situ pour une validation plus précise des calculs d'estimations du transit littoral avec ces types de formules empiriques sont nécessaires, notamment en amont de la réalisation de travaux en mer importants. Comme évoqué dans *l'expertise technique de l'érosion de l'isthme de Langlade* par le CEREMA (Leclerc et al., 2021), les résultats par SWAN et aussi XBeach (chapitre suivant) des simulations de propagation de houle indiquent également que des mouvements sédimentaires transversaux (cross-shore) sont plus importants lors des événements de tempête, avec des déferlements plongeants de houles frontales de secteur sud-ouest, supposé de la direction de provenance de 250°-260° et a priori sans obliquité par rapport au trait de côte des Buttreaux, qui est orienté au 330°-350°.

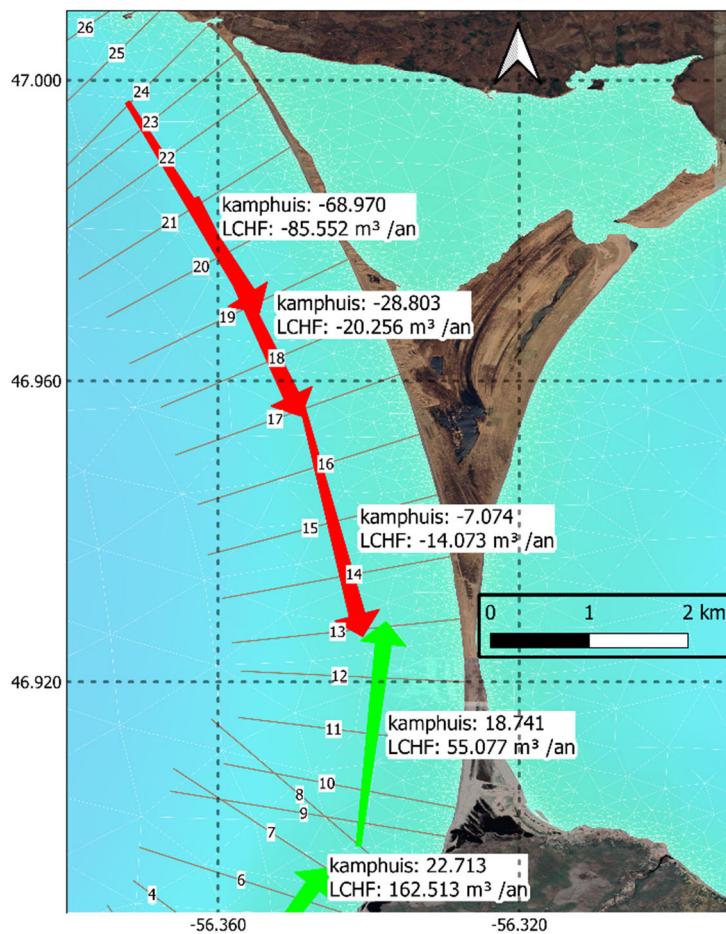


Illustration 50. Évaluation du transport sédimentaire en utilisant la formule de Kamphuis, 2002 et LCHF: résultats du taux de transport sédimentaire potentiel annuel le long de la façade ouest de l'Isthme. Zoom sur quelques profils représentatifs dans le secteur des Buttreaux. En rouge, la direction de dérive résiduelle est orientée vers sud, en vert vers le nord.

Tableau 9. Bilan annuel résiduel de volumes de sable en m³/an/m transporté par les vagues, pour les profils du secteur de l'Isthme. En rouge, dérive dominante vers le nord ; en bleu, dérive dominante vers le sud.

Profile	Kamphuis (m ³ /an)	LCHF (m ³ /an)	Orientation
12	11390	42278	Nord
13	2539	8790	Nord
14	-12973	-18284	Sud
15	-7074	-14073	Sud
16	3631	7197	Nord
17	-16494	-10480	Sud
18	9946	10391	Nord
19	-28803	-20256	Sud
20	-11298	-7194	Sud
21	-68970	-85552	Sud
22	-11376	-6507	Sud
23	-62108	-92138	Sud
24	-19201	-15669	Sud

5.4. SYNTHESE SUR L'ESTIMATION DU TRANSIT SEDIMENTAIRE

Dans l'objectif d'actualiser les connaissances existantes (partiellement qualitatives et considérées comme surestimées par les auteurs ; Pechon E.D.F., 1989 et Robin, 2007) et de quantifier de manière plus fine la dérive sédimentaire, la base de données IOWAGA (grille ATNW, forcée avec les vents du modèle CFSR) a été employée. Cette base de donnée couvre une période de 27 ans, entre 1990 et 2016, et les analyses statistiques calculées ont permis d'exploiter 6 ans de données supplémentaires par rapport aux analyses précédentes du BRGM (rapport VULIT, De la Torre et al., 2016) ainsi que de calculer les extrêmes avec une fiabilité plus importante. En effet, cela a notamment permis de caractériser et calculer, avec une précision plus importante, le climat de vagues au large de l'archipel. Une méthode de classification de vagues (12 classes) cohérente avec le contexte d'évaluation du transit sédimentaire (De Queiroz et al., 2019) a été employée. Enfin, pour permettre de bien quantifier les processus côtiers, avec le modèle SWAN (ex. de propagation et dissipation des vagues), une grille non structurée très détaillée englobant tout l'archipel a été mise en place, et une méthode appropriée et cohérente avec la littérature (Bertin et al., 2008) a permis de choisir la fraction d'énergie la plus appropriée au contexte, pour la détermination du point de déferlement sur plusieurs profils cross-shore à adopter pour le calcul empirique du transport sédimentaire. L'ensemble de ces choix (modèle, base de données, traitements) et analyses statiques permet de fournir un environnement fiable pour l'estimation des directions et flux sédimentaires.

En se basant sur la littérature actuelle, les formulations empiriques de Kamphuis et LCHF sont celles qui sont les plus adaptées pour l'estimation des flux sédimentaires. Elles ont permis d'évaluer avec précision la dérive résiduelle sédimentaire. Les résultats confirment les 1^{ères} analyses obtenues par Robin (2007), c'est-à-dire que deux flux contraires se distinguent nettement et convergent vers la partie la plus étroite de l'isthme (Illustration 50). Ainsi, au nord de l'isthme, les sédiments se déplacent du nord vers le sud, alors qu'au sud de l'isthme, leur direction résiduelle s'inverse, allant du sud vers le nord. Toutefois, l'analyse réalisée pour ce projet fournit une information fine en continue du flux le long de la façade ouest de l'isthme et permet d'apporter des éléments complémentaires. On constate que la zone entre le PK17 et le PK19 est caractérisée par des profils avec des dérives résiduelles de direction qui alternent et s'opposent. Cette zone peut donc être qualifiée de zone de transition.

6. Modélisation de scénarios de rechargement

Pour rappel, en parallèle à la réfection de la route de l'isthme, un rechargement artificiel en sable (apport externe) sur le littoral attenant à cette route a été proposé comme préconisation afin de rééquilibrer le budget sédimentaire du secteur (300 000 m³ sur un secteur de 1.5 à 2 km de long, rapport du CEREMA). En effet, cette méthode vise à créer une zone tampon sécuritaire en apportant du sable sur la plage et/ou l'avant-côte, atténuant ainsi l'érosion causée par les tempêtes et protégeant la base des ouvrages côtiers. Maintenir une plage haute et étendue permet de limiter les impacts directs de la houle sur la structure, assurant sa protection tout en réduisant les déplacements de matériaux et en fournissant une réserve de sédiments externe.

Cette section porte sur la modélisation morphodynamique de plusieurs scénarios de rechargement et explore les interactions complexes entre la dynamique des vagues, le transport sédimentaire et les réponses morphologiques induites par un rechargement. Cette démarche se concentre sur la compréhension des impacts et des effets du rechargement côtier sur l'évolution de la plage et des structures littorales, en tenant compte des variations hydrodynamiques et des changements géomorphologiques résultant de cet apport artificiel. En examinant de près les modèles et les simulations spécifiques appliqués, cette étude vise à éclairer les mécanismes sous-jacents et à fournir des perspectives pour une gestion durable.

6.1.1. Modèle morphodynamique XBeach

L'évaluation précise de l'ampleur, de la localisation et de l'extension des effets des processus physiques côtiers (incluant les transports sédimentaires) sont des éléments essentiels pour la gestion du littoral. Dans ce sens, l'utilisation de modèles décrivant les processus physiques pour simuler les changements morphodynamiques induits par les tempêtes, pour des scénarios historiques ou de projection, est très importante.

Dans cette étude, cette simulation numérique des processus physiques est réalisée sur le site à l'aide du modèle morphodynamique XBeach (eXtreme Beach behavior), pour (i) modéliser les évolutions morphologiques lors de conditions de tempête, et (ii) produire en même temps des modélisations permettant de comprendre et d'évaluer l'impact de deux scénarios de rechargement de plage. Dans ce chapitre 4, la mise en place des outils de modélisation, l'analyse des résultats et une discussion sur les forçages, les scénarios et limites de la méthode sont présentés.

Le modèle XBeach est actuellement l'un des modèles les plus avancé pour résoudre les processus physiques dominant le comportement des systèmes plage/dune en période de tempête (Roelvink et al., 2009). Ce modèle permet de simuler certains phénomènes côtiers sur des secteurs dont l'extension est de quelques kilomètres, avec une résolution jusqu'à l'ordre des quelques décimètres. XBeach est un modèle *open source* qui a été développé suite à l'ouragan Katrina, grâce aux fonds et au soutien de l'US Army Corps of Engineers et d'un consortium regroupant l'UNESCO-IHE, Deltares (Delft Hydraulics), l'Université de Technologie de Delft et l'Université de Miami pour pouvoir évaluer les impacts des ouragans sur les plages de sable. Au-delà des côtes sableuses, le modèle a été appliqué aux récifs coralliens et d'atolls, en coopération avec l'Université d'Australie occidentale, l'USGS, etc. A la demande de l'U.S. Office of Naval Research, le modèle inclut maintenant également les effets de dissipation par la végétation ou autres écosystèmes naturels.

XBeach a été développé à l'origine comme un modèle de résolution de groupes de vagues courtes, permettant de résoudre les variations d'ondes courtes à l'échelle des groupes de vagues et les ondes longues qui leur sont associées. Depuis l'article original de Roelvink et al. (2009), un certain nombre d'options supplémentaires de modèle ont été mises en œuvre, permettant ainsi aux utilisateurs de choisir les échelles de temps à résoudre :

- (i) Mode *stationnaire*, résolvant efficacement les équations de la moyenne des vagues, mais négligeant les ondes infragravitationnelles;
- (ii) Mode *surfbeat* (non-stationnaire) où les variations des ondes courtes à l'échelle du groupe des vagues (enveloppe des ondes courtes) et les vagues longues qui leur sont associées sont résolues ;
- (iii) Mode *non-hydrostatique*, où une combinaison des équations non *Shallow Water* non-linéaires avec un terme de correction de la pression non-hydrostatique est appliquée, permettant de modéliser la propagation et la décroissance des vagues individuelles.

Il résout les équations *Shallow Water*, l'équation d'action des vagues, une équation de transport de sédiment (advection-diffusion moyennée dans la profondeur), les équations d'évolution du fond et les équations pour l'écoulement des eaux dans les nappes phréatiques de surface (turbulences ou pas). La circulation littorale dans la frange côtière est également calculée par le modèle ce qui lui permet d'évaluer le transport sédimentaire et les évolutions morphologiques : érosion, ensablement, submersion de dunes ou de récifs au cours d'événements météorologiques intenses. Les phénomènes pris en compte dans l'équation d'onde des vagues appelée aussi équation d'équilibre d'action des ondes courtes sont la propagation des vagues, la réfraction bathymétrique, la réfraction due aux courants et le déferlement. La diffraction est résolue seulement dans le module non-hydrostatique.

Cependant, le mode non-hydrostatique (de résolution des vagues courtes) nécessite une résolution spatiale très élevée (ordre des décimètres) et des pas de temps extrêmement petits, ce qui rend ce mode beaucoup plus coûteux en termes de calcul que le mode *surfbeat*. Ce dernier, utilisé dans le contexte de ce projet, permet d'obtenir de bonnes résolutions spatiales (ordre du mètre) avec peu d'effets sur les capacités de calcul. Ce modèle résout le "surf-beat", également connu sous le nom de mouvements des houles longues créés par les groupes de vagues. Ces vagues infragravitationnelles sont responsables de la plupart des processus physiques côtiers qui génèrent des impacts sur les systèmes dune-plage.

Pour ce qui est de l'évolution de la morphologie, le phénomène d'avalanche du sable est pris en compte au cours des épisodes d'érosion de plage/dune engendrés par les tempêtes. De plus, XBeach permet de traiter *différentes classes sédimentaires* et de définir des zones *non érodables*. Il offre la possibilité de considérer les processus liés à la nappe phréatique; ce qui permet de tenir compte des phénomènes d'infiltration et d'exfiltration qui jouent un rôle dans l'intensification ou la réduction des courants dans la zone de jet de rive (Valentini and Balouin, 2020). Ce type de modèle permet donc un travail spécifique de simulation de l'érosion du système plage-dune, particulièrement en période de tempête, et calcule des volumes de submersion potentielle, qui peuvent être produits.

Ce modèle numérique est par conséquent un outil permettant la simulation des effets de l'érosion événementielle et potentiellement l'extension de la submersion marine.

6.1.2. Mise en œuvre de XBeach le long de la façade Ouest de l'isthme

Cette partie a pour but de présenter et justifier les scénarios hydrodynamiques (forçages) choisis pour les simulations avec le modèle numérique XBeach (en 2D). L'érosion évènementielle lors de tempête a été simulée pour des événements historiques, avec des périodes de retour de un an puis de 5 à 10 ans (décrites dans la section 6.1.6).

La mise en place d'une modélisation à haute résolution de l'érosion nécessite une représentation détaillée de la bathymétrie et de la topographie du secteur d'étude afin d'assurer un continuum terre-mer. Un travail important de collecte et de traitement de données est nécessaire afin de représenter avec précision ces éléments du site d'étude (parties terrestres, lagune, passes, port, proche côtier, haute mer).

La donnée du levé topographique LIDAR à haute résolution (Illustration 47), constitue le socle des données utilisées pour constituer le modèle numérique pour la modélisation. La partie bathymétrique utilisée et intégrée est celle décrite dans la partie 5.3.1. et comprend les données bathymétriques réalisées par iXBlue pour ce projet.

La représentation de l'occupation du sol et de la nature du sol/fond marin sont des paramètres importants à prendre en compte dans les modèles afin d'assurer une bonne représentation du frottement et des écoulements. Cette occupation du sol doit être prise en compte dans les modèles via un coefficient de frottement variable en fonction des différents types de matériaux (sable, terre, ciment, goudron) ainsi que le type d'urbanisation en fonction de sa densité (Pedreros, 2016). Pour le site, seuls deux types d'occupation du sol sont définis et l'évaluation des rugosités de surface repose essentiellement sur les différences significatives entre le frottement dans le domaine mobile (sable et dune non végétalisée) et un domaine non mobile constitué par la dune végétalisée, l'arrière-dune et la partie urbaine, intégrant donc ces différents types de couvertures.

La formule de la rugosité de Manning a été utilisée dans cette modélisation et introduite dans XBeach. Une valeur du coefficient de Manning de 0.022 est utilisée pour le domaine sous-marin mobile. Afin de prendre en compte la présence des parties rocheuses et graviers sur le fond, la rugosité du fond est augmentée pour réduire les vitesses d'écoulement à ces endroits. Une valeur de 0.04 pour le coefficient de Manning (Chow, 1959) est appliquée dans la partie non-mobile de ce domaine.

Le modèle nécessite de connaître avec précision les sédiments mobilisables, la granulométrie de ces sédiments et les structures côtières rigides. Ainsi :

- Le stock sédimentaire mobile est défini grâce au volume de l'USU (Billy, 2014; Billy et al., 2013 ; Illustration 23), qui permet d'évaluer la hauteur maximale des sédiments pouvant être mobilisés. Les valeurs sont interpolées sur le domaine de modélisation (Illustration 51).
- La granulométrie choisie correspond à celle des sédiments types définis, soit un D_{50} de 125 µm et un D_{90} de 450 µm (approximation suite aux données des granulométries de surface le long de la façade ouest de l'isthme ; Billy, 2014; Robin, 2007; Robin et al., 2013).
- Les structures côtières, comme les enrochements, puis la partie urbanisée (ici bâtiments, routes) ont été considérées comme non érodable.

