

Université de Caen, « Morphodynamique Continentale et Côtière » CNRS-UMR 6143

Morphodynamique des systèmes de flèches sableuses
Etude comparative entre les embouchures tidales de l'Archipel de St
Pierre et Miquelon et de la côte Ouest du Cotentin (Manche)

Rapport de Synthèse pour le site

Internet du Conservatoire du Littoral à

St Pierre et Miquelon
Mars 2007

Par Nicolas ROBIN

Sous la direction de F.LEVOY



Résumé

Une majeure partie des côtes basses de l'archipel de Saint-Pierre et Miquelon sont touchées par une érosion importante et chronique d'origine naturelle. Ces évolutions sont localement aggravées par des interventions anthropiques préjudiciables (présence des chevaux, promenade des autochtones, circulation hors réseau routier) qui accentuent leur fragilité. Le recul généralisé du trait de côte sur la façade Ouest de l'isthme de Miquelon-Langlade risque de s'accélérer dans le futur. Les changements climatiques annoncés avec des hivers plus doux, provoquant l'absence récurrente de pieds de glace protecteurs pour le littoral et l'élévation du niveau marin, ne sont pas des signes positifs permettant une stabilisation du système. La question d'une ouverture de l'isthme, probablement au niveau du cordon des Buttereaux (zone la plus étroite), se pose aujourd'hui si les tendances évolutives observées à différents pas de temps se poursuivent. Or, l'existence de cet isthme revêt un intérêt primordial pour de nombreux motifs qu'ils soient environnementaux ou socio-économiques.

Face à ces évolutions constatées et à venir, une étude détaillée de la dynamique côtière autour de l'isthme de Miquelon-Langlade a été réalisée entre 2003 et 2006 dans le cadre d'une thèse effectuée à l'Université de Caen par Nicolas ROBIN. Cette base de connaissances a permis d'apporter une vision globale du fonctionnement hydrosédimentaire de l'isthme à différentes échelles de temps. Ce programme a apporté des données scientifiques sur différents axes de recherche tels que l'évolution du trait de côte, l'évolution des paramètres morphométriques des plages et l'évaluation du stock sédimentaire présent sur l'avant-côte. Cette étude a également localisé les zones les plus sensibles et menacées par l'attaque des houles et des courants induits. Des travaux de modélisation numérique ont cerné les différents scénarios hydrodynamiques les plus énergétiques à l'origine du recul du trait de côte de la façade Ouest et ont permis d'évaluer quantitativement le transit sédimentaire annuel sur cette même façade.

Cette étude est le premier projet global mis en œuvre sur l'archipel visant à connaître et quantifier l'évolution de l'isthme et son environnement ainsi qu'à identifier les facteurs à l'origine de son forçage. Son élaboration constitue une première étape afin d'envisager des solutions pour stabiliser le système. Sa poursuite et son suivi au cours des prochaines années sont nécessaires afin d'acquérir une vision plus fine de son évolution (notamment celle du trait de côte).

Introduction

Les résultats des recherches exposées sur ce site s'inscrivent dans le cadre d'une thèse commencée à l'Université de Caen en mai 2003 par Nicolas ROBIN. Cette thèse est encadrée par le Professeur Franck LEVOY. Elle est financée par le Conservatoire du Littoral, le Conseil Général et l'Agence de l'Eau Seine-Normandie pour la partie concernant l'Archipel de St Pierre et Miquelon (photo.1). Un autre volet porte sur la côte ouest du Cotentin (Manche). Celui-ci est financé par la région Basse Normandie. Le travail de cette thèse focalise sur la morphodynamique des systèmes de flèches sableuses barrant les embouchures tidales des sites étudiés.

Les recherches entreprises sur le site de l'isthme de Miquelon-Langlade reposent sur la réalisation de trois missions de terrain. Les deux premières ont eu lieu du 5 au 12 septembre 2003 et du 8 septembre au 15 octobre 2004. Elles ont permis de recueillir les premières données de terrain, à la fois sur l'isthme et sur son avant-côte. Ces données scientifiques sont originales puisqu'elles sont les premières obtenues sur ce site dans le domaine de la dynamique côtière. Le déroulement de la troisième et dernière mission dans l'archipel de St Pierre et Miquelon a eu lieu entre le 24 août et le 27 septembre 2005.

Chacune des campagnes se sont déroulées suivant deux axes de recherche :

- Une phase d'investigations en mer a été dédiée aux prélèvements d'échantillons sédimentaires sur les deux façades de l'isthme de Miquelon-Langlade. Leur traitement granulométrique permet de caractériser les sédiments de l'avant-côte et d'évaluer l'extension du stock sédimentaire mobilisable par les processus marins actuels. Des profils bathymétriques ont également été effectués. Ils permettent d'obtenir des données supplémentaires, complétant la carte marine du SHOM, afin d'avoir une plus grande précision du relief de l'avant-côte. Par la suite, ces données seront utilisées dans le cadre d'un travail de modélisation numérique visant à étudier la propagation de la houle et le transport sédimentaire sur la façade Ouest de l'archipel.

- Une deuxième phase à terre, a été menée sur le littoral de l'isthme de Miquelon-Langlade. L'essentiel des opérations menées ont pour objectif l'obtention de profils topographiques transversaux de la plage, la réalisation de prélèvements de sédiments superficiels, ainsi que le levé de la position du trait de côte matérialisée par la ligne de végétation. La méthodologie employée impose d'effectuer les différents travaux aux mêmes endroits que ceux menés lors des précédentes missions.

Ces campagnes de terrain sont associées à un travail de laboratoire portant sur :

- Une recherche et synthèse bibliographique sur l'archipel, la région, la position des glaciers pendant le quaternaire, les fluctuations du niveau marin, la mise en place des morphologies observées sur l'archipel.

- Le dépouillement et le traitement des données.

- Une étude de modélisation numérique de la propagation de la houle et du transit sédimentaire.

-Un travail de digitalisation de photographies aériennes pour extraire la position du trait de côte sur les cinquante dernières années.

Etude de l'évolution du trait de côte de l'isthme de Miquelon-Langlade

Méthodologie

L'interprétation des évolutions du trait de côte a pu être effectuée grâce à l'acquisition de photographies aériennes verticales (1949, 1985, 1990, 2000) réalisées par l'Institut Géographique National. Afin d'exploiter de façon numérique ces photographies, le logiciel Arc View 3.1 a été utilisé. Il permet de travailler sur des cartes et des photographies qui sont géoréférencées dans un système de coordonnées X et Y prédéfinies. Ainsi, cela rend possible la superposition des documents afin de les comparer les uns aux autres.

Lors de cette étude, la ligne de végétation est choisie comme indicateur de la position du trait de côte. Elle constitue la frontière entre le premier cordon dunaire végétalisé (stable) et la plage (dynamique).

Les données de 2003, 2004 et 2005 proviennent du levé au GPS en mode naturel de la ligne de végétation acquis lors des différentes missions de terrain.

Principaux résultats

La façade Ouest

Le recul du trait de côte est un phénomène significatif à l'échelle mondiale. Le littoral de St Pierre et Miquelon n'échappe pas à cette tendance. Depuis 1949, la façade Ouest du cordon littoral, au Nord du « pk 16 » est affectée par une érosion de l'ordre de 10 m (-0.2 m/an). A cette échelle de temps, la partie au Sud du « pk 16 » présente une avancée artificielle liée à la création d'un ouvrage longitudinal de haute plage en avant du trait de côte. Cependant, ce faible taux d'érosion observé sur une échelle semi-séculaire masque deux tendances :

La succession de fortes tempêtes entre 1985 et 1990 (janvier 1987, février 1988 et août 1989) a mis en évidence la fragilité du système vis-à-vis des conditions climatiques et hydrodynamiques. Pendant cette période, l'ensemble de la côte a reculé en moyenne de 25 m (-5 m/an). Cette tendance érosive exceptionnelle affecte toute la façade ouest de l'isthme (figure.1).

