
David Aernouts et Arnaud Héquette

L'évolution du rivage et des petits-fonds en baie de Wissant pendant le XXe siècle (Pas-de-Calais, France)

Avertissement

Le contenu de ce site relève de la législation française sur la propriété intellectuelle et est la propriété exclusive de l'éditeur.

Les œuvres figurant sur ce site peuvent être consultées et reproduites sur un support papier ou numérique sous réserve qu'elles soient strictement réservées à un usage soit personnel, soit scientifique ou pédagogique excluant toute exploitation commerciale. La reproduction devra obligatoirement mentionner l'éditeur, le nom de la revue, l'auteur et la référence du document.

Toute autre reproduction est interdite sauf accord préalable de l'éditeur, en dehors des cas prévus par la législation en vigueur en France.

revues.org

Revues.org est un portail de revues en sciences humaines et sociales développé par le Cléo, Centre pour l'édition électronique ouverte (CNRS, EHESS, UP, UAPV).

Référence électronique

David Aernouts et Arnaud Héquette, « L'évolution du rivage et des petits-fonds en baie de Wissant pendant le XXe siècle (Pas-de-Calais, France) », *Géomorphologie : relief, processus, environnement* [En ligne], 1/2006 | 2006, mis en ligne le 01 avril 2008, consulté le 10 octobre 2012. URL : <http://geomorphologie.revues.org/477> ; DOI : 10.4000/geomorphologie.477

Éditeur : Groupe français de géomorphologie

<http://geomorphologie.revues.org>

<http://www.revues.org>

Document accessible en ligne sur : <http://geomorphologie.revues.org/477>

Ce document est le fac-similé de l'édition papier.

© Groupe français de géomorphologie

L'évolution du rivage et des petits-fonds en baie de Wissant pendant le XX^e siècle (Pas-de-Calais, France)

Coastline and shoreface evolution in the Bay of Wissant (Pas-de-Calais, France)

David Aernouts* et Arnaud Héquette*

Résumé

Le littoral de la Baie de Wissant consiste essentiellement en de larges estrans sableux bordés par des massifs dunaires dont la plupart sont fortement attaqués par la mer. L'analyse de l'évolution du trait de côte entre 1949 et 2000, à l'aide de photographies aériennes verticales, a montré qu'une grande partie de la côte de la baie de Wissant a connu une forte érosion pendant la deuxième partie du XX^e siècle, particulièrement dans sa partie centrale où les rythmes de recul ont été de l'ordre de 4 à 5 m/an. Nos résultats montrent également que l'érosion du littoral s'est presque entièrement généralisée à l'ensemble de la baie de Wissant depuis le milieu des années 1970. La seule exception concerne le secteur oriental de la baie, à l'est du village de Wissant, où le rivage a au contraire progressé vers le large. La comparaison de levés bathymétriques datant de 1911, 1977 et 2002 a permis de montrer qu'il existe une nette correspondance entre les zones de forte érosion dans les petits fonds et les secteurs d'important recul de la côte, ce qui suggère que l'évolution de la ligne de rivage est fortement liée aux variations morphologiques de l'avant-côte. Dans l'ensemble, le bilan sédimentaire de la baie est fortement négatif depuis le début du XX^e siècle, les pertes de sédiments se chiffrant à plus de 100 000 m³/an. Si l'aggravation de l'érosion littorale pendant le dernier quart de siècle peut en partie être expliquée par des phénomènes naturels comme des variations dans le régime des tempêtes, des facteurs anthropiques ont pu aussi accentuer le déficit sédimentaire de la baie.

Mots clés : dynamique du trait de côte, érosion littorale, avant-côte, baie de Wissant, Pas-de-Calais.

Abstract

The coast of the Bay of Wissant consists mainly of wide beaches and coastal dunes, which have been severely eroded for a number of years. A study of shoreline evolution from 1949 to 2000, based on vertical aerial photographs, showed that a major part of the coast of the Bay of Wissant was affected by very severe coastal erosion during the second part of the 20th century, especially in the central part of the bay where coastal retreat rates have been on the order of 4 to 5 m/yr. Our results also indicate that coastal erosion became more extensive, affecting most of the shoreline of the Bay of Wissant since the middle of the 1970's. The only exception concerns the eastern part of the Bay, east of the hamlet of Wissant, where the shoreline conversely advanced seaward. The analysis of 1911, 1977 and 2002 bathymetry surveys shows that there is a strong correspondence between areas of significant nearshore erosion and sectors of coastline which experienced rapid retreat. The overall sediment budget in the Bay of Wissant is strongly negative since the early 20th century, the sediment deficit being in excess of 100 000 m³/yr. Although the aggravation of coastal erosion during the last decades of the 20th century may be partly explained by natural phenomena such as variations in storm frequency and intensity, anthropogenic factors may have also increased the sediment deficit in the bay.

Key words : coastline evolution, coastal erosion, shoreface, Bay of Wissant, Northern France.

Abridged English Version

The coast of the Bay of Wissant consists mainly of wide beaches and coastal dunes, which have been severely eroded for a number of years. A study of shoreline evolution from 1949 to 2000 was carried out using vertical aerial photographs. An analysis of bathymetry changes, down to ap-

proximately 20 m water depth, was also conducted, based on 1911, 1977, and 2002 bathymetry surveys, in order to assess the morphological variations of the complete coastal profile including nearshore and shoreface environments.

The results of this work show that the central part of the bay was affected by very severe coastal erosion during the second part of the 20th century, with a shoreline retreat in

* Laboratoire de Géomorphologie Dynamique et Aménagement des Littoraux – EA 3599, université du Littoral Côte d'Opale, 189A boulevard Maurice Schumann, 59140 Dunkerque, France. E-mail : aernouts@univ-littoral.fr, hequette@univ-littoral.fr

excess of 200 m at several locations even reaching more than 250 m, representing mean annual retreat rates on the order of 4 to 5 m/yr (fig. 6). In the western part of the Bay, the coastal dunes also underwent erosion, but the retreat rates were lower and more variable, mostly ranging from 0.9 to 3.0 m/yr. Our results also show that the retreat rates are variable through time. The period 1949 to 1977 was characterized by maximum retreat rates of more than 6 m/yr in the centre of the bay, while the coastline was relatively stable or slowly retreating in the western part of the bay during that period. The analysis of shoreline positions indicates that coastal erosion was more extensive between 1977 and 2000, affecting almost completely the Bay of Wissant. The only exception is the eastern part of the bay, east of the hamlet of Wissant, where the shoreline conversely advanced seaward during both periods.

The analysis of bathymetry changes suggests that coastline evolution is strongly related to nearshore morphological variations. There is a very strong correspondence between areas of significant nearshore erosion and sectors of coastline, which experienced rapid retreat in the central and western parts of the Bay (fig. 7). Conversely, east of the hamlet of Wissant, where the shoreline advanced seaward several tens of meters, the seabed in the nearshore zone was either stable or characterized by sediment accumulation. Computation of sediment volume change showed that the net sediment budget in the Bay of Wissant was strongly negative during the 20th century, the sediment deficit being in excess of 100 000 m³/yr on average. Nearshore seabed erosion mostly occurred in a longshore trough located between the shore and an offshore sand bank (Banc à la Ligne), although this bank also experienced a significant decrease in sediment volume (fig. 8 and table 1). The decrease in the sediment volume of this bank, which represents a potential sediment source for the beach and coastal dune systems, may have contributed to a decrease in the littoral sand budget.

Bathymetry change analyses also indicate that nearshore erosion proceeded more rapidly during the 1977-2002 period compared to the preceding period, coastal erosion being also more widespread during the later period. Although the aggravation of coastal and shoreface erosion during the last decades of the 20th century may be partly explained by variations in storm frequency and intensity, anthropogenic factors should certainly be taken into account. Both the extraction of marine aggregates in the vicinity of the Banc à la Ligne and the extension in the early 1970's of a harbour jetty at Boulogne-sur-Mer, southwest of the Bay of Wissant, probably increased the sediment deficit in the bay.

This study shows that shoreline evolution in the Bay of Wissant strongly depends on erosion and sedimentation processes that affect the whole littoral profile from the coastal dunes down to the shoreface several metres below sea level. Seabed erosion in the nearshore zone caused a lowering of the level of the intertidal beach, which certainly favoured coastal retreat since lower beach levels result in higher frequencies of water levels that may reach and erode coastal dunes.

Introduction

Située sur la côte du Pas-de-Calais, aux confins de la Manche et de la mer du Nord, la baie de Wissant, qui abrite une petite station balnéaire depuis le XIX^e siècle, est un site reconnu pour sa richesse paysagère. Le littoral de la baie de Wissant est constitué d'une large plage sableuse bordée par des dunes côtières d'édification récente, tout comme la plupart des littoraux meubles de la région Nord-Pas-de-Calais (Munot et Gilot, 1977 ; Fauchois, 1998 ; Battiau-Queney *et al.*, 2000). L'estran se prolonge vers le large par une avant-côte en pente douce, puis par des bancs sableux pré-littoraux. Le littoral de la baie de Wissant connaît une très forte érosion depuis plusieurs décennies. Le recul de la ligne de rivage est l'un des plus rapides en France, ce qui explique la grande inquiétude des autorités locales. L'érosion de la baie a été largement décrite par plusieurs auteurs (Clabaut et Chamley, 1986 ; Pinte, 1987 ; Fauchois, 1998 ; Sipka, 1994) qui ont formulé un certain nombre d'hypothèses pour expliquer les causes de ce phénomène. Il a ainsi été suggéré que les variations morphologiques des fonds à l'avant-côte, et plus particulièrement de la morphologie d'un banc pré-littoral, auraient affecté les transits sédimentaires côtiers, ce qui aurait eu des répercussions sur l'évolution du trait de côte.

L'objet de cet article est, d'une part, de préciser les rythmes d'évolution du rivage en baie de Wissant par l'analyse diachronique des photographies aériennes verticales depuis 1949 et, d'autre part, d'étudier l'évolution morphologique des petits-fonds à l'aide de données bathymétriques couvrant la période 1911 à 2002, afin d'apprécier les changements morphologiques qui ont affecté l'ensemble du profil côtier incluant la zone pré-littorale.