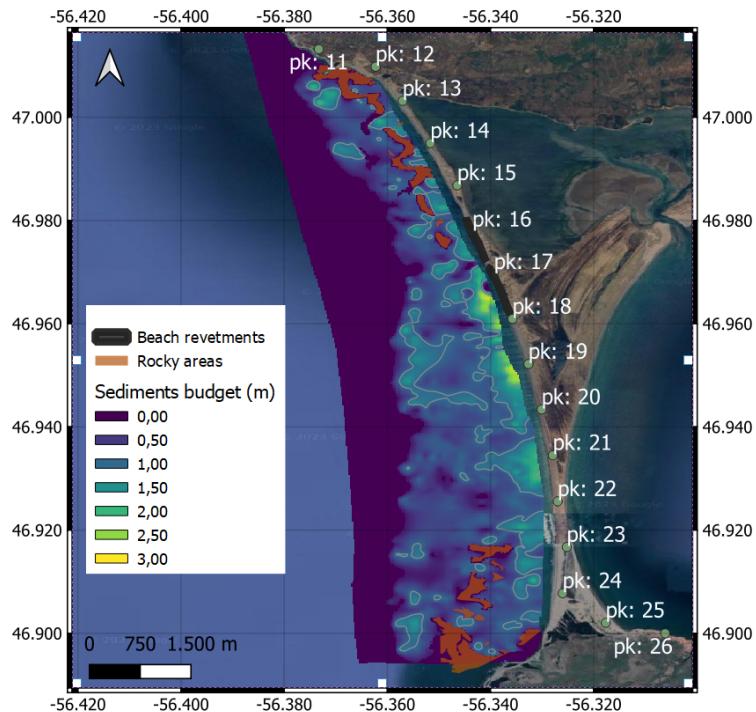


Illustration 51. Budget de sédiments mobilisable dans le domaine et couches des formations rocheuses apparentes (zones non érodables) ; données interpolées issues des travaux de Billy, 2014.

La grille mise en place et l'emprise du modèle XBeach, en mode bidimensionnel, consistent en une grille curviligne, de 961 x 425 mailles (extension de 14 km de long par 8 km de large) avec une résolution spatiale variable construite à partir des données de topographie/bathymétrie issues du MNT (Illustration 52).

- La résolution cross-shore moyenne est de 40 m à la limite au large, descendant à 2 m dans la zone de jet de rive, afin d'assurer une reproduction correcte de la propagation des vagues et une description plus détaillée sur la côte. Ce réglage visant à saisir correctement les changements de la bathymétrie de 15 m à 2 m de profondeur en utilisant un plus grand nombre de mailles, plus proche du trait de côte.
- La résolution long-shore est autour de 10 m sur le secteur d'étude, plus large dans les surfaces latérales du domaine (Illustration 52).

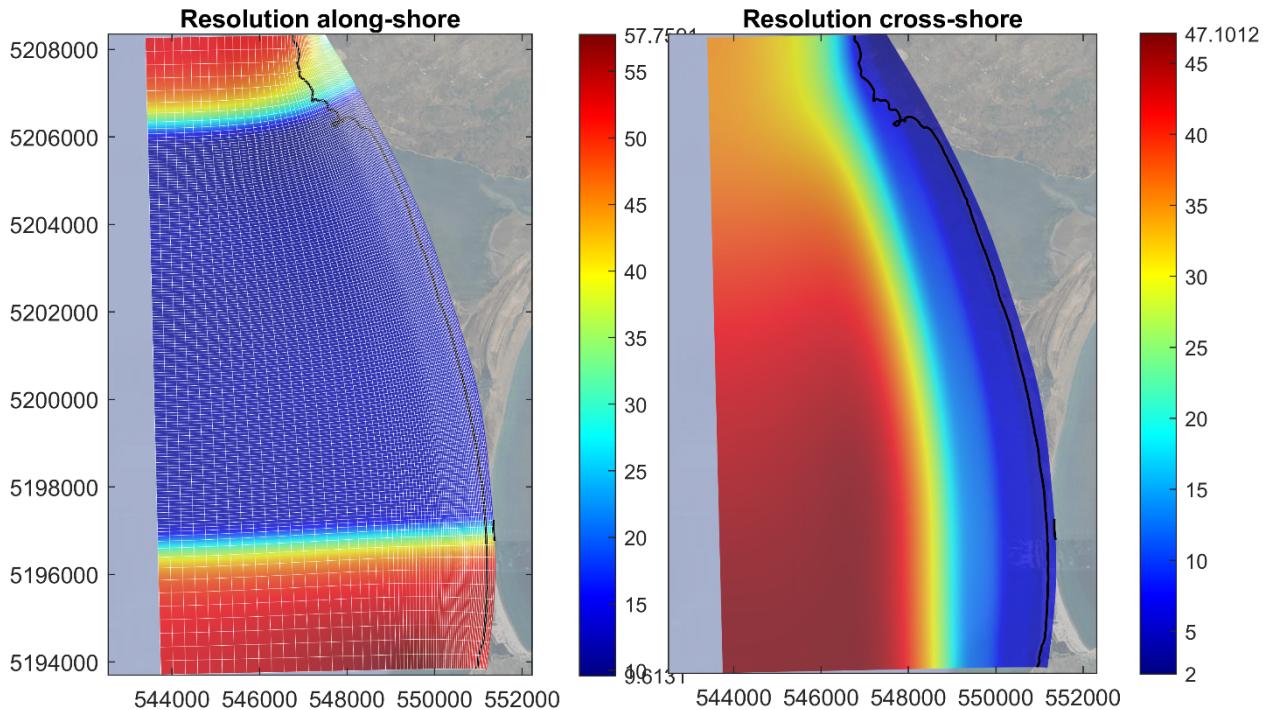


Illustration 52. Grille de calcul de long de la façade Ouest de l'isthme, sur fond de Google Map. Les résolutions spatiales, selon la direction parallèle (longshore) et perpendiculaire (cross-shore), sont montrées, la grille de calcul superposé en blanc, avec une échelle réduite (x8).

6.1.3. Scénarios de rechargement

Le rechargement du littoral consiste à déposer mécaniquement du sable sur le littoral afin d'avancer le trait de côte ou de maintenir le volume de sable dans le système littoral. Il s'agit d'une mesure dites « douce » de protection et de remédiation qui a pour but de préserver la plage dans son état naturel et conserver sa valeur récréative. Le rechargement de plage nécessite une compréhension de base de la variabilité du littoral et de la plage.

Les objectifs des apports de sable peuvent être liés à la formation/restauration d'une plage récréative, le maintien du trait de côte (érosion chronique ou érosion côté légère), le renforcement des dunes contre l'ouverture de brèches (vers la terre ou vers la mer), la protection des ouvrages côtiers (digues, épis, etc.), une simple réduction de l'énergie des vagues arrivant sur le système plage/dune (barres artificielles submergées le long d'un profil non barré) ou de protection et alimentation du système plage/dune (Van Rijn et al., 2011), etc.

Il s'agit d'une mesure temporaire car les processus littoraux naturels (causant l'érosion) restent inchangés. Un entretien régulier est nécessaire (rechargements complémentaires). On peut réduire l'entretien en utilisant un sable relativement grossier comme matériau de remplissage. L'apport de sable peut être réalisé à différents endroits le long du profil et de la côte (Illustration 53), comme sur :

1. **La zone des dunes** (vers la terre et vers la mer au-dessus du niveau de pied de dune) : les dunes sont renforcées/protégées contre les ruptures pendant les tempêtes (Illustration 53 ; *landward et seaward dune reinforcement*).
2. **La zone de plage et haut de plage**: le sable est déversé aussi haut que possible sur la plage pour obtenir une plage récréative en combinaison avec des revêtements, des épis, des brise-lames détachés et des seuils submergés (Illustration 53 ; *beach nourishment*). L'apport de sable peut se faire de deux manières : a) une couche de sable sur la plage (pour une

plage récréative ou pour la protection d'une structure), ou une source continue à un endroit ou plusieurs endroits spécifiques (site de déversement d'une installation de dérivation) ; b) au-dessus de la limite de haute mer (HW) en amont de la section érodée pour le maintien du trait de côte ;

3. **La zone de l'avant-plage** (Illustration 53 ; *soreface nourishment*): des bermes sont construites à partir de matériaux dragués. Le dépôt de sable se localise en eaux peu profondes pour créer une barre artificielle longitudinale et favoriser l'alimentation en sédiments de la plage par les processus de transport vers le rivage ; si des barres sont présentes, la berme est généralement placée sur la partie de la barre vers le large (Van Rijn et al., 2011).

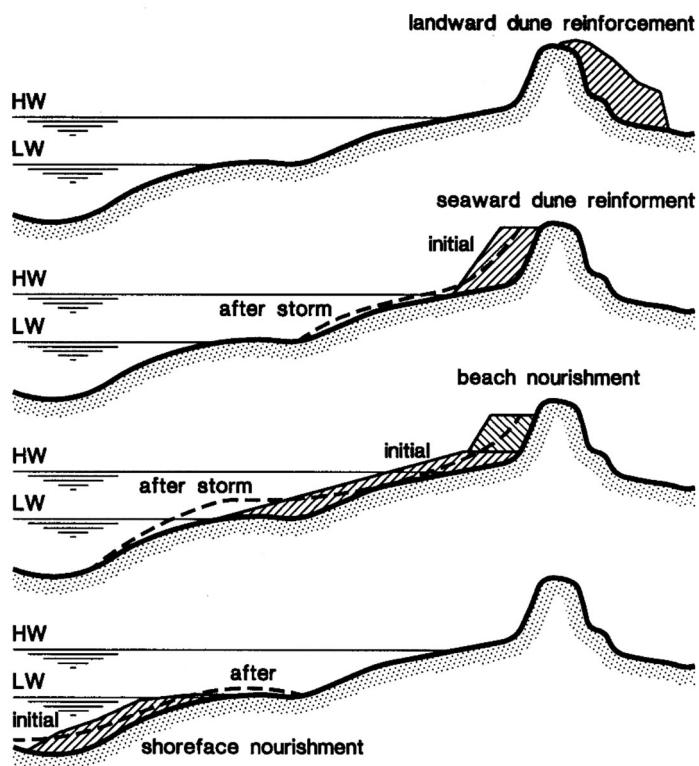


Illustration 53. Type de rechargeement, dune, plage, avant-plage. Profils cross-shore (Van Rijn et al., 2011).

Deux scénarios ont été retenus dans cette étude: le scénario de recharge de plage et celui de recharge de l'avant-plage. La conception des scénarios construits provient les recommandations du Rapport d'étude du CEREMA (Leclerc et al., 2021). Ainsi, la zone à recharger s'étend sur une longueur approximative de 2 km entre le PK15, pour protéger la section du cordon dunaire naturel en recul significatif dû à l'effet de bord de l'ouvrage, et le PK17, où commence au sud la section en enrochements. Le volume de recharge pour les deux scénarios modélisés est de l'ordre de $150 \text{ m}^3/\text{m}$ avec un volume total de l'ordre de $300\,000 \text{ m}^3$ sur cette longueur de 2 km, et une largeur variable selon le profil mais de 70 m en moyenne. L'épaisseur moyenne de sable dans les scénarios est de l'ordre de 1.2 à 3.5 m (en fonction du profil de plage). La morphologie du rechargeement se rapproche du profil naturel de la plage et/ou de l'avant-côte.

6.1.4. Configuration du scénario A : Rechargement de l'avant-plage

Le rechargement de l'avant-plage simulé est représenté dans l'illustration 54 et couvre la zone d'intérêt décrite dans le paragraphe précédent. Trois profils représentatifs sont extraits des simulations (bleu, rouge et vert). Le volume de rechargement est de 309 000 m³ avec une largeur moyenne de 70 m, la largeur moyenne de la crête des profils de rechargement est de 15m.

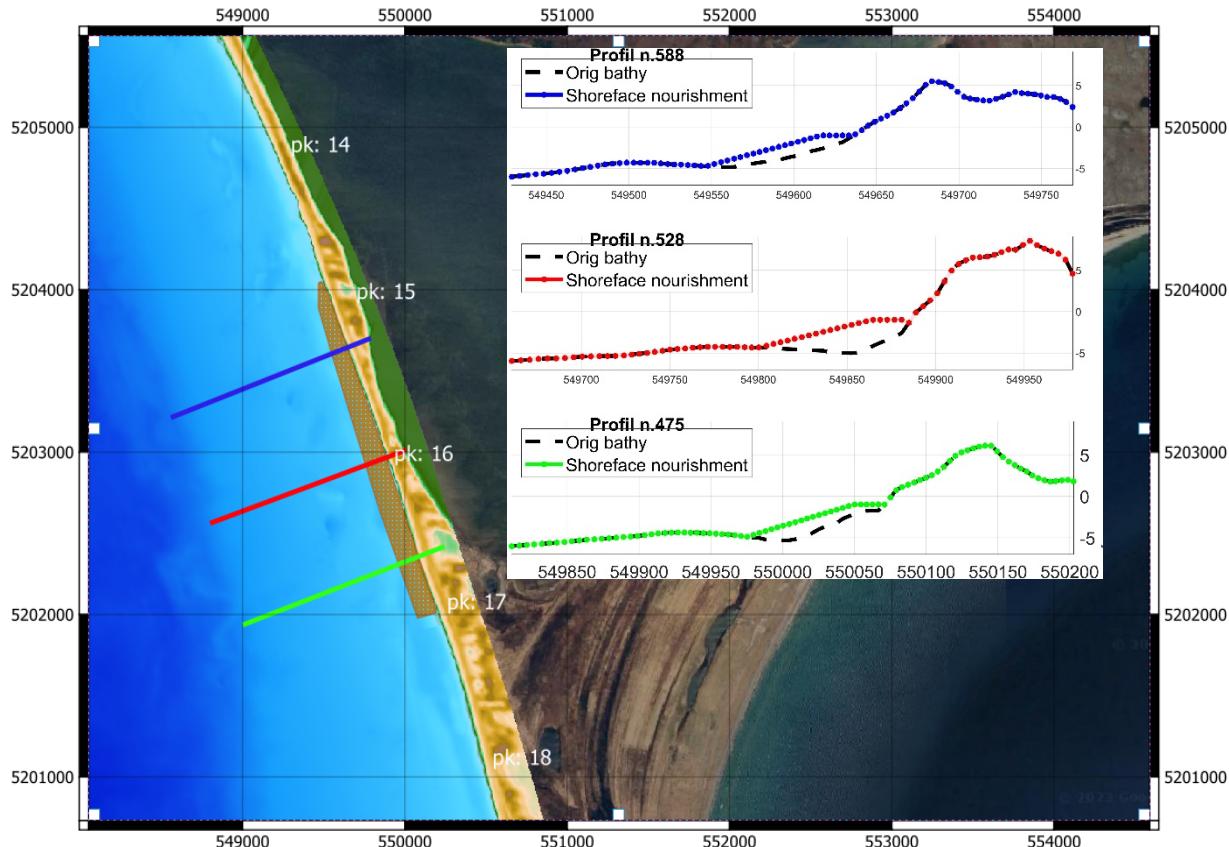


Illustration 54. Scénario de rechargement de l'avant-plage modélisé. Trois profils transversaux représentatifs sont extraits (bleu, rouge et vert) de la zone simulée.

6.1.5. Configuration du scénario B : Rechargement de plage

Le rechargement de plage simulé est représenté dans l'illustration 55 et couvre la zone d'intérêt décrite dans le paragraphe précédent. Trois profils représentatifs sont extraits des simulations (bleu, rouge et vert). Le volume total de rechargement est de 293 631 m³ avec une largeur moyenne de 75 m, la largeur moyenne de la crête de profil de rechargement est de 21m.