L'érosion observée depuis 1949 semble s'accélérer de nos jours. Des levés du trait de côte entre septembre 2003 et septembre 2005 indiquent une érosion significative généralisée sur l'ensemble de la façade maritime (figure.1). Cette érosion atteint 6 m (-3 m/an) au Nord, alors que la zone au Sud du « pk 16 » présente un recul plus faible de l'ordre de 3 m (-1.5 m/an).

La façade Est

La côte Est est caractérisée par la présence d'une passe qui est la seule ouverture du Grand Barachois vers l'océan. Cette passe est l'interface entre l'océan et la lagune ce qui génère un courant de marée important malgré le marnage microtidal (1.4 m). Elle est fermée par deux flèches sédimentaires, l'une au Nord (flèche aux Cacaouis), à crochons recourbés, et l'autre au Sud, connectée à un système de « beach ridges ».

L'évolution de la flèche au Nord de l'embouchure présente trois comportements distincts et continus dans le temps. L'extrémité de la flèche qui correspond à la rive nord de la passe est en érosion depuis cinquante ans avec un maximum pendant la période 1949-1990 d'environ 1 m/an. Cependant, cette tendance semble se ralentir depuis trois ans puisque seule l'extrémité Sud-Est de l'embouchure est en érosion. Le littoral bordé de dunes au Nord de l'embouchure est en accrétion depuis 1949. Cette tendance est encore active actuellement et semble s'accroître malgré une morphologie en érosion du massif dunaire interne, balayé par les vents dominants de secteur Ouest. Une partie de ce sable est déposée sur la haute plage sous la forme d'un cordon dunaire embryonnaire. Le développement de ce cordon et sa colonisation par la végétation de plus en plus importante induit une avancée significative du trait de côte d'environ 50 m au maximum depuis 1949. La création de ce nouveau cordon dunaire est présent sur un peu moins d'un kilomètre au Nord de l'embouchure.

La flèche Sud est en accrétion. Cette avancée du trait de côte est extrêmement prononcée à l'embouchure de la passe où depuis cinquante ans une avancée du trait de côte de 108 m est mise en évidence. Il faut noter que l'accrétion observée de la pointe s'effectue en parallèle du flanc Sud du chenal qui est en érosion. Le littoral plus au Sud connaît également une tendance à l'accrétion. Cependant l'avancée du trait de côte est de moins en moins importante en s'éloignant de l'embouchure. A 800 m au Sud de celle-ci, l'évolution du trait de côte est réduite.

Les paramètres morpho-sédimentaires

Méthodologie

La morphologie des plages a été étudiée sur une période de trois ans en réalisant des profils topographiques transversaux sur les côtes Est et Ouest de l'isthme (10 profils sur la côte est de part et d'autre de l'embouchure du Grand Barachois et 5 sur la côte ouest). La localisation de ces profils est identique à chaque campagne. Ils ont été effectués au moyen d'un niveau de chantier entre la ligne de végétation et la ligne de rivage de basse mer.

La granulométrie des sédiments permet de caractériser les conditions énergétiques relatives à la zone d'étude. Ainsi, 19 échantillons sédimentaires ont été prélevés sur les côtes ouest et est, aux mêmes endroits que lors des missions précédentes grâce au positionnement par GPS. Les sédiments recueillis ont été analysés à l'Université de Caen à l'aide d'une colonne à tamis de type AFNOR.

Principaux résultats

La façade Ouest

L'observation sur un an des profils de la côte Ouest indique que la pente de la plage est homogène du Nord au Sud et comprise entre 8.5% et 9.8%. La pente relativement forte des profils induit une largeur de plage faible (de l'ordre de 40 m).

Les prélèvements effectués le long de la côte révèlent la présence d'un sable mal trié. La médiane (D_{50}) est comprise entre 0,40 mm et 0,90 mm (sable moyen à grossier) suggérant le caractère énergétique des conditions hydrodynamiques de cette façade. L'échantillon le plus au Sud est composé d'une fraction plus grossière associée à une matrice sableuse fine de 0,30 mm. Ce changement granulométrique traduit la disparition graduelle de sédiments sableux en faveur de sédiments plus grossiers vers le Sud de l'isthme. Ces tendances peuvent changer lors d'événements de plus fortes énergies avec la présence d'un sable très grossier et l'apparition de graviers sur la haute plage.

La façade Est au Nord de l'embouchure

En 2003, l'étude des profils montrait que la pente de la plage était constante entre 7.5% et 8% au voisinage de l'embouchure et diminuait vers le Nord (6.4% pour l'avant dernier profil et 4.9% pour le profil le plus au Nord). Cette tendance est moins évidente sur les profils de 2004 et 2005 où la pente semble être plus homogène sur l'ensemble de la zone (entre 6.4% et 6.9%).

L'indice D_{50} souligne la présence d'un sédiment de plus en plus fin vers le Nord (0,30 mm à l'embouchure, 0,24 mm pour l'échantillon au milieu de la zone et 0.19 mm pour l'échantillon le plus au Nord correspondant à un sable fin). Le sédiment est mal classé au voisinage de l'embouchure, mais devient mieux classé vers le Nord. Cette partie de l'isthme présente peu, voire aucun changement significatif des indices granulométriques sur deux ans.

La façade Est au Sud de l'embouchure

L'étude montre que la pente de la plage devient de plus en plus forte vers le Sud (6.1 % et 7.2 % au voisinage de l'embouchure et 8.5% pour le profil le plus au Sud). De plus, la largeur de la berme de haute plage observée au voisinage de l'embouchure (70 m) diminue également vers le Sud pour disparaître au niveau de la ferme Larranaga. A noter la présence à partir de ce profil, d'une micro-falaise (atteignant 1.5 m en 2005) localisée sur le haut de plage qui est constituée majoritairement de galets. Cette micro-falaise est présente jusqu'à la partie médiane de l'isthme.

Le bilan granulométrique des échantillons prélevés sur cette zone ne présente aucun changement significatif des indices granulométriques sur deux ans. Les trois premiers échantillons au voisinage de l'embouchure indiquent la présence d'un sable fin avec un D_{50} de 0,25 mm. Ce sable est bien classé. Les deux derniers échantillons révèlent la présence d'un sédiment beaucoup plus grossier puis la présence majoritaire de graviers et galets principalement sur le haut de plage. Seule la matrice de sable fin a été prélevée et n'indique aucun changement de sa granulométrie.

Les données marines

Les conditions hydrodynamiques

Méthodologie

Les conditions hydrodynamiques sur la façade ouest de l'isthme ont été enregistrées pendant la seconde mission. Un houlographe/courantomètre (S4DW) positionné sur une potence lestée fut immergé à une cote de -17 mètres entre le 16 septembre et le 8 octobre 2004. Cet appareil intègre à la fois un capteur de pression et un courantomètre électromagnétique (photo.3). Lorsqu'un courant se déplace dans le champ magnétique généré par l'appareil, il induit un changement de tension directement proportionnel à la vitesse du courant. Les données recueillies permettent le calcul de la vitesse et de la direction des courants moyens, ainsi que des vitesses orbitales induites par la houle. Cet appareil est également équipé d'un capteur de pression permettant d'enregistrer les fluctuations de la surface libre. Outre la marée, après traitement, différents paramètres de la houle sont obtenus telles que la hauteur significative H_s (en m), la période de pic T_p (en s) et la direction de l'agitation (en degré).

