

# THESE

présentée à

L'UNIVERSITÉ DES SCIENCES ET  
TECHNOLOGIES DE LILLE

pour obtenir le titre de

DOCTEUR DE L'UNIVERSITÉ EN GÉOLOGIE ET  
GÉOCHIMIE SÉDIMENTAIRES

par

Corinne CORBAU

DYNAMIQUE SÉDIMENTAIRE EN DOMAINE  
MACROTIDAL: EXEMPLE DU LITTORAL DU  
NORD DE LA FRANCE (DUNKERQUE)

## INTRODUCTION GÉNÉRALE

Les littoraux, domaines - frontières entre mer et terre, connaissent des modifications importantes à l'échelle géologique, qui sont dues aux variations du niveau marin et se manifestent soit par une avancée de la ligne de rivage vers la mer, soit par un recul du trait de côte. Ces phénomènes à long terme ne sont pas observables à l'échelle humaine. Néanmoins la plupart des littoraux actuels subit des modifications caractérisées soit par une érosion soit par une sédimentation ce qui conduit également à une modification de la ligne de rivage. Les reculs de la côte s'effectuent souvent lors d'événements catastrophiques, et les conséquences en sont parfois graves pour les populations riveraines ou pour l'économie.

La terminaison septentrionale du littoral français, depuis l'avant-port Ouest de Dunkerque jusqu'à la frontière franco-belge, n'échappe pas à ces phénomènes de modification de la ligne de rivage. Orientée WSW-ENE et longue d'environ 35 km elle est caractérisée à l'Ouest de Dunkerque par un vaste complexe portuaire et industriel qui s'étend de l'avant-port Ouest à l'avant-port Est et, à l'Est de Dunkerque par une alternance de secteurs naturels et de secteurs urbanisés développés en bordure méridionale de la Mer du Nord (fig. 0 - 1). Au total plus de 50% de la zone d'étude sont urbanisés.

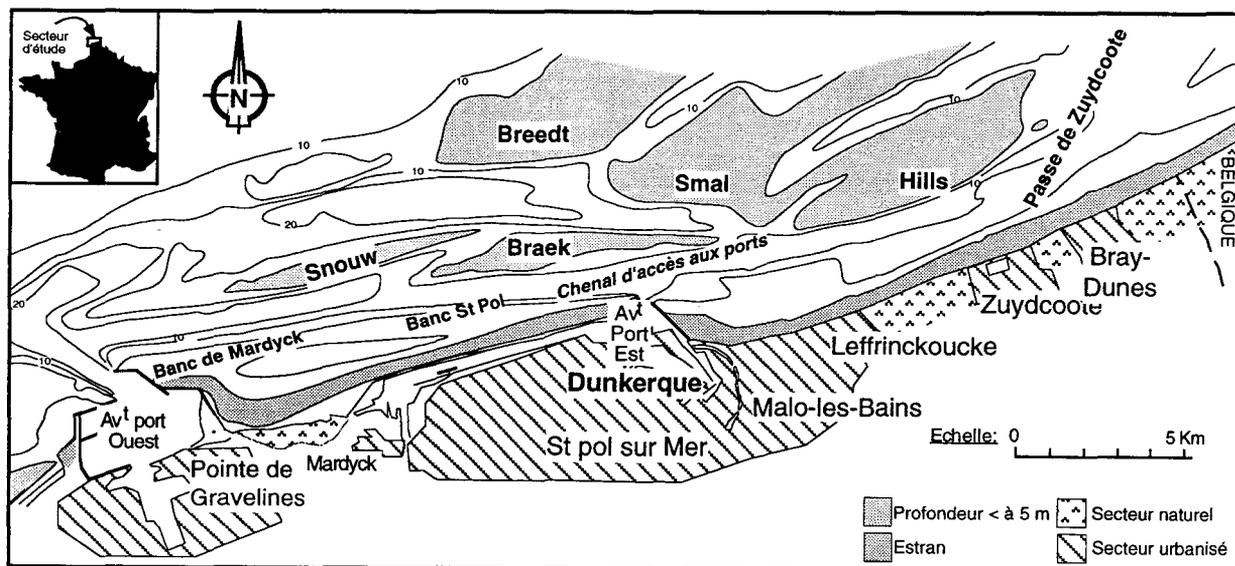


Figure 0-1 : Secteur d'étude

Une coupe morphologique au niveau des secteurs naturels montre en direction de la mer les ensembles sableux suivants : un cordon dunaire large de 750 m et haut de 10 à 15 m en moyenne, protégeant la plaine maritime flamande dont le niveau se situe sous celui des hautes mers de vive-eau ; un estran de 350 à 500 m de large, faiblement décliné et constitué de sable fin ; un talus littoral large de 1 500 m limité au Nord par le chenal d'accès aux ports de Dunkerque et les fonds marins environnants. Ces derniers sont constitués d'alignements de bancs sableux sub-émergeants et sub-parallèles à la côte, alternant avec des dépressions. La plus côtière des dépressions constitue le chenal d'accès aux deux avant-ports de Dunkerque.

L'érosion du littoral, principalement observée à l'Est de Dunkerque pendant les tempêtes associées à de forts coefficients de marée, se manifeste par un abaissement du niveau de l'estran, une réduction de sa largeur, des dégâts sur les ouvrages de défense et une migration du cordon dunaire vers l'intérieur des terres. A terme, cette érosion peut menacer la stabilité des ouvrages de protection côtière, créer des brèches dans le cordon dunaire et provoquer l'inondation de la plaine maritime flamande. C'est la raison pour laquelle le **Syndicat Intercommunal du Littoral Est (S.I.L.E)**, dans le but de trouver le moyen de prévenir les assauts de la mer, a mis en place à partir de 1990 un programme d'étude dont les objectifs sont successivement d'évaluer l'influence des facteurs naturels et anthropiques sur les évolutions sédimentaires de cette zone, puis d'examiner les différentes solutions pouvant être préconisées pour lutter contre l'érosion. L'étude s'est déroulée dans le cadre d'une collaboration entre le Laboratoire National d'Hydraulique (E.D.F./L.N.H., Chatou), le laboratoire de Dynamique Sédimentaire et Structurale de l'Université des Sciences et Technologie de Lille I, et un cabinet de géologue indépendant (P. Clabaut), dont les compétences et les moyens techniques sont complémentaires (fig. 0 - 2).

La démarche scientifique adoptée a comporté deux étapes :

La première étape (1990 - 1991) est basée sur l'analyse de documents existants pour établir un état des lieux (P. Clabaut et cette étude), ainsi que sur l'élaboration de calculs numériques de propagation de la houle à partir de données hydrodynamiques (E.D.F./L.N.H.).

La seconde étape constitue la phase d'acquisition de données nouvelles et complémentaires. L'acquisition de données hydrodynamiques a essentiellement été réalisée par le LNH. Quant à l'acquisition et à l'interprétation de données d'ordre sédimentologique comprenant relevés bathymétriques et topographiques, prélèvements d'échantillons, prospection sismique et traçage fluorescent, elles font l'objet principal du présent mémoire en ce qui concerne l'étude des fonds marins et du domaine d'estran, l'étude du système dunaire ayant été confiée à P. Clabaut. L'objectif de cette seconde phase est d'établir un modèle d'évolution générale du site, et d'en comprendre les principaux mécanismes.

Par la suite une étude d'ensemble sur modèle numérique, des études locales sur modèles physiques et des propositions d'aménagement seront effectuées principalement par le L.N.H., toujours dans le cadre de l'étude financée par le S.I.L.E..