Présentation du site

Encadrée par le cap Gris Nez à l'ouest et le cap Blanc Nez à l'est, la baie de Wissant s'étend sur environ dix kilomètres de longueur (fig. 1). Outre la digue promenade du village de Wissant, la baie de Wissant est bordée par un étroit cordon dunaire (250-300 m de large) découpé en plusieurs massifs. D'ouest en est, les dunes de la Baraque Fricot, du Châtelet et d'Aval (fig. 1) présentent des signes évidents d'érosion depuis au moins 1980 (Fauchois, 1998). La présence commune sur le front dunaire de végétation d'arrière dune comme l'argousier témoigne de l'érosion qui affecte ces formes d'accumulation. On observe également de profondes brèches qui entaillent les dunes littorales et des falaises dunaires dépassant souvent deux mètres de hauteur. En outre, plusieurs blockhaus datant de la Seconde Guerre mondiale, autrefois cachés dans les dunes, se retrouvent aujourd'hui sur la plage. Au village de Wissant, les affouillements du bas de digue ont entraîné sa destruction partielle en 1999 avant sa reconstruction dans l'urgence (Paxion et Cohen, 2001). Dans le secteur de la dune d'Amont à l'est de Wissant (fig. 1), la morphologie dunaire est différente de celle qui prévaut dans la partie ouest de la baie. La morpho-

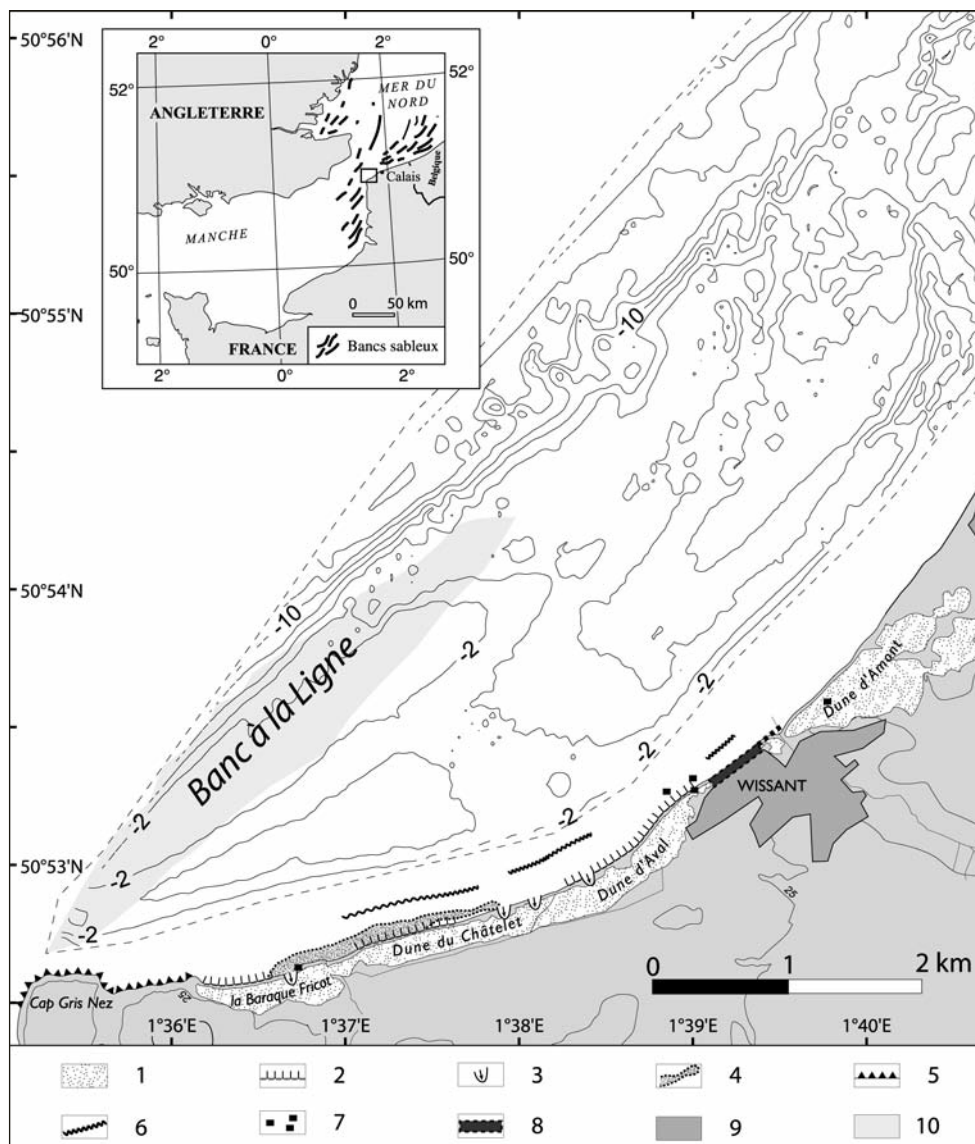


Fig. 1 – Localisation du site d'étude (les isobathes correspondent à la bathymétrie de 2002 ; fond de carte de la partie terrestre, modifié d'après Messence et Cohen, 2002). 1 : dunes littorales ; 2 : falaises dunaires ; 3 : brèche ou sifflevent ; 4 : cordon de galets ; 5 : falaises rocheuses ; 6 : affleurement de tourbe ; 7 : blockhaus ; 8 : digue ; 9 : zone urbanisée ; 10 : localisation approximative du banc À la Ligne.

Fig. 1 – Location of the study area (depth contours correspond to the 2002 bathymetry; terrestrial part of the map, modified after Messence and Cohen, 2002). 1: coastal dunes; 2: dune scarps; 3: breach or blowout; 4: gravel ridge; 5: rock cliffs; 6: peat outcrop; 7: blockhouse; 8: sea-wall; 9: urban area; 10: approximate location of the banc À la Ligne.

viron deux kilomètres au large de Wissant. La morphologie de ce banc et sa position par rapport au rivage l'apparentent à une accumulation sous-marine de type *banner bank* (Dyer et Huntley, 1999).

Située dans le détroit du Pas de Calais, la baie de Wissant n'est séparée que d'une

logie des dunes littorales dans ce secteur révèle en effet une plus grande stabilité du trait de côte, comme l'atteste la présence de dunes embryonnaires et d'une dune bordière qui n'est pas touchée par l'érosion marine.

L'estran, large d'environ 800 m à marée basse de vive-eau, est soumis à un régime de type macrotidal, le marnage moyen à Wissant étant de 5,84 m et de 8,15 m en vive-eau (SHOM, 2004). Face aux dunes érodées, des bancs de tourbes holocènes (Mortier et Boels, 1982), sous-jacents au sable, affleurent sur de larges surfaces, ce qui témoigne à la fois du recul du rivage et d'un abaissement de l'estran. Ce constat est identique face à la digue de Wissant, régulièrement submergée par les vagues lors des marées hautes de vive-eau. L'estran se prolonge en mer par une avant-plage en pente douce, également sableuse, qui forme une petite cuvette n'excédant pas dix mètres de profondeur (par rapport au zéro hydrographique) entre la côte et le banc À la Ligne (fig. 1). Partiellement ancré au cap Gris Nez, le banc À la Ligne, long de 3,5 km et large de 500 m, s'étend vers le nord-est en s'éloignant du rivage jusqu'à une distance d'en-

trentaine de kilomètres des côtes britanniques. En raison du resserrement des côtes françaises et anglaises et d'un marnage macrotidal, les courants de surface peuvent dépasser 2 m/s en période de vive-eau. En baie de Wissant, au pied du banc À la Ligne, la vitesse des courants de marée à un mètre du fond atteint 1,2 m/s lors de telles conditions de marée (Augris *et al.*, 1990). La marée, d'une période semi-diurne, est responsable d'une double alternance quotidienne des courants le long de la côte dont la dissymétrie en faveur du flot, tant du point de vue de la durée que de la vitesse, a été abondamment documentée (Augris *et al.*, 1990 ; Vicaire, 1991). La dominance du courant de flot, qui s'écoule de la Manche vers la mer du Nord dans la zone côtière, induit un transport sédimentaire résiduel vers le nord-est (Dewez *et al.*, 1989 ; Anthony, 2002). Les houles constituent un autre agent pouvant avoir des effets significatifs sur la dynamique morpho-sédimentaire côtière. Les houles dominantes au large proviennent du sud-ouest en raison de la prépondérance des vents de cette direction, mais, suite à leur réfraction, elles abordent le rivage avec une direction NNW. La plupart

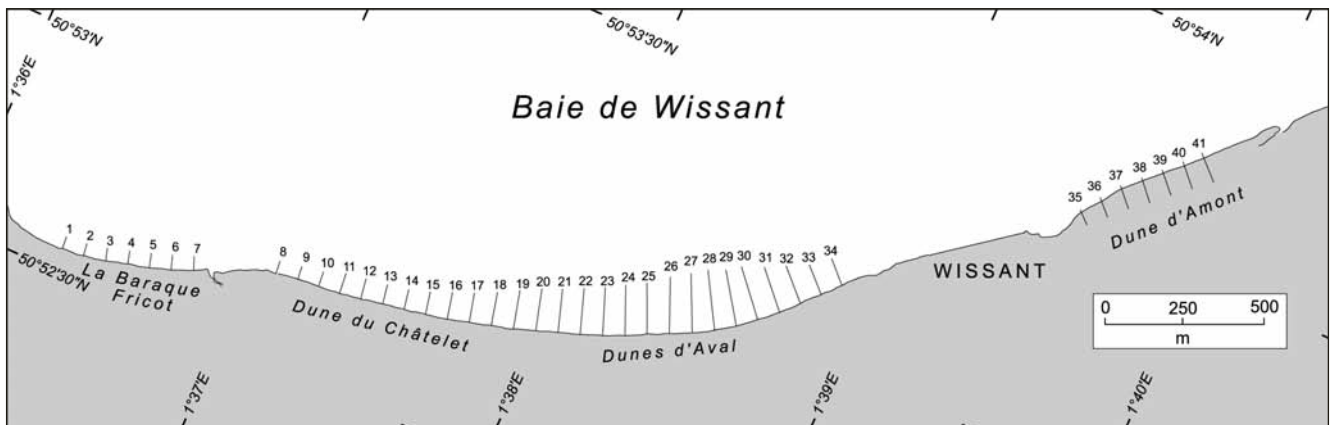


Fig. 2 – Localisation des mesures de position du trait de côte.

Fig. 2 – Location of shoreline position measurements.

des houles ont des périodes comprises entre 5 et 7 s et une hauteur au large de moins de 1,2 m (Cliques et Lepetit, 1986). Bien que peu fréquentes, des houles longues de plus de 12 s de période et de hauteurs supérieures à 5 m peuvent être observées. Les hauteurs de vagues à la côte sont cependant largement inférieures en raison de la dissipation de leur énergie lors de leur propagation au-dessus des nombreux bancs qui parsèment les fonds de la Manche. Leur action sur les littoraux meubles, et en particulier sur les fronts dunaires, est cependant loin d'être négligeable lorsque des surcotes se produisent à marée haute, ce phénomène pouvant causer une hausse du niveau d'eau de 1,5 m au-dessus du niveau de marée prédit (Ruz et Meur-Férec, 2004).

Méthodologie

Évolution du trait de côte

L'analyse de l'évolution du trait de côte de la baie de Wissant a été réalisée en superposant les photographies aériennes verticales de l'IGN de 1949 (1/25 000), 1977 (1/20 000) et 2000 (1/25 000). Le choix des dates des différentes campagnes photographiques a été dicté par les dates des levés bathymétriques disponibles afin d'analyser les variations du trait de côte pendant des périodes similaires. Bien que les photographies aériennes constituent des documents relativement bien adaptés pour étudier l'évolution du trait de côte et souvent utilisées à cet effet (Smith et Zarillo, 1989 ; Suanez et Simon, 1997 ; Durand, 1998), elles présentent néanmoins de nombreuses déformations géométriques (Thieler et Danforth, 1994). Ces déformations peuvent être responsables d'erreurs de plusieurs dizaines de mètres entre la photographie et la réalité.