Les principaux résultats

Lors de la campagne, deux cycles de marée de vive-eau et de morte-eau ont été enregistrés. Le marnage maximum mesuré est de 1,5 m caractérisant une vive-eau moyenne et classifiant l'archipel en environnement microtidal.

La hauteur significative (H_s) de la houle est majoritairement comprise entre 0,2 m et 1,5 m. Au cours de trois périodes, des hauteurs comprises entre 1,5 m et 2,4 m ont été enregistrées. Les périodes de pic (T_p) comprises le plus souvent entre 4 et 10 secondes ont dépassé 12 secondes pendant trois périodes représentatives de houles longues de secteur Ouest. La direction des houles pendant la durée de la mission se restreint à une fenêtre de secteur Sud-Ouest à Nord. La majorité des houles provient du quadrant Ouest.

Une corrélation entre l'intensité et la direction des vents locaux par rapport aux conditions d'agitation peut être établie. Lorsque les vents sont de quadrant Est, l'agitation est inférieure à 1 m. L'isthme, ainsi que Miquelon, protègent la côte Ouest. Par contre, dès que les vents proviennent du quadrant Nord, l'influence sur la hauteur de la houle se fait ressentir immédiatement.

La vitesse des courants moyens est faible, toujours inférieure à 0,15 m/s. Ces courants sont toujours orientés vers la côte. Une analyse des données de marée permet de trouver une corrélation entre les moments de plus fort courant et les variations du niveau d'eau. En effet, les plus fortes vitesses sont observées à marée haute (0,15 m/s). La marée basse suivante est alors caractérisée par une légère diminution des vitesses (0,10 m/s). Ces observations sont valables sur l'ensemble de la mission. Cependant, il faut signaler que ces pics de courant ne sont pas systématiques à chaque marée haute. Il arrive souvent que le niveau de pleine mer possède comme celui de basse mer, des vitesses de courant très faibles (0,05 m/s). Par contre, aucune relation systématique n'existe entre les variations du niveau d'eau et la direction des courants moyens. Au vu de ces résultats, il est préférable de parler de courants généraux (influencés par le courant du Labrador et/ou du St Laurent), plutôt que de courants de marée, sa contribution étant faible compte tenu du marnage.

Du fait de la faible vitesse des courants moyens sur l'avant-côte de la côte Ouest, le transport sédimentaire sera principalement gouverné par les conditions d'agitation.

Le disponible sédimentaire

Méthodologie

Grâce à l'utilisation d'une benne à sédiments, des prélèvements superficiels sur l'avant-côte des deux façades de l'isthme ont pu être réalisés (photo.2). Ces prélèvements (135 sur la façade Est et 79 sur la façade Ouest) ont été effectués entre les cotes -30 m et -5 m. Le but de ce travail est double :

caractériser la nature et la granulométrie des sédiments présents sur l'avant-côte au droite de l'isthme.

évaluer le stock sédimentaire remobilisable par l'action de l'agitation principalement afin de percevoir leur contribution éventuelle à la morphodynamique des plages.

Un grand nombre de sondages bathymétriques (322 à l'Est, 178 à l'Ouest) ont pu également être réalisés. Ces données permettent de préciser la topographie de l'avant-côte et de compléter la dernière carte du SHOM extraite d'un levé canadien datant de 1954.

Les principaux résultats

La réalisation de profils bathymétriques permet de mettre en valeur des différences significatives de la topographie de l'avant-côte entre les deux façades de l'isthme de Miquelon-Langlade.

Sur la façade Ouest, les profils bathymétriques révèlent des différences entre le Nord et le Sud de l'isthme. Au Sud, l'avant-côte présente une pente régulière (0.5% entre la cote 0 et -15 m). En se déplaçant vers le Nord, le profil devient concave avec une pente plus forte sur la partie haute (1.2% entre 0 et -15 m). Malgré ces différences, l'avant-côte devient moins pentue sur l'ensemble de la façade à partir d'une cote située entre -20 et -30 m (de l'ordre de 0.27%).

Les profils bathymétriques réalisés sur la façade Est peuvent être divisés en trois sections suivant l'éloignement à la côte. La partie haute du profil est pentue (3%) jusqu'à la cote -10 m. Une partie intermédiaire caractérisée par une large zone plane (0,35%) est ensuite identifiée. C'est à l'endroit de l'embouchure de la lagune du Grand Barachois que cette section est la plus large (3200 m). Sur la partie basse des profils (à partir de la cote -30 m), la pente s'accroît (0.7%). Au Nord de la pointe aux Cacaouis la pente générale de l'avant-côte devient plus forte (0.54%). La partie intermédiaire caractérisée par une large zone plane disparaît au Nord de la pointe aux Alouettes. Ces observations suggèrent que la plate-forme sur laquelle repose l'isthme se rétrécit au Nord de la pointe au Cacaouis et ne semble pas s'étendre au-delà de la pointe aux Alouettes.

Le prélèvement de sédiments de part et d'autre de l'isthme montre que l'avant-côte est constituée en majeure partie de sable fin ayant la même origine (figure.2). Les indices

granulométriques sont identiques. Les blocs (granite, grès), galets et graviers sont également de même nature. Sur la façade est, la plate-forme sur laquelle repose l'isthme se rétrécit (pente plus forte) et change de nature (absence de sable et présence de sédiments plus grossiers) au Nord de la pointe aux Cacaouis. La plate-forme sableuse semble restreinte en latitude au voisinage proche de l'isthme bien que la frontière au Sud ne soit pas précisément délimitée. Par contre, elle montre sur la façade Est une extension vers le large importante (jusqu'à la cote - 40 m, à 8 km de la côte) (figure.2). Cette extension des sables fins sur la façade ouest est plus restreinte (jusqu'à la cote -15 m soit à 3 km de la côte). Cette différence peut être due aux conditions d'agitation plus intenses qui ont tendance à remobiliser une plus grande quantité de sédiments sableux sur la façade Ouest.

Ainsi, l'ensemble des résultats montrent la présence d'un stock sédimentaire remobilisable pour les plages beaucoup plus important en surface, et probablement en volume sur la façade Est que sur le littoral Ouest.

Modélisation de la propagation de la houle sur l'avant-côte de la façade Ouest

Méthodologie

L'étude de la propagation de la houle sur l'avant-côte de la façade Ouest est basée sur l'utilisation du modèle numérique SWAN développé par le laboratoire Delft Hydraulics (Pays-Bas). L'application de ce modèle permet d'analyser l'évolution des caractéristiques de l'agitation (hauteur significative, direction de propagation) entre le large et l'estran (cote de -5m). Au total, 55 scénarios ont été simulés en faisant varier la hauteur (5 classes entre 0.5 m et 2.5 m) et la direction de la houle (11 directions entre 0° et 180°). La hauteur du plan d'eau et la période de la houle (6 secondes) sont définies comme constante. Des cas extrêmes (houle de 5 m) ont également été simulés suivant les onze directions, ainsi que des cas de tempêtes ayant eu lieu dans le passé.

Les principaux résultats

Les simulations numériques montrent que la façade Ouest de l'isthme est plus exposée à des houles de secteur 270° (figure.3). Lorsque la hauteur significative de la houle est de 2.5 m au large, le déferlement à la côte est de 1.5 m sur la partie Nord et 0.5 m au Sud. Les autres directions de simulation indiquent un amortissement plus important lors de sa propagation sur l'avant-côte. Néanmoins il apparaît qu'une houle aux caractéristiques identiques au large (hauteur significative de 2.5 m et une période de 6s) de secteur 200° est plus énergétique à la côte (1.1 m au nord et 0.7 m au sud) que celle de secteur 340° (0.5 m sur l'ensemble de la façade) (figure.3). Dans le cas d'une forte tempête de secteur Ouest (hauteur significative de 5 m au large), la zone des Buttereaux est touchée par des vagues déferlantes de 1.9 m, alors que sur la partie sud de l'isthme les vagues sont inférieures à 0.8 m.