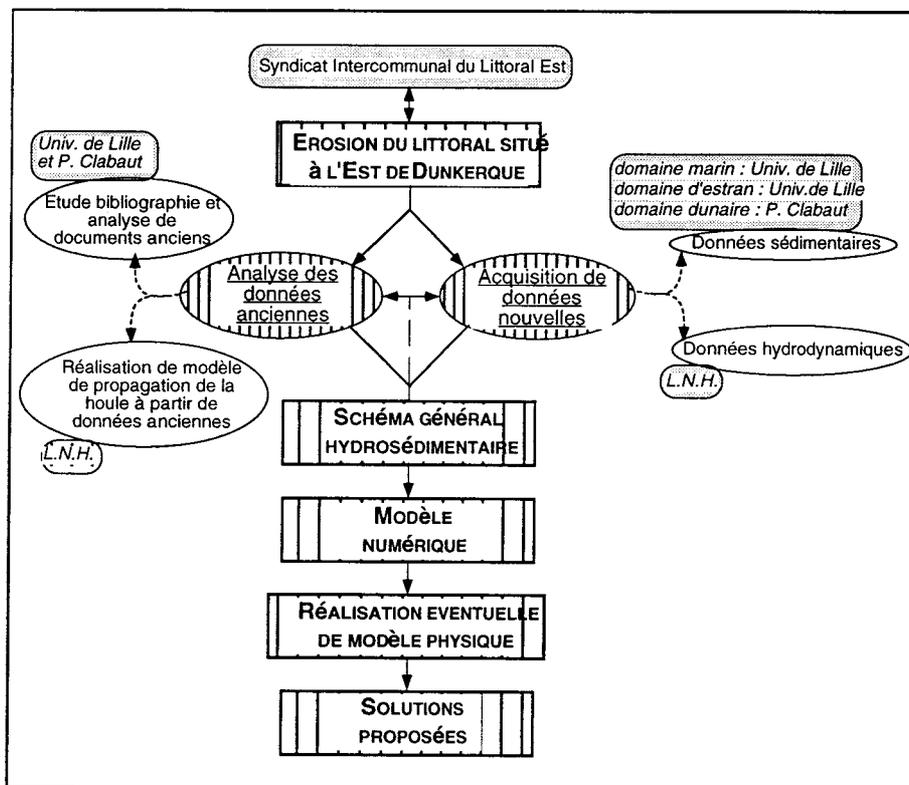


Figure 0-2 : L'étude du littoral Est dunkerquois

Le présent mémoire s'articule de la façon suivante :

- Le **chapitre I** porte sur l'évolution du littoral Est dunkerquois depuis les dernières transgressions marines, de l'Holocène jusqu'à nos jours. Cette approche géologique et historique a été réalisée à partir d'une étude bibliographique, complétée par une analyse des données existantes pour la période la plus récente.

- L'exposé des facteurs naturels susceptibles de contrôler l'évolution sédimentaire du domaine d'étude fait l'objet du **chapitre II**. Les mesures hydrodynamiques enregistrées par le L.N.H. y sont également présentées.

- Le **chapitre III** concerne l'étude des petits fonds marins, où les aspects morphologiques sédimentologiques sont développés ainsi que l'organisation interne des bancs côtiers.

- Le **chapitre IV** est consacré à l'étude morphosédimentaire de l'estran et aux tentatives de quantification par traçage fluorescent de la dynamique sédimentaire du domaine intertidal.

- La conclusion générale regroupe les principaux enseignements obtenus ainsi qu'un schéma hydrosédimentaire proposé dans la perspective d'un aménagement du littoral.

# CHAPITRE I :

## ÉVOLUTION HOLOCÈNE ET HISTORIQUE DU LITTORAL DUNKERQUOIS

### I - 1 - INTRODUCTION

La connaissance des variations du niveau marin à long terme et plus particulièrement au cours de l'Holocène est indispensable pour comprendre la morphologie et la dynamique actuelles (Eisma *et al.*, 1979 ; Paskoff 1993). La morphologie et la dynamique du littoral dunkerquois sont principalement héritées de la transgression flandrienne (Somme, 1975 ; Clabaut & Laboratoire de Dynamique Sédimentaire et Structurale, 1992) dont nous détaillerons dans ce chapitre les principales étapes.

A cette évolution naturelle holocène du site se surimpose à partir du VIII<sup>ème</sup> siècle l'évolution historique marquée par de nombreuses interventions humaines. Nous verrons comment à partir de cartes, plans et documents anciens, ces interventions ont participé jusqu'au XIX<sup>ème</sup> siècle au façonnement du littoral.

L'étude de l'évolution la plus récente à partir de la fin du XIX<sup>ème</sup> siècle est fondée sur l'analyse de données bathymétriques à haute résolution du Service Hydrographique et Océanographique de la Marine (S.H.O.M.) permettant une approche quantitative, sur la comparaison de profils topographiques anciens réalisés de 1884 à 1993, ainsi que sur l'étude de cartes et documents récents.

### I - 2 - ÉVOLUTION HOLOCÈNE

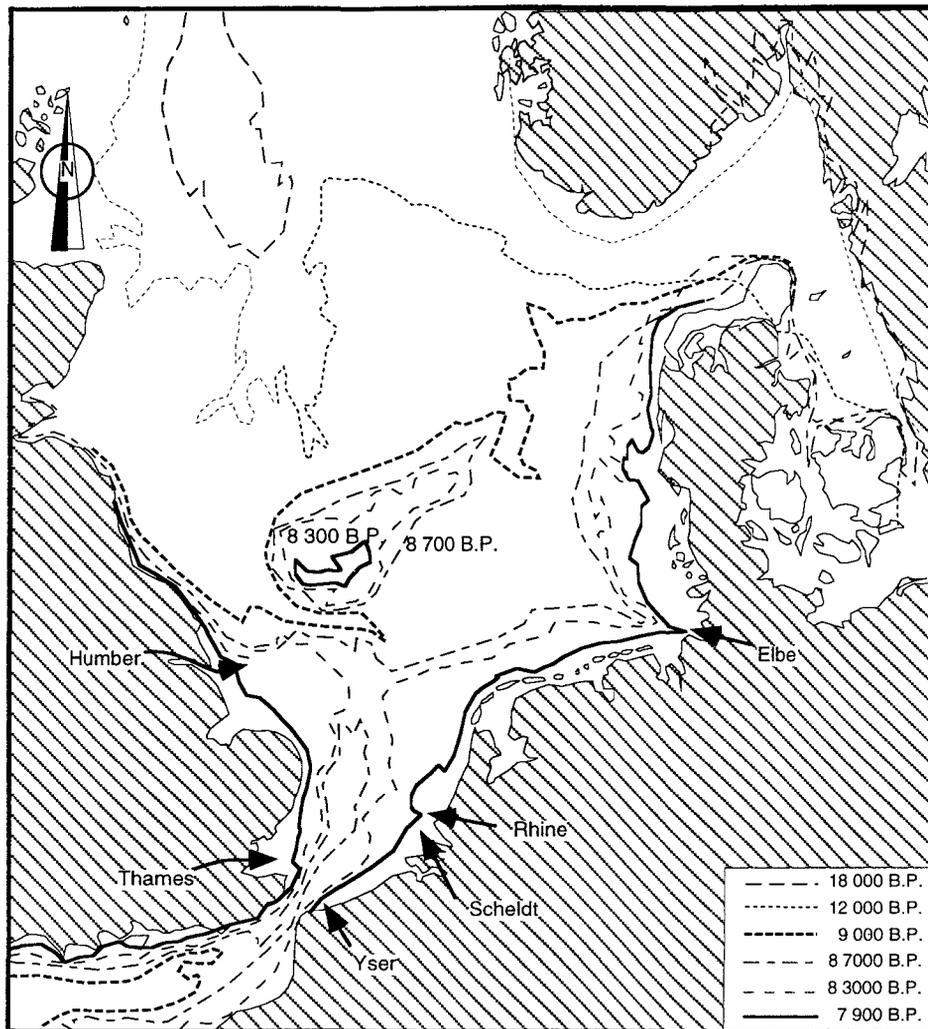
Vers 15 000 B.P. le réchauffement climatique s'amorce et la transgression flandrienne s'initie pour se poursuivre durant tout l'Holocène (Jansen *et al.*, 1979 ; Jelgersma, 1979).

