

Modélisation de l'évolution du littoral des îles de la Madeleine, Québec

Shoreline Evolution Model of the Îles de la Madeleine, Québec

Erstellung eines Modells zur Entwicklung des Küstenstreifens der îles de la Madeleine, Québec

Georges Drapeau et Odette Mercier

Volume 44, numéro 2, 1990

URI : <https://id.erudit.org/iderudit/032819ar>

DOI : <https://doi.org/10.7202/032819ar>

[Aller au sommaire du numéro](#)

Éditeur(s)

Les Presses de l'Université de Montréal

ISSN

0705-7199 (imprimé)

1492-143X (numérique)

[Découvrir la revue](#)

Citer cet article

Drapeau, G. & Mercier, O. (1990). Modélisation de l'évolution du littoral des îles de la Madeleine, Québec. *Géographie physique et Quaternaire*, 44(2), 217–226. <https://doi.org/10.7202/032819ar>

Résumé de l'article

L'hypothèse selon laquelle le bilan périphérique de l'érosion et de la sédimentation du littoral d'une île devrait être essentiellement nul a été vérifiée aux îles de la Madeleine, un ensemble d'îles de 70 km de longueur situé au centre du golfe du Saint-Laurent. Le principe de continuité a servi à élaborer un modèle qui permet d'établir le bilan sédimentaire du littoral. Les volumes de sédiments associés à l'érosion et à la sédimentation du littoral ont été calculés en déterminant d'une part l'avancée ou le retrait de la ligne de rivage et en déterminant d'autre part le profil de la plage. Pour ce faire, le littoral a été divisé en segments de 500 m de largeur auxquels ont été associés 236 profils de plage. Les résultats montrent que le bilan sédimentaire des plages est essentiellement nul, la sédimentation dépassant l'érosion de seulement 1300 m³/an. Le littoral des îles de la Madeleine est néanmoins très dynamique puisque l'érosion totalise 294 800 m³/an et la sédimentation, 296 100 m³/an. L'érosion des falaises a été calculée en supposant un retrait uniforme de 30 cm/an, ce qui donne un taux d'érosion de quelque 172 500 m³/an. L'analyse détaillée de l'érosion et de la sédimentation littorales a permis de mettre en évidence la configuration du transport littoral autour des îles.

MODÉLISATION DE L'ÉVOLUTION DU LITTORAL DES ÎLES DE LA MADELEINE, QUÉBEC

Georges DRAPEAU et Odette MERCIER, INRS-Océanologie, Université du Québec, Laboratoire océanologique de Rimouski, Rimouski, Québec G5L 3A1.

RÉSUMÉ L'hypothèse selon laquelle le bilan périphérique de l'érosion et de la sédimentation du littoral d'une île devrait être essentiellement nul a été vérifiée aux îles de la Madeleine, un ensemble d'îles de 70 km de longueur situé au centre du golfe du Saint-Laurent. Le principe de continuité a servi à élaborer un modèle qui permet d'établir le bilan sédimentaire du littoral. Les volumes de sédiments associés à l'érosion et à la sédimentation du littoral ont été calculés en déterminant d'une part l'avancée ou le retrait de la ligne de rivage et en déterminant d'autre part le profil de la plage. Pour ce faire, le littoral a été divisé en segments de 500 m de largeur auxquels ont été associés 236 profils de plage. Les résultats montrent que le bilan sédimentaire des plages est essentiellement nul, la sédimentation dépassant l'érosion de seulement 1300 m³/an. Le littoral des îles de la Madeleine est néanmoins très dynamique puisque l'érosion totalise 294 800 m³/an et la sédimentation, 296 100 m³/an. L'érosion des falaises a été calculée en supposant un retrait uniforme de 30 cm/an, ce qui donne un taux d'érosion de quelque 172 500 m³/an. L'analyse détaillée de l'érosion et de la sédimentation littorales a permis de mettre en évidence la configuration du transport littoral autour des îles.

ABSTRACT *Shoreline evolution model of the Îles de la Madeleine, Québec.* The premise that for the case of an island the peripheral budget for erosion and accretion of the shore should be essentially nil is verified for Îles de la Madeleine. The principle of continuity is used to develop a model that makes it possible to establish a budget for the erosion and the sedimentation of the littoral zone. The volumes of sediments associated with the erosion and the sedimentation of the littoral zone are established by calculating on the one hand the advance or retreat of the shoreline and on the other hand the profile of the beach. To do so the shore of the islands has been divided into 500 m wide cells to which are combined 236 beach profiles. The results show that the sedimentary budget is essentially nil, sedimentation exceeding erosion by only 1300 m³/yr. Nonetheless the shore is very dynamic as erosion totals 294,800 m³/yr and sedimentation totals 296,100 m³/yr. The erosion of sea cliffs has been calculated separately using a uniform retreat of 30 cm/yr, which gives an erosion rate of some 172,500 m³/yr. Detailed analysis of erosion and sedimentation permits to outline the different patterns of littoral transport along the shores of the islands.

ZUSAMMENFASSUNG *Erstellung eines Modells zur Entwicklung des Küstenstreifens der îles de la Madeleine, Québec.* Die Hypothese, derzufolge die Oberflächenbilanz der Erosion und Sedimentierung des Küstenstreifens einer Insel im wesentlichen bedeutungslos sein sollte, ist an den îles de la Madeleine überprüft worden, einer Gruppe von Inseln von 70 km Länge, die im Zentrum des Sankt Lorenzgolfs liegt. Das Kontinuitätsprinzip diente der Erstellung eines Modells, mit dem sich die Sedimentierungsbilanz darstellen lässt. Die Volumen der Sedimente, die mit der Erosion und der Sedimentierung des Küstenstreifens in Verbindung gebracht werden, wurden berechnet, indem man einerseits das Vorrücken und Zurückweichen der Uferlinie und andererseits das Küstenprofil bestimmt hat. Für diesen Zweck wurde der Küstenstreifen in Segmente von 500 m Länge unterteilt, denen man 236 Strandprofile zugeordnet hat. Die Ergebnisse zeigen, dass die Sedimentierungsbilanz der Strände im wesentlichen bedeutungslos ist, da die Sedimentierung die Erosion nur um 1300 m³/Jahr übertrifft. Der Küstenstreifen der îles de la Madeleine ist trotzdem sehr dynamisch, da die Erosion insgesamt 294 500 m³/Jahr beträgt und die Sedimentierung 296 100 m³/Jahr. Die Erosion der Steilküsten wurde unter der Annahme eines gleichförmigen Rückzugs von 30 m/Jahr berechnet, was einen Erosionswert von einigen 172 500 m³/Jahr ergibt. Die detaillierte Analyse der Küstenerosion und sedimentierung hat erlaubt, die Gestaltung des Transports des Küstenstreifens um die Inseln offenzulegen.

* Contribution du 6^e Congrès de l'Association québécoise pour l'étude du Quaternaire, sous la direction de Bernard Hétu
Manuscrit reçu le 25 octobre 1988; manuscrit révisé accepté le 19 février 1990.