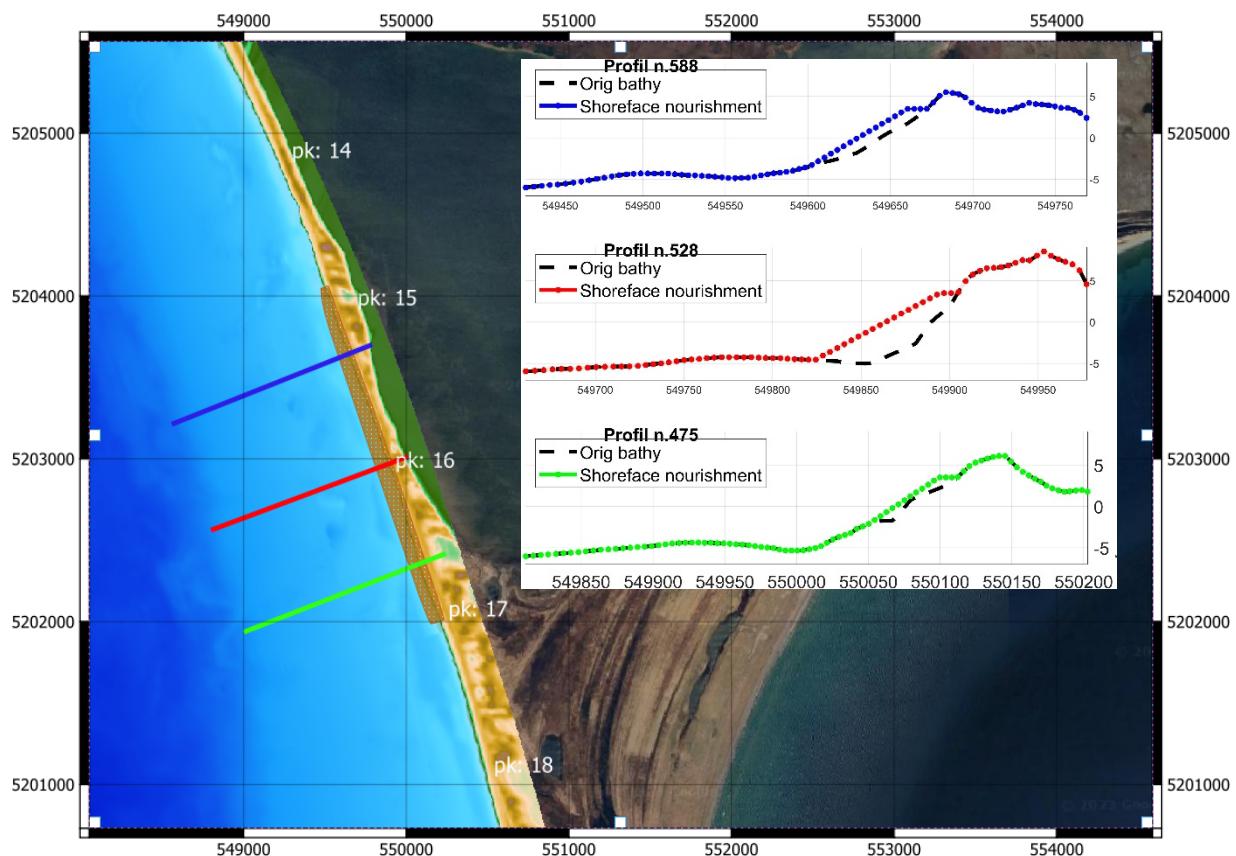


Illustration 55. Scénario de rechargement de plage modélisé. Trois profils transversaux représentatifs sont extraits (bleu, rouge et vert) de la zone simulée.

6.1.6. Tempêtes modélisées

Quatre scénarios hydrodynamiques de tempête ont été modélisés avec Xbeach, pour différentes périodes de retour.

1. Le premier scénario est caractérisé par une succession de trois tempêtes ayant chacune un période de retour autour de 1 ans (Illustration 56). Ce sont les trois tempêtes du 3 Novembre 2007, 16 Décembre 2007 et 02 Février 2008.
2. Le deuxième scénario est caractérisé par une tempête ayant une période de retour de 5 ans (Illustration 61). C'est une tempête de Novembre 2014 qui a été choisie comme référence.
3. Le troisième scénario est caractérisé par une tempête ayant une période de retour de 10 ans (Illustration 66). C'est une tempête de Février 2013 qui a été choisie comme référence.
4. Le dernier scénario est caractérisé par une succession de quatre tempêtes ayant chacune une période de retour égal ou inférieur à 1 an (Illustration 71). C'est la succession de quatre tempêtes des 23 Novembre 2020, 15 Décembre 2020, 22 Décembre 2020 et 06 Février 2021, qui ont été choisies comme références, c'est-à-dire les tempêtes qui ont provoqué les encoches d'érosion sur l'isthme.

Les données du modèle IOWAGA, grille ATNW, décrites précédemment ont été utilisées pour les tempêtes jusqu'en 2016, et celles du modèle IOWAGA en forecast, grille GLOBALE, pour les

tempêtes jusqu'en 2021. Les données de niveau d'eau du marégraphe de Sainte Pierre, SHOM, ont été considérées.

La grille du modèle SWAN, mise en place pour la classification du transport sédimentaire (section 5.3), a été utilisée pour propager les vagues jusqu'à la frontière du modèle Xbeach. Les sorties du modèle ont été extraits avec une fréquence de 1 heure.

On notera les simulations des scénarios de tempêtes de 1 à 4 et les scénarios de rechargement A et B. Ainsi le scénario 2.B correspondra à une tempête ayant une période de retour 5 ans et une configuration de rechargement de plage.

1. Simulation de trois tempêtes, période de retour 1 an

Les trois tempêtes sont caractérisées par une hauteur Hs max autour de 7 m, période de pic respectivement de 14, 11 et 11 secondes et une direction autour du pic de 210°, 230° et 220° (Illustration 56). Le niveau d'eau est faible, au pic de la tempête. La durée de la simulation par Xbeach est de 210 heures au total. Des conditions de transitions entre chaque tempête ont été introduites, avec de Hs de 1m, période de 9s et direction de 270°.

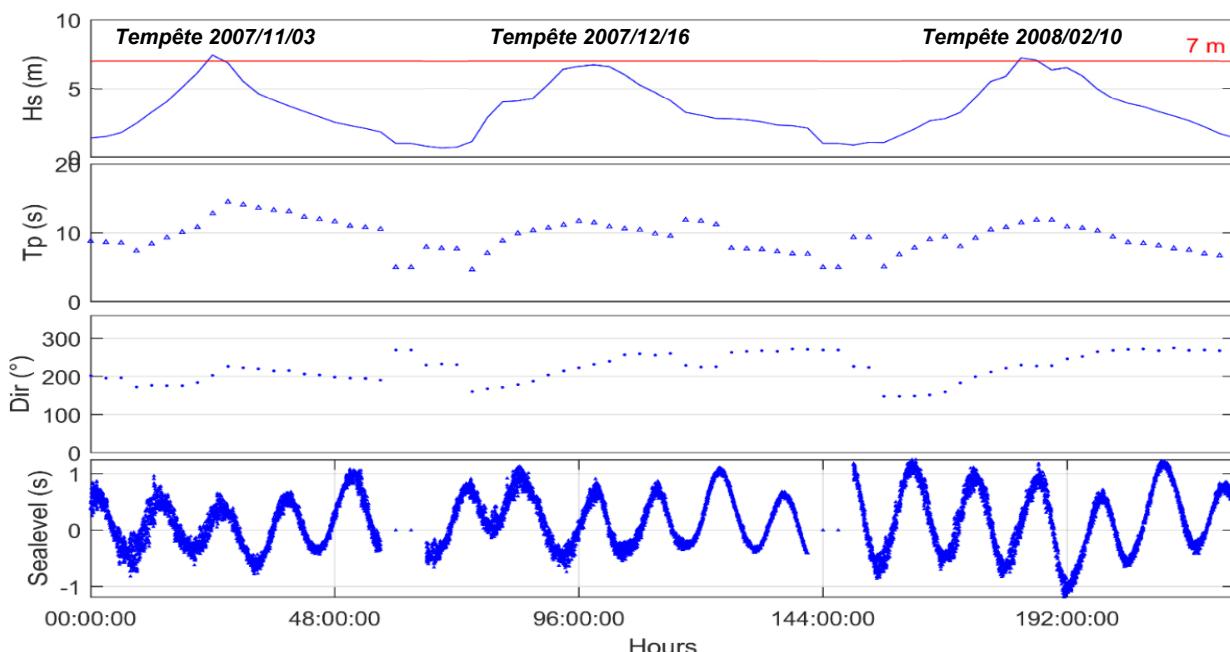


Illustration 56. Caractéristiques d'une succession de 3 tempêtes avec une période de retour de 1 an chacune.

L'évolution morphologique du rechargement de l'avant-plage (Simulation 1-A - Illustration 57) ainsi que les extractions des profils transversaux (à gauche de l'illustration) montrent une variation très importante, avec la perte complète du volume rechargé pour le profil au nord et au sud du secteur (bleu et vert) et une perte du 70% pour la zone centrale (rouge). Le volume total du rechargement, initialement de 309 000 m³, a chuté à une valeur autour 50 000 m³ à la fin de la simulation (Illustration 58). La simulation est réalisée à la fois en considérant une distribution granulométrique du sable dans la zone du rechargement égale à celle en place, ou un quantile

D₅₀ inférieur de 0.106mm. Les résultats sont sensiblement les mêmes pour ces deux granulométries (carrés et ronds bleus).

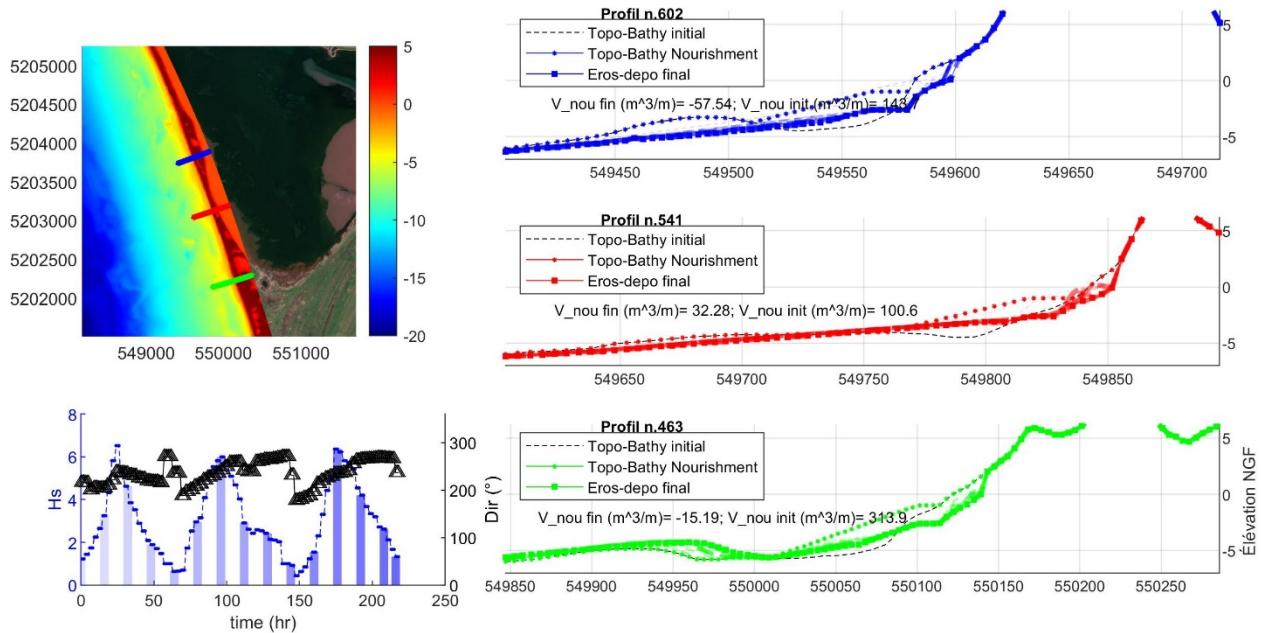


Illustration 57. Évolution morphologique du rechargeage de l'avant-plage pour une succession de 3 tempêtes de 1 an de période de retour, calculée sur trois profils de la grille Xbeach, secteur des Buttereaux (Simulation 1-A).

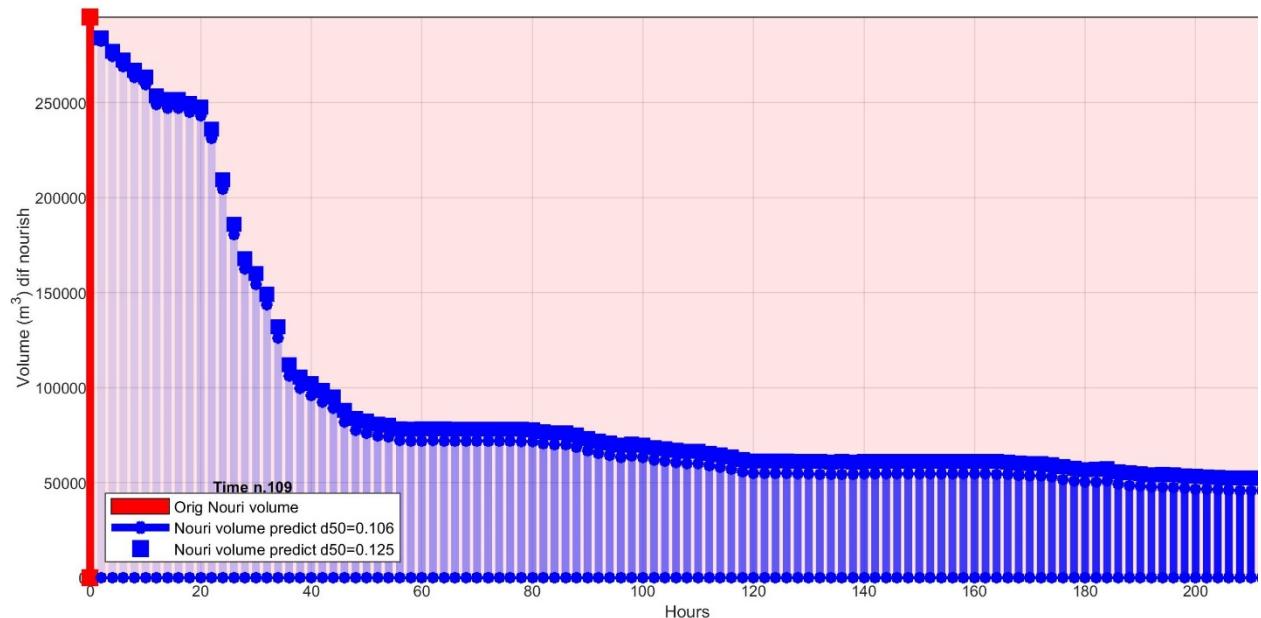


Illustration 58. Évolution du volume total pour le scénario de rechargeage de l'avant-plage au cours du temps de la simulation (succession de 3 tempêtes de 1 an de période de retour ; Simulation 1-A).

L'évolution morphologique du rechargeage de plage dans le secteur des Buttereaux sur les trois profils montre également des variations de volume importante après cette simulation autour de presque 50% d'érosion (Simulation 1-B Illustration 59). Le volume total du rechargeement, initialement de 294 000 m³, est d'autour 150 000 m³/m à la fin de la simulation (Illustration 60), avec une influence de la distribution granulométrique de moins de 3%.