Les clichés utilisés pour ce travail ont subi une rectification géométrique à l'aide du logiciel de traitement d'image ER-Mapper® afin de limiter les déformations inhérentes à la prise de vue et au développement. Les photographies aériennes de 1949 et de 1977 ont été géoréférencées et rectifiées (rectification polynomiale de 3^e ordre) à partir d'un orthophotoplan couleur de la zone d'étude datant de l'année

2000. Après rectification, le pied de dune, retenu comme limite du trait de côte, a été identifié et cartographié sur l'ensemble des images. La couleur monochrome de la photographie limite le repérage du trait de côte, notamment lorsque l'on doit repérer la limite entre l'estran et une dune vive, la couleur étant blanche sur l'image dans les deux cas (Leatherman, 1983). Le recours à la stéréoscopie sur les clichés originaux, aux cartes postales anciennes quand elles existent (Paxion et Cohen, 2001) et aux témoignages historiques peut aider à repérer la bonne position du trait de côte. Compte tenu des différentes sources d'erreurs possibles, la marge d'erreur associée à la délimitation du trait de côte sur les photographies aériennes rectifiées a été estimée à $\pm 9,5$ m. Cette marge d'erreur correspond à la précision de l'orthophotoplan infrarouge (± 3 m), au repérage des amers sur la photographie aérienne (± 2 m), au repérage du trait de côte tel que mesuré au niveau de la digue de Wissant (± 3 m), et à l'erreur résiduelle calculée par le logiciel pour l'ensemble des amers ($< \pm 1,5$ m). L'erreur maximale possible s'élève ainsi à ± 19 m si l'on veut comparer la position du trait de côte à deux dates différentes.

Les mesures d'évolution de la position du trait de côte ont été effectuées tous les cent mètres environ le long du rivage, au niveau de 41 transects couvrant l'ensemble des massifs dunaires (fig. 2). Pour chacun des transects, la mesure de l'avancée ou du recul du trait de côte a permis d'évaluer les rythmes d'évolution de la ligne de rivage pour chacune des périodes considérées. Bien que la rectification des photographies aériennes ne permette pas d'éliminer entièrement les déformations géométriques des clichés, les rythmes d'évolution du rivage mesurés sont dans la grande majorité des cas largement supérieurs à la marge d'erreur qui est de l'ordre de $\pm 0,68$ m/an pour les deux périodes étudiées (1949-1977 et 1977-2000).

Évolution de la bathymétrie

L'analyse de l'évolution des fonds marins a été réalisée à partir des minutes de bathymétrie de 1911 et de 1977 fournies par le Service Hydrographique et Océanographique de

la Marine (SHOM), ainsi qu'à partir des données d'une campagne de bathymétrie réalisée par les Services Maritimes des Ports de Boulogne-sur-Mer et Calais en 2002. L'utilisation des minutes de bathymétrie dans l'étude de l'évolution des fonds marins permet de limiter les marges d'erreur par rapport aux cartes marines et d'établir un état des fonds exhaustif, ne serait-ce qu'en raison de la plus forte densité des points de mesure (Aernouts et Héquette, 2004). La couverture spatiale des différents levés bathymétriques

utilisés est cependant variable d'une année à l'autre (fig. 3). Les levés bathymétriques de 1911 comprennent 7 224 points

Fig. 3 – (A) Localisation des points de sonde en baie de Wissant lors des levés de 1911, 1977 et 2002 ; (B) Bathymétrie de la Baie de Wissant en 1911, 1977 et 2002.

Fig. 3 – (A) Location of depth soundings in the Bay of Wissant for the 1911, 1977, and 2002 surveys; (B) Bathymetry of the Bay of Wissant in 1911, 1977, and 2002.

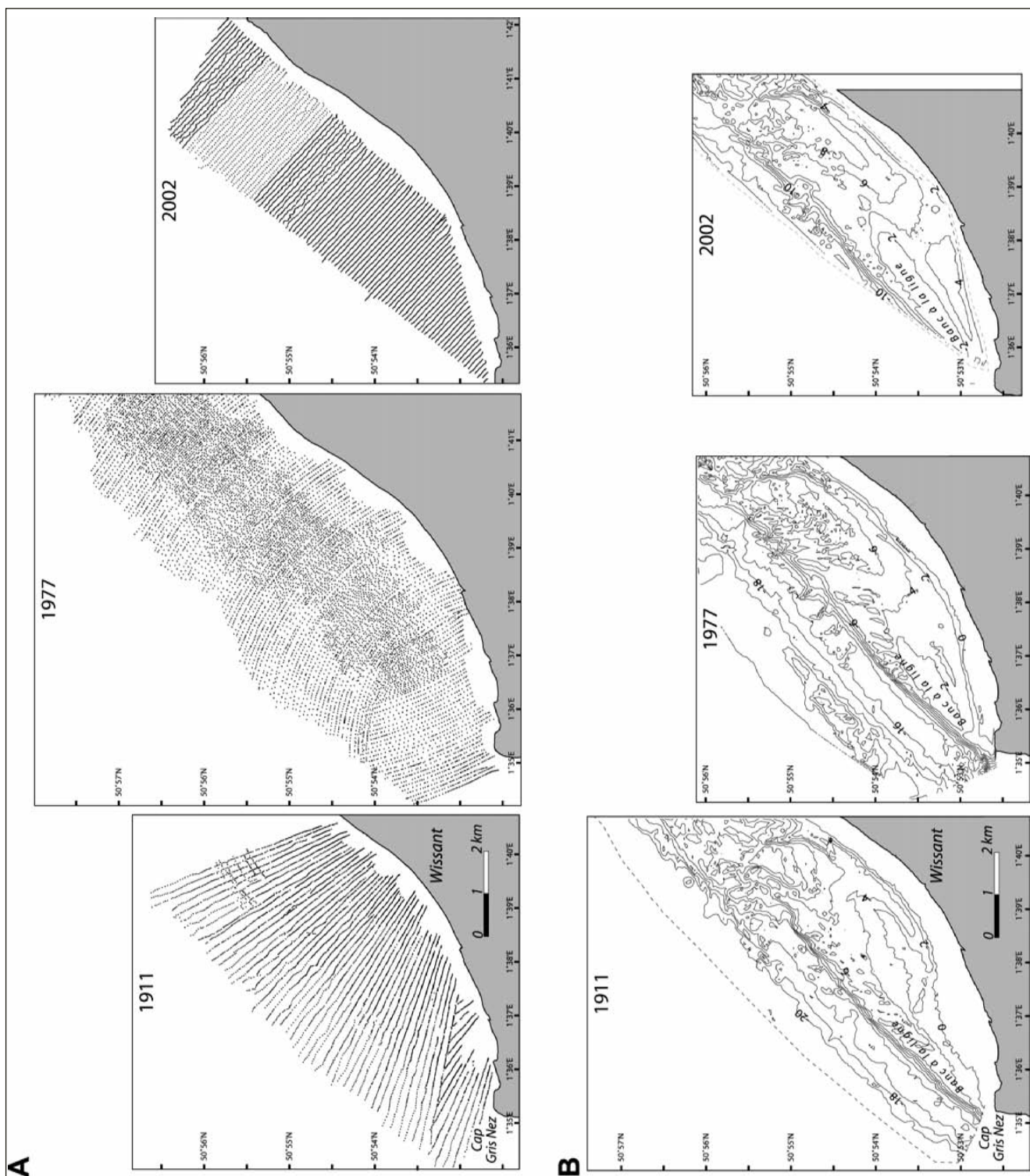


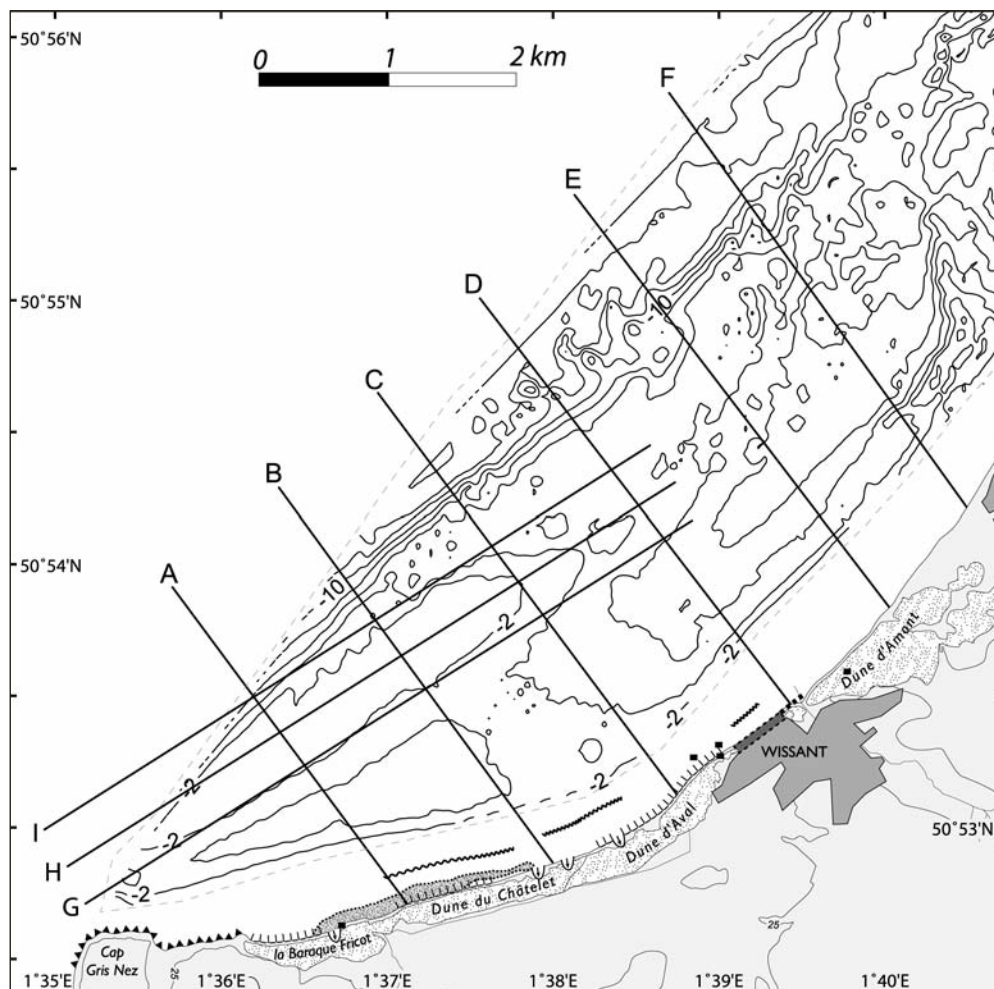
Fig. 4 – Localisation des profils bathymétriques (pour la légende, voir la fig. 1).