#### I - 2 - 1 - LES GRANDES ÉTAPES DE LA TRANSGRESSION FLANDRIENNE

**Les grandes étapes de la transgression flandrienne en Mer du Nord** peuvent être résumées comme suit (fig. I-1) :

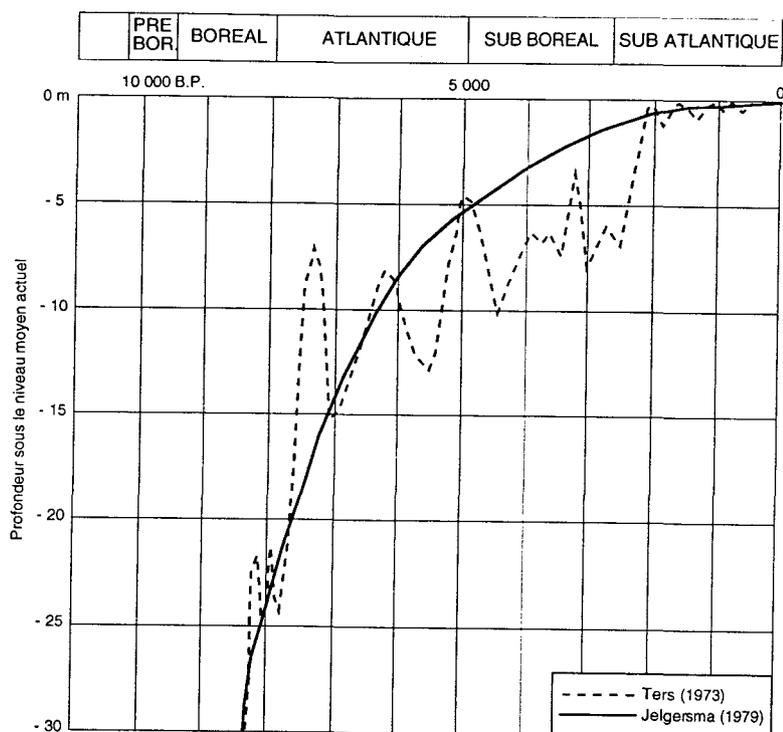
- Vers 18 000 B.P., le niveau de la mer était à - 130 m par rapport au niveau actuel.
- Vers 10 000 B.P., au début de l'Holocène, le niveau de la mer est passé à - 65 m.
- Vers 9 000 B.P., la connexion entre la Manche et la Mer du Nord s'effectue.

- Vers 8 300 B.P., le niveau de la mer est à - 30 m.
- Vers 7 800 B.P., le niveau de la mer est à - 20 m du niveau actuel de la mer et la configuration générale du rivage est proche de l'actuelle.



**Figure I-1** : Les étapes de la transgression flandrienne en Mer du Nord (d'après Jelgersma, 1979).

Il est vraisemblable qu'à partir de là, la vitesse de la transgression commence à diminuer mais pour certains auteurs la remontée jusqu'au niveau actuel s'effectue par oscillations successives (Ters, 1973 ; Moostaert *et al.*, 1989), tandis que pour d'autres la vitesse décroît progressivement (Jelgersma, 1979 ; Zägwijn, 1989 ; fig. I-2).



**Figure I-2 :** Courbes de remontée du niveau marin au cours de l'Holocène. In vicaire (1991)  
d'après Ters (1973) et Jelgersma (1979).

### I - 2 - 2 - SÉDIMENTATION HOLOCÈNE DANS LA PLAINE MARITIME FLAMANDE

Dans la plaine maritime du Nord de la France, **trois unités litho-stratigraphiques** sont communément distinguées (Dubois, 1924 ; Hageman, 1969 ; Paepe & Baeteman., 1979 ; fig. I-3) : **l'Assise de Calais, la Tourbe Supérieure et l'Assise de Dunkerque**. L'Assise de Calais regroupe quatre phases transgressives qui se sont déroulées au cours de l'Atlantique et au début du Sub-boréal. Puis du Sub-boréal à l'actuel, quatre autres phases ont été reconnues au sein de l'Assise de Dunkerque (Hageman, 1969 ; Sommé 1975; Houthuys *et al.*, 1993 ; tab. I-1).

<b>Subatlantique</b>	Dunkerque III	1150 B.P. à plus récent	<b>Assise de Dunkerque</b>
	Dunkerque II	1700 - 1350 B.P.	
	Dunkerque I	2550 - 2050 B.P.	
<b>Sub-boréal</b>	Dunkerque 0	3450 - 2950 B.P.	<b>Tourbe Supérieure</b>
	Calais IV	4550 - 3750 B.P.	
<b>Atlantique</b>	Calais III	5250 - 4750 B.P.	<b>Assise de Calais</b>
	Calais II	6250 - 5250 B.P.	
	Calais I	7950 - 6450	

**Tableau I -1 :** Les transgressions Calaisiennes et Dunkerquiennes (d'après Hageman, 1969 ; Jelgersma, 1979 et Houthuys *et al.*, 1993)

Les limites chronologiques de ces différentes transgressions (Hageman, 1969 ; Jelgersma, 1979 ; Houthuys *et al.*, 1993 ; Westerhoff *et al.*, 1993), définies pour les Pays-Bas, sont données dans le tableau I-1. Elles peuvent s'appliquer en partie à la plaine maritime flamande française puisqu'il existe des similitudes entre les formations flandriennes des Pays-Bas, de la Belgique et du Nord de la France (Tavernier & de Moor,, 1974; Sommé, 1975; Houthuys *et al.*, 1993).

La synthèse des connaissances géologiques est faite par Sommé (1975) et Clabaut & Laboratoire de Dynamique Sédimentaire et Structurale (1992), elle reprend en grande partie les travaux de Blanchard (1906), Dubois (1924) et Briquet (1930).

#### *L'Assise de Calais*

L'Assise de Calais se compose de deux formations : les cordons littoraux anciens et les sables pissarts.

**Les cordons anciens** sont principalement représentés par le cordon des Pierrettes mis en place sous forme de flèche de galets à l'embouchure des estuaires. Compte tenu de sa structure grossière sablo graveleuse, il est le seul cordon littoral ancien à avoir résisté aux transgressions ultérieures. Il constitue actuellement un petit relief qui s'étend d'Ouest en Est de Sangatte à Mark et au Virval (Sommé, 1975 et 1979).

**Les sables pissarts** représentent l'Assise de Calais au sens strict. Ils sont généralement attribués à la phase transgressive Calais II, la plus importante en amplitude des phases calaisiennes. Ces formations n'affleurent nulle part car elles sont recouvertes par la tourbe supérieure ou par les formations de l'Assise de Dunkerque.