INTRODUCTION

Les plages des îles de la Madeleine, situées au centre du golfe du Saint-Laurent (fig. 1), attirent l'attention des sédimentologues parce qu'on y trouve tous les exemples classiques de l'évolution d'un littoral assujéti à l'action dominante des vagues. De plus, l'érosion spectaculaire des escarpements rocheux d'une part et la stabilité des plages sableuses d'autre part peuvent paraître paradoxales. En effet, les affleurements rocheux faisant face à la mer montrent tous des falaises vives en voie d'érosion. Les grès rouges et verts sont particulièrement vulnérables et leur recul peut atteindre plus d'un mètre par année, comme l'a montré la passe récemment creusée pour relier l'étang de l'Hôpital au golfe. Par contre, les plages sont plus stables que les littoraux rocheux; certaines s'érodent tandis que d'autres s'accroissent, ce qui assure l'équilibre de l'ensemble insulaire.

L'objectif de notre travail est d'étudier l'évolution du littoral des îles de la Madeleine. Nous avons ainsi adopté le principe de continuité pour élaborer un modèle qui permette d'établir le bilan sédimentaire des plages. On pose aussi comme prémisses que, dans le cas d'une île, le bilan périphérique de l'érosion et de la sédimentation des plages doit être essentiellement nul; autrement il y aurait croissance indéfinie dans le cas d'une sédimentation excédentaire ou disparition probable si l'érosion prédominait.

Certains modèles de l'évolution du littoral ont été fondés sur la détermination de la hauteur et la période des vagues qui atteignent le rivage et sur l'évaluation de la proportion de cette énergie qui contribue effectivement au transport littoral des sédiments, soit en calculant directement le flux d'énergie des vagues, soit en évaluant la contrainte de cisaillement eau-sédiment (Kamphuis *et al.*, 1986). On peut ainsi quantifier le volume de sédiments transportés et estimer l'érosion ou la sédimentation qui en résulte. On ne dispose cependant pas des données nécessaires pour appliquer de tels modèles à l'ensemble des plages des îles de la Madeleine. D'autres types de modèles servent plutôt à prévoir le déplacement de la ligne de rivage en fonction de la variation du niveau de la mer (Bruun, 1954, 1962; Elderman, 1970; Dean, 1975; Bruun et Schwartz, 1985). Le modèle élaboré ici pour quantifier l'évolution du littoral des îles de la Madeleine s'apparente au deuxième type de modèles, sauf que nous ne tenons pas compte des variations à long terme du niveau marin pour les comparaisons que nous avons faites entre 1963 et 1977.

Les îles de la Madeleine se prêtent particulièrement bien à la modélisation parce qu'elles sont de dimension suffisante (70 km de longueur) pour que se développe une géomorphologie littorale spécifique, mais aussi assez petites pour être assujetties à des contraintes uniformes. La modélisation des plages des îles de la Madeleine est d'autant plus intéressante à réaliser que celles-ci sont exposées à des vagues en provenance de toutes les directions. De plus, comme il n'y a ni rivières dans les îles ni canyons sous-marins à proximité, on n'a donc pas à inclure dans le modèle de source ou piège extérieurs de sédiments qui compliqueraient le calcul du bilan sédimentaire. Un autre facteur contribue à faciliter la modélisation, la granulométrie des sédiments littoraux est suffisamment uni-

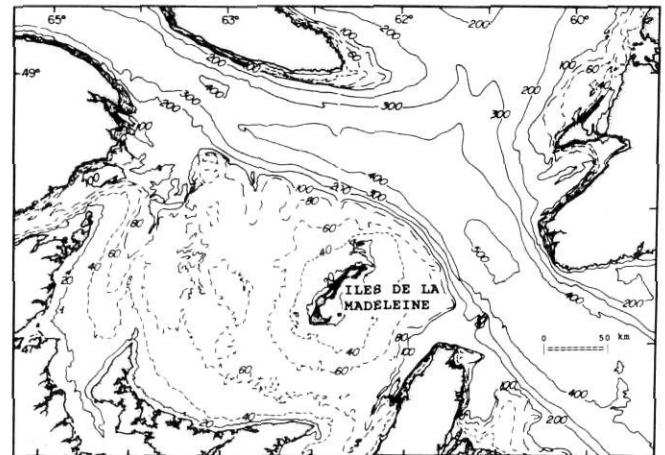


FIGURE 1. Carte de localisation bathymétrique des îles de la Madeleine sur le plateau madelinien. Les profondeurs sont en mètres.

Bathymetric location map of Îles de la Madeleine on the Magdalen platform. Depths are in metres.

forme autour des îles ($D_{50} = 0,25$ mm) pour que la mobilité des sédiments puisse être considérée comme étant essentiellement la même pour les différentes plages.

DESCRIPTION DU MILIEU

GÉOLOGIE ET GÉOMORPHOLOGIE

Les îles de la Madeleine sont constituées de deux entités lithostratigraphiques. À la base, on trouve des sédiments terrigènes, des carbonates, des évaporites, des volcanoclastites et des laves. L'entité supérieure est composée de grès rouges et gris-vert qui reposent en discordance sur l'entité inférieure (Brisebois, 1981). Presque toutes les falaises exposées à la mer sont façonnées dans ces grès rouges et gris vert.

Les îles de la Madeleine comprennent un ensemble de sept îlots rocheux reliés par des flèches de sable et des tombolos doubles qui forment des lagunes (fig. 2). L'examen des photographies aériennes montre comment les tombolos doubles se sont développés à partir des noyaux rocheux et comment aussi les flèches terminales se sont progressivement formées (Owens, 1975; Owens et McCann, 1980).

MILIEU PHYSIQUE

Les vents aux îles de la Madeleine sont associés aux systèmes climatiques qui se déplacent vers l'est et qui engendrent des vents en provenance surtout de l'ouest et du nord-ouest (fig. 3). Les îles sont aussi assujetties occasionnellement à des tempêtes extra-tropicales qui migrent le long de la côte de l'Atlantique.

Les fetchs mesurent plus de 300 km, sauf en direction sud où ils sont limités à 100 km. Les vagues dans le golfe du Saint-Laurent sont normalement plus accentuées que les vagues océaniques. La majorité des vagues mesurent de 0,5 à 2 m de hauteur avec des périodes correspondantes de 4 à 7 secondes (fig. 3A). Les vagues les plus longues générées dans le golfe ont une période de 14 secondes (Boczar-Karakiewicz *et al.*, 1987), mais des périodes encore plus longues ont été enregistrées occasionnellement à partir de vagues en prove-

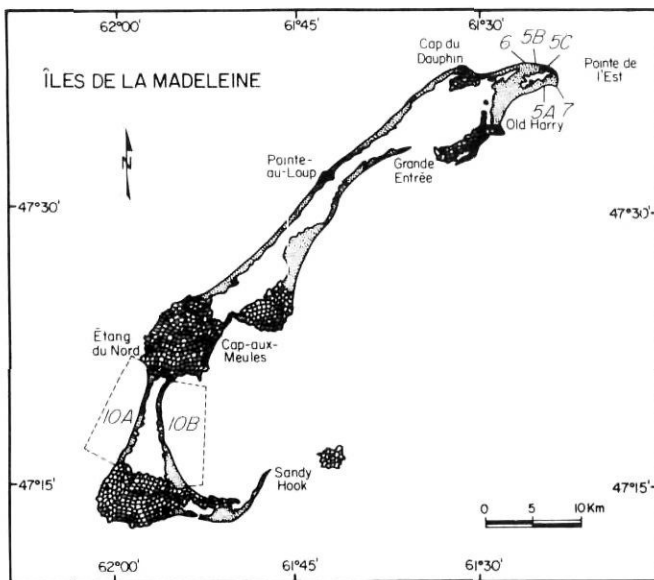


FIGURE 2. Carte des îles de la Madeleine qui met en évidence les îlots rocheux auxquels sont rattachés les cordons littoraux et les flèches terminales. La localisation des figures 5, 6, 7 et 10 est indiquée.