Fig. 4 – Location of bathymetry profiles (see fig. 1 for caption).

de sonde qui couvrent une superficie de 32 km², ce qui représente un point de mesure tous les quarante-quatre mètres en moyenne le long des radiales de navigation. La couverture bathymétrique de 1977 est la plus étendue puisqu'elle est constituée de 14 288 points de sonde couvrant une superficie de 67 km² (un point de sonde tous les 47 m). Les levés de 2002 comprennent 9 189 points de sonde sur une surface de 32 km², livrant la plus forte densité de points de mesure (un point de sonde tous les 35 m).

Ces données ont été utilisées pour réaliser, à l'aide du logiciel Surfer®, trois cartes bathymétriques représentant la morphologie des fonds de la Baie de Wissant pour chacune de ces dates (fig. 3). La superposition des différentes cartes bathymétriques produites a ensuite permis de réaliser trois cartes d'évolution mettant en évidence les zones d'abaissement et d'exhaussement des fonds marins entre deux dates, soit entre 1911 et 1977, 1977 et 2002, et entre 1911 et 2002. La base de données bathymétriques a également été utilisée pour établir six profils bathymétriques transversaux d'environ 2 000 à 4 000 m de longueur (fig. 4), approximativement perpendiculaires à la ligne de côte et atteignant -15 à -20 m au large (par rapport au zéro hydrographique). Trois profils longitudinaux d'environ 5 500 m de longueur ont aussi été réalisés afin d'apprécier les variations latérales du banc À la Ligne. Les variations volumétriques liées à l'abaissement et à l'exhaussement des fonds entre deux dates ont été calculées sur l'ensemble de la baie ainsi que par mètre linéaire le long de chaque profil bathymétrique. Par ailleurs, afin de comparer les rythmes d'évolution des fonds marins entre 1911-1977 et 1977-2002, les volumes globaux de sédiments ont été pondérés par le nombre d'années de chaque période (respectivement 66 ans et 25 ans).

La marge d'erreur maximale des données bathymétriques a été estimée en considérant l'erreur verticale directe de mesure ($\pm 0,7$ m lorsque l'on compare deux levés bathymé-



triques, fig. 5), ainsi que l'erreur induite par l'imprécision de positionnement du navire. L'erreur de positionnement du navire peut-être évaluée à ± 10 m, même au début du XX^e siècle (Sabatier et Raivard, 2002), erreur à laquelle il faut rajouter une imprécision de ± 4 m liée à la digitalisation des minutes de bathymétrie. Les pentes maximales étant d'environ 3 % dans la zone d'étude, une marge d'erreur horizontale de l'ordre de ± 14 m se traduit par une erreur verticale maximale de $\pm 0,42$ m sur de telles pentes (fig. 5). L'erreur verticale totale pouvant être induite par cette imprécision horizontale peut ainsi atteindre $\pm 0,84$ m lorsque l'on intègre deux levés bathymétriques diachroniques. Cette valeur additionnée à la valeur de $\pm 0,7$ m obtenue pour l'erreur verticale directe donne une marge totale de $\pm 1,54$ m. Une valeur de $\pm 1,5$ m a ainsi été retenue comme seuil à partir duquel les variations mesurées de la bathymétrie peuvent être considérées comme significatives.

L'évolution de la ligne du rivage pendant la deuxième moitié du XX^e siècle

Évolution de 1949 à 1977

L'évolution du trait de côte se caractérise par un recul quasi général dans la partie centrale de la baie de Wissant

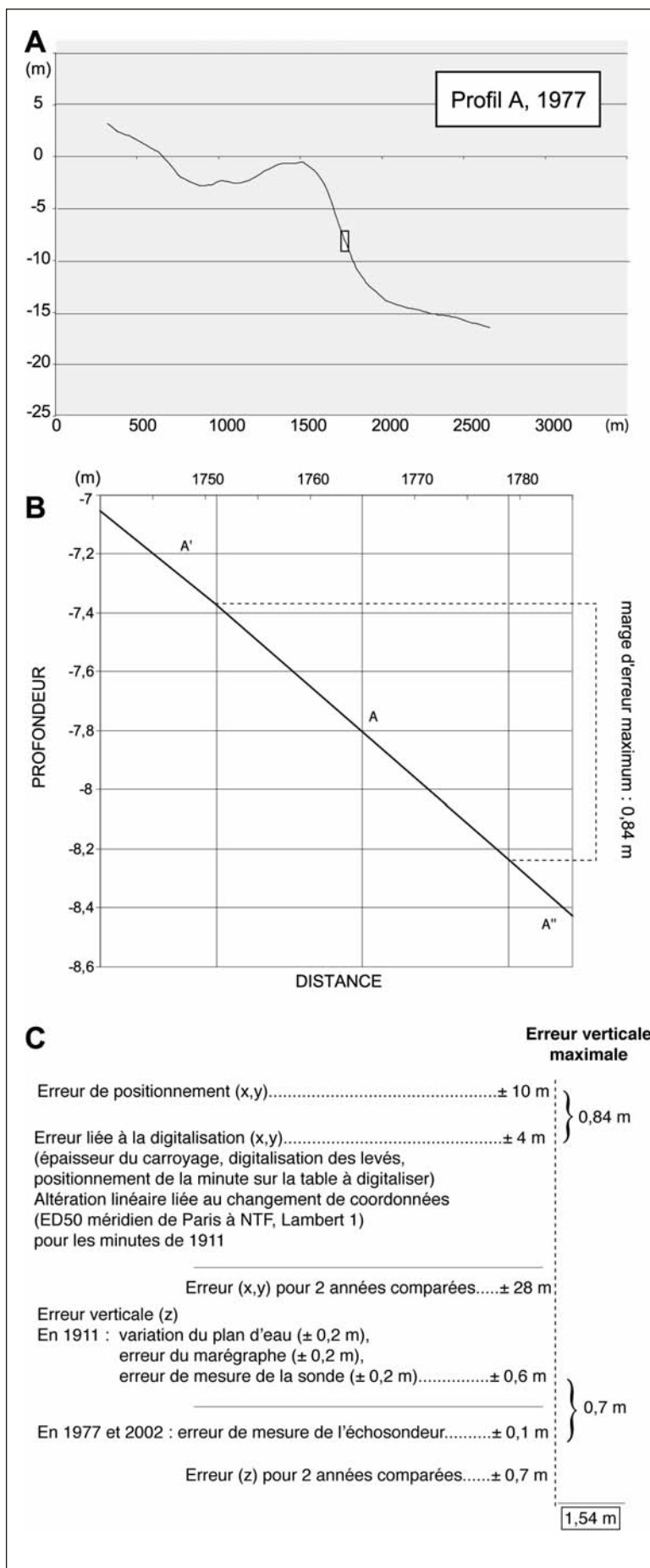


Fig. 5 – Estimation de la marge d'erreur des données bathymétriques. A) et B) : exemple de détermination de l'erreur verticale maximale pouvant être induite par une erreur de positionnement sur une pente sous-marine ; C) : détermination de la marge d'erreur totale.

Fig. 5 – Estimation of error range of the bathymetry data. A) and B): example of determination of maximum vertical error due to a positioning error on a submarine slope; C): determination of total error range.

(fig. 6). Ce recul n'est cependant pas régulier, même si l'on ne considère que cette partie du rivage de la baie. Les plus forts reculs ont été enregistrés au niveau de la Dune d'Aval (fig. 1) où le front dunaire a reculé de plus de 130 m entre ces deux dates, soit plus de 4,5 m/an, atteignant même 175 m au niveau du transect 26, ce qui correspond à un rythme de plus de 6 m/an (fig. 6). Un peu plus à l'ouest dans le secteur de la dune du Châtelet (fig. 1 et fig. 2), le recul du trait de côte, bien que moins rapide, a néanmoins atteint plusieurs dizaines de mètres par endroits, ce qui représente des rythmes d'érosion du front dunaire généralement supérieurs à 1 m/an pendant cette période. Les rythmes d'érosion ont toutefois tendance à nettement diminuer vers l'ouest.

De part et d'autre du secteur central de la baie, l'évolution du trait de côte a cependant été très différente. Au niveau des dunes de la Baraque Fricot, dans la partie ouest de la baie, les mesures indiquent un recul, mais les valeurs sont soit inférieures ou légèrement supérieures à la marge d'erreur (fig. 6), suggérant une faible érosion, voire une stabilité de ce secteur de la baie. On note également des valeurs positives (transects 6 et 7), mais, là encore, les valeurs étant en-deçà de la marge d'erreur, on ne peut conclure qu'à une stabilité du rivage. Dans le secteur de la dune d'Amont, dans la partie est de la baie (fig. 1), l'évolution de la ligne de rivage a été toute autre puisque l'on observe des valeurs fortement positives qui indiquent une progression de la ligne de côte de plus de cinquante mètres dans l'ensemble, les rythmes d'avancée du rivage étant généralement de plus de 2 m/an (fig. 6).

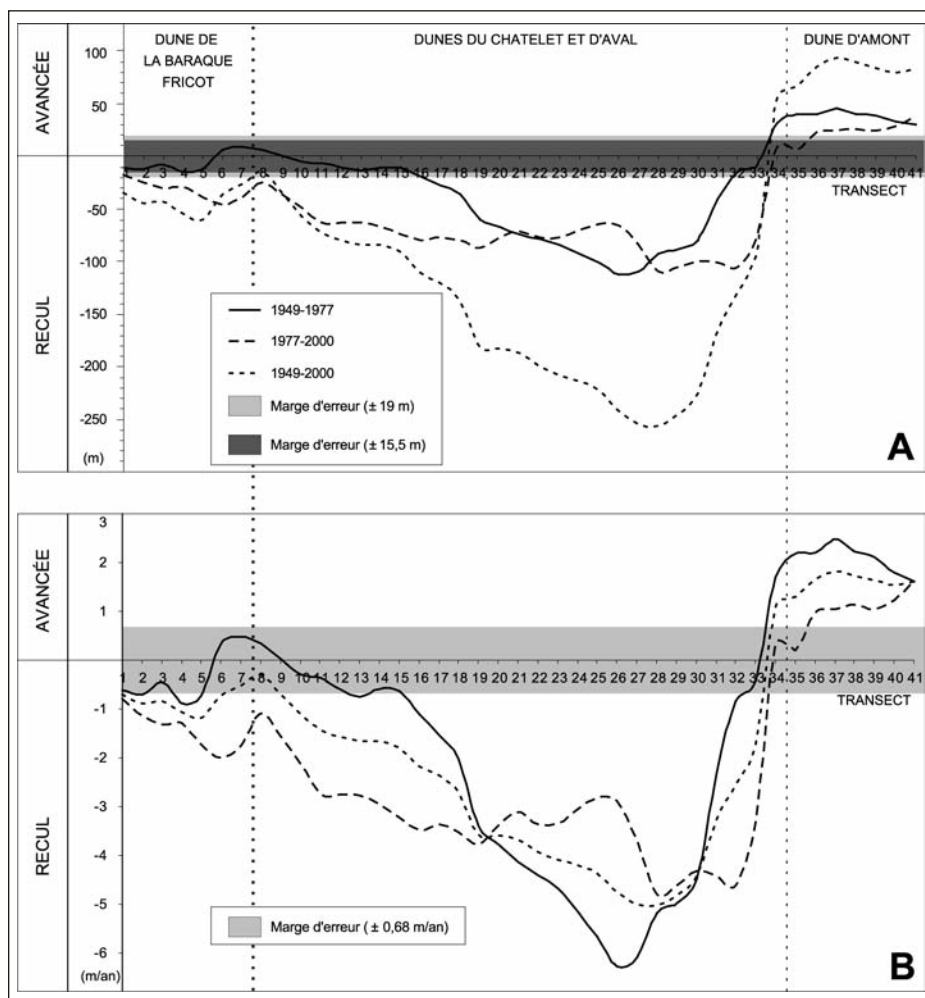
De 1977 à 2000

La période suivante correspond à une généralisation de l'érosion littorale à la quasi-totalité de la baie de Wissant. Bien que les rythmes de recul aient diminué dans le secteur de la dune d'Aval, variant de 3,0 à 4,8 m/an (au lieu de 5 à 6 m/an entre 1949-1977), plusieurs secteurs, qui étaient caractérisés par une stabilité du trait de côte, ont

Fig. 6 – A) : évolution de la position du trait de côte en Baie de Wissant entre 1949 et 2000 ; B) : rythmes annuels d'évolution du trait de côte pour les périodes 1949-1977, 1977-2000, et 1949-2000.