#### *La Tourbe Supérieure (ou tourbe de surface)*

Datée du Sub-boréal, la tourbe supérieure, épaisse de 3 à 6 mètres, se caractérise par des intercalations de dépôts marins témoignant d'inondations épisodiques dues à des changements morphologiques, à des tempêtes ou à des petits épisodes transgressifs. Ces incursions marines déterminent un problème chronostratigraphique du Flandrien, selon que les incursions marines sont considérées comme appartenant à l'Assise de Calais ou partiellement à l'Assise de Dunkerque (Dubois, 1924 ; Sommé, 1975).

#### *L'Assise de Dunkerque*

Dans la région dunkerquoise, l'assise de Dunkerque correspond aux formations relatives aux transgressions Dunkerque I, II et III, c'est-à-dire aux formations postérieures à la tourbe supérieure. Ces limites géographiques sont équivalentes à celles de l'Assise de Calais, et les

faciès qui la composent sont le plus souvent sablo-silteux à argilo-silteux (Sommé, 1975). Les formations franchement argileuses sont localisées notamment dans la région dunkerquoise (Paepe, 1960).

Les transgressions Dunkerque I, II et III, qui marquent l'évolution historique du site, ont été d'ampleur inégale mais elles ont à chaque fois emprunté des voies comparables : la mer a pénétré par les estuaires et par les brèches des cordons dunaires anciens voire remaniés (fig. I-3, tab. I-2).

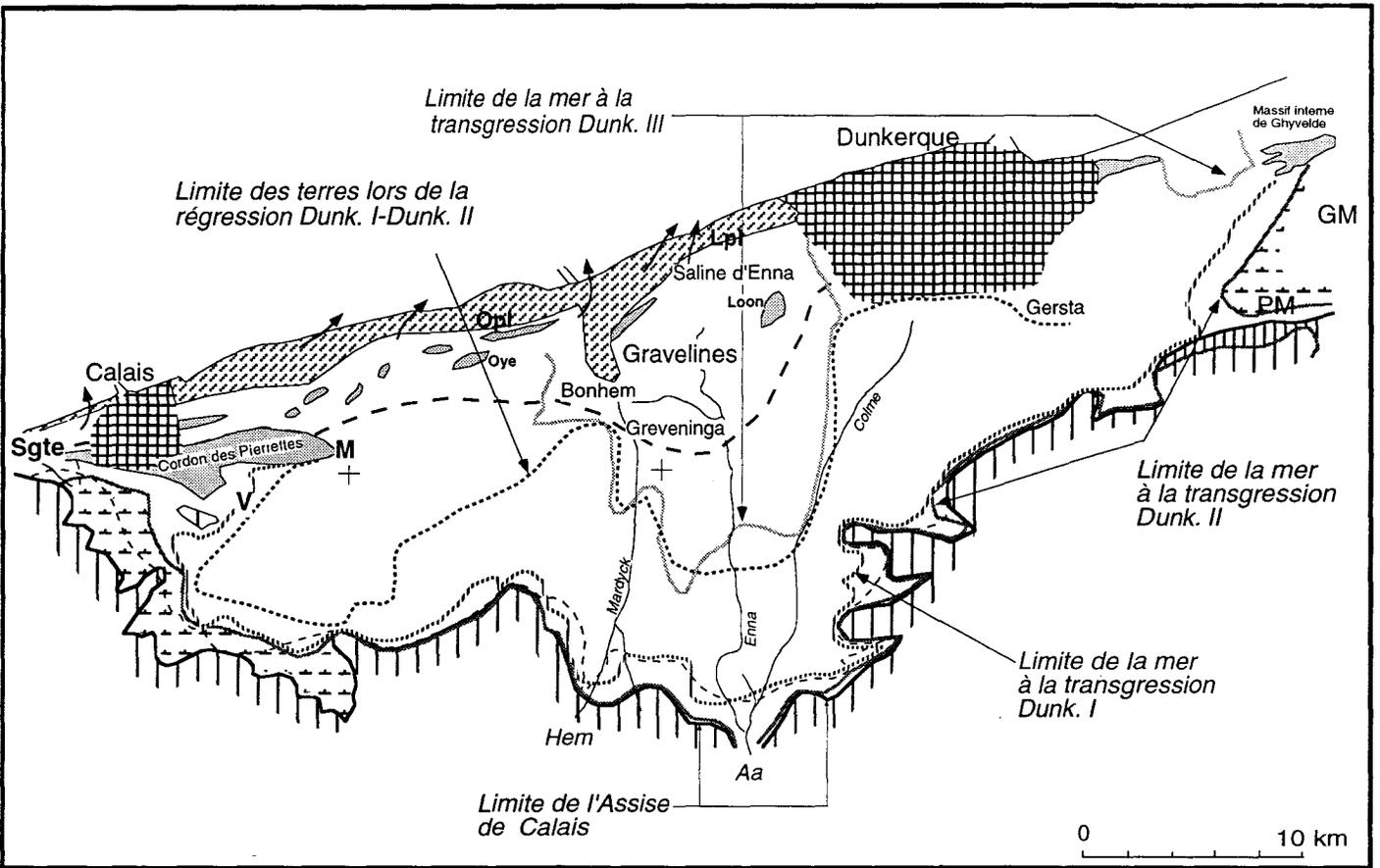
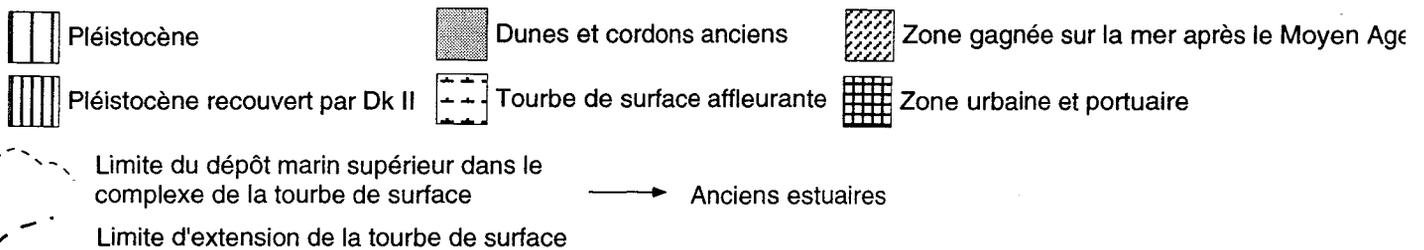


Figure I-3 : Évolution de la plaine maritime flamande au cours de la transgression flandrienne d'après (Sommé 1975).

Sgte : Sangate, V : Virval, M : Marck, Opl : Oye plage, Lpl : Loon Plage, PM : Petite Moères, GM : Grande Moères



Lors de la **transgression Dunkerque I ou phase pré-romaine**, l'incursion marine a emprunté les estuaires de Colme et d'Enna appartenant au vaste système deltaïque de l'Aa, ainsi que l'estuaire d'Hem Mardyck et les brèches importantes du cordon dunaire édifié à la fin de la transgression Calaisienne (Paepe, 1960). L'ampleur de cette phase transgressive a vraisemblablement été minimisée, par suite des remaniements et recouvrements (Sommé, 1975 ; Houthuys *et al.*, 1993).

**La régression qui suit, dite romaine**, s'est limitée au banc des Pierrettes, à Marck, aux cordons anciens d'Oye plage et de Loon plage, et a rejoint le littoral actuel à Dunkerque. Le littoral gallo-romain était alors oblique par rapport au littoral actuel, il était situé plus au large à l'Est de Dunkerque et plus vers la terre à l'Ouest de Dunkerque (Blanchard, 1906, Briquet, 1930). Pour Briquet (1930) la tendance générale du site est à l'engraissement avant l'époque gallo-romaine.