Map of Îles de la Madeleine outlining the rocky islets to which are attached barrier beaches and terminal spits. The location of figures 5, 6, 7 and 10 is shown.

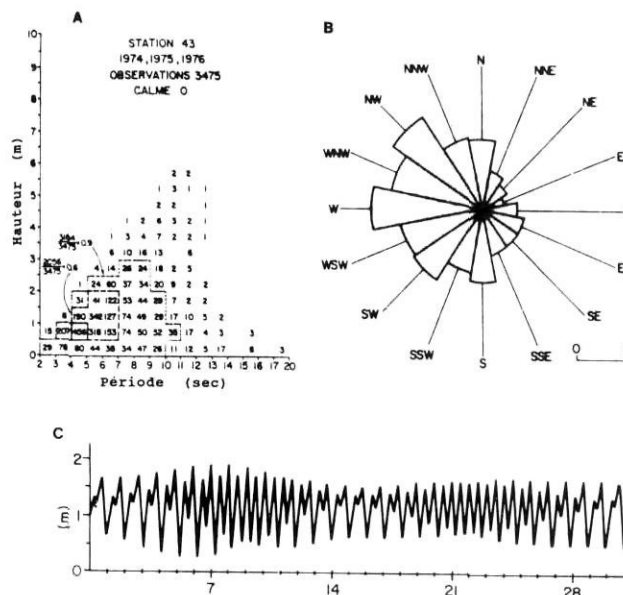


FIGURE 3. Vents, vagues et marées aux îles de la Madeleine. A) Histogramme des mesures de vagues enregistrées en 1974, 1975 et 1976 à l'est de l'extrémité nord-est des îles de la Madeleine. Le diagramme montre la hauteur caractéristique des vagues (H_{33}) en fonction de la période prédominante. B) Rose de la fréquence des vents enregistrés à la station marine de Cap-aux-Meules, de 1951 à 1980. C) Enregistrement de la marée durant un mois lunaire à Pictou, Nouvelle-Écosse, qui sert de référence aux îles de la Madeleine.

Winds, waves and tides on Îles de la Madeleine. A) Histogram of wave measurements recorded in 1974, 1975 and 1976 east from the north-east end of the islands. The diagram shows the significant wave height (H_{33}) versus the peak period. B) Wind rose of wind frequencies recorded at Cap-aux-Meules marine station from 1951 to 1980. C) Tidal record during one lunar month from Pictou, Nova Scotia, that serves as a reference for Îles de la Madeleine.

nance de l'Atlantique qui ont migré dans le golfe par le détroit de Cabot.

Aux îles de la Madeleine, la marée est mixte et surtout diurne (fig. 3C), les îles se situant à quelque 50 km d'un point amphidromique de la composante semi-diurne de la marée (Farquharson, 1970). La hauteur de la marée est de 58 cm pour les marées moyennes et de 95 cm pour les marées de vives-eaux (Pêches et Océans Canada, 1986).

La glace se forme le long du littoral de janvier à avril et la glace de dérive en provenance d'autres régions du golfe peut causer d'importantes accumulations locales.

ÉVOLUTION DU LITTORAL

Le dynamisme des plages des îles de la Madeleine devient particulièrement apparent quand on analyse l'évolution de la partie nord des îles (Drapeau, 1980). En raison de la prédominance des vents du quadrant nord-ouest, l'érosion des plages prédomine du côté ouest et la sédimentation se produit surtout du côté est, plus abrité, comme le montrent, à partir de cartes et de photographies aériennes, des mesures du déplacement de la ligne de rivage de l'île de l'Est, à l'extrémité nord-est des îles de la Madeleine (fig. 4). Un étang, le grand étang de l'Est, situé à un kilomètre de la pointe de l'Est, était, en 1890, relié au golfe par un goulet (fig. 5A). Cette partie du littoral s'est complètement ensablée et se trouvait à 650 m de la plage en 1934, ce qui correspond à une avancée de la plage de 14,8 m/an. Au cours de la même période l'érosion de la plage a atteint 200 m du côté nord de la pointe de l'Est (fig. 5B). Enfin, la superposition de photographies aériennes, prises entre 1952 et 1977, à des relevés hydrographiques datant de 1934 nous permet de vérifier la tendance récente de l'érosion du littoral de la partie nord de la pointe de l'Est (fig. 5C). Le diagramme à droite de la figure 5C montre que l'érosion a été uniforme durant la période de 1934 à 1977 avec un taux moyen de 8,4 m/an. Ces résultats mettent en évidence la grande mobilité du littoral et la capacité d'adaptation des plages aux conditions hydrodynamiques prévalantes.

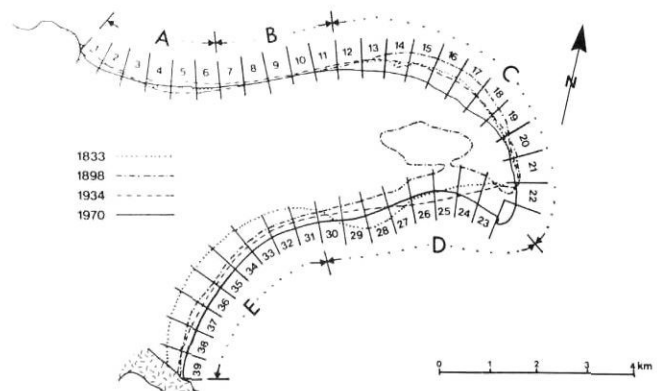


FIGURE 4. Évolution du littoral de l'île de l'Est de 1833 à 1970. Le littoral est divisé en 39 segments d'une largeur de 500 m (d'après Drapeau, 1980).

Shoreline evolution of Île de l'Est between 1833 and 1970. The shore is divided into 39, 500 m wide, segments (after Drapeau, 1980).

L'érosion et la sédimentation des plages résultent du flux résiduel d'énergie créé par le déferlement oblique des vagues. À mesure que progresse ce processus, il provoque des modifications de la plage qui devient de plus en plus parallèle aux vagues déferlantes et passe ainsi d'un stade d'érosion à un stade d'équilibre. Les processus d'érosion et de sédimentation du littoral sont cependant soumis à une certaine inertie de sorte qu'ils ne s'arrêtent pas instantanément lorsqu'est atteint l'état d'équilibre. En fait, ce sont des mouvements oscillatoires qui se superposent à des périodes et des longueurs d'onde différentes. La période et la longueur d'onde les plus courtes sont celles des plages en croissant, tandis que les phénomènes qui nous intéressent s'étendent sur quelques décennies et plu-

sieurs kilomètres. Par exemple, dans le cas de la partie nord des îles, le diagramme de la figure 5C montre un taux constant d'érosion de 1952 à 1977, ce qui indique que les conditions d'équilibre n'étaient pas encore atteintes en 1977, comme le montre la figure 6. En contrepartie, on observe une accumulation importante de sédiments à l'extrémité sud-est de la pointe de l'Est (fig. 7).