Cette étude souligne la disparité énergétique entre la zone nord et sud de la façade Ouest de l'isthme. La pente plus douce de l'avant-côte au Sud favorise la dissipation d'une partie de l'énergie de la houle incidente. En effet, aucun scénario ne montre une hauteur significative de la houle à la côte supérieure à 0.7 m sur cette partie. Le profil concave de l'avant-côte au droit des Buttereaux et la remontée rapide des fonds à partir de -15 m est l'élément majeur pour expliquer le caractère plus énergétique de cette zone. L'amortissement

de la houle liée aux phénomènes de réfraction est également constaté pour des directions de houle présentant un fort angle avec les isobathes et la forme générale du trait de côte.

Cette étude confirme la fragilité de la zone des Buttereaux aux conditions hydrodynamiques à l'inverse de la zone au sud plus dissipative. Cette transition est graduelle sur la façade Ouest.

Modélisation du transit sédimentaire sur l'avant-côte de la façade Ouest

Méthodologie

L'étude du transport sédimentaire sur la façade Ouest est basée sur l'utilisation d'un modèle numérique UNIBEST, développé par le laboratoire Delft Hydraulics (Pays Bas). Ce modèle calcule le transport sédimentaire induit par les courants de houle et/ou de marée. Il utilise pour cela plusieurs formules disponibles dans la littérature (Van Rijn, Eugeland-Hansen, Bijker, Baillard). Les données nécessaires pour obtenir des résultats de simulations réalistes incorporent les agents hydrodynamiques, la bathymétrie de la zone côtière et la position de la ligne de rivage ainsi que les caractéristiques sédimentologiques des matériaux du site. Les taux de transports sont évalués pour chacun des scénarios de houle que comporte le climat annuel. Un transport annuel moyen est ensuite déduit de la durée de chacune de ces conjonctions. Le temps de chaque scénario est établi à l'aide de la relation entre le climat d'agitation et les caractéristiques du vent recueillies lors de la seconde mission.

Les principaux résultats

De façon générale, les quatre formules utilisées pour simuler le transport sédimentaire sur le haut estran de la façade Ouest indiquent des résultats similaires en terme de direction. Deux flux de direction opposés ont été mis en évidence (figure.4). Au Nord de l'isthme, le transport sédimentaire s'effectue du Nord vers le Sud. Au Sud de l'isthme (au niveau de l'étang Ynachi) la direction résiduelle est orientée du Sud vers le Nord. La zone de convergence des deux flux sédimentaires se localise au niveau de la partie la plus étroite de l'isthme (figure.4).

Les taux de transports calculés divergent d'une formule à l'autre. Cependant ils sont de même ordre de grandeur excepté pour ceux issus de la formule de Engelund-Hansen qui surestime le transport aux regards des trois autres. De manière générale le flux potentiel entrant au Nord est de l'ordre de 50000 m³/an, puis diminue vers le sud de l'isthme. A l'entrée sud du système, le transport annuel moyen potentiel est de l'ordre de 20000 m³.

Formation de l'isthme de Miquelon-Langlade

Les variations eustatiques et isostatiques de l'archipel

Le contexte glaciaire de l'archipel de St Pierre et Miquelon s'est traduit par le recouvrement de celui-ci par les différentes avancées des langues de l'inlandsis Laurentidien. Le dernier recouvrement est daté du Wisconsinien supérieur (-18000 B.P). Durant cette dernière glaciation, l'archipel était recouvert par un glacier provenant de Terre-Neuve et progradant vers le Sud. Le début du réchauffement climatique qui engendre la fin de cette

période glaciaire provoque des changements importants du niveau marin, ainsi que des phénomènes isostatiques qui touchèrent l'ensemble du Canada et ces régions limitrophes.

Il y a 20000 ans, l'extension de la couverture glaciaire est maximale (Shaw *et al*, 2006) (figure.5). Toutes les régions canadiennes sont recouvertes ainsi que St-Pierre et Miquelon. Le poids de la glace sur le continent entraîne une subsidence caractérisant un niveau marin plus haut que celui observé actuellement. Ce niveau marin devait probablement être pour la région de Terre-Neuve et de St Pierre et Miquelon, 40 m supérieurs au niveau actuel (Bell *et al*, 2003). Entre 18000 et 12000 ans, la déglaciation est amorcée. La couverture glaciaire était encore présente sur Terre Neuve, mais sous forme d'un lobe individuel. Cette déglaciation libère un poids très important de la lithosphère qui réagit par un rebond post-glaciaire. Ce rebond se fait ressentir sur le niveau marin touchant Terre-Neuve puisqu'il subit une régression locale de 60 m en 2000 ans (correspondant à un ordre de grandeur de 3.5cm/an entre 14000 et 12000 ans) malgré le contexte transgressif général de cette période (Bell *et al*, 2003). L'archipel est aussi concerné par le recul de la couverture glaciaire vers le nord. Ce recul progressif dépose sur le plateau continental une masse importante de matériaux morainiques (la granulométrie de ces matériaux est hétérogène, du silt au bloc décamétrique, les prélèvements en mer confirment cette hypothèse). Ce dépôt est associé probablement à des moraines latérales localisées sur les flancs des langues glaciaires et créant des reliefs détritiques lors de leur recul. La position des îles de Miquelon et Langlade suivant un axe méridien est essentielle par rapport à l'écoulement des glaciers venant et se retirant vers le Nord. Il y a 12 000 ans, la disparition de la couverture glaciaire est observée dans la région de Terre-Neuve (Shaw *et al*, 2006). Le niveau marin aux abords de Terre-Neuve est stable. Il serait proche de la ligne isobathe des 20 mètres. Les îles de Miquelon-Langlade seraient alors exondées et entourées d'une importante quantité de sédiments mise en place lors du retrait des langues glaciaires.

Mise en place de l'isthme de Miquelon-Langlade

Depuis 8000 ans, le niveau marin augmente de façon continue pour atteindre le niveau actuel. De plus, il semblerait qu'à partir de cette période, le taux de remontée du niveau marin soit supérieur au taux isostatique, plaçant ainsi l'archipel en période transgressive. Cette remontée progressive permet grâce à l'action des houles, de trier le matériel présent et de le mettre en mouvement dans la direction des houles dominantes. De ce fait, il est probable que les plus gros blocs, décimétriques, déposés sous forme de moraines latérales ne puissent être remobilisés et restent à l'emplacement du dépôt initial. Ils deviennent alors progressivement des reliefs susceptibles d'influencer le transport sédimentaire.

L'étude des ensembles morphologiques associée aux données hydrosédimentaires disponibles permet de dresser une hypothèse sur le mode de formation de l'isthme de Miquelon-Langlade. La première entité morphologique qui s'est probablement créée sur le sous-bassement morainique semble être le cordon des Buttereaux (photo.4). Cependant, aucune structure morphologique ne précise le mode de formation de ce cordon. Néanmoins, les travaux de modélisation de la houle et du transport sédimentaire simulés pour des conditions climatiques actuelles indiquent une dérive littorale nord-sud sur la majeure partie de cette façade. Ainsi cette flèche se développa et progressa dans la même direction sous l'influence de la houle et de la dérive littorale induite. Elle devait recevoir une alimentation « cross-shore » résiduelle, lors de périodes de relative accalmie et ainsi s'engraisser.