Transgressions	Époques	Événements
Dunkerque III	Au X <sup>e</sup> siècle	L'incursion marine a eu des effets plus limités par suite de la construction des premières digues.
Dunkerque II	Du IV <sup>e</sup> au début du VIII <sup>e</sup> siècle	La mer a pénétré par l'estuaire de la Colme et par une brèche située entre Zuydcoote et Malo-les-Bains.
Dunkerque I	Du VII <sup>e</sup> au I <sup>er</sup> siècle avant J.C.	La mer a pénétré par les estuaires de Colme, Enna et Hem Mardyck et par des ruptures du cordon dunaire. Après la régression, le littoral est oblique par rapport au littoral actuel.

**Tableau I -2** : Ages et caractéristiques des transgressions Dunkerquiennes (d'après Dubois, 1939 ; Paepe, 1960; Flatres-Mury, 1966).

**La transgression Dunkerque II du haut Moyen Age** est considérée comme la phase la plus importante. Elle est mieux connue grâce aux données historiques et archéologiques, et correspond à un hiatus entre l'occupation gallo-romaine et la recolonisation médiévale de la plaine (Blanchard, 1906). Dans la région dunkerquoise, la mer a pénétré par l'estuaire de Colme et par une brèche située entre Zuydcoote et Malo-les-Bains (Paepe, 1960). Dans le Calaisis, l'incursion marine s'est effectuée par le vaste estuaire de l'Aa et par une rupture du cordon littoral entre Marck et Gravelines.

### **I - 3 - ÉVOLUTION GÉNÉRALE DEPUIS LES PREMIÈRES INTERVENTIONS HUMAINES SUR LE LITTORAL DUNKERQUOIS**

A la fin du VIII<sup>ème</sup> siècle, la régression générale a permis la réoccupation de la plaine maritime flamande par l'homme. L'évolution naturelle a alors été modifiée par les premières interventions humaines.

### I - 3 - 1 - DU X<sup>ème</sup> SIÈCLE AU XII<sup>ème</sup> SIÈCLE

Au X<sup>ème</sup> siècle **la transgression Dunkerque III**, identique aux précédentes, a eu des effets plus limités sur le littoral du fait de la construction des premières digues. Elle est reconnue dans un secteur situé entre Zuydcoote et Leffrinckoucke, circonscris par une ancienne digue (Paepe, 1960, Flatres Mury, 1966).

A l'Est de Dunkerque le banc de **Ghyvelde**, ancien cordon littoral, a constitué une barrière naturelle contre les transgressions dunkerquiennes (De Lesdain, 1912).

Après les transgressions dunkerquiennes, le vaste estuaire de l'Aa et la région dunkerquoise sont restés à l'état de schorres. Les zones estuariennes de Greveninga et de Gersta, encore très marquées au XI<sup>ème</sup> siècle (Blanchard, 1906), ont progressivement été endiguées et réduites aux abords immédiats de Dunkerque, pour en constituer **le port Est au XII<sup>ème</sup> siècle**.

### I - 3 - 2 - DU XII<sup>ème</sup> AU XIX<sup>ème</sup> SIÈCLE

Pendant cette période les interventions humaines ont surtout concerné **l'aménagement de l'actuel avant-port Est de Dunkerque**. Ces aménagements sont étroitement liés aux événements historiques.

#### *Édification du port de Dunkerque*

La construction du port de Dunkerque, qui constitue de nos jours l'actuel avant-port Est, a débuté dès le XII<sup>ème</sup> siècle (Lemaire, 1927). Les premières jetées datent probablement de **1235** mais ne sont représentées pour la première fois sur un plan de la ville qu'en 1572 (De Rouville, 1946 ; fig. I-4). En 1660, la citadelle a été construite sur une zone située sur la plage à l'Ouest du port, et, à l'Est une nouvelle jetée a remplacé le musoir (annexe 1 fig. 1).

Jusqu'au XVII<sup>ème</sup> siècle, l'accès au port de Dunkerque s'effectuait par la rade de Mardyck, limitée au Nord par le banc du **Schürcken**. L'avancée et la soudure de ce banc à la côte ont entraîné le comblement de la rade de Mardyck ce qui a provoqué la fermeture du port de Dunkerque (Briquet, 1930 ; fig. I-5). Entre 1678 et 1683 de nouvelles jetées, longues de 1925 m, orientées vers le NW, sont alors édifiées pour relier le port de Dunkerque à la rade actuelle (De Rouville, 1946, Carte de Cassini, in Tilly, 1979 ; fig I - 6).

**La soudure du banc du Schürcken à la côte serait due à l'installation d'ouvrages militaires sur les schorres visant à interdire l'accès Ouest de la rade** (Blanchard, 1906). Ces ouvrages auraient **modifié localement les courants de marée**, provoquant le comblement partiel de la passe dans sa partie centrale.



Figure I - 4 : Premier plan de la ville de Dunkerque en 1576 (archive L.N.H.)

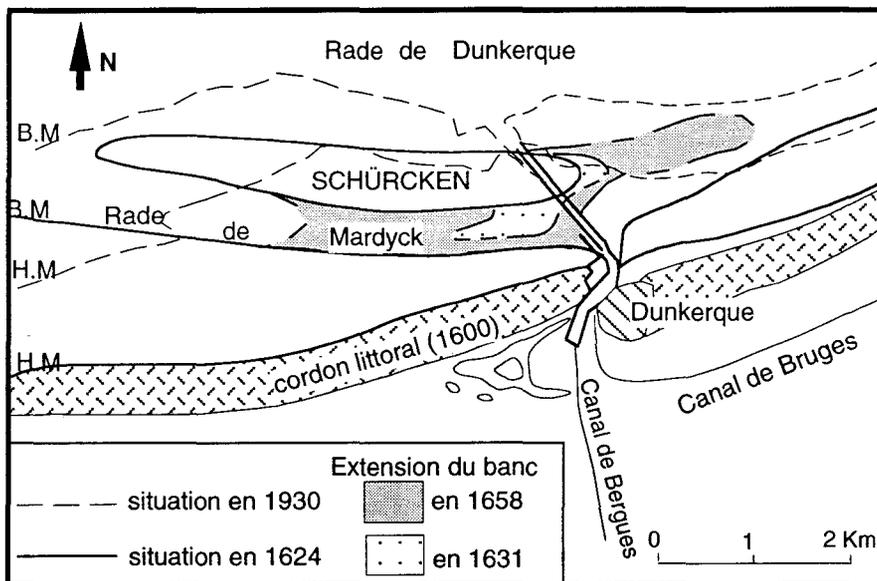
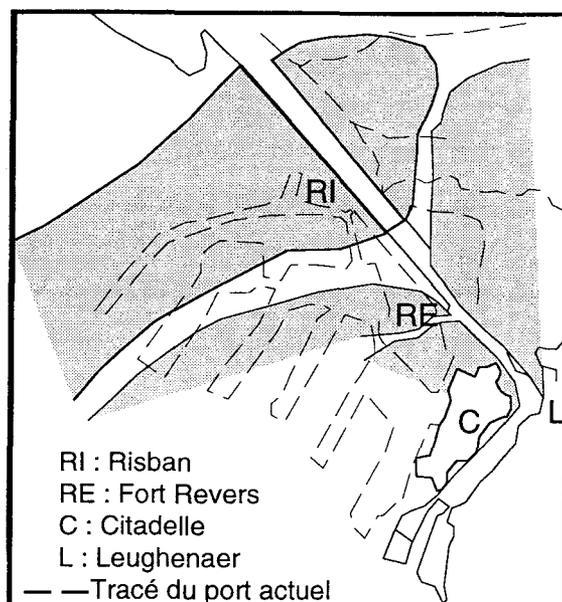


Figure I-5 : Evolution du banc du Schürcken (d'après Dubois, 1939).