MÉTHODOLOGIE

MODÈLE

Le principe de continuité est un concept qui s'applique au transport littoral des sédiments. Considérons une section uni-

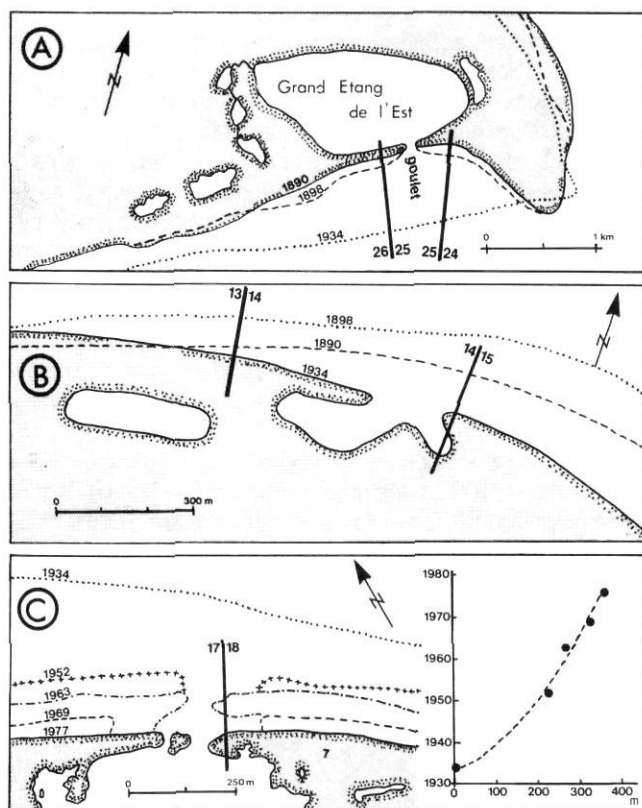


FIGURE 5. Exemples d'érosion et de sédimentation (localisés à la fig. 2) du littoral de l'île de l'Est. A) Évolution du «goulet» au grand étang de l'Est. Les cartes cadastrales de 1890 et de 1898 montrent que cet étang était alors ouvert sur le golfe du Saint-Laurent. On voit par les courbes de la carte marine de 1934 une accumulation importante de sédiments qui a complètement isolé le grand étang de l'Est du golfe. B) Évolution de 1898 à 1934 de la ligne de rivage de la partie nord de l'île de l'Est. C) Évolution de la ligne de rivage du côté nord de l'île de l'Est, de 1934 à 1977. Le taux de retrait de la côte est mis en évidence par le diagramme à droite de la figure (d'après Drapeau, 1980).

Examples of erosion and sedimentation of Île de l'Est. Evolution of the «goulet» at the Grand Étang de l'Est. Cadastral maps of 1890 and 1898 show that this pond was then opened on the Gulf. The 1934 navigation chart outlines the accumulation of large quantities of sediments that have completely closed Grand Étang de l'Est from the Gulf. B) Evolution of the shoreline between 1898 and 1934 on the northern side of Île de l'Est. C) Evolution of the shoreline of Île de l'Est between 1934 and 1977. The erosion rate of the coastline is outlined by the diagram on the right of the figure (after Drapeau, 1980).



FIGURE 6. Photographie montrant l'érosion du talus de haut de plage à la suite d'une tempête d'intensité moyenne (localisation à fig. 2).

Photograph showing the erosion of the backshore cliff after a storm of moderate intensity (see location on fig. 2).

FIGURE 7. Photographie montrant l'accumulation de sédiments au niveau du talus de haut de plage. Le véhicule est situé à l'emplacement de la ligne de marée haute en 1963. La limite de marée haute en 1979, à quelque 200 m du point d'observation, est indiquée par une flèche (localisation à la fig. 2).

Photograph showing the accumulation of sediments at the high tide berm level. The vehicle is parked at the location of the high tide line in 1963. The location of the high tide line in 1979, 200 m. away, is shown by an arrow (see location on fig. 2).

forme de plage qui pourrait mesurer 500 m, telle que schématisée à la figure 8. L'avancée ou le retrait de la ligne de rivage dans cette section est directement proportionnel au volume de sédiments accumulés ou érodés. Dans le cas du recul de la ligne de rivage de P_1 à P_2 , le volume de sédiments impliqué (Q_i) est égal au produit de la section verticale A multiplié par la longueur de plage considérée (dx_i). Comme on étudie l'évolution du littoral en fonction du temps et que l'axe des « x » est parallèle au transport littoral, l'équation de continuité peut se formuler comme suit :

$$\frac{\delta Q}{\delta X} + \frac{\delta A}{\delta t} = 0 \quad (1)$$

Plus spécifiquement selon les conventions de la figure 8, le littoral étant divisé en segments de largeur dx_i , pour chaque segment « i » une avancée dy_i de la ligne de rivage correspond à l'accumulation d'un volume de sédiments Q_i et un retrait dy_i à l'érosion correspondante, soit :

$$\frac{dQ_i}{dx_i} = \frac{dy_i (dB_i + dC_i + D/2)}{dt} \quad (2)$$

La sommation des changements de volume de chaque segment permet d'établir le bilan de l'érosion et de la sédimentation générées par le déplacement de la ligne de rivage.

$$Q_s = \sum Q_i \quad (3)$$

Ce bilan représente le régime sédimentaire qui reflète l'évolution du littoral.

APPLICATION AU LITTORAL DES ÎLES DE LA MADELEINE

Pour appliquer l'équation de continuité à l'évolution du littoral des îles de la Madeleine, il a d'abord fallu diviser le littoral en segments de largeur dx_i . D'une part les segments devaient être suffisamment petits pour que les conditions d'érosion ou de sédimentation soient uniformes à l'intérieur de chaque segment, d'autre part ils ne devaient pas être trop nombreux puisque chaque segment devait être mesuré. Les îles de la Madeleine sont caractérisées par des plages longues de plusieurs kilomètres, de sorte que des segments de 500 m sont appropriés pour les fins de la présente étude. Des segments plus petits ont aussi été délimités pour définir avec plus de précision certaines portions du littoral. Le littoral a ainsi été divisé en 469 segments. La figure 4 montre les 39 segments de la pointe de l'Est, à l'extrémité nord-est des îles de la Madeleine.

Les déplacements de la ligne de rivage ont été mesurés en superposant les deux séries de cartes produites à partir de photographies aériennes prises en 1963 à l'échelle de 1/7920 et en 1977 à l'échelle de 1/10 000. C'est essentiellement la méthode qu'ont utilisé Dolan *et al.* (1978, 1983) pour élaborer le «Coastal Erosion Information System». Ces auteurs rapportent que la marge d'erreur de cette méthode est de 2,5 m, ce qui correspond à nos estimations selon lesquelles la marge d'erreur pouvait atteindre 5 m (Mercier, 1987). D'autres séries de cartes et de photographies aériennes ont servi à obtenir des mesures sur une plus longue période et à vérifier la direction du transport littoral.