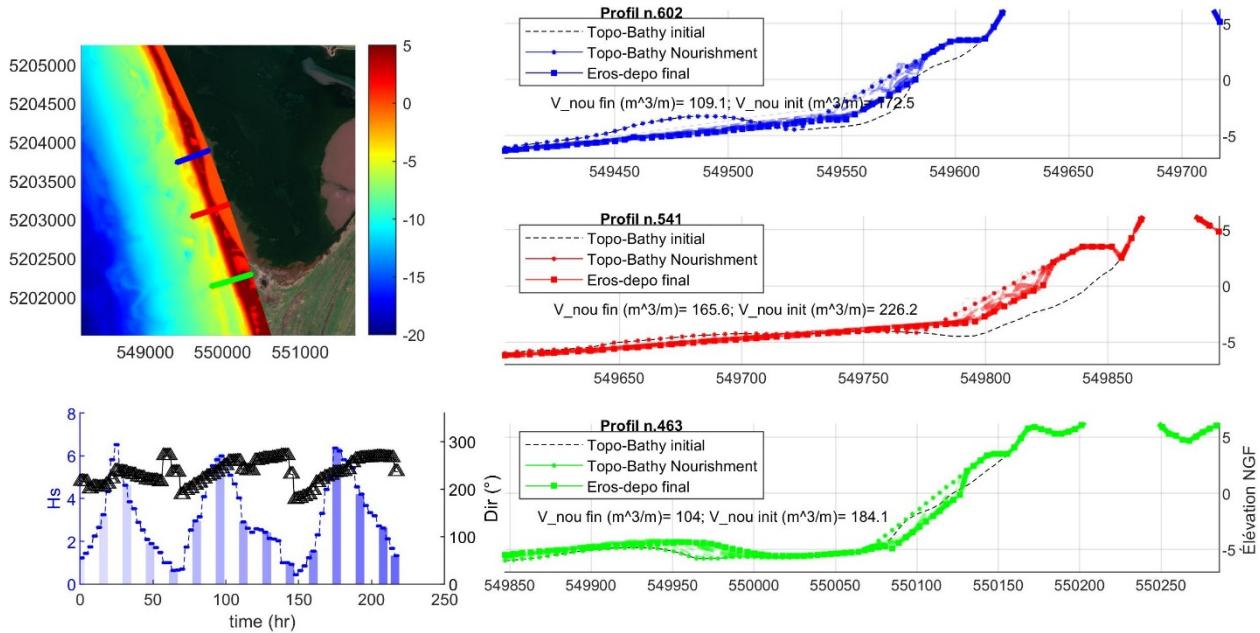


Illustration 59. Évolution morphologique du rechargeement de plage pour une succession de 3 tempêtes de 1 an de période de retour, calculée sur trois profils de la grille Xbeach, secteur des Buttreaux (Simulation 1-B).

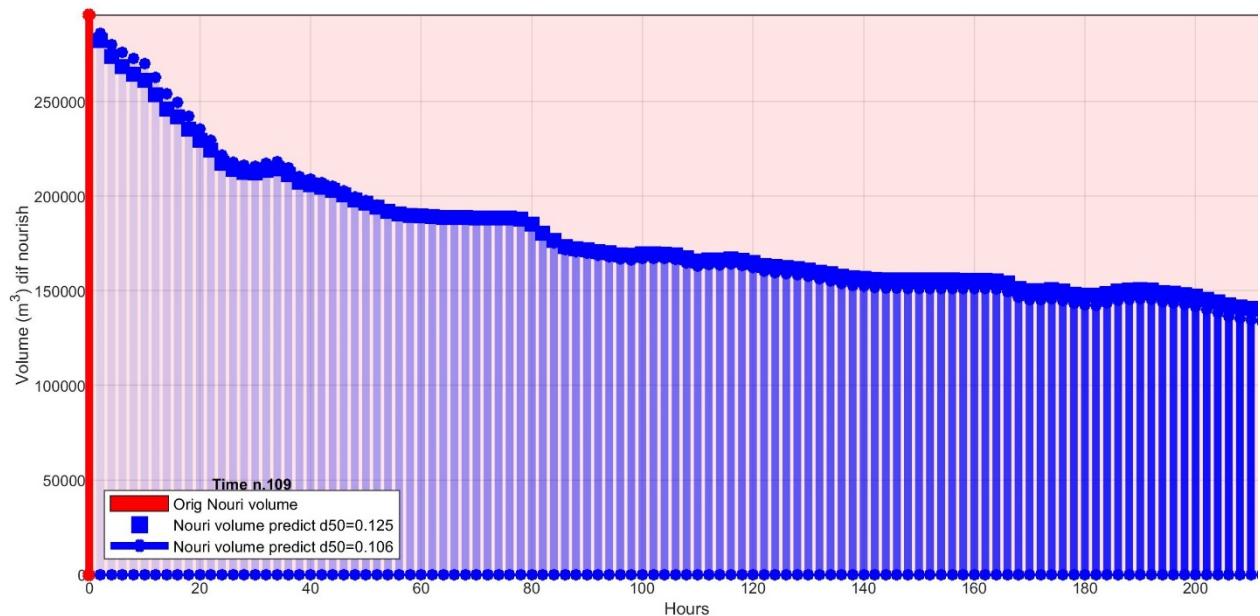


Illustration 60. Évolution du volume total pour le scénario de rechargement de plage au cours du temps de la simulation (succession de tempêtes de 1 an de période de retour ; Simulation 1-B).

2. Simulation d'une tempête de 5 ans de période de retour

La tempête du 8 Novembre 2014 est caractérisée par une hauteur Hs max autour de 8 m, à la frontière de la grille Xbeach, d'une période de pic autour de 11 seconds et d'une direction autour du pic de 255° (Illustration 61). Le niveau d'eau est faible, au pic de la tempête. La durée de la simulation par Xbeach est de 56 heures.

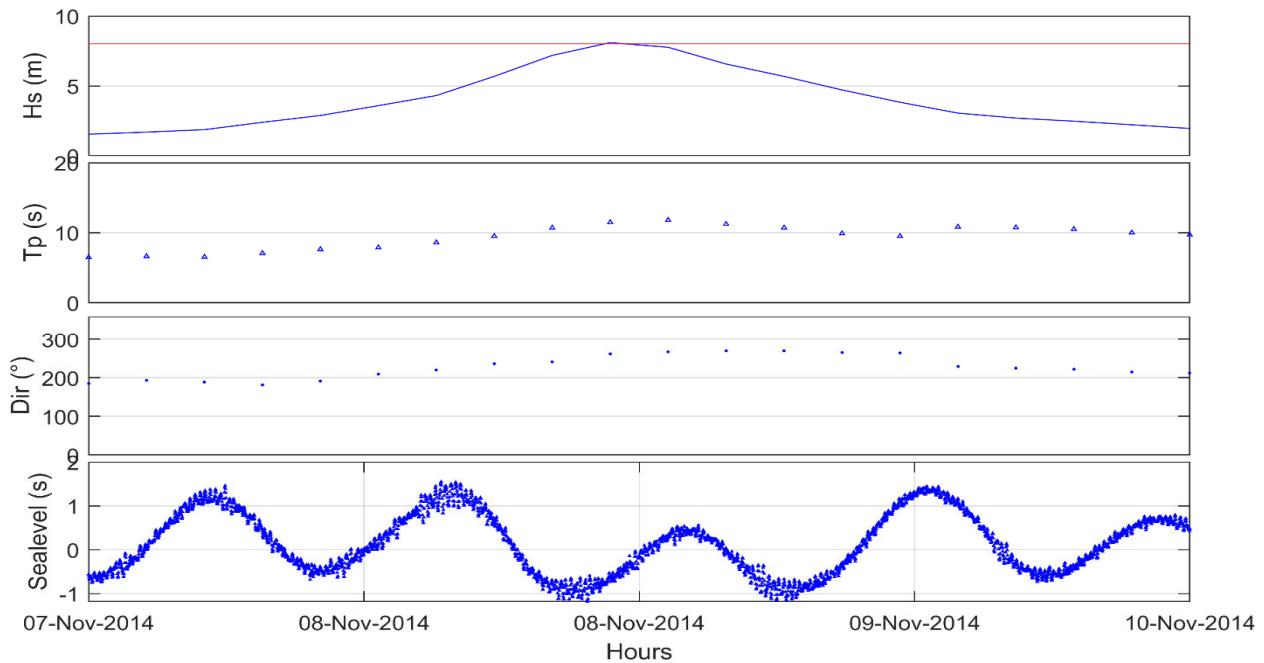


Illustration 61. Caractéristiques d'une tempête avec période de retour de 5 ans.

L'évolution morphologique du rechargeement de l'avant-plage (Simulation 2-A ; Illustration 62), ainsi que les extractions de profils transversaux (à gauche de l'Illustration) dans le secteur d'étude montre une variation significative, avec de grosses pertes de volume, notamment par transport longshore, et une plus faible part par une composante cross-shore, autour de 10% des pertes. Le volume total du rechargeement, initialement de 309 000 m³, est d'autour 110 000 m³/m à la fin de la simulation (Illustration 63). L'illustration montre aussi l'évolution du volume, dans la zone du rechargeement, selon si on utilise une distribution granulométrique du sable égale à celle en place, ou si on considère valeur du quantile D50 inférieur, de 0.106mm.

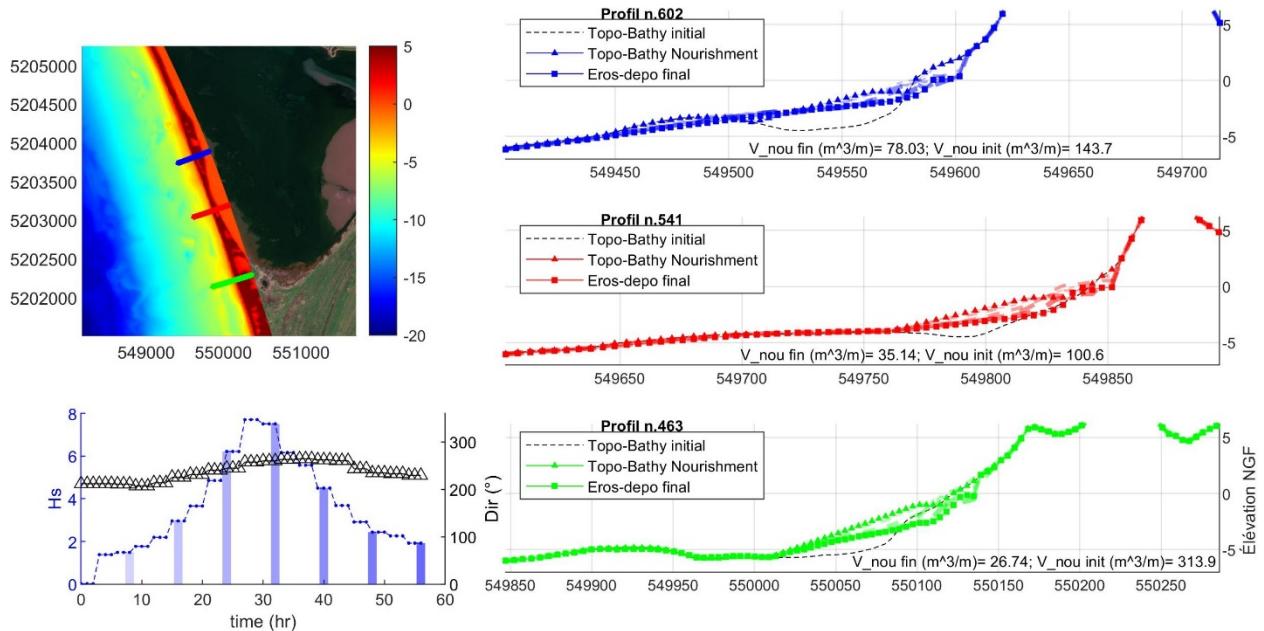


Illustration 62. Évolution morphologique du rechargeement de l'avant-plage pour une tempête de 5 ans de période de retour, calculée sur trois profils de la grille XBeach, secteur des Buttereaux (Simulation 1-A).

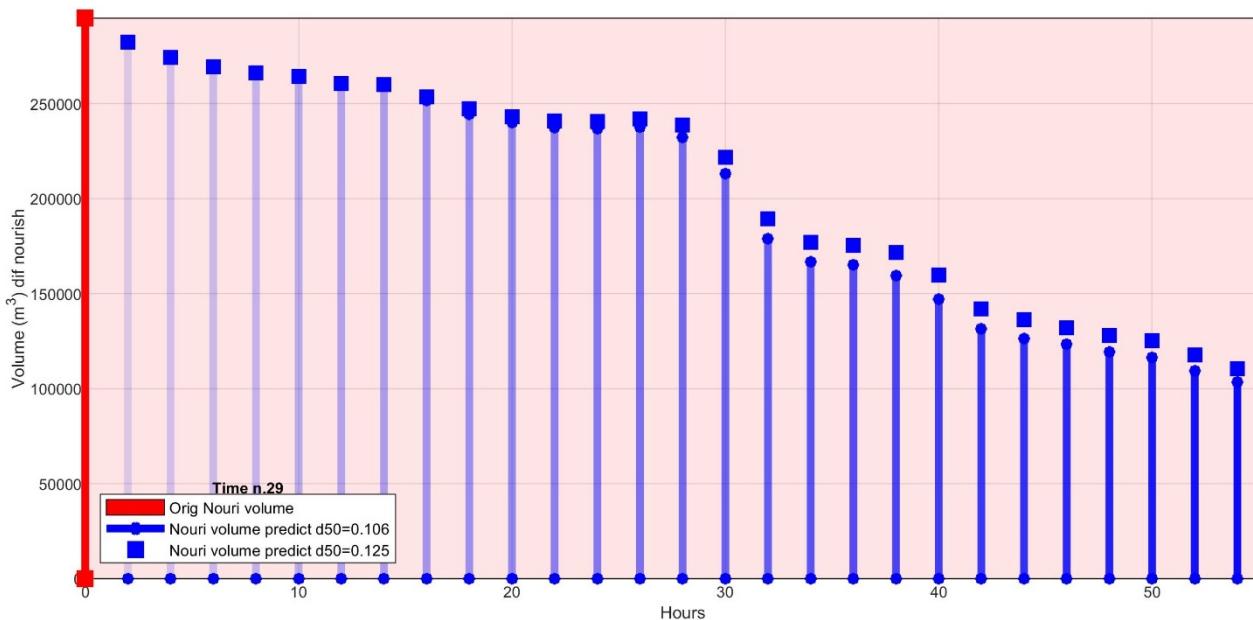


Illustration 63. Évolution du volume total pour le scénario de rechargement de l'avant-plage au cours du temps de la simulation (tempête de 5 ans de période de retour ; Simulation 2-A).

L'évolution morphologique du rechargement de plage dans le secteur des Butteraux sur les trois profils montre des variations contrastées, notamment sur les profils au nord et dans la zone centrale montrent une gagne de quelques dizaines de m^3 de volume, le profil au sud à autour de 50% presque de pertes. Le volume total du rechargement, initialement de 294 000, est d'autour 220 000 m^3/m à la fin de la simulation (Illustration 65), avec une influence de la distribution granulométrique de moins de 5%.

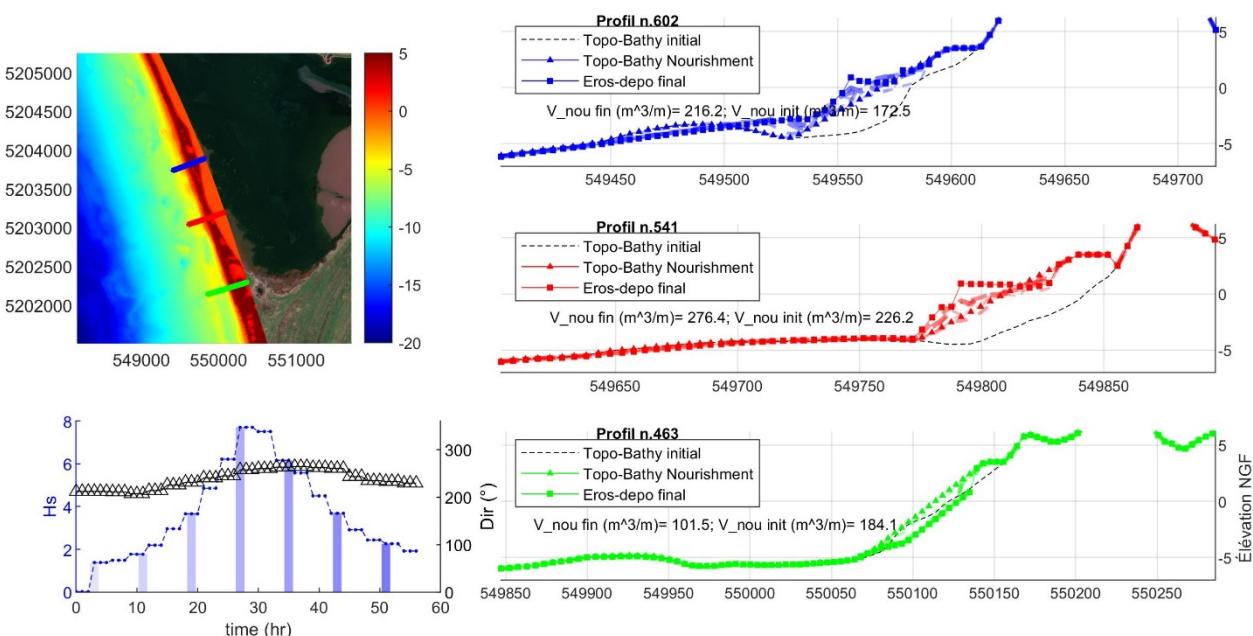


Illustration 64. Évolution morphologique du rechargement de plage pour une tempête de 5 ans de période de retour, calculée sur trois profils de la grille XBeach, secteur des Butteraux (Simulation 2-B).