La présence de dunes paraboliques sur cette même façade indique que l'apport de sédiment par le vent a dû être important car leurs constructions nécessitent une grande quantité de matériel. De plus, le positionnement du cordon face à la direction principale des vents (Ouest à Sud-Ouest), a favorisé le développement de caoudeyres, puis la formation et la migration de dunes paraboliques. De par leur morphologie, la formation de ces dunes a été réalisée dans des conditions climatiques actuelles.

La formation et le développement du cordon des Butteraux a favorisé sur la zone située au Sud-Est de Miquelon, l'apparition de conditions hydrodynamiques plus calmes, à l'abri des houles dominantes de secteur Ouest à Sud-Ouest. Cette zone subit alors principalement l'action des vagues venant de la façade Est. De telles conditions provoquèrent l'édification de la flèche aux Cacaouis par diffraction des houles d'Est à Nord-Est sur la partie Sud-Est de l'île de Miquelon. Cette hypothèse est confirmée par la présence de crochets fossiles recourbés vers l'Ouest attestant de l'action des houles de secteur Nord-Est (photo.5).

Le cordon des Butteraux progradant progressivement vers le Sud, la zone devient de plus en plus protégée des houles de secteur Ouest. Le transport sédimentaire dans cette zone protégée est ainsi contrôlé par les houles de secteur Est. Ce changement d'influence des houles va favoriser la création de « beach ridges » (photo.6) par l'accolement de barres intertidales (photo.7) associé à un flux sédimentaire sud-nord important.

La liaison avec l'île de Langlade s'effectue par la rencontre de la partie Nord (ou plutôt de la partie sud de Miquelon), migrant vers le Sud (Langlade les travaux de modélisation et l'étude des cartes anciennes valident cette hypothèse) et de la flèche ébauchée au Nord de Langlade (attention, une rencontre se fait entre deux choses) . Cette liaison, difficile à établir du fait de la présence de courants importants aurait été favorisée par de nombreux échouages de navires (plus de sept cents) dans cette zone. Elle se serait établi au 18^{ème} siècle suivant l'étude de cartes anciennes.

Conclusion

Les trois missions réalisées sur l'archipel de St Pierre et Miquelon avaient pour but d'étudier l'évolution morphologique de l'isthme de Miquelon-Langlade ainsi que l'environnement marin à son voisinage. Des travaux en laboratoire portant sur l'évolution du trait de côte à une échelle semi-séculaire, la propagation de la houle et l'estimation du transit sédimentaire potentiel sur l'avant-côte de la façade Ouest complètent le travail de terrain.

L'étude de l'évolution des paramètres morfo-sédimentaires met en évidence :

- Sur la façade ouest, la pente de la plage de l'ordre de 9% est relativement homogène du Nord vers le Sud. Celle de la façade est possède une pente plus douce (de l'ordre de 6.5%) devenant plus forte vers le Sud (8.5%). La largeur de la plage est plus grande sur ce secteur de côte.
- Le sédiment de la façade ouest est relativement homogène du Nord vers le Sud et est constitué de sable grossier mal classé. Sur la façade est, un grano-classement positif du nord vers le sud peut être mis en évidence. Cependant, le sédiment est représentatif d'un sable fin sur la majeure partie de la façade

étudiée. Au Sud il devient plus grossier. Aucun changement significatif de la granulométrie est observé sur les deux années d'investigation.

L'observation des paramètres morpho-sédimentaires est corrélée avec l'évolution du trait de côte observée depuis 2003.

- La façade ouest est sensible aux conditions d'agitation et de tempêtes. Depuis deux ans, cette façade subit une érosion significative du trait de côte.
- La façade est présente une accrétion ou une stabilité du trait de côte. Seule une petite zone localisée au Sud de l'embouchure est en érosion depuis deux ans. Cependant, la tendance semble se stabiliser lors du dernier levé.

La morphologie de l'avant-côte, ainsi que sa nature sédimentologique fut étudiée.

- Ainsi, une plate forme constituée de sable fin peut être délimitée au voisinage proche de l'isthme. Cette plate forme très étendue vers le large sur la façade est, est beaucoup plus restreinte côté ouest. Par contre, l'extension vers le Nord semble très limitée. Une dissymétrie du volume du stock sédimentaire de sable fin entre les deux façades est donc mise en évidence.

Cette étude a également permis d'acquérir les premières données de houle directionnelle sur l'archipel. Les données enregistrées sur la façade Ouest pour un mois de Septembre révèlent la dominance d'une agitation de secteur Ouest inférieure à 1 m. Ces caractéristiques sont contrôlées par les vents locaux. Cette façade sera relativement protégée lors de coups de vent en provenance de l'Est. Les courants moyens sont faibles et ne possèdent pas la compétence suffisante pour mettre en mouvement les sédiments. Ainsi, le transport sédimentaire sur l'avant-côte semble être gouverné par les caractéristiques de l'agitation.

L'étude de l'évolution du trait de côte sur les cinquante dernières années a été possible grâce à la superposition de photographies aériennes verticales sur la zone d'étude. Cette méthodologie permet de connaître les tendances évolutives récentes de l'isthme de Miquelon-Langlade. Ces investigations sur la côte Ouest montrent malgré une stabilité relative du trait de côte entre 1990 et 2003, que le cordon des Buttereaux est une zone fragile de nouveau en érosion depuis 2003. Actuellement, la largeur du cordon n'est que de 50 m dans la partie la plus étroite. Or, cette façade est sensible aux événements de tempêtes (la période 1985-1990 par exemple ou les résultats des simulations numériques de la propagation de la houle) ainsi qu'à une pression anthropique grandissante. A l'inverse, la façade Est présente une accrétion depuis cinquante ans, à l'exception de l'extrémité de la flèche Nord.

Bibliographie

Bell, T., Batterson, M.J., Liverman, D.G.E., and Shaw, J., 2003. A new late-glacial sea-level record for St. George's Bay, Newfoundland. *Canadian Journal of Earth Sciences* 40, 1053-1070.

Shaw,J., Piper,D.J.W., Fader,G.B.J., King,E.L., Todd,B.J., Bell,T., Batterson,M.J., and Liverman,D.G.E., 2006. A conceptual model of the deglaciation of Atlantic Canada. Quaternary Science Reviews 25, 2059-2081.

Remerciements

Cette étude a été rendue possible grâce au financement du Conseil Régional de Basse-Normandie, du Conservatoire du Littoral, de l'Agence de l'eau Seine Normandie et du Conseil Général de St Pierre et Miquelon. Les différentes campagnes n'auraient pas pu être réalisées sans de nombreux contacts et collaborations établis sur l'archipel. L'aide du Service de l'Équipement et du Service des Phares et Balises a été primordiale pour la réalisation des missions en mer sur leur navire de service « Paul Vaillon ». L'équipe des plongeurs du Service de l'Équipement est également remerciée. Le Département de l'Agriculture a joué un rôle essentiel dans le bon déroulement des missions grâce à son aide logistique aussi bien sur St Pierre que sur Miquelon. Enfin nous remercions Roger Etcheberry pour m'avoir aidé à réaliser mes travaux de mesures pendant de nombreuses journées de terrain.

GLOSSAIRE / LEXIQUE

Paramètres morpho-sédimentaires des plages : Il s'agit de paramètres permettant de caractériser la plage (morphologie, profil de la plage, taille du sédiment).

Forçage : Elément dont l'action aura pour conséquence d'induire des modifications.

Conditions hydrodynamiques: Les conditions hydrodynamiques correspondent aux caractéristiques des courants (intensité et direction) et à ceux de la houle (hauteur, direction, période).

Flèche : Accumulation sédimentaire qui se propage librement vers la mer. Cette morphologie est régulièrement présente au niveau des embouchures où lors d'une irrégularité du tracé de la côte.

Embouchure tidale : Embouchure d'un fleuve ou d'une lagune qui est influencée par la marée.