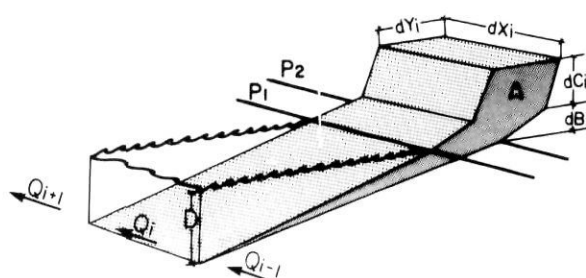


FIGURE 8. Schéma de modélisation. La plage est divisée en segments de largeur dx_i , le retrait de la ligne de rivage de P_1 à P_2 est dy_i , la hauteur de la plage est dB_i , la hauteur de la dune côtière est dC_i et D représente la profondeur à la limite marine du modèle. La partie ombragée « A » identifie la section perpendiculaire au rivage correspondant au retrait de la ligne de rivage de P_1 à P_2 .

Model outline. The beach is divided into segments of width dx_i . The retreat of the shoreline from P_1 to P_2 is dy_i . The beach height is dB_i . The height of the coastal dune is dC_i and the depth of closure is D . The shadowed area « A » outlines the section perpendicular to the beach corresponding to the retreat of the shoreline from P_1 to P_2 .

Le déplacement de la ligne de rivage dans chacun des segments correspond au dy de l'équation différentielle partielle 1 et au dy de l'équation 2. En se rapportant à l'équation 2 et à la figure 8, on constate que l'on peut obtenir la valeur de dQ_i en déterminant pour chaque segment la limite terrestre dB_i et dC_i , et la limite marine D du modèle.

CONDITIONS AUX LIMITES DU MODÈLE

Limite terrestre

La limite terrestre de chaque segment est définie par le profil de la plage (fig. 8). Chacun des segments du modèle a été caractérisé par référence à l'un des 236 profils de plage mesurés autour des îles (Mercier, 1987). Les profils de plage ont été établis selon la méthode de Emery (1961), qui utilise la ligne d'horizon de la mer comme référence de niveau; lorsqu'elle n'est pas visible, on se sert d'un niveau à bulle.

Lorsque le littoral régresse, la plage s'érode et la ligne de rivage se déplace de P_1 à P_2 (fig. 8). Le profil de plage qui en résulte est alors composé des éléments dB_i et dC_i . Lorsque la sédimentation prédomine, la plage progresse vers le large et l'accumulation de sédiments qui en résulte forme un profil moins élevé (db_i) parce que l'élargissement de la plage se produit sans qu'il y ait reconstitution simultanée du talus d'arrière plage (dC_i).

Des profils typiques de chacune des grandes plages des îles de la Madeleine sont illustrés à la figure 9. Le profil A est caractéristique d'une zone d'érosion particulièrement active. Les conditions qui prévalent dans cette zone, particulièrement la formation de talus d'érosion à la suite de tempêtes, sont illustrées à la figure 6. Le profil F est représentatif des zones de sédimentation. La figure 7, une photographie prise un peu plus au nord, illustre l'accumulation de sédiments au niveau du talus de haut de plage, caractéristique des zones de sédimentation active.

Limite marine

Il existe plusieurs définitions de la limite de la profondeur du transport des sédiments parallèle au littoral. Quelques-unes

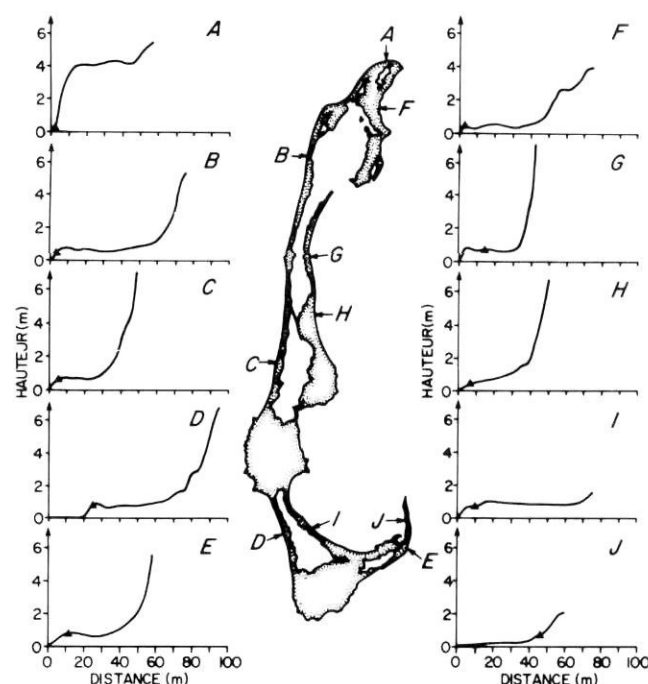


FIGURE 9. Profils typiques de chacune des grandes plages des îles de la Madeleine. Le petit triangle sur chaque profil identifie la laisse de haute mer.

Typical beach profiles from all long beaches of Îles de la Madeleine. The small triangle identifies the high tide level.

sont associées à la hauteur maximale du déferlement des vagues (Willis et Price, 1975; Sunamura et Horikawa, 1977; Willis, 1977; Walton et Chiu, 1979), d'autres à la hauteur caractéristique et à la période des vagues (Hallermeier, 1978, 1981). Ces limites concernent l'ensemble du système littoral et si on les appliquait aux îles de la Madeleine, la limite inclurait non seulement la plage mais aussi tout le système de barres sableuses qui ceinturent les îles (Drapeau *et al.*, 1984). Ces barres sableuses sont formées et maintenues par les vagues incidentes (Boczar-Karakiewicz *et al.*, 1984), ce qui implique une interaction avec les sédiments venant du large. Ce processus nous contraint à séparer les barres sableuses parallèles à la plage des barres sableuses en croissant qui s'y rattachent. Pour arriver à cette distinction entre les deux systèmes, nous avons établi que la limite vers le large de notre modèle serait fixée par le creux situé entre la plage et la première barre sableuse parallèle à la plage. Aux îles de la Madeleine, cette frontière se situe à une profondeur de 5 mètres. On associe de cette façon à la plage les barres sableuses en croissant qui se forment près de la plage et qui sont associées aux ondes de bord (*edge waves*) plutôt qu'aux ondes incidentes (Boczar-Karakiewicz *et al.*, 1987). La profondeur de 5 mètres est relativement faible, mais elle coïncide avec les observations de Kraus et Harikai (1983) qui ont étudié le même phénomène à la plage d'Oarai, au Japon.

La section immergée perpendiculaire au littoral peut prendre soit la forme d'un parallélogramme (Komar, 1983), soit celle d'un triangle (Price *et al.*, 1973). Nous avons choisi la section de forme triangulaire (fig. 8) afin de tenir compte du fait que le transport littoral des sédiments est plus intense près de la

zone de déferlement et qu'il diminue progressivement vers le large, comme l'a démontré Komar (1976) en se basant sur le concept du «*radiation stress distribution*» et comme l'ont vérifié expérimentalement Kraus et Harikai (1983), à Oarai Beach.