**Figure I-6** : Percement du banc du Schürcken et prolongement des jetées du port ( Archives L.N.H.)

En 1713, suite au traité d'Utrecht visant à interdire l'entrée du port de Dunkerque, son chenal d'accès fût comblé. Pour permettre la sortie en mer des navires le canal de Mardyck fut creusé par l'armée de la Brouette et permit de relier le port à la rade de Mardyck. Ce canal fut détruit ultérieurement (De Rouville, 1946 ; annexe 1 fig. 2). Le traité de Versailles de 1783 autorisa la réouverture du chenal d'accès au port de Dunkerque. De nouvelles jetées parallèles basses en bois à claire voies ont alors été édifiées.

**Les cartes des fonds marins de 1801 à 1861, sont très comparables (fig. I-7) et traduisent une stabilité d'ensemble** avec toutefois des variations locales de profondeur (De Rouville, 1946). Seule la passe de Mardyck située à l'Est de Dunkerque montre une évolution plus marquée caractérisée par un comblement consécutif à la fermeture de son extrémité Est du fait de la construction du port.

En 1836, les jetées du port sont prolongées de 300 m (annexe 1 fig. 3).

En 1877, une première drague est mise en service pour remplacer les chasses. Cette drague est utilisée pour approfondir la zone correspondant à l'actuel avant-port Est de Dunkerque.

De 1891 à 1896, le chenal est élargi et les jetées en bois à claire voies sont remplacées par des jetées pleines (annexe 1 fig. 4).

**A l'Ouest de Dunkerque, la poldérisation a été très active** ce qui a favorisé la formation de cordons dunaires isolant des secteurs de schorres appelés localement "salines", "hemmes" ou "polders". Les lignes de rivages successives de 1100 à 1910 (fig. I-8), marquées par l'alignement d'une série de cordons dunaires ou d'endigements, se sont déplacées vers la mer sur une distance de 2 km (Briquet, 1930; Sommé, 1975). Cette **avancée du littoral** s'est effectuée à une vitesse moyenne de **3 m/an, atteignant 5 m/an de 1784 à 1861**. L'avancée des bancs vers la côte a pu favoriser la progression rapide du littoral Ouest dunkerquois.

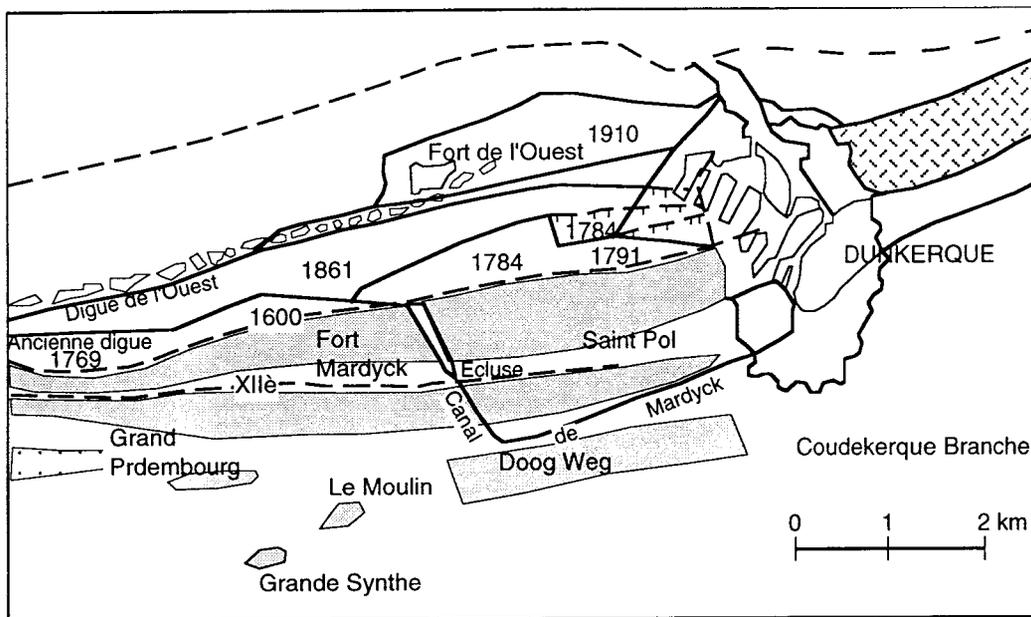


Figure I-8 : Évolution du littoral de 1100 à 1910 (Briquet, 1930).

L'évolution de la zone située à l'Est de Dunkerque s'est distinguée du secteur Ouest par l'existence d'un cordon dunaire unique complexe, plus haut et plus large, incorporant des éléments de dunes anciennes orientées E-W (Paepe, 1960 ; De Ceunynck, 1993). Ces dunes ont par ailleurs été décrites comme des formes de remaniement très mobiles liées au régime des vents (Blanchard 1906 ; Briquet 1930). En 1716 par exemple, le village de Zuydcoote a été englouti sous les sables des dunes.

L'observation des plans de différentes époques, indiquant la position des hautes et de basses mers, montre des changements importants entre les secteurs Ouest et Est de Dunkerque. Les cartes antérieures à 1740 présentent un estran de largeur identique de part et d'autre de Dunkerque (fig. I-9), tandis que les plans établis en 1757 et 1760 révèlent un estran beaucoup plus développé à l'Ouest qu'à l'Est du port (fig. I-10). A cette époque, la largeur était de 1200 m à l'Ouest contre 800 m à l'Est. La vitesse de réduction de la largeur de l'estran à l'Est est estimée à 5 m/an.