Avant-côte : Domaine marin dont le fond subit l'action des vagues en période de beau temps. Sa limite vers le large est située à une profondeur entre -5 et -25 m.

Granulométrie : Taille du sédiment.

Profils bathymétriques : Détermination de l'altitude d'une zone sous l'eau.

SHOM : Service Hydrographique et Océanographique de la Marine.

Profils topographiques transversaux : Profils topographiques en 2D qui sont perpendiculaires à la plage

Marnage microtidal : Le marnage est la différence de hauteur entre la basse mer et la haute mer. Le terme microtidal correspond à un marnage inférieur à 2 mètres.

Crochon : L'extrémité des flèches sédimentaires présente dans certains cas une individualisation des crêtes dunaires. On parle alors de crochon ou de crochet.

Beach ridges: Cordons dunaires parallèles.

Accrétion: Partie d'une plage qui possède un bilan sédimentaire positif (gain de sediments).

Berne: Accumulation sédimentaire localisée sur la haute plage.

Conditions d'agitation : Houle au large.

Morphodynamique des plages : Etude de l'évolution morphologique d'une plage.

Inlandsis Laurentidien : Calotte glaciaire située sur la Canada il y a 18000 ans B.P.

Progradation : Phénomène qui se caractérise par une avancée.

Phénomènes isostatiques : Déplacement vertical de la croûte continentale ou océanique.

Subsidence : Enfouissement progressif pendant une assez longue période d'un bassin sédimentaire.

Contexte transgressif : Période géologique où le niveau marin augmente.

Matériaux morainiques : Ensemble de pierres (de taille centimétrique ou métrique) entraînées par un glacier.

Alimentation "cross-shore": Apport sédimentaire perpendiculaire au littoral.

Caoudeyres: Brèche dans le milieu dunaire où s'engouffre le vent.

Barre intertidale : Morphologie (banc ou barre) qui est découverte à marée basse et recouverte par la mer à marée haute .



Photo.1 : L'isthme de Miquelon-Langlade (photo N.Robin)



Photo.2 : Prélèvement d'un échantillon sédimentaire à l'aide d'une benne

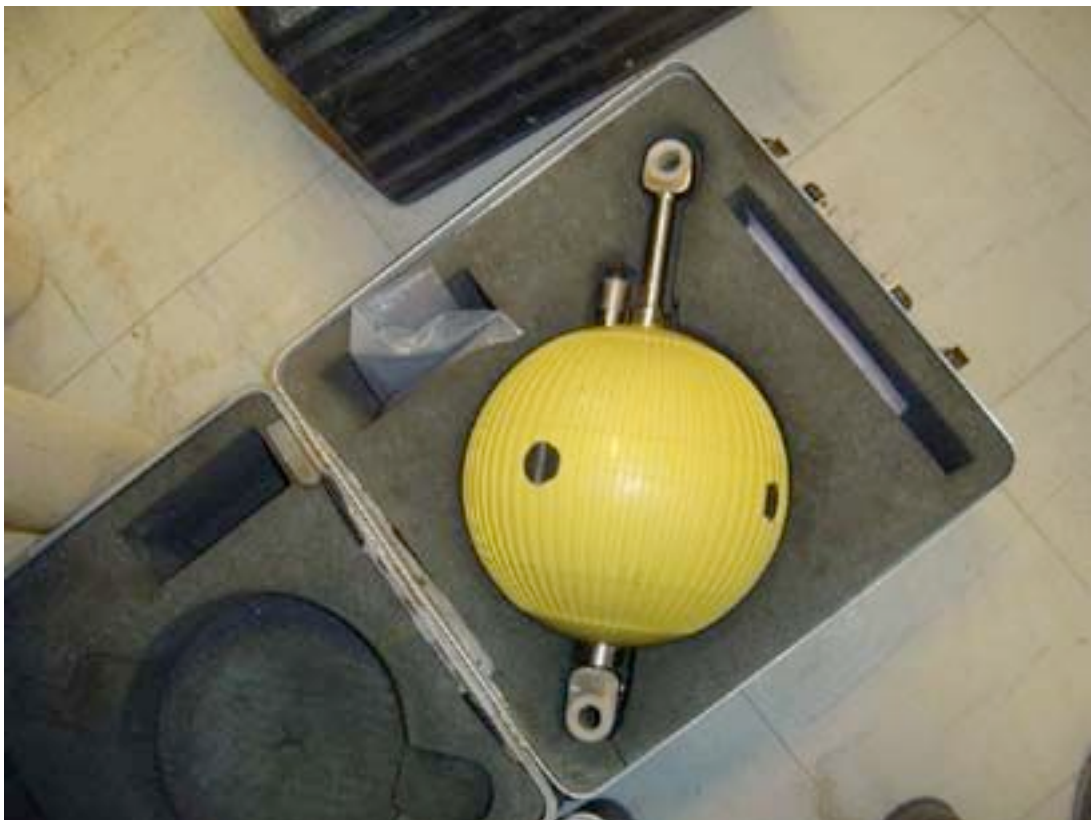


Photo.3 : Un Houlographe-courantomètre dans sa boîte

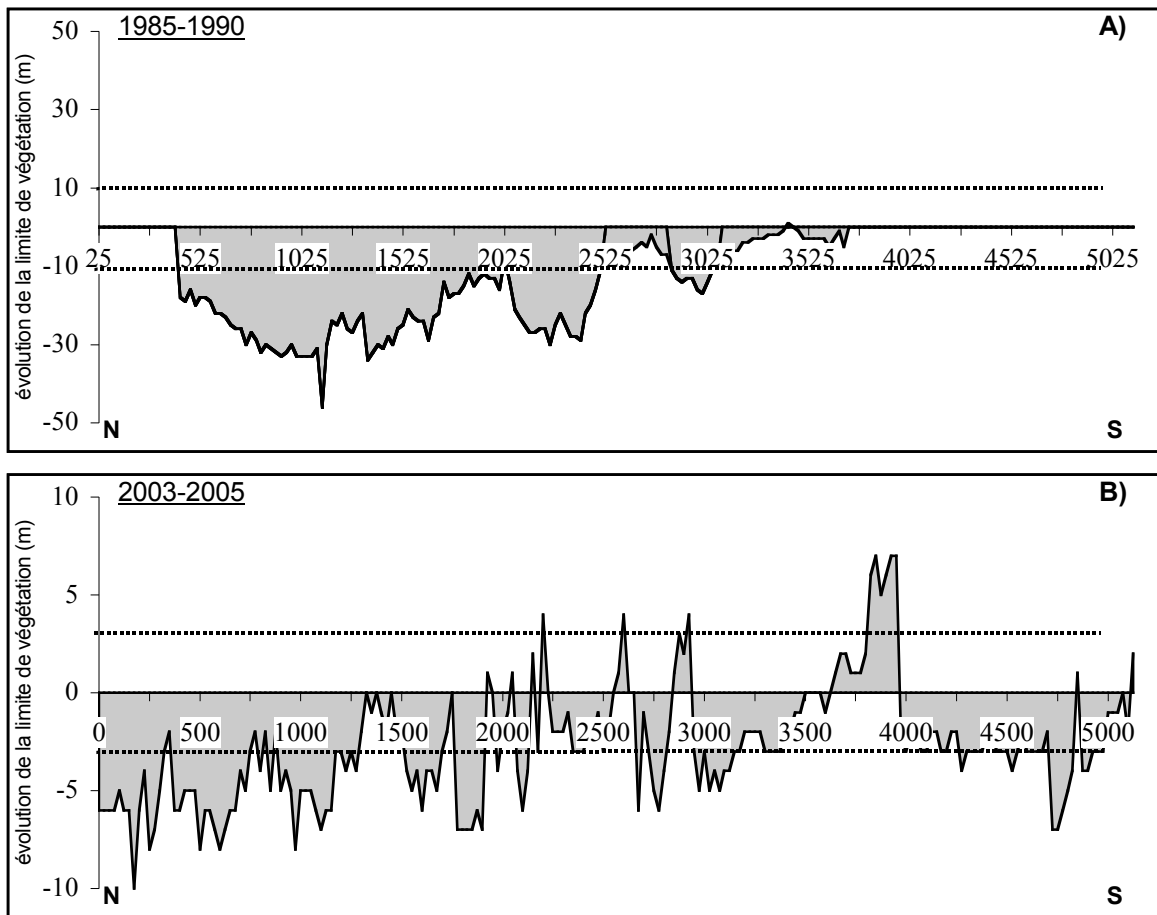


Figure.1 : Evolution de la ligne de végétation de la façade Ouest entre 1985-1990 (A, l'incertitude est de +/- 10 m) et 2003-2005 (B, l'incertitude est de +/- 2.5 m). Le transect commence au ruisseau de la Mère Durand jusqu'à la borne pK 18.