Fig. 6 – A) : coastline evolution in the Bay of Wissant from 1949 to 2000; B) : Mean rates of coastline evolution for the periods 1949-1977, 1977-2000, and 1949-2000.

alors connu un recul marqué (fig. 6). L'érosion s'est nettement accentuée au niveau des dunes du Châtelet et de la Baraque Fricot, secteurs alors assez stables jusque-là, où le recul du trait de côte a été de l'ordre de 1 à 2 m/an entre 1977 et 2000. Dans la partie est de la baie, le trait de côte a continué à progresser vers le large au niveau de la dune d'Amont, mais à un rythme inférieur à la période précédente (fig. 6). Outre le transect 35 pour lequel la faible valeur d'avancée de la ligne de rivage est inférieure à la marge d'erreur, l'ensemble de ce secteur a connu une progression du trait de côte d'environ 1 à 1,6 m/an.



De 1949 à 2000

Si l'on examine l'évolution du trait de côte pendant toute la période de mesure de cette étude, on constate que les parties occidentale et centrale de la baie de Wissant ont été affectées par une forte érosion, particulièrement au niveau de la dune d'Aval où le recul du pied de dune a été supérieur à 200 m entre 1949 et 2000 (transects 22 à 30, fig. 6), atteignant même plus de 250 m à l'endroit du transect 28. De telles valeurs se traduisent par des vitesses de recul extrêmement élevées allant d'environ 4 à 5 m/an. Plus à l'ouest, ces valeurs tendent à diminuer assez rapidement, mais restent néanmoins très significatives (généralement >1 m/an), et dans tous les cas supérieures à la marge d'erreur.

Pour l'ensemble de la période étudiée, le secteur de la dune d'Amont, dans la partie est de la baie, a connu une avancée de la ligne de rivage comprise entre 1,3 et 1,8 m/an (fig. 6), correspondant à des apports sableux responsables du développement d'accumulations éoliennes sur le haut de plage et de la progression vers le large du massif dunaire. Il est vraisemblable que ces apports sédimentaires proviennent, au moins en partie, des produits de l'érosion littorale dans le reste de la baie. En dépit de l'absence d'estimation des volumes impliqués dans ces transferts de sédiments, la représentation graphique des variations spatiales de la position du trait de côte (fig. 6A) indique clairement qu'il existe

une forte disproportion entre les quantités de sédiments érodés et les quantités qui ont pu s'accumuler dans la partie est.

Globalement, pour l'ensemble de la baie, nos mesures montrent que l'érosion littorale a eu tendance à se déplacer vers l'ouest, touchant de plus en plus de secteurs auparavant stables. Par ailleurs, il existe une forte opposition entre les parties centrale et ouest de la baie, marquées par un important recul, et le secteur à l'est du village de Wissant où le rivage connaît, au contraire, une progression vers le large depuis au moins le milieu du XX^e siècle.

L'évolution de la morphologie des petits fonds entre 1911 et 2002

Évolution de 1911 à 1977

La carte d'évolution des fonds en baie de Wissant montre qu'une grande partie de la baie a connu des variations bathymétriques importantes entre 1911 et 1977 (fig. 7A). Le banc À la Ligne a connu une évolution complexe pendant cette période, son sommet s'étant exhaussé de deux à quatre mètres sur près de 2,5 km de longueur au nord-est du cap Gris Nez, tandis que son flanc externe a plutôt été affecté par de l'érosion sur presque toute sa longueur. Cette évolution est bien visible sur les profils bathymétriques transversaux qui indiquent que le sommet du banc s'est

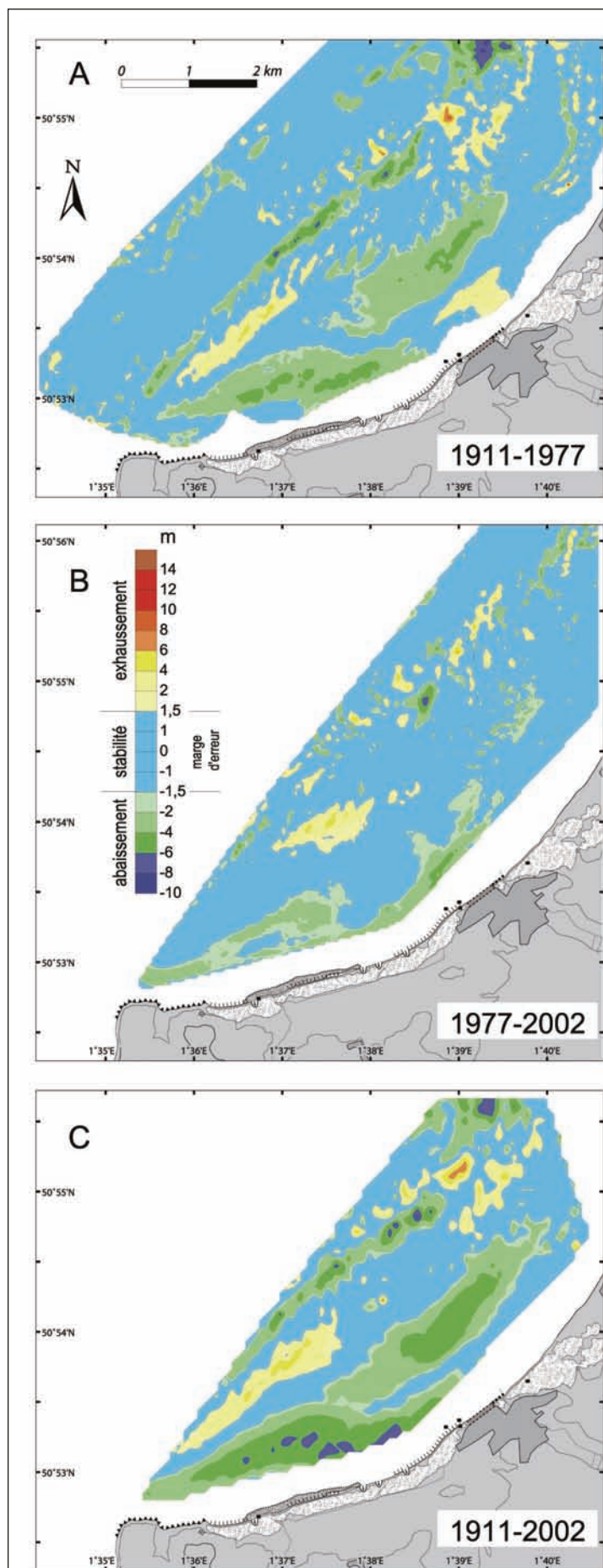


Fig. 7 – Cartes d'évolution de la bathymétrie en baie de Wissant pour les périodes (A) 1911-1977, (B) 1977-2002, et (C) 1911-2002 (données SHOM 2001, contrat n° E70/2001).

Fig. 7 – Maps of bathymetry changes in the Bay of Wissant from (A) 1911 to 1977, (B) 1977 to 2002, and (C) 1949-2002 (data from SHOM 2001, contract n° E70/2001).

considérablement développé dans la partie sud-ouest de la baie (profils A et B, fig. 8), où les volumes accumulés sont de l'ordre de 850 m³/m linéaire entre approximativement 1 500 et 2 500 m du rivage (tab. 1). Le profil H, réalisé dans l'axe du banc À la Ligne (fig. 9), montre également que, au sud-ouest, son sommet s'est fortement exhaussé. Dans la partie centrale de la baie, par contre, le banc a connu un fort démaigrissement, particulièrement entre 1 000 et 2 000 m de distance de la côte où la crête s'est abaissée de plus de 3,5 m par endroits (fig. 8), ce qui s'est traduit par une perte de 3 730 m³ (profil C) et 3 087 m³ (profil D) par mètre linéaire (tab. 1). En outre, le flanc externe a reculé dans ce secteur de 150 à 200 m vers la côte (fig. 8). Les profils E et F (fig. 8) illustrent l'évolution du banc dans la partie nord-est de la baie où son sommet s'est légèrement élevé, ceci étant particulièrement visible sur le profil F, avec une accumulation supérieure à 1 000 m³/m linéaire entre 2 200 et 2 800 m de distance de la côte (tab. 1). Par contre, le flanc externe du banc a été affecté par une importante érosion, excédant 3 650 m³ par mètre linéaire le long de ce profil (tab. 1). L'analyse des profils bathymétriques montre que, dans l'ensemble, le banc À la Ligne a subi un démaigrissement entre 1911 et 1977, même si sa crête a pu s'exhausser localement. L'érosion du flanc interne du banc et l'accumulation de sédiments à son sommet indiquent, en outre, que le sommet du banc s'est déplacé vers le large.