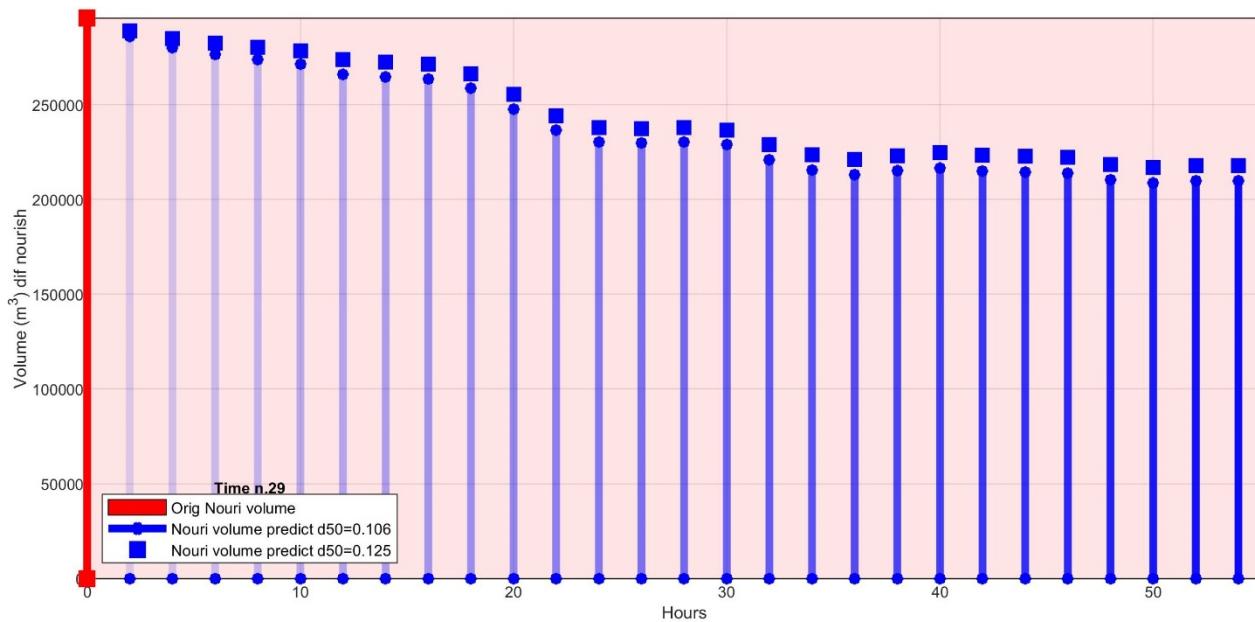


Illustration 65. Évolution du volume total pour le scénario de rechargement de plage au cours du temps de la simulation (tempête de 5 ans de période de retour ; Simulation 2-B).

3. Simulation d'une tempête de 10 ans de période de retour

La tempête du 18 Février 2013 est caractérisée par une hauteur Hs max autour de 9 m, à la frontière de la grille Xbeach, d'une période de pic autour de 14 seconds et d'une direction autour du pic de 230° (Illustration 66). Le niveau d'eau est faible, au pic de la tempête. La durée de la simulation par XBeach est de 78 heures.

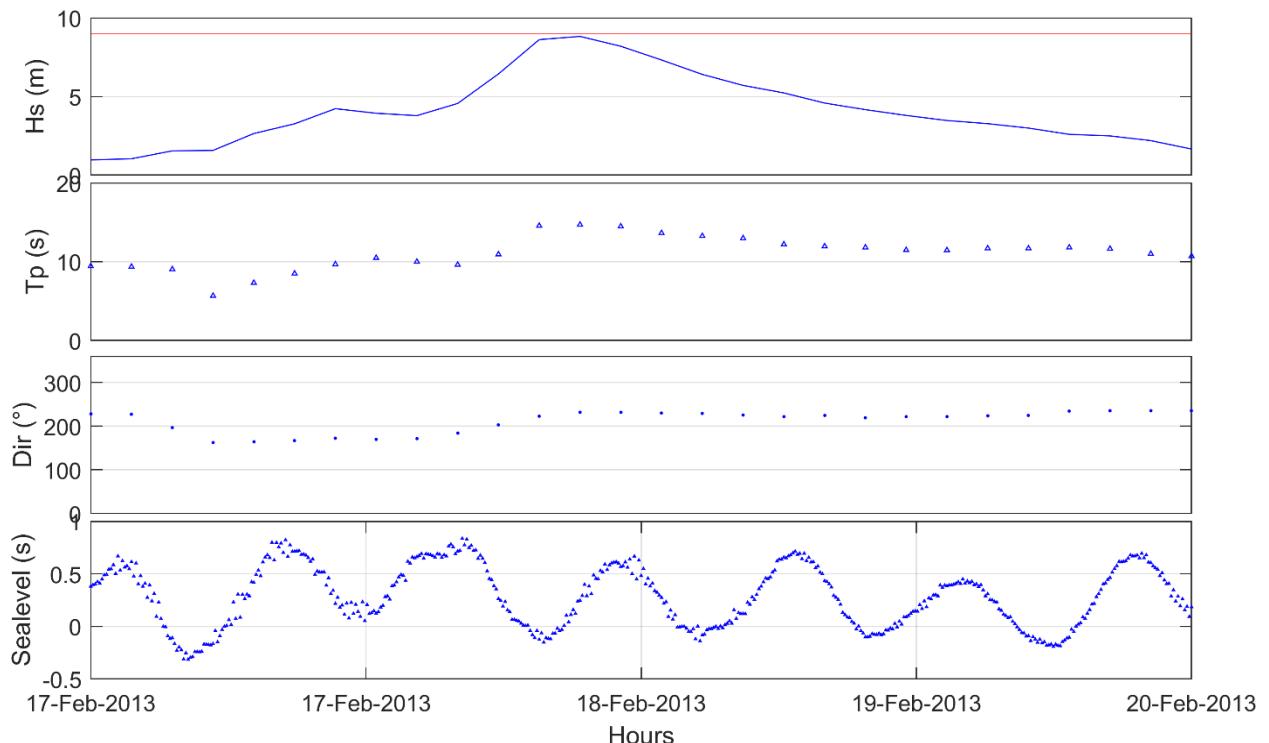


Illustration 66. Caractéristiques d'une tempête avec période de retour de 10 ans.

L'évolution morphologique du rechargement de l'avant-plage (Simulation 3-A ; Illustration 67) ainsi que les extractions de profils transversaux (à gauche de l'Illustration) dans le secteur

d'étude montre une variation très importante, avec perte complète du volume sur le profil au sud (vert) et des pertes de volume autour de 50% sur les autres profils, avec un transport longshore plus importante. Le volume total du rechargement, initialement de 309 000 m³, est d'autour 90 000 m³, à la fin de la simulation (Illustration 68). L'influence de la distribution granulométrique ici aussi de moins de 5%.

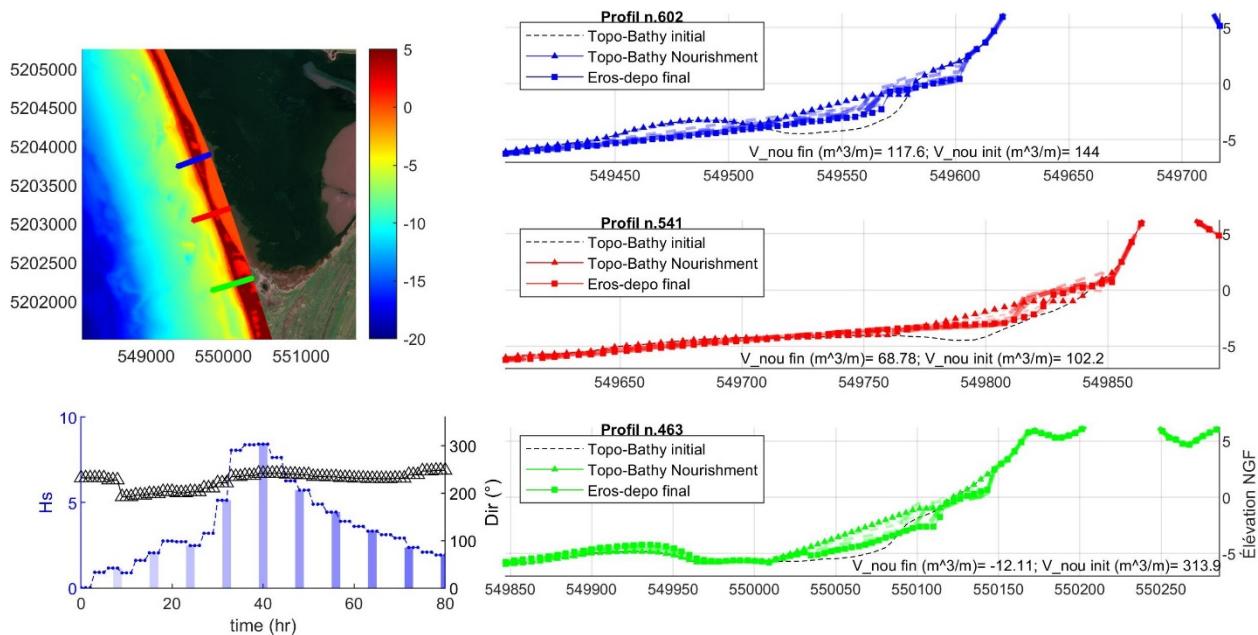


Illustration 67. Évolution morphologique pour le scénario de rechargement de l'avant-plage pour une tempête de 10 ans de période de retour, calculée sur trois profils de la grille XBeach, secteur des Buttereaux (Simulation 3-A).

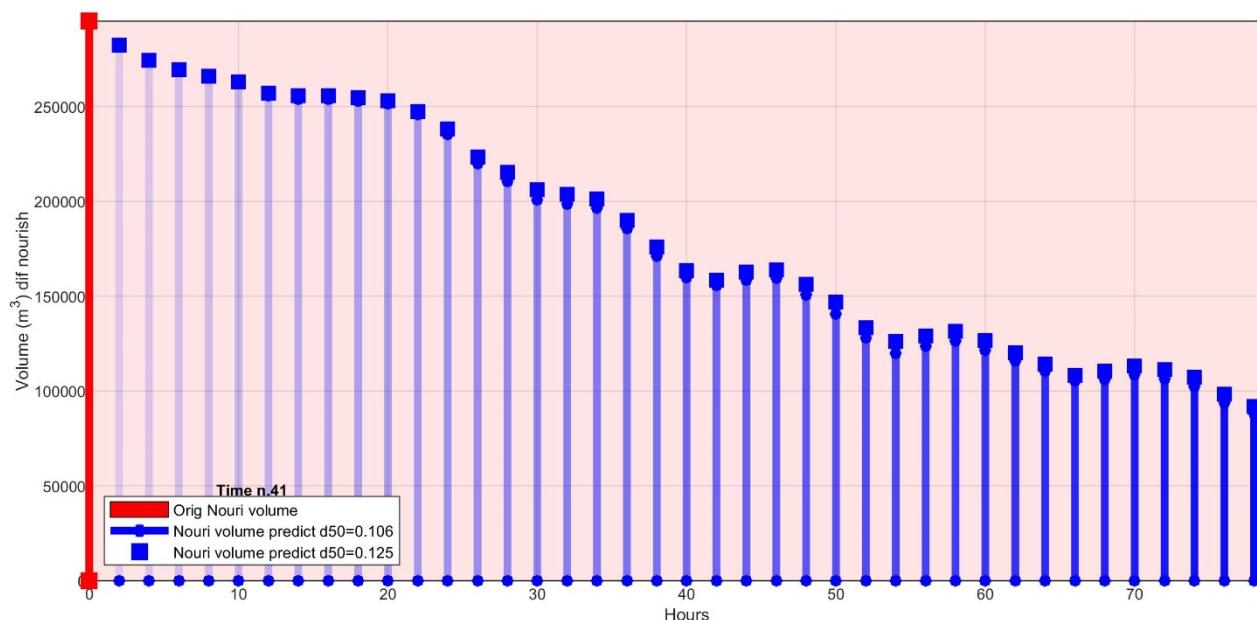


Illustration 68. Évolution du volume total de rechargement de l'avant-plage au cours du temps de la simulation (tempête de 10 ans de période de retour ; Simulation 3-A).

L'évolution morphologique du rechargement de plage montre des variations de volume aux alentours de 30%, en accrétion sur le profil central et celui au nord (rouge et bleu), et autour de 60% en érosion sur le profil au sud (vert ; Simulation 3-B Illustration 69). Le volume total du

rechargement, initialement de 294 000 m³, est autour 240 000 m³ à la fin de la simulation (Illustration 70), avec une influence de la distribution granulométrique de moins de 4%.

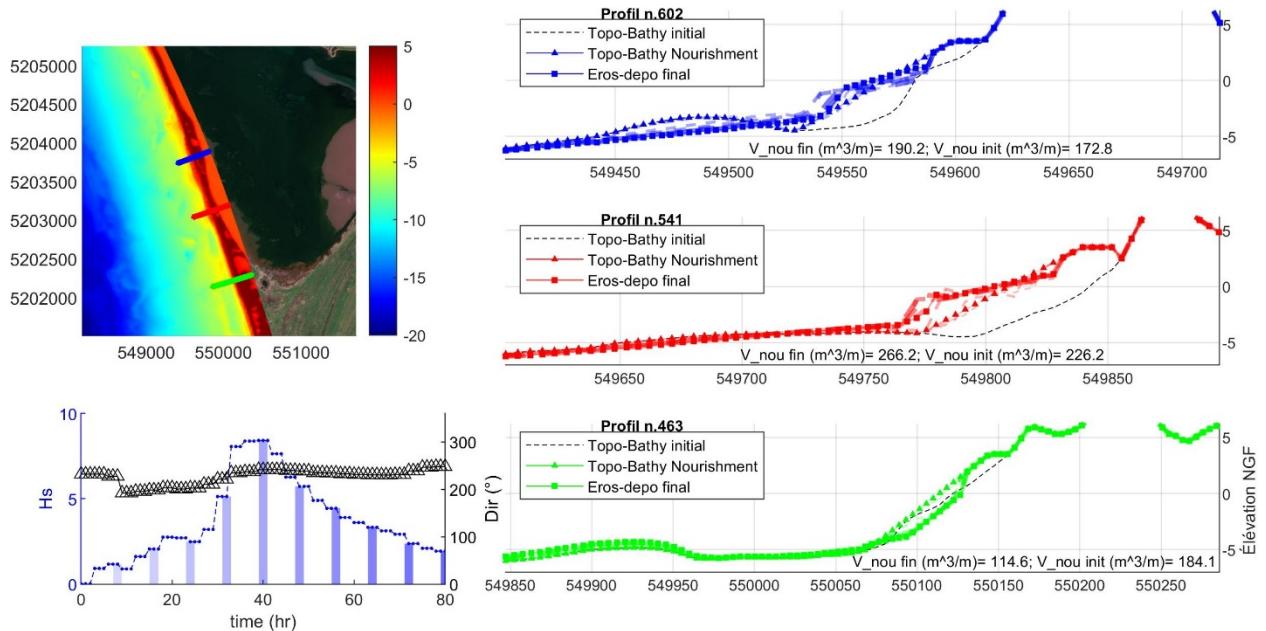


Illustration 69. Évolution morphologique pour un scénario de rechargement de plage pour une tempête de 10 ans de période de retour, calculée sur trois profils de la grille XBeach, secteur des Buttéraux (Simulation 3-B).