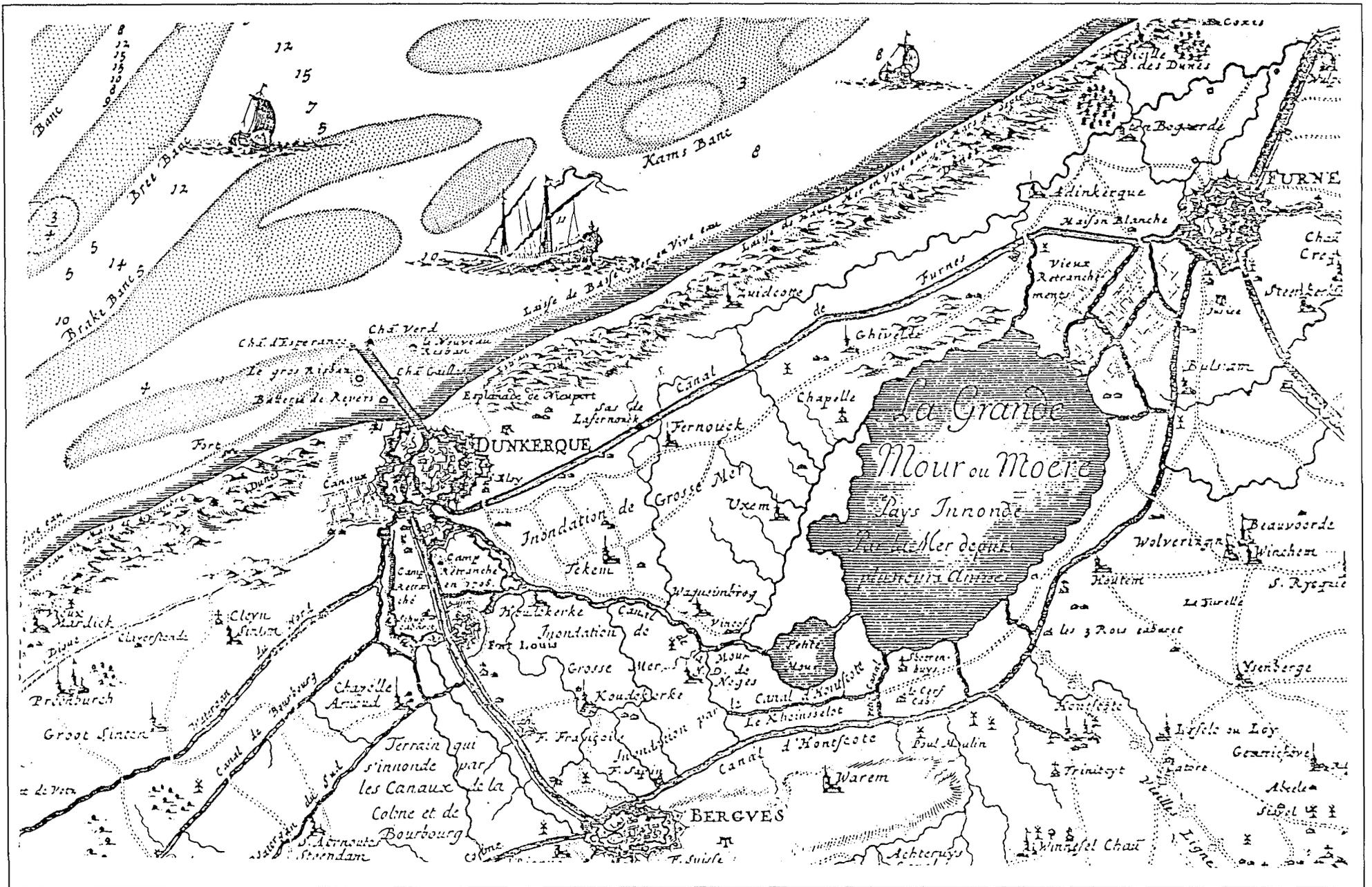


Figure I-9: Carte de Mardyck à Furnes entre 1648 et 1713 (Clabaut et Laboratoire de Dynamique Sédimentaire et Structurale, 1992)

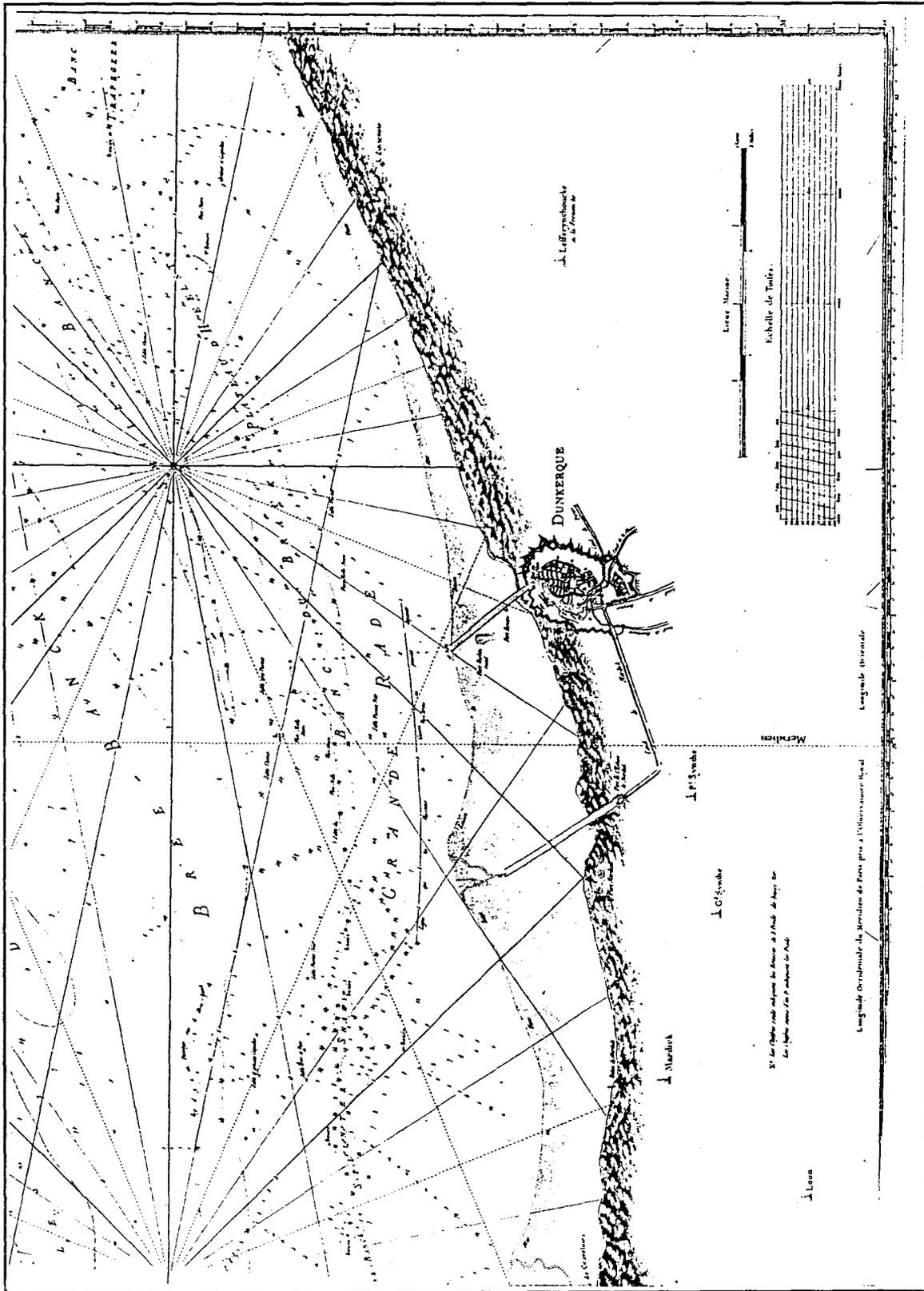


Figure I-10 : Extrait de la carte des côtes de Flandres, Coultre de la Bretonnière (1776) d'après le Service photographique des archives nationales

**Cette différence entre les deux secteurs reflète un engraissement des plages situées à l'Ouest de Dunkerque opposé à un amaigrissement à l'Est. Il y a donc passage d'un état d'équilibre avant 1740 à un état d'instabilité après cette date, marquant le début de l'érosion des plages à l'Est de Dunkerque.**

En 1836, suite au prolongement de 300 m des jetées du port de Dunkerque, une avancée sur une distance comparable de l'estran vers le large est observée, mais uniquement à l'Ouest de Dunkerque (Bryche, 1995 ; annexe 1 fig. 3).

En 1862 une première description de la morphologie de l'estran situé à l'Est de Dunkerque est proposée par A Plock (in Bryche, 1995) "la plage s'étend sur une distance de 13 à 14 km depuis Dunkerque jusqu'à la frontière franco-belge. La largeur de l'estran, comprise entre 320 et 500 m, est en moyenne de 420 m. L'inclinaison de l'estran est de 1 à 1,5 % pour la zone comprise entre la laisse de basse mer de vives-eaux et la laisse de haute mer de mortes-eaux. Ailleurs, la pente est d'environ 1 à 6 %".