La carte des variations bathymétriques (fig. 7A) montre clairement que l'évolution des petits fonds, entre le banc et la côte, a été marquée par une forte érosion dans la majeure partie de la baie. De vastes secteurs au large de la dune du Châtelet et de la dune d'Aval sont caractérisés par un abaissement des fonds de deux à quatre mètres et même de quatre à six mètres à proximité de l'estran. Les profils A, B et C, situés au large de la dune du Châtelet et de la dune d'Aval, montrent tous les trois une érosion significative des petits fonds de 2 145, 3 167 et 3 730 m³/m linéaire respectivement (fig. 8, tab. 1). Il en va de même au large de la commune de Wissant (fig. 7), bien que la zone d'érosion soit située un peu plus loin au large. Cette importante érosion dans les faibles profondeurs est clairement révélée par le profil G (fig. 9), levé le long de la côte sur le flanc interne du banc. À l'est de Wissant, par contre, face à la dune d'Amont, on note une accumulation de sédiments immédiate-

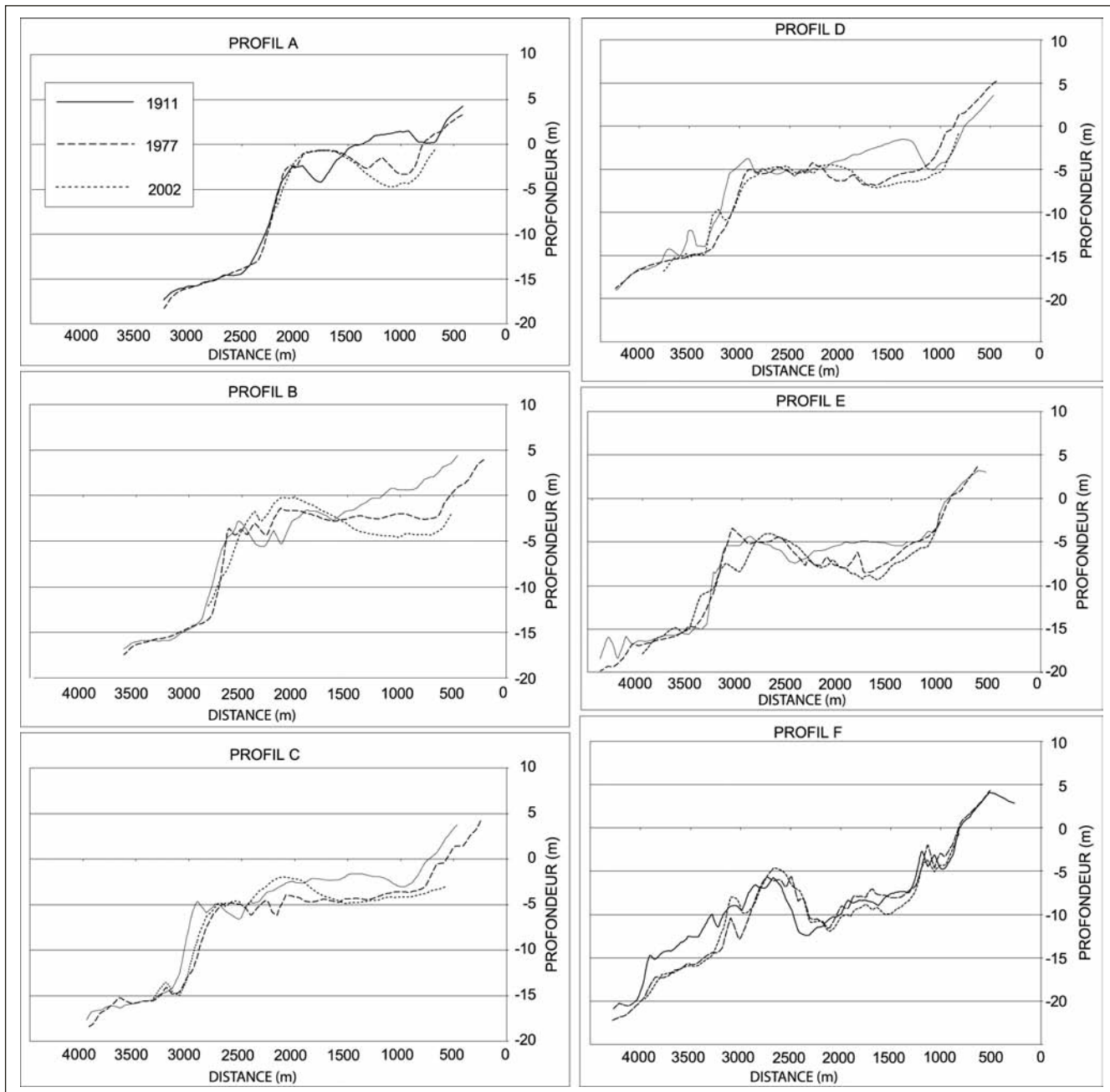


Fig. 8 – Evolution des profils bathymétriques transversaux de 1911 à 2002 (voir la fig. 4 pour la localisation des profils A à F).

Fig. 8 – Evolution of shore-perpendicular bathymetry profiles from 1911 to 2002 (see fig. 4 for location of profiles A to F).

ment au large de l'estran (fig. 7A). Cette évolution est visible sur le profil D (fig. 8) où la zone la plus proche du rivage (-5 à +5 m de profondeur) a connu une aggradation sous l'effet d'un dépôt de sédiments d'environ 1 260 m³/m linéaire (tab. 1). Plus à l'est, les profils E et F montrent une stabilité des fonds dans les mêmes profondeurs.

De 1977 à 2002

Bien que la période 1977-2002 ne représente que vingt-cinq ans d'évolution, des changements significatifs sont

perceptibles sur la carte d'évolution de la bathymétrie (fig. 7B). On peut remarquer que l'accrétion verticale du sommet du banc À la Ligne s'est poursuivie, mais plus à l'est que pendant la période 1911-1977. Le profil A montre une grande stabilité du sommet du banc dans le secteur sud-ouest de la baie, et ce n'est qu'à partir du profil B, situé plus à l'est, que l'accumulation s'est produite au niveau de la crête du banc (fig. 8). Dans les petits fonds entre le banc À la Ligne et le rivage, l'érosion s'est poursuivie de façon importante dans toute la partie centrale et sud-ouest de la baie (fig. 7B), l'abaissement du fond ayant même atteint un peu plus de 4 m

	429-615 -123	615-802 76	802-1 550 -2 145	1 550-1 986 879	1 986-2 173 45	2 173-2 671 -116	Distance (m)	Volume (m ³)
A	678-1 612 -1 275	1 612-2 048 38	2 048-2 173 -153					
B	458-1 947 -3 167	1 947-2 448 845	2 448-2 620 -90	2 620-2 696 54	2 696-2 945 -467			1911-1977 1977-2002
C	520-1 577 -1 886	1 577-2 510 1 085	2 510-2 705 -385	2 705-2 821 -3 163				
D	466-2 463 -3 730	2 463-2 712 242	2 712-3 212 -1 333					
E	580-1 583 -760	1 583-2 463 1 431	2 463-2 670 10	2 670-3 024 331	3 024-3 336 78			
F	470-1 133 1 257	1 133-2 195 -3 087	2 195-2 852 93	2 852-3 779 -1 825				
G	817-1 763 -1 293	1 763-2 195 402	2 195-2 330 -79	2 330-2 834 130	2 834-3 099 -163	3 099-3 345 475		
H	636-1 077 -139	1 077-2 400 -2 101	2 400-2 842 398	2 842-2 968 -59	2 968-3 157 213	3 157-3 346 -114	3 346-3 598 192	3 598-4 421 -727
I	1 047-1 959 -930	1 959-2 279 -55	2 279-2 854 339	2 854-3 220 -901	3 220-3 913 550			
J	512-1 051 313	1 051-1 129 -17	1 129-1 191 31	1 191-1 562 -189	1 562-1 903 267	1 903-2 179 -51	2 179-2 796 1 060	2 796-4 275 -3 652
K	821-1 191 -345	1 191-2 329 -1 229	2 329-2 756 267	2 756-3 267 747				
L	244-5 559 -10 158							
M	1 012-3 140 638	3 140-5 550 -810						
N	7,5-723 -594	723-3 792 4 294	3 792-5 568 -1 981					
O	956-2 490 8	2 490-5 568 -3 670						
P	58-1 834 -2 882	1 834-4 082 2 164	4 082-5 605 -521					
Q	1 714-4 497 2 343	4 497-5 605 -133						

Tableau 1 – Estimation des variations de volume sédimentaire le long de chaque profil bathymétrique (en m³/m linéaire). Les distances correspondent à la distance du point d'origine de chaque profil (voir fig. 8 et fig. 9).

Table 1 – Estimate of sediment volume changes along each bathymetry profile (in m³/m width). Distances correspond to the distance from the origin of each profile (see fig. 8 and fig. 9).

1911-2002, le volume du banc À la Ligne a diminué, les pertes de sédiments s'étant produites tant sur la face interne que sur la face externe du banc. Cette érosion du banc est encore plus facilement perceptible sur les profils bathymétriques (fig. 8) que sur la carte d'évolution du fond. Les autres variations significatives de la bathymétrie concernent les petits fonds entre le banc À la Ligne et le rivage où l'érosion est extrêmement forte. Face aux dunes du Châtelet et d'Aval, l'érosion est généralement comprise entre quatre et six mètres, et parfois supérieure à six mètres à proximité du rivage (fig. 7C).

Bien que l'analyse diachronique des variations bathymétriques ne nous renseigne pas sur la variabilité à court terme de la morphologie des fonds marins, elle permet d'esquisser les tendances évolutives à moyen terme et de mieux comprendre la dynamique morpho-sédimentaire de la baie. Le bilan global montre une perte nette de sédiments d'environ 10,5 x 10⁶ m³ en l'espace de 91 ans, soit un déficit sédimentaire de l'ordre de 116 000 m³/an pour l'ensemble de la baie. Par ailleurs, la comparaison des levés bathymétriques indique que les rythmes d'érosion des fonds à proximité de la côte ont été plus élevés pendant la période 1977-2000 par rapport à 1911-1977. Les calculs effectués à partir des cartes bathymétriques différentielles indi-

lègèrement au large de la commune de Wissant. Cette érosion peut s'expliquer par un déplacement vers la côte du profil pré-littoral, clairement visible sur les profils A, B et C à moins de 1 000 m de distance de la côte (fig. 8). A l'est de la commune de Wissant, les fonds montrent une grande stabilité entre 500 et 1 000 m de la côte (profils E et F).

quent en effet que, jusqu'à environ un kilomètre de distance vers le large, les fonds se sont abaissés à des rythmes généralement compris entre 2 et 6 cm/an entre 1911 et 1977, tandis que les valeurs d'érosion des fonds ont plutôt été supérieures à 6 cm/an entre 1977 et 2002, atteignant même plus de 10 cm/an par endroits à proximité immédiate de l'estran.