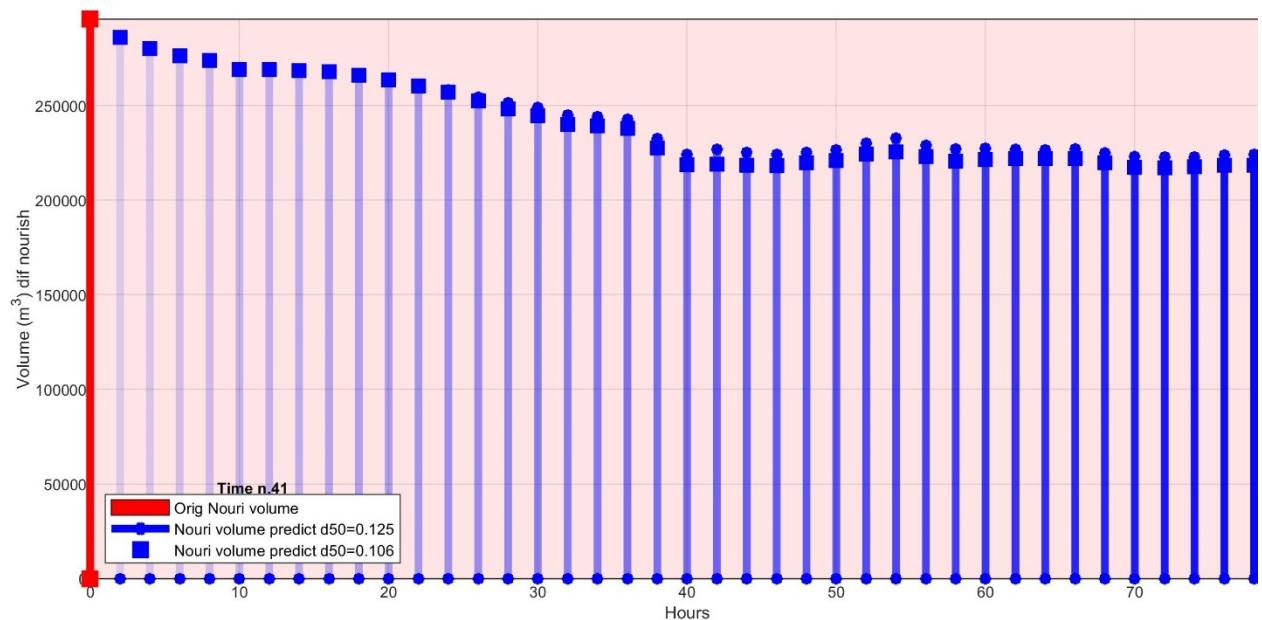


Illustration 70. Évolution du volume total de rechargement de plage au cours du temps de la simulation (tempête de 10 ans de période de retour ; Simulation 3-B).

4. Simulation d'une succession de 4 tempêtes, celles de l'hiver 2020-2021

Le dernier scénario hydrodynamique est caractérisé par quatre tempêtes, modélisées en succession. Ces tempêtes sont la tempête de Novembre, Décembre 2020 et Février 2021. Des hauteurs Hs max autour de 5.5-6 m, période de pic de 11 (pour les premiers trois) et 9 seconds pour la dernière tempête, direction autour du pic respectivement de 270°, 280°, 210° et 220° (Illustration 71). La durée totale de la simulation par XBeach est de 224 heures au total. Des

conditions de transitions entre chaque tempête ont étées introduites, avec de Hs de 1m, période de 6s et direction de 270°.

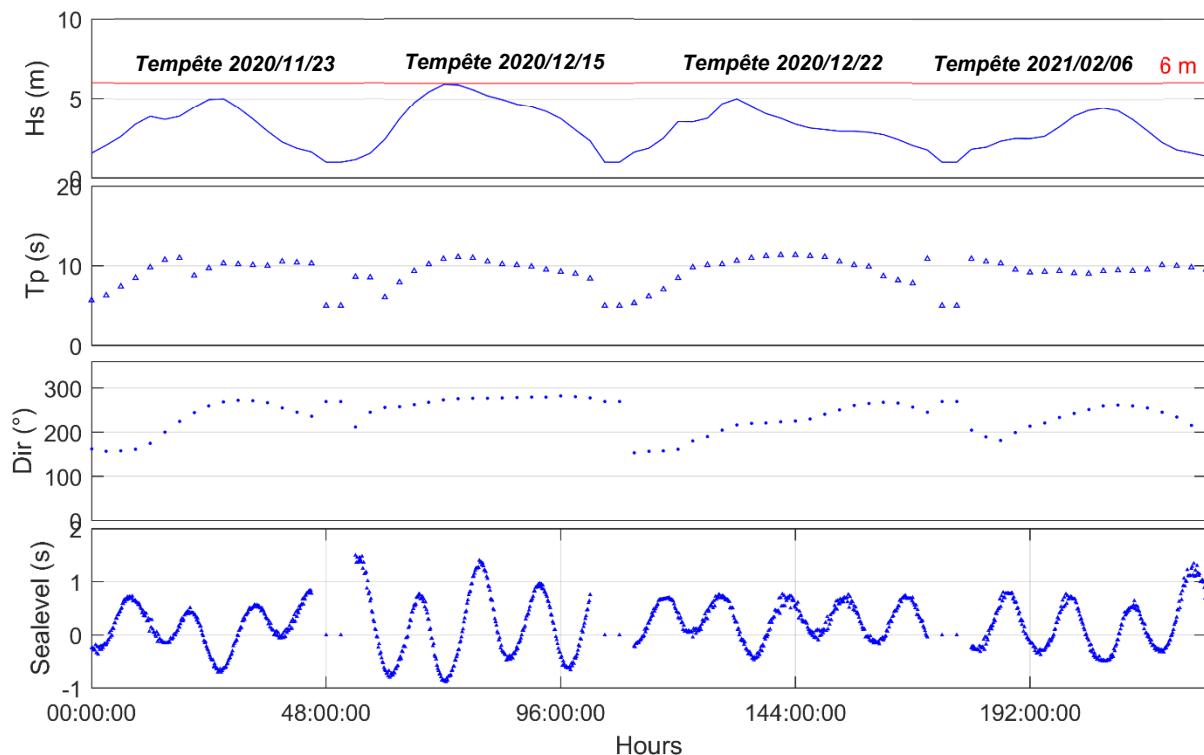


Illustration 71. Caractéristiques de la succession de tempêtes, nov. 2020 à fév. -2021, correspondant à des tempêtes de période de retour autour ou inférieur à 1 an chacune.

L'évolution morphologique du rechargeement de l'avant-plage (Simulation 4-A ;Illustration 72) ainsi que les extractions de profils transversaux, montrent une érosion presque totale. Le volume total du rechargeement, initialement de 309 000 m³ chute à 40 000 m³, à la fin de la simulation (Illustration 73) ; l'influence de la distribution granulométrique reste faible avec moins de 7%.

Identification de stocks sédimentaires en mer et modélisation hydro-sédimentaire le long de la façade ouest de l'isthme de Miquelon-Langlade

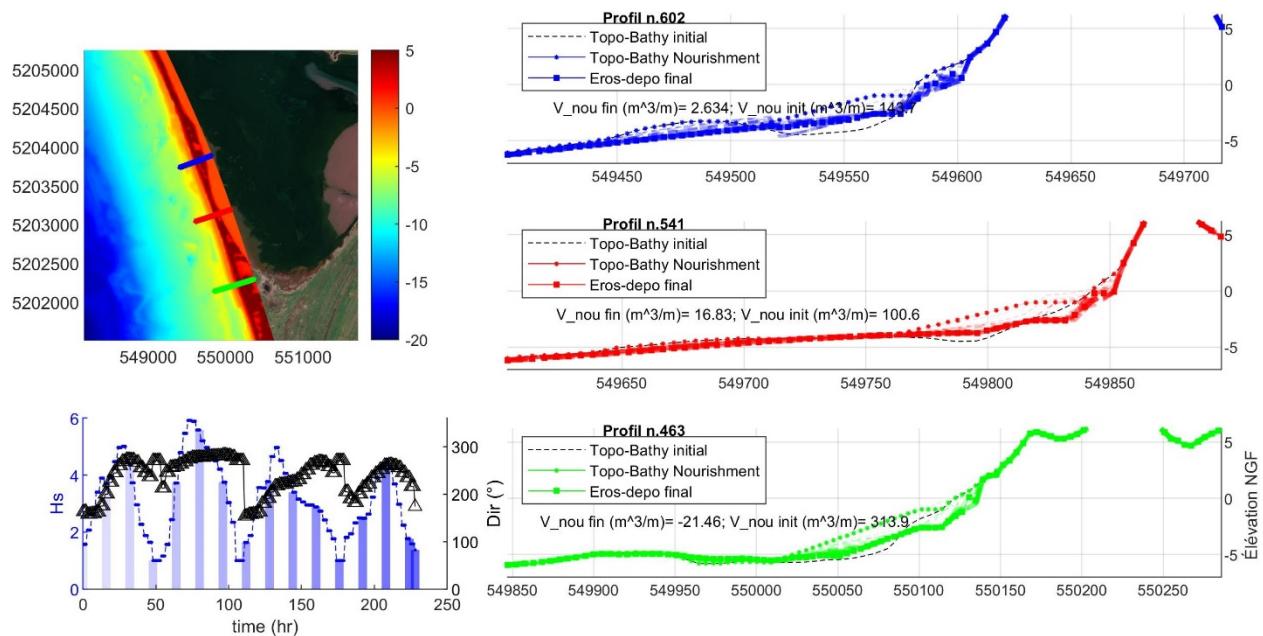


Illustration 72. Évolution morphologique du scénario de rechargement de l'avant-plage pour une succession de 4 tempêtes , celles de nov. 2020 à fév. 2021, calculée sur trois profils de la grille XBeach, secteur des Butteraux (Simulation 4-A).

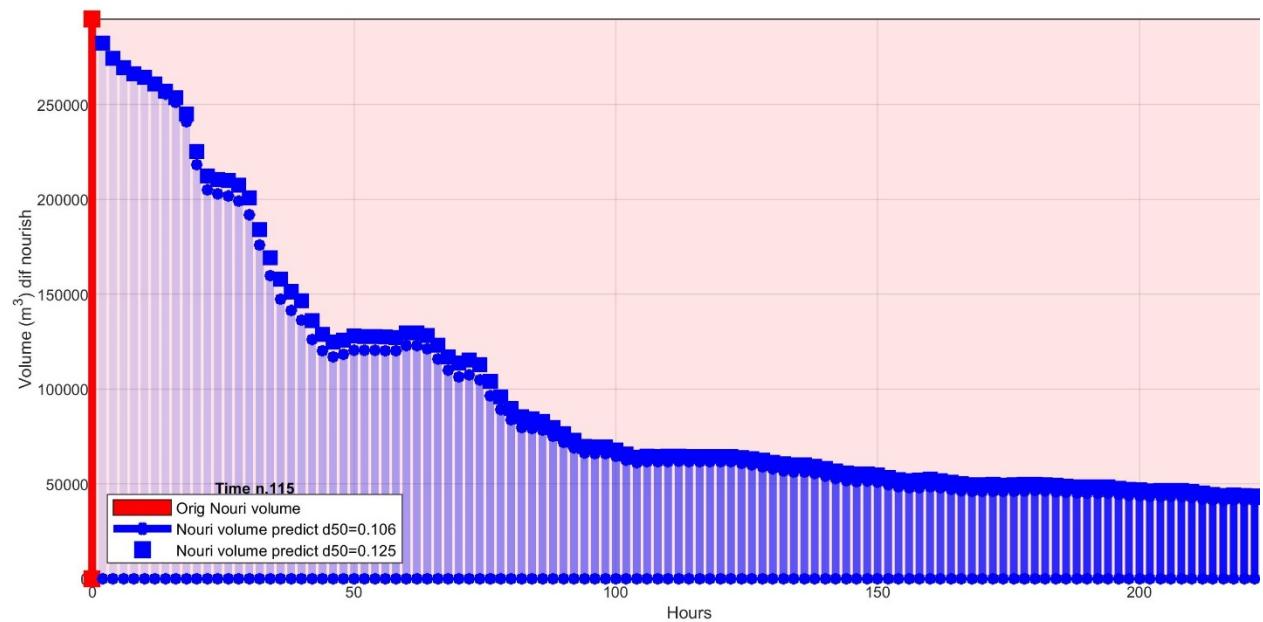


Illustration 73. Évolution du volume total de rechargement de l'avant-plage au cours du temps de la simulation (succession de 4 tempêtes nov. 2020 à fév. 2021 ; Simulation 4-A).

L'évolution morphologique du rechargement de plage montre des variations de volume équivalent à 50%, en érosion sur les trois profils (Simulation 4-B ; Illustration 74). Le volume total du rechargement, initialement de 294 000 m³, est d'autour 125 000 m³ à la fin de la simulation (Illustration 75).

Identification de stocks sédimentaires en mer et modélisation hydro-sédimentaire le long de la façade ouest de l'isthme de Miquelon-Langlade

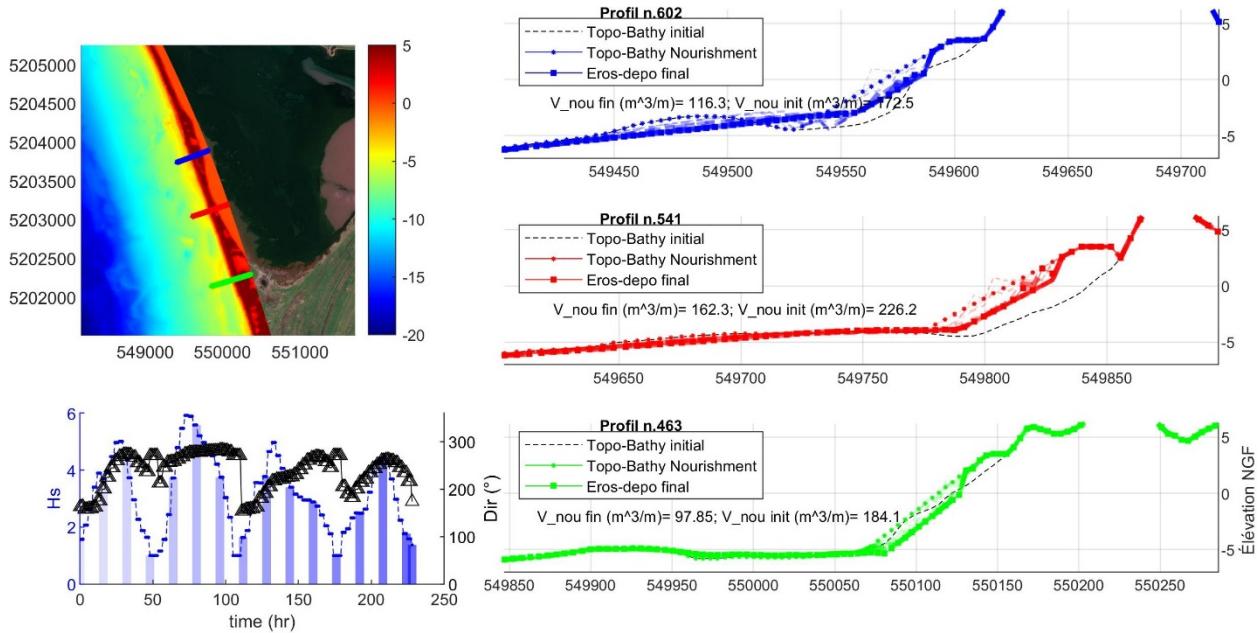


Illustration 74. Évolution morphologique du scénario de rechargement de plage pour une succession de 4 tempêtes, celles de nov. 2020 à fév. 2021, calculée sur trois profils de la grille XBeach, sur le secteur d'étude ; Simulation 4-B).