Localisation des trnsects A et B ?

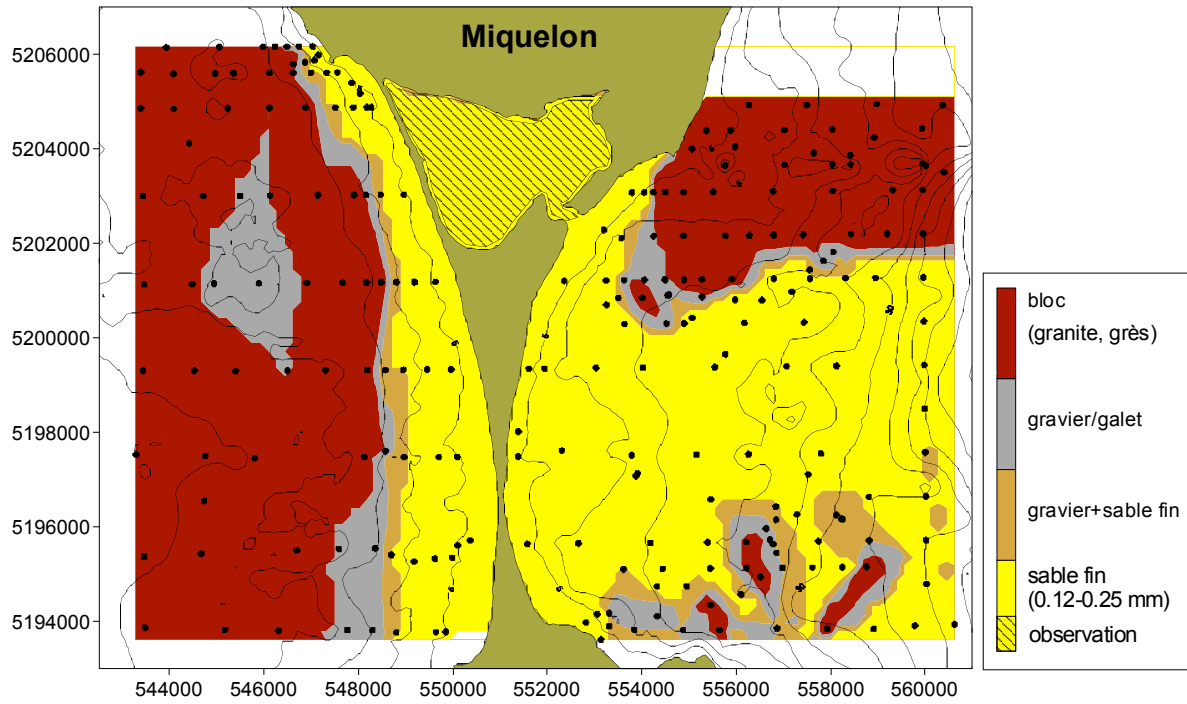


Figure.2 : Zoom de la carte sédimentaire au voisinage de l'isthme de Miquelon-Langlade (N.Robin). Les points noirs sont les lieux d'échantillonnage.

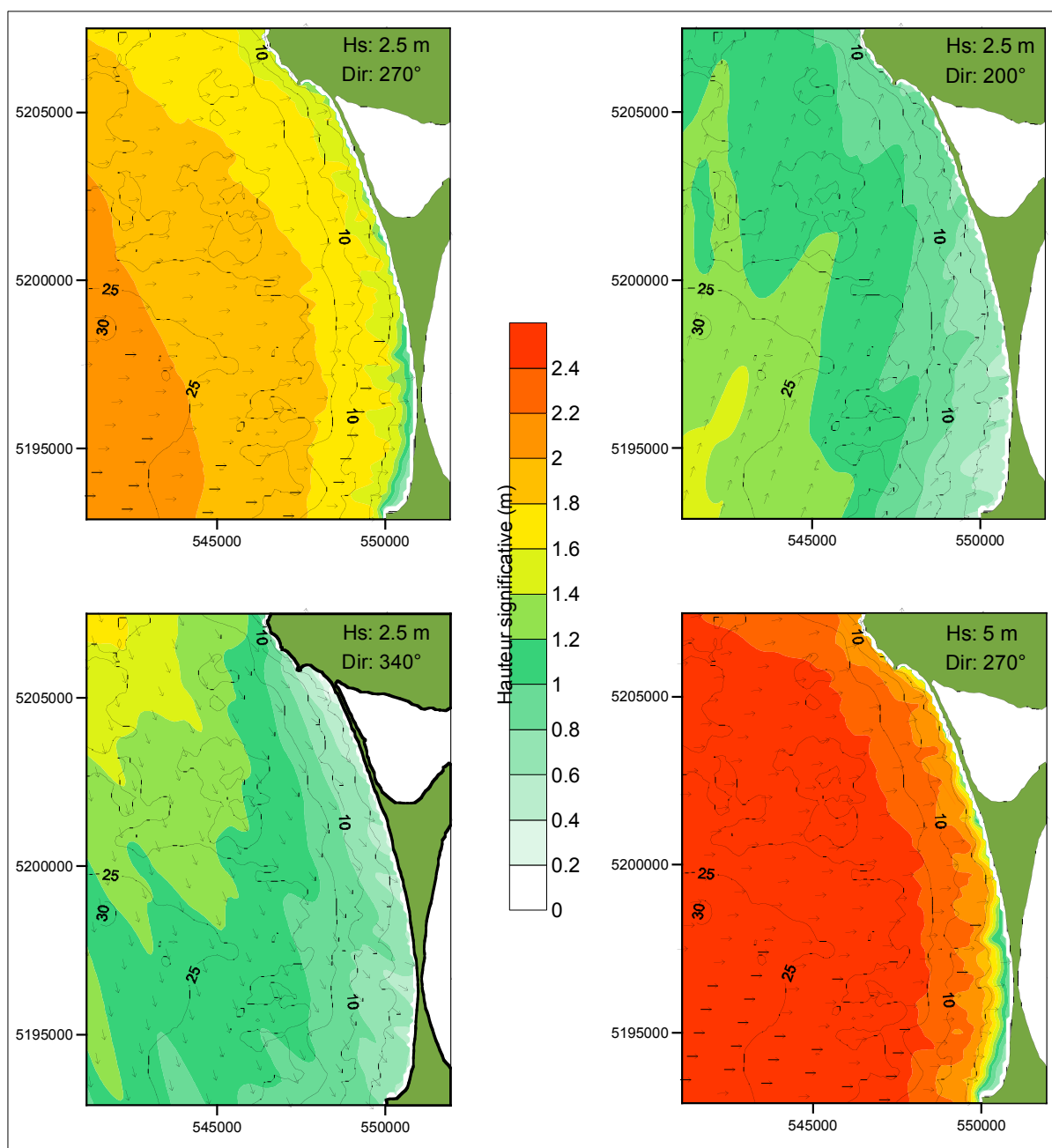


Figure.3 : Différents scénarios de la propagation de la houle sur l'avant-côte de la façade Ouest de l'isthme de Miquelon-Langlade (N.Robin).