De 1911 à 2002

Dans l'ensemble, les changements bathymétriques en baie de Wissant sont de très grande ampleur et témoignent de mouvements sédimentaires extrêmement importants (fig. 7C). Le déplacement vers le nord-est de la zone d'accumulation de sédiments au sommet du banc À la Ligne semble indiquer que la crête du banc s'est développée dans la même direction pendant le XX^e siècle. Malgré cette aggradation verticale bien visible sur la carte différentielle

Discussion

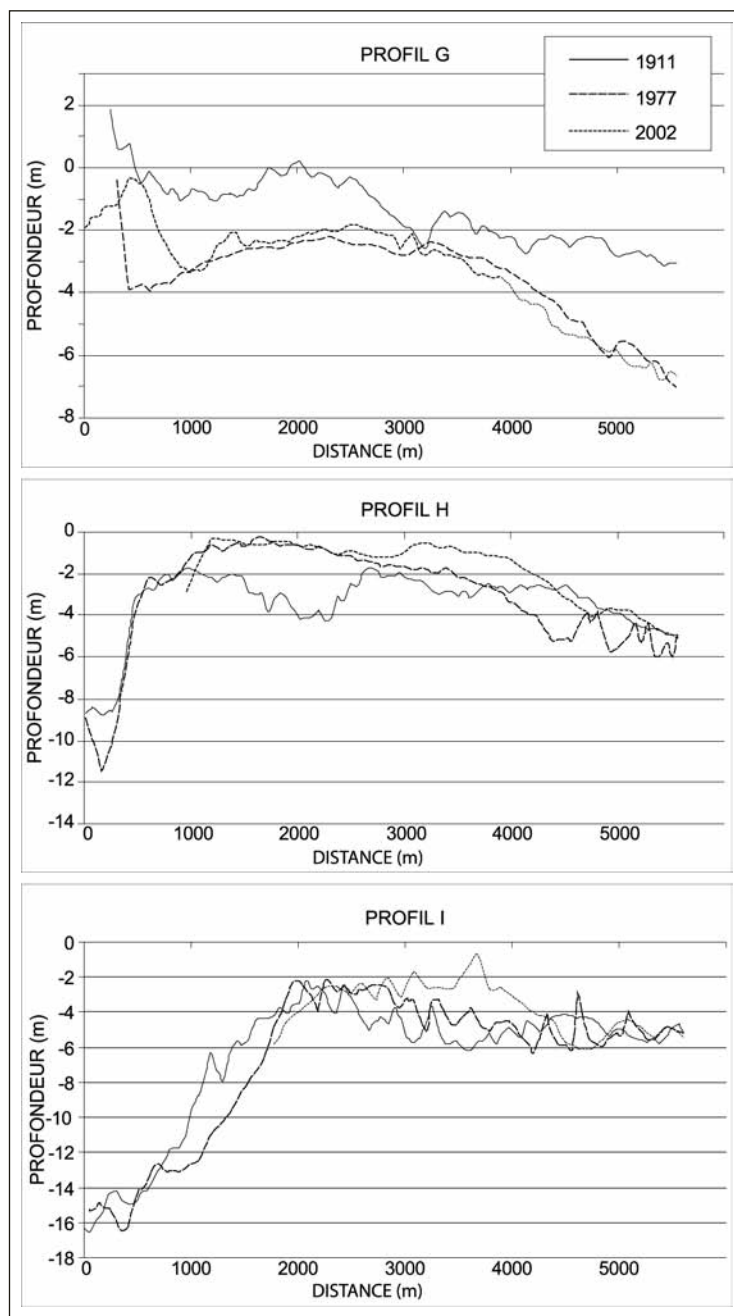
L'analyse des photographies aériennes verticales de 1949, 1997 et 2000 a permis d'estimer les rythmes d'évolution de la ligne du rivage de la baie de Wissant pendant la deuxième partie du XX^e siècle. Les secteurs les plus touchés par le recul se situent au centre de la baie et dans une moindre mesure dans la partie occidentale, alors que le secteur de la dune d'Amont, à l'est du village de Wissant, a connu une avancée du trait de côte depuis au moins 1949. L'accumula-

Fig. 9 – Evolution des profils bathymétriques longitudinaux de 1911 à 2002 (voir la fig. 4 pour la localisation des profils G à I).

Fig. 9 – Evolution of shore-parallel bathymetry profiles from 1911 to 2002 (see fig. 4 for location of profiles G to I).

tion de sédiments responsable de cette avancée de la ligne de rivage est en partie due à des transferts le long de la côte de sédiments provenant des zones occidentales en érosion. Des mesures hydrodynamiques récentes réalisées sur l'estran de la Baie de Wissant (Sedrati et Anthony, 2005) ont clairement montré que la dynamique sédimentaire est fortement conditionnée par des courants longitudinaux d'origine tidale dont les vitesses peuvent dépasser 150 cm/s lorsque les vents renforcent les courants de marée. Les vents dominants de secteur ouest favorisent considérablement un transport longitudinal déjà dirigé vers l'est en conditions modales, contribuant à l'accumulation de sédiments dans le secteur de la dune d'Amont.

L'évolution de la bathymétrie dans la baie de Wissant suggère cependant que l'évolution du trait de côte ne dépend pas uniquement des processus hydro-sédimentaires agissant dans la zone intertidale, mais qu'elle est également fortement liée à la dynamique morpho-sédimentaire de l'avant-côte. Depuis 1911, le bilan sédimentaire de la baie de Wissant est fortement négatif, les pertes étant particulièrement localisées dans une dépression longitudinale située entre le banc À la Ligne et le rivage. Ce constat confirme les résultats des travaux antérieurs sur l'évolution des petits fonds dans ce secteur (Clabaut, 1988 ; Augris *et al.*, 1990). Cette perte de sédiments dans la zone pré-littorale a fortement affecté le bilan sédimentaire de la zone intertidale et la dynamique du trait de côte. Il existe effectivement une nette correspondance entre les zones de forte érosion dans la zone pré-littorale proche et celles d'important recul du trait de côte, comme la dune du Châtelet et la dune d'Aval. Le long du village de Wissant, si le trait de côte est stabilisé artificiellement par une digue, le niveau de l'estran n'a fait que s'abaisser depuis plusieurs années (Messence et Cohen, 2002). Désormais, la plage est entièrement submergée à marée haute et les vagues peuvent déferler directement sur cet ouvrage, menaçant sa stabilité. Là encore, les fonds un peu plus au large ont subi une nette érosion pendant les dernières décennies (fig. 7). Dans les secteurs où le trait de côte est stable ou a connu une avancée, comme à l'est de Wissant (dune d'Amont), les petits fonds proches de l'estran sont au contraire caractérisés par une stabilité, voire une accumulation de sédiments. Les phénomènes d'érosion ou d'accumulation touchent donc l'ensemble du profil côtier depuis la dune jusqu'à des pro-



fondeurs de plusieurs mètres sous le niveau des plus basses mers (≈ 0 hydrographique). Un abaissement des fonds marins à proximité de la côte aura tendance à provoquer un abaissement du niveau de l'estran, ce qui s'est effectivement produit dans la partie centrale et ouest de la baie (fig. 8, profils A, B, C). Une telle diminution de hauteur de l'estran n'a pu que favoriser l'érosion du haut de plage et des dunes littorales en induisant une augmentation de la fréquence des niveaux d'eau sur le haut de plage. Le rôle majeur du niveau de l'estran sur la fréquence de submersion du haut de plage et sur l'érosion du front dunaire a justement été particulièrement mis en évidence en baie de Wissant (Ruz et Meur-Férec, 2004).

Les résultats concernant l'évolution du trait de côte montrent également que l'érosion littorale s'est généralisée à l'ensemble des massifs dunaires de la partie centrale et occi-

dentale de la baie de Wissant pendant la période 1977-2000. Même s'il n'existe que trois levés bathymétriques durant le XX^e siècle, l'analyse des variations bathymétriques indique également que l'érosion des fonds marins proches de la côte semble s'être accélérée entre 1977 et 2002. Plusieurs hypothèses peuvent être invoquées pour tenter d'expliquer l'aggravation de l'érosion du rivage et des petits fonds pendant le dernier quart du XX^e siècle. À partir d'une étude statistique des tempêtes entre 1961 et 1995 prenant en compte les vents de vitesse moyenne supérieure à 16 m/s à Dunkerque, à environ cinquante kilomètres à l'est de Wissant, P. Clabaut *et al.* (2000) ont montré que les années 1970, et dans une moindre mesure les années 1980 et 1990, avaient connu une plus grande fréquence de tempêtes que les années 1960. B. Vasseur et A. Héquette (2000) ont analysé les données marégraphiques du port de Dunkerque et les vents d'afflux ayant pu engendrer des surcotes à Dunkerque entre 1957 et 1988. D'après cette étude, les années 1970 et surtout la période 1977-1988 ont été caractérisées par une plus grande fréquence de hauts niveaux d'eaux associés à des tempêtes plus intenses comparativement à la fin des années 1950 et aux années 1960. Des résultats similaires ont été observés sur les côtes de la Manche (Costa, 1997).

Le démaigrissement du banc À la Ligne qui, à l'instar d'autres bancs pré-littoraux de la région, a pu représenter une source sédimentaire pour la plage et les dunes (Aernouts et Héquette, 2003) a également pu contribuer à la diminution du prisme sédimentaire intertidal et supratidal. Des extractions de sables qui eurent lieu sur et aux abords du banc À la Ligne pendant les années 1960 et 1970 (Ferrière *et al.*, 1993) n'ont pu qu'accentuer ce phénomène. D'après C. Augris *et al.* (1990), les volumes prélevés en seulement trois ans à la fin des années 1970 auraient été d'environ 130 000 m³. Il est également vraisemblable qu'en raison de la diminution de la taille du banc, sa capacité à dissiper l'énergie des vagues et à protéger la côte de leur attaque se soit réduite au cours du XX^e siècle. Les résultats d'une étude de modélisation de la propagation de la houle sur les fonds de 1911, 1977 et 2002 de la baie de Wissant (CETMEF, 2004) vont dans ce sens. La modélisation numérique de la propagation de houles d'ouest à nord sur ces différentes bathymétries tend à démontrer que le démaigrissement du banc pendant le XX^e siècle aurait permis aux houles d'attaquer plus facilement le centre de la baie, secteur qui serait devenu le plus exposé aux houles de forte hauteur et soumis à un déferlement tardif. Enfin, l'extension de la jetée du port de Boulogne-sur-Mer au début des années 1970 a peut-être aussi joué un rôle dans l'accélération de l'érosion à Wissant (Clabaut, 1988), car cet ouvrage, situé en amont du transit sédimentaire régional provoque le dépôt d'une partie des sédiments transitant vers le nord (Augris *et al.*, 1990), au détriment de la baie de Wissant.

Conclusion

Les résultats de cette étude montrent que la baie de Wissant a connu une érosion extrême pendant la deuxième partie du XX^e siècle, particulièrement dans la partie centra-

le de la baie où le recul du front dunaire a dépassé 250 m depuis 1949. L'analyse de l'évolution de la ligne de rivage montre également que l'érosion littorale s'est presque entièrement généralisée à l'ensemble de la baie pendant la période 1977-2000, sauf dans la partie est qui a connu une avancée du trait de côte. Bien que la variabilité temporelle des rythmes d'érosion littorale puisse être en partie expliquée par des variations dans les conditions météo-marines pendant les dernières décennies, nos résultats démontrent que les phénomènes d'érosion et d'accumulation littorale dans la baie de Wissant dépendent aussi fortement de la dynamique morpho-sédimentaire dans les petits fonds. Les secteurs de la baie caractérisés par des phénomènes de recul du trait de côte sont en effet ceux qui correspondent aussi à une érosion dans les petits fonds. Au contraire, à l'est du village de Wissant, le littoral a connu une avancée et est prolongé vers le large par des fonds stables ou en accumulation. La comparaison des levés bathymétriques de 1911, 1977 et 2002 indique que la zone pré-littorale a perdu en moyenne plus de 100 000 m³ de sédiments par an durant le XX^e siècle. Cette érosion des fonds a induit l'abaissement du profil de la plage, favorisant ainsi le recul de la ligne de rivage. Il est également très vraisemblable que les variations morphologiques du banc À la Ligne, situé à proximité de la côte, et notamment son démaigrissement, aient modifié les conditions hydrodynamiques à la côte, altérant ainsi la dynamique sédimentaire littorale.