DIRECTION DU TRANSPORT LITTORAL

La direction du transport littoral a été déterminée en considérant d'une façon itérative deux types de critères : les formes sédimentaires littorales (Lueder, 1959; Dubois et Briard, 1979) et le principe de continuité. Les formes littorales qui ont fourni des indications sur la direction du transport littoral ont été, aux îles de la Madeleine, principalement les formes d'accumulation édifiées en raison de la présence d'obstacles et l'orientation des formes sédimentaires littorales (Mercier, 1987). Ces formes sédimentaires littorales sont dans certains cas générées par des courants giratoires locaux qui ne sont pas représentatifs du transport à plus grande échelle. Il faut donc confronter les directions de transport indiquées par la morphologie littorale locale avec les quantités de sédiments transportés déterminées à partir du modèle.

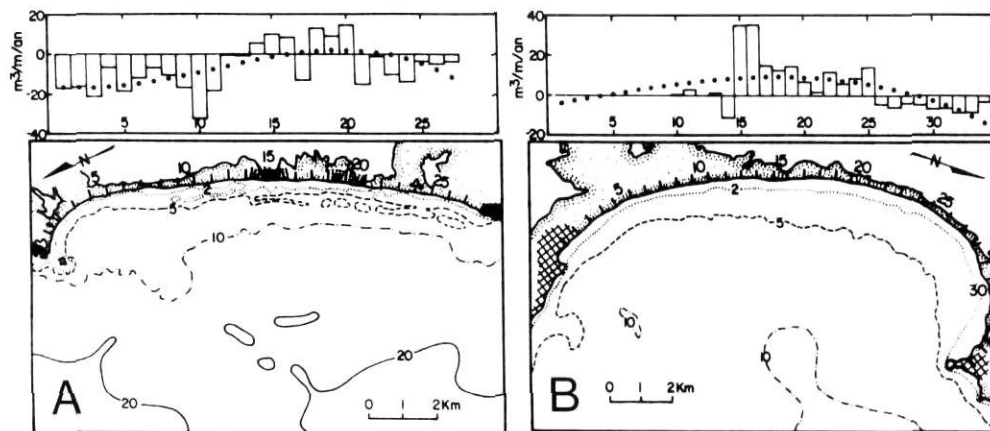
ÉROSION DES FALAISES ROCHEUSES

Le volume de matériel érodé des falaises rocheuses a été évalué en déterminant la superficie de la face exposée de chaque falaise et en la multipliant par le taux d'érosion annuelle. Si la superficie de la face exposée des falaises peut être facilement mesurée, il n'en va pas de même pour le taux d'érosion. Les seules mesures quantitatives utilisables comme référence de l'érosion des falaises des îles de la Madeleine ont été effectuées au cap du Dauphin.

Le cap du Dauphin (fig. 2) est un promontoire mesurant 1400 m de longueur sur 40 m de hauteur, composé principalement de grès du membre de l'Étang-du-Nord de la formation du Cap-aux-Meules (Brisebois, 1981). Ces roches sont représentatives parce qu'elles sont ni les plus tendres ni les plus résistantes. Les cartes cadastrales de 1890 et 1952 ont été utilisées par Drapeau (1979) pour calculer l'érosion du cap du Dauphin entre ces deux dates. La face exposée du cap a été subdivisée en 17 segments et le volume de sédiments érodés calculé pour chacun d'entre eux. Les résultats obtenus donnent un taux d'érosion de 35 cm/an. Mercier (1987) a poursuivi les calculs en comparant le plan cadastral de 1952 à des photographies aériennes prises en 1977. Le taux d'érosion obtenu entre les deux dates est de 28 cm/an. Faute de pouvoir compter sur des résultats plus complets, on a estimé le recul des falaises à 30 cm/an pour l'ensemble des îles de la Madeleine, taux moyen à partir duquel on a calculé le volume de sédiments érodés des falaises. Cette évaluation est évidemment très approximative; elle devra être précisée en mesurant le taux d'érosion de chacune des falaises et les marges d'erreur inhérentes.

RÉSULTATS

Les volumes de sédiments associés à l'avancée ou au retrait de la ligne de rivage ont été calculés dans chacun des segments du périmètre des îles de la Madeleine. Les résultats mettent en évidence plusieurs paramètres dont l'importance de l'érosion et de la sédimentation du littoral de même que les



Examples of results obtained on west side (A), Dune de l'ouest beach, and on east side (B), Dune du Sud beach (located on fig. 2). Each figure shows the local bathymetry as well as the beach divided into 500 m segments. Calculations of sedimentation (+) and erosion (-)

are outlined by a histogram lined up with each beach segment. A third order regression curve is outlined by a series of dots using the same axes as the histograms.

gradients de ces paramètres, en plus de fournir les éléments du bilan sédimentaire global (Drapeau et Mercier, 1987).

Deux exemples des résultats obtenus sont illustrés à la figure 10 (voir la fig. 2 pour la localisation). Les deux parties de la figure 10 illustrent des conditions caractéristiques des îles de la Madeleine, c'est-à-dire de plages assujetties soit à un haut niveau d'énergie (A), soit à un faible niveau d'énergie (B).

La figure 10A représente la plage de la dune de l'Ouest qui fait face aux vents dominants en provenance de l'ouest et du nord-ouest; cette plage est donc assujettie à des conditions maximales d'énergie des vagues. Les isobathes montrent la morphologie générale de la zone subtidale et la formation de barres sableuses près du rivage. On constate aussi que la profondeur de l'eau vers le large augmente plus rapidement que sur la figure 10B. Les résultats montrent que l'érosion prédomine et qu'elle est plus accentuée dans la partie nord de la plage en raison du déferlement plus oblique des vagues et de la dérive littorale qui en résulte.

La figure 10B illustre les conditions prévalant sur la plage de la dune du Sud, zone protégée. Les isobathes montrent que la profondeur augmente moins rapidement qu'au large de la plage de la dune de l'Ouest. Le diagramme de la partie supérieure de la figure montre que la section sud (gauche) de la plage est dans son ensemble en équilibre dynamique avec son milieu. Par contre, la sédimentation l'emporte sur l'érosion au centre de la plage. On peut postuler que les conditions d'équilibre qui prévalent dans la partie sud résultent d'un déferlement des vagues parallèle à la plage et que l'accumulation de sédiments plus en amont est attribuable à l'action oblique des vagues et des courants qui en résultent. La régression du troisième ordre du taux d'érosion et de sédimentation est presque symétrique par rapport à l'ensemble de la plage, ce qui peut signifier que cette plage s'approche des conditions globales d'équilibre.

Toutes les plages des îles de la Madeleine, autant les plages concaves que les longs cordons littoraux, ont ainsi été divisées en segments et analysées. Le bilan sédimentaire brut obtenu simplement en regroupant toutes les mesures aurait fourni des valeurs globales pour l'ensemble des îles, mais pas

d'information sur la dynamique des sédiments littoraux. Nous avons choisi de réaliser une analyse beaucoup plus poussée de la dynamique des sédiments littoraux en intégrant au modèle la direction du transport littoral et les points de convergence et de divergence de ce transport littoral.