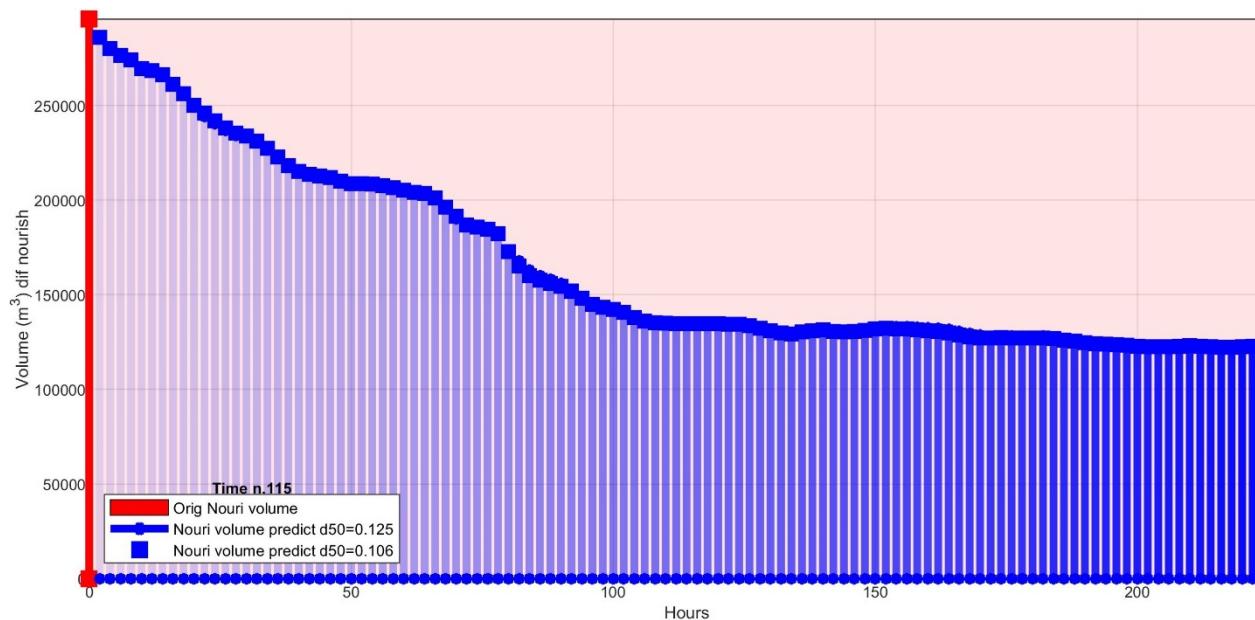


Illustration 75. Évolution du volume total de rechargement de plage au cours du temps de la simulation (succession de 4 tempêtes nov. 2020 à fév. 2021 ; Simulation 4-B).

5. Synthèse des simulations XBeach pour les 2 scénarios de rechargements et les 4 conditions hydrodynamiques

Le modèle morphodynamique a été mis en place avec toutes les informations et les connaissances récentes disponibles sur le site, telle que géologiques (épaisseur de couches de sédiments), topo-bathymétriques. Des incertitudes restent sur les résultats des simulations de XBeach, qui a été mise en place avec un paramétrage dérivé de la littérature (Elsayed and Oumeraci, 2017 ; Nederhoff et al., 2015; Splinter and Palmsten, 2012), employé dans des contextes similaires, malheureusement l'absence de mesures hydrodynamiques et morphologiques post-tempêtes ne permettent pas d'effectuer une calibration locale ad-hoc. Il est également rappelé ici que XBeach ne peut pas modéliser le comportement de déstabilisation d'un ouvrage.

Les résultats de l'ensemble des 8 modélisations, pour les 4 conditions hydrodynamiques et les 2 scénarios de rechargement, sont synthétisés dans le Tableau 10. Ce tableau représente, en pourcentage, la perte de sédiment sur la zone du rechargement (configuration A et B) suite à une tempête ou une succession de tempêtes.

Les scénarios de rechargement de la plage (rechargement B) montrent des pertes de sédiments moins importantes pour les 4 scénarios de conditions hydrodynamiques simulés, que ceux simulés pour le rechargement de l'avant-côte (rechargement A).

Les comportements du système avant-côte / Plage sont proches pour les deux conditions de tempêtes fortes, période de retour 5 ans et 10 ans. On note tout de même une perte de sédiment plus faible pour les conditions hydrodynamiques d'une tempête de p.r. de 5 ans (64 % et 26 %, respectivement pour les scénarios de rechargement A et B ; Tableau 10) que pour celle de p.r. de 10 ans (70 % et 27 %).

Les simulations de trois tempêtes de période de retour 1 an (simulation 1) et celle d'une série réelle de 4 tempêtes de période de retour égale ou inférieure à 1 an, sont proches.

De plus, on constate que quel que soit le scénario choisi, l'influence de la distribution granulométrique reste faible. Cela peut s'expliquer par la proximité de ces deux classes granulométriques choisies pour l'étude.

Tableau 10. Pourcentage de volume de rechargement perdu dans la zone de rechargement pour les deux scénarios de rechargement de plage et avant-plage et 4 conditions hydrodynamiques (p.r. période de retour).

	Volume perdu	
	A - Rechargement avant-plage	B - Rechargement plage
Simulation 1	3 Tempêtes 1 an p.r.	84% 54%
Simulation 2	1 Tempête 5 ans p.r.	64% 26%
Simulation 3	1 Tempête 10 ans p.r.	70% 27%
Simulation 4	4 Tempêtes en 2021	87% 59%

La succession des tempêtes de l'hiver 2020-2021, très morphogènes, ont conduit à une déstabilisation quasi-généralisée de l'ouvrage de haut de plage et un effet de bord significatif au nord du PK16 (CEREMA ; Leclerc et al., 2021). Le modèle XBeach traite les ouvrages comme des surfaces non érodables, il ne permet donc pas de simuler des déstabilisations d'ouvrages comme ceux cités précédemment. Néanmoins, un focus a été fait sur un profil (n°549) situé sur la partie nord de l'ouvrage de protection (PK16 ; Illustration 76), en comparant le comportement morphodynamique de la plage pour des scénarios de rechargements 4A et 4B avec une simulation sans recharge dit « naturel » (Illustration 77).

Ainsi, pour la simulation dans un contexte dit « naturel », à la fin de la succession des 4 tempêtes la modélisation mets en lumière la formation d'un important talus d'érosion (autour de 2m de hauteur, entre 0 et 2 m d'altitude; Illustration 77a.). Même si dans le cadre des modélisations XBeach l'ouvrage est considéré comme une surface non-érodable, ce talus d'érosion a sûrement dû déstabiliser l'enrochemet localisé à proximité directe. Pour le scénario 4A, rechargement de l'avant-plage (Illustration 77b), le profil subit une évolution similaire, avec cependant un talus moins prononcé. Par contre pour le scénario 4B, même si on y constate une marche d'érosion du haut de plage, on constate que le rechargement de plage joue un rôle tampon (Illustration 77c). Malgré une érosion de ce rechargement, on constate qu'une grande partie est restée en place, ce qui permettra de continuer à « protéger » la zone littorale de prochains évènements de tempêtes.

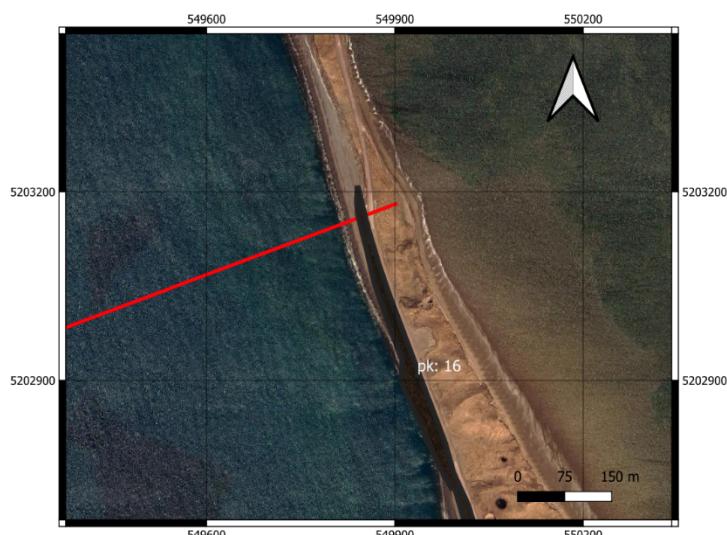


Illustration 76. Localisation du profil n°549, situé à l'extrême nord de l'ouvrage de protection.

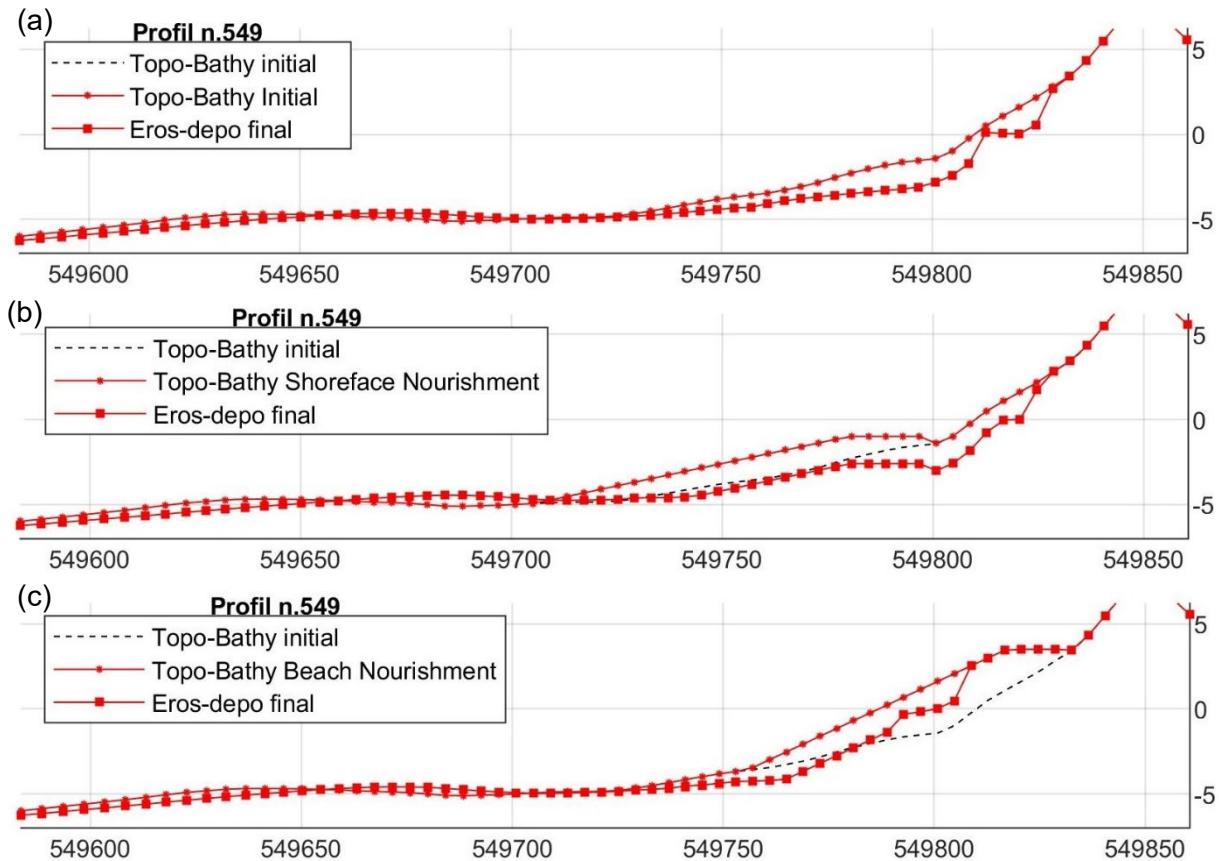


Illustration 77. : évolution morphologique du profil n°549, au nord du PK16 pour un scénario de topo-bathymétrie (a) sans rechargeement, (b) avec rechargement de l'avant-plage et (c) avec rechargement de plage.

7. Conclusion

7.1. IDENTIFICATION DES STOCKS SEDIMENTAIRES EN MER

Au large de Miquelon, on constate qu'il y a un potentiel intéressant de stocks sédimentaires, que ce soit en terme d'épaisseur des dépôts, de volumes estimés ou de granulométrie. Trois zones ont été identifiées dans cette étude dont l'estimation de l'épaisseur des dépôts sédimentaires est comprise entre 8 et 20 m. Deux des zones sont comprises entre 45 et 85 m de profondeur, donc au-delà de la profondeur de fermeture, pour une distance de la côte comprise entre 1 et 3 milles. La 3^{ème} est plus au large mais également plus profonde (80 et 95 m de profondeur). Au vu des connaissances sur le secteur, une activité d'extraction ne devrait pas perturber la dynamique littorale sur les petits fonds ou celle du trait de côte à proximité de Miquelon. Toutefois, on constate que les zones de gisements potentiels sont proches des activités de pêches, culture marine (AOT) et de câbles numériques, on peut également ajouter à ceci le trafic maritime (ferries, plaisance, porte-conteneur). Il est également stipulé dans le DSBM que les activités de dragages ne sont pas autorisées à moins de 3 milles nautiques de la côte. De plus, une opération de dragage à des profondeurs supérieures à 80 mètres rendra plus difficile la faisabilité de l'extraction de sédiments (difficultés techniques et coûts). Ces critères rendent donc difficile une extraction de sédiment sur ces zones (conflits d'usages, répercussion environnementales liées à une activités d'extraction, utilisation raisonnable des ressources).

Le long de la façade Est de l'Isthme, trois unités sédimentaires se superposent et constituent un dépôt en forme de lobe. Malgré la superposition de ces dépôts, l'épaisseur est modérée et surtout mal connue à proximité du littoral. Ces dépôts sédimentaires sont en connexion direct avec l'avant-côte et la dynamique sédimentaire de cette façade. Aucune modélisation hydro-sédimentaire/morphodynamique le long de la façade Est de l'isthme n'existe. Une extraction trop proche du littoral est à proscrire car elle engendrerait des répercussions directement sur la dynamique de l'avant-côte/plage qui déstabiliserait ce secteur. Les conséquences d'une extraction de sable à la limite de la profondeur de fermeture (entre 10 et 15 m de profondeur) sont difficilement prévisibles, et un impact sur la dynamique de l'avant-côte/plage de ce secteur serait un risque non-négligeable à considérer. De plus, sur la partie la plus distal de ce stock, le substrat est recouvert d'une faible épaisseur de sable (1-2 m), ce qui ne présente pas des conditions conseillées pour une zone de gisement pour un dragage. Là aussi les stocks identifiés sont à moins de 3 milles de la côte.

En se basant sur les éléments de connaissances concernant les stocks sédimentaires, leur localisation ainsi que le DSBM : aucune des quatre zones identifiées ne répond totalement aux critères pour être un gisement pour de l'extraction de sédiments marins.

7.2. MODELISATION MORPHODYNAMIQUE

Pour ce site, le but du rechargement en sable est de créer une zone tampon sécuritaire en apportant du sable sur la plage et/ou l'avant-côte, atténuant ainsi l'érosion causée par les tempêtes et protégeant la base des ouvrages côtiers. Cette gestion dite « douce » a été étudiée ici au niveau du secteur PK15-PK17 qui a subi les impacts des tempêtes de l'hiver 2020-2021 et qui connaît également de l'érosion dû aux effets de bord de l'enrochement. Afin de permettre une meilleure compréhension des processus de dynamique hydro-sédimentaires, avec les données

les plus cohérentes et récentes, et permettre une modélisation morphodynamique fine et détaillée, une enchaînement d'analyses a été menée.

La base de données de vague rétrospective IOWAGA, filtrée des événements cycloniques, a été utilisée dans cette étude. Ces données ont permis de produire une estimation fiable du transit sédimentaire le long de la façade Ouest de l'isthme. Des statistiques précises concernant le climat des vagues ont été réalisés sur trois points au large de l'archipel (Nord, Sud et Ouest) ainsi qu'une classification statistique des familles de vagues (algorithme de regroupement K-Moyennes ; initialisation des groupes par MDA (De Queiroz et al., 2019)). Cela a permis d'identifier 12 classes de vagues caractéristiques du site. Afin de pouvoir déterminer la dynamique hydro-sédimentaire et notamment le flux de sédiments longshore, un travail de modélisation (modèle de vague spectrale SWAN) a été réalisé pour propager ces 12 classes de vagues au large de la zone d'étude. En effet, bien que reproduire les caractéristiques des vagues à la côte soit complexe, au large du site d'étude les caractéristiques peuvent être synthétisées à partir de la classification statistique (points considérés : Ouest et Sud de l'Archipel).