La compréhension des processus agissant sur les plages et les dunes littorales des côtes macrotidales reste essentielle pour saisir le fonctionnement morphodynamique de ces milieux (Anthony *et al.*, 2004 ; Vanhée *et al.*, 2002 ; Ruz et Meur-Férec, 2004). Toutefois, l'étroite relation qui semble exister entre l'évolution des petits fonds et les variations de la position du trait de côte suggère qu'il est primordial de prendre en compte la dynamique morphologique et sédimentaire de l'avant-côte pour mieux comprendre la variabilité des mouvements de la ligne de rivage. La zone infratidale apparaît en effet comme une interface majeure entre le littoral et le milieu marin, l'évolution morphologique des petits fonds ayant des répercussions directes sur la dynamique sédimentaire littorale et l'évolution du trait de côte. Pourtant, l'intégration de l'avant-côte dans la gestion de la zone côtière est loin d'être systématique, peut-être en raison des coûts logistiques et humains supplémentaires qu'entraîne sa prise en considération. La prise en compte de cet espace est cependant indispensable si l'on veut aboutir à une gestion intégrée de la zone côtière.

Remerciements

Cette étude a bénéficié du soutien financier de la Région Nord-Pas-de-Calais par le biais d'une allocation de recherche à D. Aernouts. Ce travail a également reçu le soutien financier du programme franco-britannique INTERREG III « Plages à Risques » en partie financé par des fonds FEDER. La rectification des photographies aériennes utilisées dans cette étude a été effectuée grâce à un orthophotoplan fourni gracieusement par l'Espace Naturel Régional de la Région Nord-Pas-de-Calais. L'étude des

variations bathymétriques a été réalisée à partir des données du Service Maritime des Ports de Boulogne-sur-Mer et de Calais pour l'année 2002 et des minutes de bathymétrie du Service Hydrographique et Océanographique de la Marine pour les années 1911 et 1977 (© SHOM 2001 - contrat n° E70/2001). Les auteurs remercient également S. Costa, H. Regnauld et J.-C. Thouret pour leur lecture critique du manuscrit et leurs suggestions.

Références

- Aernouts D. et Héquette A. (2003)** – Les effets des changements bathymétriques à l'avant-côte dans l'évolution du rivage. Exemples le long des côtes du Nord-Pas-de-Calais. XXXe Colloque de l'union des océanographes de France. *Hydrodynamique et transport sédimentaire en zone côtière, impacts sur les écosystèmes associés*. 8-10 Septembre 2003, Marseille.
- Aernouts D. et Héquette A. (2004)** – Minutes de bathymétrie et évolution des fonds marins : les abords du port de Calais. *M@ppemonde* 73 (<http://mappemonde.mgm.fr/>).
- Anthony E.J. (2002)** – Long-term marine bedload segregation and sandy versus gravely Holocene shorelines in the eastern English Channel. *Marine Geology* 187, 221-234.
- Anthony E.J., Levoy O. et Monfort O. (2004)** – Morphodynamics of intertidal bars on a megatidal beach, Merlimont, northern France. *Marine Geology* 208, 73-100.
- Augris C., Clabaut P. et Vicaire O. (1990)** – *Le domaine marin du Nord-Pas-de-Calais – Nature, morphologie et mobilité des fonds*. Edition IFREMER – Région Nord-Pas-de-Calais, 93 p.
- Battiau-Queney Y., Fauchois J., Deboudt P. et Lanoy-Ratel P. (2000)** – Beach-dune systems in a macrotidal environment along the northern French coast. *Journal of Coastal Research*, Proceedings of the ICS 2000, New Zealand, 580-592.
- CETMEF (2004)** – *Étude de propagation de la houle – Impact de l'évolution du Banc à la Ligne*. Rapport technique du Centre d'Études Techniques Maritimes et Fluviales, Ministère de l'Équipement, des Transports, du Logement, du Tourisme et de la Mer, 35 p. et annexes.
- Clabaut P. (1988)** – *Dynamique sédimentaire dans le détroit du Pas de Calais*. Thèse de doctorat, université des Sciences et Technologies de Lille, 251 p.
- Clabaut P. et Chamley H. (1986)** – Observations sédimentologiques sur le littoral de Wissant. *Annales de la Société Géologique du Nord*, t. CY, 169-178.
- Clabaut P., Chamley H. et Marteel H. (2000)** – Évolution récente des dunes littorales à l'est de Dunkerque (Nord de la France). *Géomorphologie : relief, processus, environnement*, 2, 125-136.
- Clique P.-M. et Lepetit J.-M. (1986)** – *Catalogue sédimentologique des côtes de France. Côtes de la Manche et de la mer du Nord*. Direction d'Études et Recherches d'EDF, Laboratoire National d'Hydraulique-Laboratoire Central d'Hydraulique de France, Paris, 133 p.
- Costa S. (1997)** – *Dynamique littorale et risques naturels : l'impact des aménagements, des variations récentes du niveau marin et des modifications climatiques entre la baie de Seine et la baie de Somme*. Thèse, université Panthéon-Sorbonne (Paris I), 376 p.
- Dewez S., Clabaut P., Vicaire O., Berck C., Chamley H. et Augris C. (1989)** – Transits sédimentaires résultants aux confins Manche-mer du Nord. *Bulletin de la Société géologique de France*, 8, 1043-1053.
- Durand P. (1998)** – Cinématique d'un littoral sableux à partir de photographies aériennes et de cartes topographiques. Exemple du littoral d'Argelès-Plage à Saint-Cyprien (Roussillon, France). *Géomorphologie : relief, processus, environnement*, 2, 155-166.
- Dyer K.R. et Huntley D.A. (1999)** – The origin, classification and modelling of sand banks and ridges. *Continental Shelf Research* 19, 1285-1330.
- Fauchois J. (1998)** – *L'intérêt de la cartographie à grande échelle dans l'étude géomorphologique des littoraux dunaires du Nord-Pas-de-Calais*. Thèse, université des Sciences et Technologies de Lille, 266 p.
- Ferrière J., Trentesaux A. et Chamley H. (1993)** – Le domaine marin du Nord-Pas-de-Calais : nature des fonds et dynamique sédimentaire. *Annales de la Société géologique du Nord*, 2, 23-30.
- Leatherman S.P. (1983)** – Shoreline mapping: A comparison of techniques. *Shore and Beaches* 51, 28-33.
- Messence S. et Cohen O. (2002)** – La gestion de l'érosion côtière en baie de Wissant : de la négligence à l'urgence. Actes du colloque « Espaces littoraux en mutation », Commission de Géographie de la Mer et des Littoraux, Dunkerque, 1^{er} juin 2000, 73-80.
- Mortier R. et Boels M. (1982)** – Histoire de la plaine maritime de Wissant (Pas-de-Calais) depuis le début de l'Holocène. *Annales de la Société géologique du Nord*, 101, 17-22.
- Munot A.V. et Gilot E. (1977)** – Recherches palynologiques et datations ¹⁴C dans les régions côtières du Nord de la France. 1 : Phases transgressives et stabilisations dunaires flamandaises dans l'estuaire de la Canche (Pas-de-Calais). *Bulletin de l'Association Française pour l'Étude du Quaternaire*, 3, 17-25.
- Paxion K. et Cohen O. (2002)** – La baie de Wissant : cent ans d'évolution du rivage. *Mappemonde*, 67, 24-27.
- Pinte P. (1987)** – Essai de cartographie des risques naturels du littoral de Wissant à Wimereux (Bas Boulonnais). *Hommes et Terres du Nord*, 3, 160-178.
- Ruz M.H. et Meur-Férec C. (2004)** – Influence of high water levels on aeolian sand transport: upper-beach/dune evolution on a macrotidal coast, Wissant Bay, Northern France. *Geomorphology* 60, 73-87.
- Sabatier F. et Raivard L. (2002)** – Évolution bathymétrique de la pointe de l'Espiguette (delta du Rhône, mer Méditerranée) : résultats préliminaires. Acte du colloque « Espaces littoraux en mutation », Commission de Géographie de la Mer et des Littoraux, Dunkerque, 1^{er} juin 2000, 7-12.
- Sedrati M. et Anthony E.J. (2005)** – The role of longshore currents in intertidal bar mobility on a macrotidal beach under high-energy conditions, Dune d'Amont, Wissant Bay, Northern France. *5th International Conference on Coastal Dynamics*, Barcelone, Espagne, 4-8 avril 2005, Abstracts, 44-45.
- SHOM (2004)** – *Annuaire des marées, tome 1 - Ports de France*. Imprimerie de l'Établissement Principal du Service Hydrographique et Océanographique de la Marine, Brest.

- Sipka V. (1994)** – *Cartographie géomorphologique dynamique à grande échelle des côtes basses sableuses: l'exemple de la baie de Wissant*. Mémoire de DEA de géographie, université des Sciences et Technologies de Lille, 76 p.
- Smith G.L. et Zarillo G.A. (1989)** – Calculating long-term shoreline recession rates using aerial photography and beach profiling techniques. *Journal of Coastal Research* 6, 111-120.
- Suarez S. et Simon B. (1997)** – Utilisation de l'analyse diachronique dans l'étude de l'évolution du littoral oriental du delta du Rhône (France, Sud-Est). *Photo-Interprétation*, 35, 147-153.
- Thieler E.R. et Danforth W.W. (1994)** – Historical Shoreline Mapping (I): Improving Techniques and Reducing Positioning Errors. *Journal of Coastal Research* 10, 549-563.
- Vanhée S., Anthony E.J., et Ruz M.-H. (2002)** – Aeolian sand transport on a ridge and runnel beach: preliminary results from Leffrinckoucke Beach, Northern France. *Journal of Coastal Research*, Special Issue 36, 732-740.
- Vasseur B. et Héquette A. (2000)** – Storm surges and erosion of coastal dunes between 1957 and 1988 near Dunkerque (France), southwestern North Sea. In Pye, K and Allen, J.R.L. (Eds.), *Coastal and Estuarine Environments*, Geological Society, Special Publication 175, London, 99-107.
- Vicaire O. (1991)** – *Dynamique hydro-sédimentaire en mer du Nord méridionale (du cap Blanc Nez à la frontière belge)*. Thèse, université des Sciences et Technologies de Lille, 264 p.

Article reçu le 17 septembre 2004, accepté le 10 avril 2005.