Le schéma le plus simple du transport littoral des îles de la Madeleine montrerait des courants littoraux circulant uniformément autour des îles sans rencontrer d'obstacles. Dans de telles conditions, la modélisation du transport littoral serait d'autant plus simple que le transport serait unidirectionnel et sans points de convergence ou de divergence. La réalité est évidemment plus complexe et le modèle du transport littoral des îles de la Madeleine a été structuré en faisant d'abord l'étude du transport des sédiments à petite échelle pour ensuite en faire une étude plus détaillée.

L'examen de la carte des îles de la Madeleine (fig. 2), malgré sa petite échelle, permet de déterminer les directions du transport littoral qui prévalent aux extrémités: la pointe de l'Est et Sandy Hook. À la figure 4 (pointe de l'Est) l'évolution de la ligne de rivage montre bien que le transport des sédiments s'effectue dans le sens des aiguilles d'une montre et contourne la pointe. La situation est différente sur le Sandy Hook, où la forme effilée de la flèche résulte d'un transport littoral en direction de l'extrémité de la flèche de chaque côté de celle-ci. Il y a donc là un point de convergence du transport des sédiments. Le modèle du transport littoral est schématisé à la figure 11. Les points de convergence et de divergence du transport littoral y sont indiqués par des chiffres romains.

Les notions de points de convergence et de points de divergence méritent d'être explicitées. Dans la mesure où le transport littoral ne se résume pas à une simple circulation autour des îles, il se trouve forcément des endroits vers lesquels le transport littoral converge et d'autres endroits à partir desquels le transport littoral diverge. Par exemple, comme on vient de le démontrer, la flèche du Sandy Hook est un point de convergence. L'échelle de la figure 2 ne permet pas d'identifier les autres points de convergence et de divergence. L'identification des points de convergence et de divergence a été déterminée en analysant d'abord la direction du transport littoral puis en

TABLEAU I
Bilan sédimentaire du littoral ($\times 1000 \text{ m}^3/\text{an}$)

Zone Cellule		Cordons littoraux Érosion sédim.	Plages concaves Érosion sédim.	Falaises Érosion
A	a			24,9
A	b		3,5	
A	c	17,1		
A	d			2,4
A	e	6,3		
A	f			7,5
A	g	108,4		
A	h		136,3	
B	i			16,5
B	j		6,7	
B	k	12,2		
C	l	39,1		
C	m			44,1
D	n	22,6		
D	p		2,2	
D	q			12,9
E	r	18,8		
E	s		69,5	
E	t			0,6
E	u			8,7
E	v	36,9		
F	w		13,1	
F	x			2,7
F	y			55,5
F	z	94,9		
Total		282,4	292,8	172,5

Le modèle du transport des sédiments illustré à la figure 11 met en évidence des points de convergence et de divergence du transport littoral. Ces points de convergence et de divergence, associés aux promontoires et aux flèches terminales, divisent le littoral des îles de la Madeleine en cellules littorales qui sont l'équivalent des cellules sédimentaires (*sedimentation cells*) définies par Inman et Fraustchy (1966) pour expliquer la sédimentation littorale de la partie sud de la côte californienne. Ces cellules correspondent aussi aux unités sédimentologiques de côte décrites par Dubois (1973, 1979) sur la côte nord du golfe du Saint-Laurent.

Notre modèle apporte une réponse à l'hypothèse de travail concernant l'érosion et la sédimentation du littoral des îles de la Madeleine. Il faut cependant tenir compte du fait que les taux de transport utilisés ne représentent qu'une partie du transport littoral, celui qui est relié à l'érosion et à la sédimentation des plages. Dans le cas d'une section de plage stable, le bilan de l'érosion et de la sédimentation est nul, ce qui ne signifie pas pour autant que le mouvement des sédiments le long de cette section de plage, lui, soit nul; la stabilité de la plage pouvant résulter de conditions d'équilibre dynamique aussi bien que statique. L'équilibre statique c'est l'inertie totale des sédiments, tandis que l'équilibre dynamique c'est celui qui correspond aux situations beaucoup plus fréquentes où la quantité de sédiments arrivant à une extrémité d'une section de plage est la même que celle qui quitte cette section. Il faut donc distinguer entre le bilan résiduel, qui est celui qui fait l'objet du présent

travail, et le bilan global qui serait celui du transport littoral total à un moment donné.

Les liens entre le bilan résiduel et le bilan global sont difficiles à quantifier. Il faut distinguer entre le transport parallèle et le transport perpendiculaire au rivage. Ces paramètres n'étant pas quantifiés aux îles de la Madeleine, on ne peut pas faire de comparaisons directes; cependant on peut tout de même effectuer certaines concordances. Ainsi, les ports de pêche, en tant que pièges à sédiments, nous renseignent sur l'importance du transport littoral global. Par exemple, le port d'Étang-du-Nord, qui s'ensable relativement peu, est situé au point de divergence I du modèle, tandis que le port de Milleran sur la côte sud des îles, qui s'ensable continuellement, est situé dans une zone où le transport résiduel est considérable.

Même si dans le modèle on a séparé le transport perpendiculaire à la plage du transport littoral, en plaçant la limite de notre modèle à une profondeur de 5 m, on sait que cette division est artificielle. Ce problème est mis en évidence par les bilans au niveau de chaque zone (identifiée par une lettre majuscule sur la figure 11 et sur le tableau I). Ces zones sont délimitées par les barrières naturelles et les points de convergence et de divergence du transport littoral. Les excédents et les déficits de chacune de ces zones impliquent donc des transferts de sédiments entre la plage et la zone sublittorale. Par exemple, l'excédent de sédiments ($F = +97,6 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{an}$) qui atteint le point de convergence VI (pointe du Sandy Hook) doit vraisemblablement contribuer à nourrir les plages de la baie de Plaisance (zone E).

Enfin, on peut postuler que la «survie» des îles de la Madeleine ne dépend pas seulement de l'érosion des falaises rocheuses. En d'autres termes, il serait simpliste de prédire la disparition des îles en se basant sur le taux de recul annuel des falaises rocheuses. Le présent travail montre que la dynamique des plages est telle que, globalement, elles résistent à l'action de la mer en maintenant un bilan sédimentaire équilibré. Compte tenu de l'érosion des falaises et de l'élévation potentielle du niveau de la mer, on peut donc envisager dans un avenir lointain que la situation des îles de la Madeleine pourrait être semblable à celle de l'île de Sable au large de la Nouvelle-Écosse qui, démunie de tout affleurement rocheux, résiste néanmoins aux intempéries de l'Atlantique.

REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient MM. Michel Allard et J.-M. M. Dubois pour avoir revu le manuscrit, M. Bernard Hétu pour ses commentaires et M^{me} Nicole Carette pour les améliorations apportées au texte. Cette recherche a été subventionnée par le CRSNG (subvention A0585) et le Fonds FCAR (subvention 85-AS-2112).

RÉFÉRENCES

- Boczar-Karakiewicz, B., Drapeau, G. et Tessier, B., 1987. Barres sableuses littorales des îles de la Madeleine; mécanisme de leur formation et modélisation mathématique, p. 115-129. In Y. Quellet, édit., Conférence canadienne sur le littoral '87. Conseil national de recherches du Canada, Ottawa.