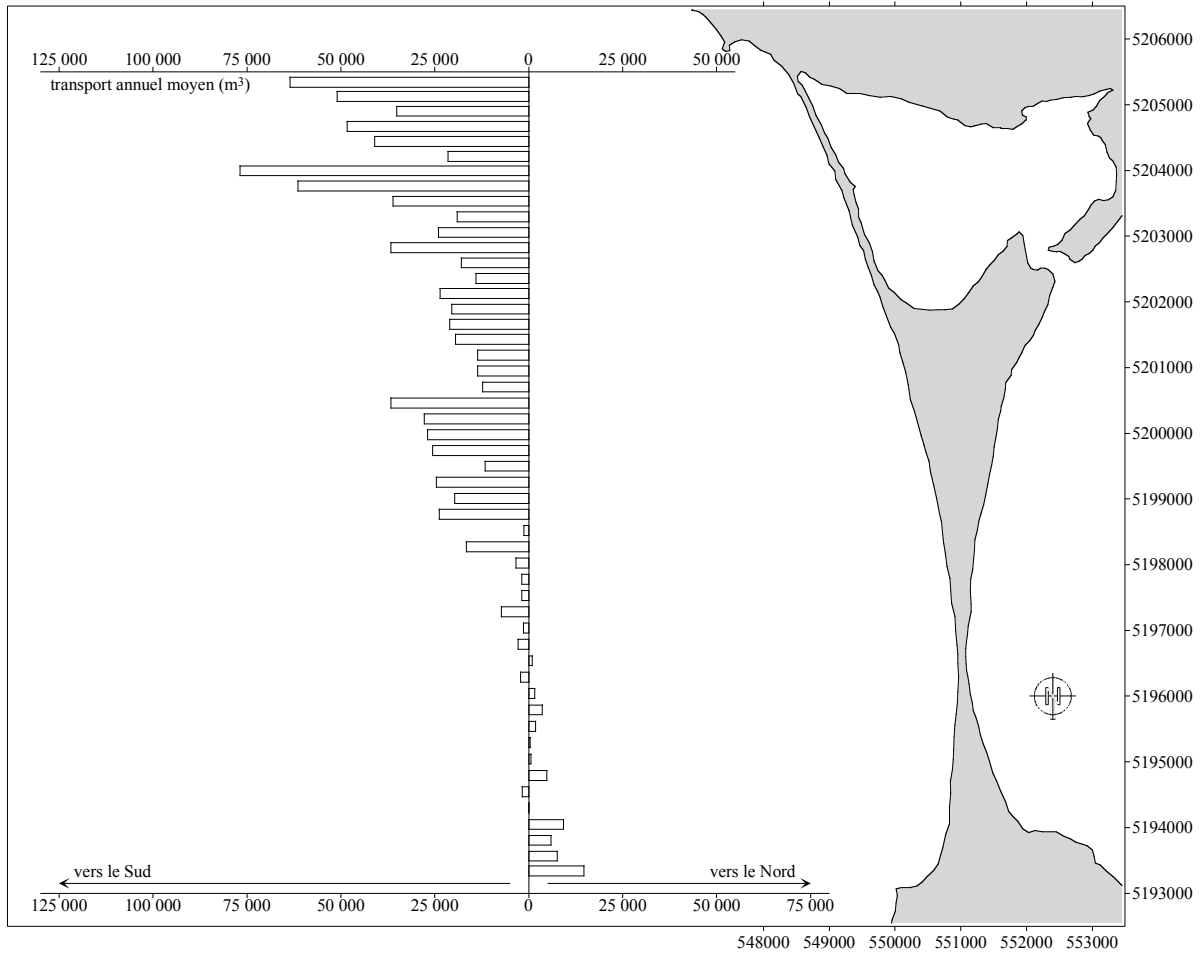


Figure.4 : Modélisation du taux de transport sédimentaire potentiel annuel sur la façade Ouest de l'isthme de Miquelon-Langlade (N.Robin).

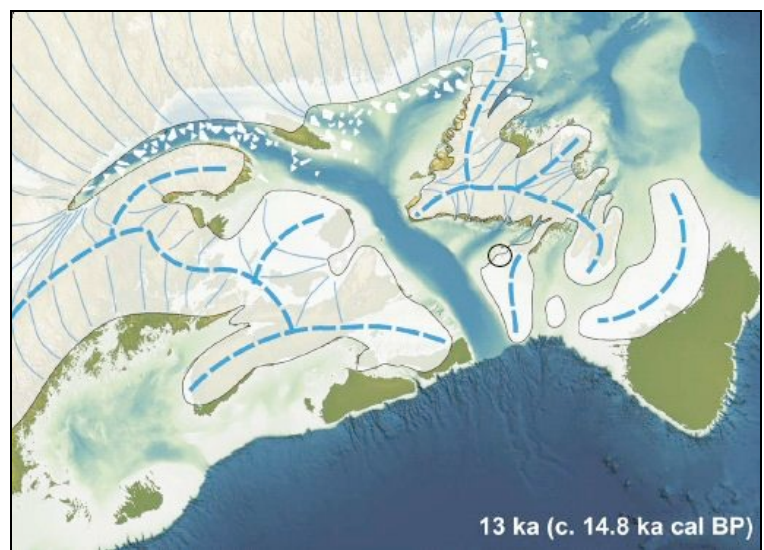
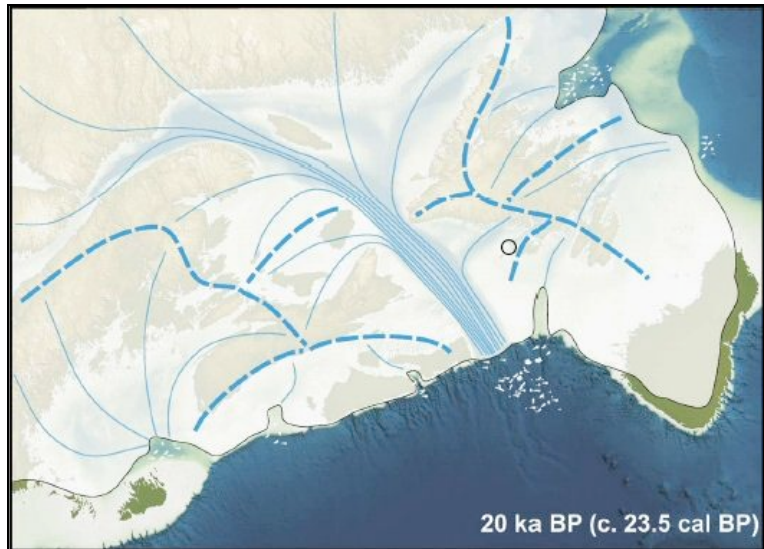


Figure.5 : Recul de la position des glaciers au Canada au Quaternaire (Shaw *et al.*, 2006). Les pointillés figurent l'axe de retrait des glaciers.



Photo.4 : Les Buttereaux sur la façade Ouest de l'isthme



Photo.5 : La pointe aux Cacaouis sur la façade Est de l'isthme (photo :N.Robin).



Photo.6 : Système de « beach ridges » sur la façade Est de l'isthme (photo :N.Robin).



Photo.7 : Présence de barres subtidales au sud de la façade Est de l'isthme (photo :N.Robin).