En termes de dynamique sédimentaire, les taux de transports calculés divergent d'une formule à l'autre (Illustration 50) mais l'ordre de grandeur est cependant le même. Le transit littoral évalué à partir de la formule de Kamphuis (2002), et les résultats du modèle SWAN, indique (§ 5.3.3) (i) pour le Nord de l'isthme un transit de l'ordre de 67 000 m³/an vers le sud, qui diminue progressivement autour de 16 000 m³/an ; puis (ii) il devient faible au niveau du secteur central, le plus étroit de l'isthme (sur un linéaire côtier de 2 km) ; et (iii) s'inverse au sud de ce secteur, où l'on trouve un transport vers le Nord, de l'ordre de 10 000 m³/an.

Une quantification des évolutions morphologiques lors de certains évènements tempétueux a été effectué en utilisant un MNT construit avec les nouvelles acquisitions bathymétriques (§ 2.2). C'est le modèle morphodynamique XBeach qui a été employé dans cette étude. C'est actuellement l'un des modèles les plus avancé pour résoudre les processus physiques dominant le comportement des systèmes plage/dune en période de tempête (Roelvink et al., 2009). Deux configurations de rechargement ont été mise en place : un rechargement de l'avant-côte (configuration A) et un de la plage (configuration B). Leur conception a été établie en fonction des recommandations du rapport d'étude du CEREMA (Leclerc et al., 2021). Ainsi, pour les deux configurations, la zone à recharger s'étend sur une longueur approximative de 2 km entre le PK15, afin de protéger la section du cordon dunaire naturel en recul significatif dû à l'effet de bord d'un ouvrage, et le PK17, où commence au sud la section en enrochement.

Quatre scénarios hydrodynamiques de tempête (réelles) ont été modélisés avec XBeach, pour différentes périodes de retour. Le 1^{er} scénario est caractérisé par une succession de trois tempêtes ayant chacune une période de retour autour de 1 an. Le 2nd scénario est caractérisé par une tempête ayant une période de retour de 5 ans, le 3^{ème} scénario par une tempête ayant une période de retour de 10 ans, et le 4^{ème} est caractérisé par la succession des quatre tempêtes (chacune ayant une période de retour égal ou inférieur à 1 an ; § 6.1.6) ayant atteints l'archipel entre novembre 2020 et Février 2021. Les résultats de l'ensemble des 8 modélisations, c'est-à-dire pour les 4 conditions hydrodynamiques et les 2 scénarios de rechargement, sont synthétisés dans le Tableau 10 du paragraphe 6.1.6.

Les 8 modélisations montrent des pertes de sédiment importantes. On notera que les scénarios de rechargement de la plage montrent des pertes de sédiments moins importantes pour les 4 scénarios de conditions hydrodynamiques simulés, que ceux simulés pour le rechargement de l'avant-côte. Les comportements du système avant-côte / plage sont proches pour les deux conditions de tempêtes fortes, c.-à-d. période de retour 5 et 10 ans. L'influence d'une succession de tempêtes sur la dynamique hydro-sédimentaire montre un résultat plus impactant sur le système, qu'une seule tempête avec une période de retour plus importante. Les résultats de

simulations de trois tempêtes de période de retour 1 an (simulation 1) et celle de la série de 4 tempêtes réelles de période de retour égale ou inférieure à 1 an, sont très proches. On constate également que quel que soit le scénario choisi, l'influence de la distribution granulométrique reste faible. Cela peut s'expliquer par la proximité de ces deux classes granulométriques choisies.

En synthèse, les scénarios de succession de tempêtes (1 et 4) sur la configuration A montrent plus de 80% de perte de sédiments dans la zone du rechargement et plus de 60% pour les scénarios de tempêtes avec p.r. de 5 et 10 ans (2 et 3). Alors que pour la configuration B les scénarios 1 et 4 montrent plus de 50% de perte de sédiments et plus de 25% pour les tempêtes avec p.r. de 5 et 10 ans.

L'application du modèle XBeach est très efficace pour montrer la variabilité de la perte volumétrique d'un rechargement. En fonction des scénarios choisis, le modèle montre des résultats bien distincts. C'est particulièrement le cas pour les simulations de la succession de 4 tempêtes, celles de 2020-2021, où l'évolution morphologique sur un profil localisé au début de l'enrochement au nord du PK16 (profil n°549) montre une forte variabilité des résultats en relation avec le type de scénario de gestion. En absence de rechargement, la formation d'un important talus d'érosion est simulé, affectant potentiellement directement la stabilité de l'enrochement (comme observé lors de l'hiver 2020-2021). Les différents scénarios de rechargement indiquent des pertes sédimentaires. Toutefois, le rechargement de plage, scénario 4B, semble demeurer efficace pour protéger ce secteur.

Les solutions douces de protection du littoral face à l'érosion côtière et à la submersion marine, comme celle par rechargement de plage ou de l'avant-côte, doivent être considérées dans un contexte d'une gestion intégrée. Un seul rechargement de plage demeure une mesure temporaire qui ne résout pas de manière définitive le problème. Ainsi, il est indispensable d'envisager des rechargements périodiques pour recharger la zone afin qu'elle puisse maintenir son rôle de zone tampon. La stabilisation du trait de côte doit également s'accompagner d'une stratégie de gestion global. Pour le cas de l'isthme de Miquelon-Langlade les solutions devraient, entre autre, considérer à la fois la gestion dunaire des Buttereaux, un plan de gestion sédimentaire et plus largement d'une stratégie de gestion incluant les usages à l'échelle de l'isthme.

8. Bibliographie

- Abadie, S., Butel, R., Mauriet, S., Morichon, D., Dupuis, H., 2006. Wave climate and longshore drift on the South Aquitaine coast. *Continental Shelf Research* 26, 1924–1939. <https://doi.org/10.1016/j.csr.2006.06.005>
- Artelia, CEREMA, UNPG, 2021. Evolution du trait de côte et extraction de granulats marins : point sur les connaissances et les pratiques actuelles. (Rapport d'étude).
- Bailard, J.A., 1984. A SIMPLIFIED MODEL FOR LONGSHORE SEDIMENT TRANSPORT. *Coastal Engineering Proceedings* 1, 99. <https://doi.org/10.9753/icce.v19.99>
- Bailard, J.A., 1981. An energetics total load sediment transport model for a plane sloping beach. *Journal of Geophysical Research: Oceans* 86, 10938–10954. <https://doi.org/10.1029/JC086iC11p10938>
- Battjes, J.A., Janssen, J., 1978. ENERGY LOSS AND SET-UP DUE TO BREAKING OF RANDOM WAVES. pp. 569–587.
- Battjes, J.A., Stive, M.J.F., 1985. Calibration and verification of a dissipation model for random breaking waves. *Journal of Geophysical Research: Oceans* 90, 9159–9167. <https://doi.org/10.1029/JC090iC05p09159>
- Bayram, A., Larson, M., Hanson, H., 2007. A new formula for the total longshore sediment transport rate. *Coastal Engineering* 54, 700–710. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2007.04.001>
- Bernardara, P., Mazas, F., Kergadallan, X., Hamm, L., 2014. A two-step framework for over-threshold modelling of environmental extremes. *Natural Hazards and Earth System Sciences* 14, 635–647. <https://doi.org/10.5194/nhess-14-635-2014>
- Bertin, X., Castelle, B., Chaumillon, E., Butel, R., Quique, R., 2008. Longshore transport estimation and inter-annual variability at a high-energy 'ron Island , France dissipative beach : St . Trojan beach , SW Ole. *Continental Shelf Research* 28, 1316–1332. <https://doi.org/10.1016/j.csr.2008.03.005>
- Bijker, E.W., 1967. Some considerations about scales for coastal models with moveable beds. Publ.50, Delft Hydraulics Lab. pp.142.
- Billy, J., 2014. Morphologie et architecture d'une barrière composite paraglaciale : l'isthme de Miquelon-Langlade (NO Atlantique). (PhD). Département de Sciences de la Terre et de l'Univers. Université de Perpignan Via Domitia.
- Billy, J., De La Torre, Y., 2021. Gestion de l'érosion de l'isthme de Miquelon-Langlade suite aux tempêtes de février et mars 2021 (RAPPORT No. BRGM/RP-70873-FR).
- Billy, J., Robin, N., Certain, R., Hein, C., Berné, S., 2013. Barrier shoreline evolution constrained by shoreface sediment reservoir and substrate control: The Miquelon-Langlade Barrier, NW Atlantic. *Journal of Coastal Research*. <https://doi.org/10.2112/SI65-353>
- Billy, J., Robin, N., Hein, C.J., FitzGerald, D.M., Certain, R., 2018. Impact of relative sea-level changes since the last deglaciation on the formation of a composite paraglacial barrier. *Marine Geology* 400, 76–93. <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2018.03.009>
- Bonneton, P., 2001. A note on wave propagation in the inner surf zone. *Comptes rendus de l'académie des Sciences* 329, 27–33.
- Booij, N., Ris, R.C., Holthuijsen, L.H., 1999. A third-generation wave model for coastal regions: 1. Model description and validation. *\jgr* 104, 7649–7666. <https://doi.org/10.1029/98JC02622>
- Bulteau, T., Mugica, J., Paris, F., Pedreros, R., 2013. Caractérisation de l'aléa submersion marine dans le cadre des PPRL dans les Landes. Détermination de l'événement naturel de référence 62 p., 43 fig., 3 tab., 1 ann.
- CEREMA, DTAM, 2018. Document stratégique de bassin maritime de Saint-Pierre-et-Miquelon. Une ambition française pour la politique maritime intégrée. Situation de l'existant.

- De la Torre, Y., 2021. Rapport d'expertise : Erosion de l'isthme Miquelon - Langlade en Février et Mars 2021. BRGM.
- 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. BRGM/ RP-63988-F, 179.
- De Queiroz, B., Scheel, F., Caires, S., Walstra, D.-J., Olij, D., Yoo, J., Reniers, A., de Boer, W., 2019. Performance Evaluation of Wave Input Reduction Techniques for Modeling Inter-Annual Sandbar Dynamics. *Journal of Marine Science and Engineering* 7. <https://doi.org/10.3390/jmse7050148>
- Elsayed, S.M., Oumeraci, H., 2017. Effect of beach slope and grain-stabilization on coastal sediment transport: An attempt to overcome the erosion overestimation by XBeach. *Coastal Engineering* 121, 179–196. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2016.12.009>
- Floyd, C.D., Leblanc, C., Whittaker, M., 1999. Combinatorial chemistry as a tool for drug discovery. *Prog Med Chem* 36, 91–168. [https://doi.org/10.1016/s0079-6468\(08\)70046-8](https://doi.org/10.1016/s0079-6468(08)70046-8)
- Gouletquer, P., Robert, S., Caisey, X., Chabirand, J.-M., Dubois, S., Le Moine, O., Soletchnik, P., Goraguer, H., Lazure, P., Le Bihan, C., Geairon, P., Lajournade, M., Le Gall, A., 2011. Contribution au développement de la filière aquacole à Saint Pierre et Miquelon. Rapport IFREMER 2011 Contrat OD, 233.
- iXblue, 2023. Saint-Pierre et Miquelon - DriX, Operation report (August - October 2022) - Projet 822C21.
- Kamphuis, J.W., Davies, M.H., Nairn, R.B., Sayao, O.J., 1986. Calculation of littoral sand transport rate. *Coastal Engineering* 10, 1–21. [https://doi.org/10.1016/0378-3839\(86\)90036-0](https://doi.org/10.1016/0378-3839(86)90036-0)
- Kamphuis, W.J., 2002. Alongshore transport of sand. Proceedings of the 28th International Conference on Coastal Engineering. ASCE. pp. 2330–2345.
- Kamphuis, W.J., 1991. Alongshore Sediment Transport Rate. *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering* 117, 624–640. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-950X\(1991\)117:6\(624\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-950X(1991)117:6(624))
- Latteux, bernard, 2008. Exploitation de matériaux marins et stabilité du littoral, Éditions Quae. ed.
- L.C.H.F., Lorin, J., Viguier, J., Migniot, C., 1979. Etude en nature de la Côte Aquitaine (entre la Pointe de Grave et l'embouchure de l'Adour). Rapport établi pour la Mission Interministérielle pour l'Aménagement de la Côte Aquitaine (Rapport extérieur No. Rapport général). Laboratoire Central hydraulique de France.
- Le Cozannet, G., Lecacheux, S., Delvallee, E., Desramaut, N., Oliveros, C., Pedreros, R., 2011. Teleconnection Pattern Influence on Sea-Wave Climate in the Bay of Biscay. *Journal of Climate* 24, 641–652. <https://doi.org/10.1175/2010JCLI3589.1>
- Leclerc, B., Michard, B., Gateau, D., 2021. Note Erosion de l'isthme de Miquelon-Langlade au niveau du secteur dit du PK16.
- Madsen, O.S., Poon, Y.-K., Gruber, H.C., 1988. SPECTRAL WAVE ATTENUATION BY BOTTOM FRICTION: THEORY. *Coastal Engineering Proceedings* 1, 34. <https://doi.org/10.9753/icce.v21.34>
- Mazas, F., Hamm, L., 2011. A multi-distribution approach to POT methods for determining extreme wave heights. *Coastal Engineering*, 58(5) 58(5), 385–394.
- Michard, B., Belan, P.-Y., Gateau, D., Lendre, S., Roche, A., Sanquer, R., Clement, M., Sencha-Thomas, J., 2021. DOCUMENT DE TRAVAIL Expertise technique de l'érosion de l'isthme de Langlade Diagnostic et proposition d'aménagement du secteur des Buttereaux. Cerema VProvisoir.
- Moisan, M., Laigre, T., 2019. Traitement et analyse des données du réseau de suivi du littoral de Saint-Pierre et Miquelon.
- Nederhoff, C., Lodder, Q., Boers, M., Den Bieman, J., Miller, J., 2015. Modeling the effects of hard structures on dune erosion and overwash: A case study of the impact of Hurricane

Sandy on the New Jersey coast, in: The Proceedings of the Coastal Sediments 2015. World Scientific.

Pechon, P., 1989. Etude sédimentologique du littoral ouest de Miquelon-Langlade. (E.D.F.).

Pedreros, R., 2016. Etat des connaissances sur la dynamique et la cinétique de la submersion marine et des méthodologies d'évaluation. Rapport final. (RAPPORT No. BRGM/RP-66197-FR).

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).

Robin, N., Billy, J., Barthe, P., Barusseau, J.P., Carvalho, E., Certain, R., Chanoué, M., Fitzgerald, D., Hein, C., Michel, C., Millescamps, B., Raynal, O., Wilson, C., Wright, S., 2013. Etude globale de l'isthme de Miquelon-Langlade. Rapport final (Univ. Perpignan No. EGIML). Université de Perpignan Via Domitia.

Roelvink, D., Reniers, A., van Dongeren, A., van Thiel de Vries, J., McCall, R., Lescinski, J., 2009. Modelling storm impacts on beaches, dunes and barrier islands. Coastal Engineering 56, 1133–1152. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2009.08.006>

SAMP-UAM, 2018. Document stratégique de bassin maritime : Saint-Pierre-et-Miquelon. (DSBM No. Fiche synthétiques des enjeux).

Smith, E.R., Wang, P., Zhang, J., 2003. Evaluation of the CERC Formula Using Large-Scale Model Data.

Splinter, K.D., Palmsten, M.L., 2012. Modeling dune response to an East Coast Low. Marine Geology 329, 46–57.

Valentini, N., Balouin, Y., 2020. Amélioration des connaissances et sensibilisation à la vulnérabilité du littoral d'Occitanie - Étude du rôle de l'érosion événementielle sur la vulnérabilité du littoral aux phénomènes de submersion marine (RAPPORT No. BRGM/RP-70384-FR).

Van Rijn, L.C., 1993. Principles of sediment transport in rivers, estuaries and coastal seas. Delft Hydraulics, Aqua Publications, Amsterdam pp.673.

Van Rijn, L.C., 1990. Handbook sediment transport by currents and waves, Delph Hydraulics, 2nd edition. ed.

Van Rijn, L.C., Tonnou, P.K., Walstra, D.J.R., 2011. Numerical modelling of erosion and accretion of plane sloping beaches at different scales. Coastal Engineering 58, 637–655. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2011.01.009>



RÉPUBLIQUE
FRANÇAISE

*Liberté
Égalité
Fraternité*

Centre scientifique et technique

3, avenue Claude-Guillemain
BP 36009
45060 – Orléans Cedex 2 – France
Tél. : 02 38 64 34 34
www.brgm.fr



Géosciences pour une Terre durable

brgm