- Boczar-Karakiewicz, B., Drapeau, G. et Long, B., 1984. Modélisation des barres sableuses littorales de la partie nord des îles de la Madeleine. *Sciences et Techniques de l'Eau*, 17: 35-39.
- Brisebois, D. 1981. Lithostratigraphie de strates Permo-carbonifères de l'archipel des îles de la Madeleine. Ministère de l'Énergie et des Ressources du Québec, Rapp. DPV-796, 48 p.
- Bruun, P. 1954. Coast erosion and the development of beach profiles. U.S. Army Beach Erosion Board Technical memorandum No. 44.
- 1962. Sea level rise as a cause of shore erosion. *Proceedings of the American Society of Civil Engineers, Journal of Waterways and Harbors*, 88: 117-130.
- Bruun, P. et Schwartz, M. L. 1985. Analytical predictions of beach profile change in response to sea level rise. *Zeitschrift für Geomorphologie*, 57: 33-50.
- Dean, R. G. 1975. Equilibrium beach profiles. U.S. Atlantic and Gulf coasts. Technical Report No 2, University of Delaware, Newark.
- Dolan, R., Hayden, B. et May, S. 1983. Erosion of the U.S. shorelines, p. 285-299. *In* P. Komar, édit., *handbook of Coastal Processes and Erosion*. CRC Press, Boca Raton.
- Dolan, R., Hayden, B. et Heywood, J. 1978. A new photographic method for determining shoreline erosion. *Coastal Engineering*, 2: 21-39.
- Drapeau, G., 1979. Sédimentologie littorale de la région du Cap-du-Dauphin, îles de la Madeleine. Aménagement portuaire de Leslie, îles de la Madeleine. Ministère des Transports du Québec, 91 p.
- 1980. Shoreline evolution at the northern end of îles de la Madeleine, 294-308. *In* T. M. Dick, édit., *Conférence canadienne sur le littoral '80*. Conseil national de recherches du Canada, Ottawa.
- Drapeau, G., O'Neil, R.A., Long, B. F. et Karakiewicz, B., 1984. Use of the airborne Lidar Bathymetry system in coastal sedimentology, p. 231-238. *In* K. P. B. Thomson et F. Bonn, édit., *Actes du 8^e Symposium canadien de télédétection*. Association québécoise de télédétection, Sainte-Foy.
- Drapeau, G. et Mercier, O. 1987. Shoreline erosion and accretion budget of Îles-de-la-Madeleine, Gulf of St. Lawrence, Canada, p. 1321-1332. *In* N. C. Kraus, édit., *Proceedings of Coastal Sediments '87*. American society of Civil Engineers, New York.
- Dubois, J.-M. M. 1973. Essai de classification de la zone côtière et identification d'unités physiographiques sur la Côte Nord. Ministère des travaux publics du Canada, Études des rives du Saint-Laurent, 71 p.
- 1979. Environnement quaternaire et évolution postglaciaire d'une zone côtière en émergence en bordure sud du Bouclier Canadien : la Moyenne Côte Nord du Saint-Laurent, Québec. Thèse de doctorat, Université d'Ottawa, 754 p.
- Dubois, J.-M. M. et Briard, M. 1979. Photographie aérienne panchromatique et dynamique littorale, p. 121-140. *In* *Compte-rendus de l'atelier sur les appareils de mesure des courants et sédiments de la zone littorale*, 24-25 oct. 1979. Conseil national de recherches du Canada, Ottawa.
- Elderman, T., 1970. Dune erosion during storm conditions. *Proceedings 12th Coastal Engineering Conference*, American Society of Civil Engineers, 1305 p.
- Emery, K. O., 1961. A simple method of measuring beach profiles. *Limnology and Oceanography*, 6: 90-93.
- Farquharson, W. I., 1970. Tides, tidal streams and currents in the Gulf of St. Lawrence. Part 1. Tides and tidal streams. Atlantic Oceanographic Laboratory, Bedford Institute of Oceanography, Report 1970-5, 145 p.
- Hallermeier, R. J., 1978. Uses of a calculated limit depth to beach erosion. *Proceedings 16th Coastal Engineering Conference*, American Society of Civil Engineers, p. 1493-1512.
- 1981. A profile zonation for seasonal sand beaches from wave climate. *Coastal Engineering*, 4: 253-277.
- Inman, D. L. et Frautschy, J. D., 1966. Littoral processes and the development of shorelines, p. 511-536. *In* *Proceedings Coastal Engineering Santa Barbara Specialty Conference*. American Society of Civil Engineers, New York.
- Kamphuis, J. W., Davies, M. H., Nairn, R. B. et Sayao, O. J., 1986. Calculation of littoral sand transport rate. *Coastal Engineering*, 10: 1-21.
- Komar, P. 1976. *Beach Processes and Sedimentation*. Prentice Hall, Englewood Cliffs, 429 p.
- 1983. Computer models of shoreline changes, p. 205-216. *In* P. Komar, édit., *Handbook of Coastal Processes and Erosion*. CRC Press, Boca Raton.
- Kraus, N. C. et Harikai, S., 1983. Numerical model of the shoreline change at Oarai Beach. *Coastal Engineering*, 7: 1-28.
- Lueder, D. R. 1959. *Aerial photographic interpretation: principles and applications*. McGraw-Hill, New York, 462 p.
- Mercier, O., 1987. Modèle géomorphologique dynamique de l'archipel des îles de la Madeleine. Mémoire de maîtrise, Université du Québec à Rimouski, 334 p.
- Owens, E. H., 1975. The geodynamics of two beach units in the Magdalen Islands, Quebec, within the framework of coastal environments of southern Gulf of St. Lawrence. Thèse de doctorat, University of South Carolina. 581 p.
- Owens, E. H. et McCann, S. B. 1980. The coastal geomorphology of the Magdalen Islands, p. 51-72. *In* S. B. McCann, édit., *The Coastline of Canada*. Geological Survey of Canada, Ottawa, Paper 80-10.
- Pêches et Océans Canada, 1986. *Tables des marées et courants du Canada*. Golfe du Saint-Laurent, 2, 42 p.
- Price, W. A., Tomlinson, K. W. et Willis, D. H., 1973. Predicting changes in the plan shape of beaches, p. 1321-1329. *In* *Proceedings of the 13th Coastal Engineering Conference*. American Society of Civil Engineers.
- Sunamura, T. et Horikawa, K., 1977. Sediment budget in Kujukuri coastal area, Japan, p. 475-487. *In* *Proceedings Coastal Sediments '77*. American Society of Civil Engineers.
- Walton, T. L. et Chiu, T. Y., 1979. A review of analytical techniques to solve the sand transport equation and some simplified solutions, p. 809-837. *In* *Proceedings of Coastal Structures '79*. American Society of Civil Engineers.
- Willis, D. H., 1977. Evaluation of alongshore transport models, p. 350-365. *In* *Proceedings Coastal sediments '77*. American Society of Civil Engineers.
- Willis, D. H. et Price, W. A. 1975. Trends in the application of research to solve coastal engineering problems, p. 111-121. *In* J. Hails et A. Carr, édit., *Nearshore Sediment Dynamics and Sedimentation*. John Wiley, New York.