### I - 3 - 3 - AU VINGTIÈME SIÈCLE ET TENDANCES ACTUELLES

#### I - 3 - 3 - 1 - Évolution des petits fonds marins dunkerquois

##### Organisation générale des fonds marins

Globalement, la situation actuelle (S.H.O.M. a et b, 1985 ; fig. I-11) est très comparable à celle du siècle dernier donnée par la carte marine établie par Beautemps-Beaupré en 1802 (fig. I-7). **L'orientation des bancs sableux est sub-parallèle à la côte. Le sommet des bancs est très faiblement immergé** (entre 0 et 5 m de profondeur).

Dans le détail, des modifications importantes se sont produites depuis le début XX<sup>ème</sup> siècle.

La comparaison des cartes marines de 1910 et 1962 effectuée par la SOGREAH (1974) révèle une élévation des fonds de 5 m au droit de Malo terminus, de la passe de Zuydcoote et de la passe entre les bancs du Braek et du Hills, ainsi qu'un comblement progressif de la fosse de Mardyck située à l'Est du port de Dunkerque.

En 1975, la construction de l'avant-port Ouest a bouleversé la morphologie des fonds marins en provoquant notamment le rattachement des bancs de Mardyck et de Saint Pol à la côte (Vicaire, 1991 ; fig. I-12).

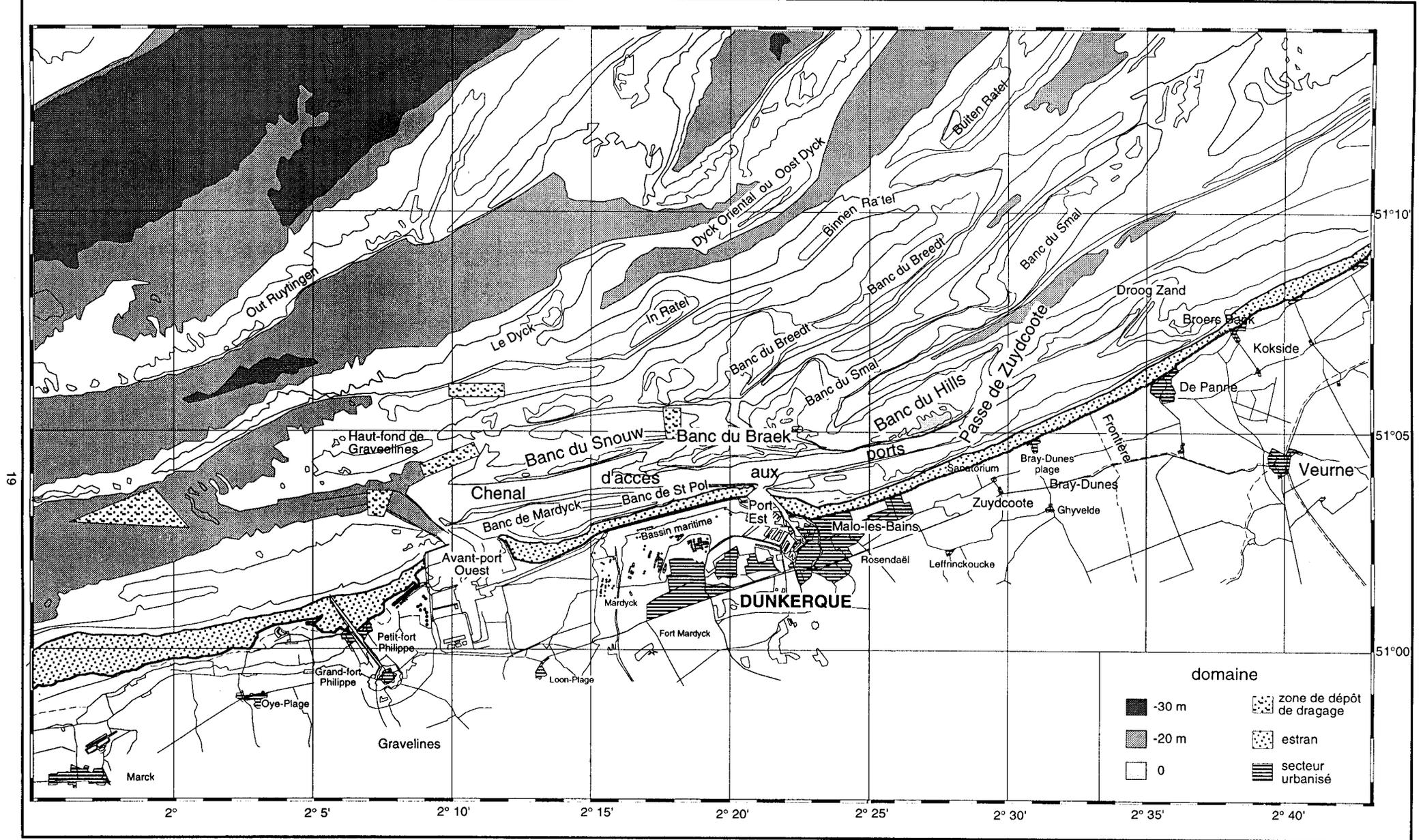
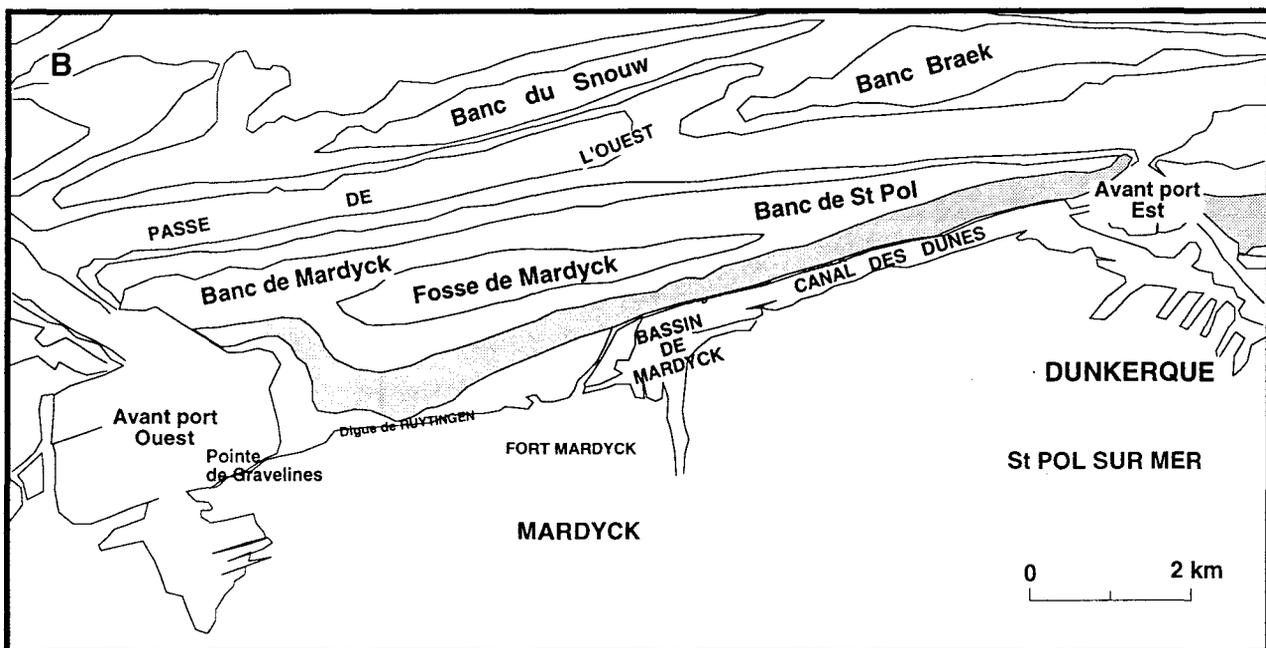
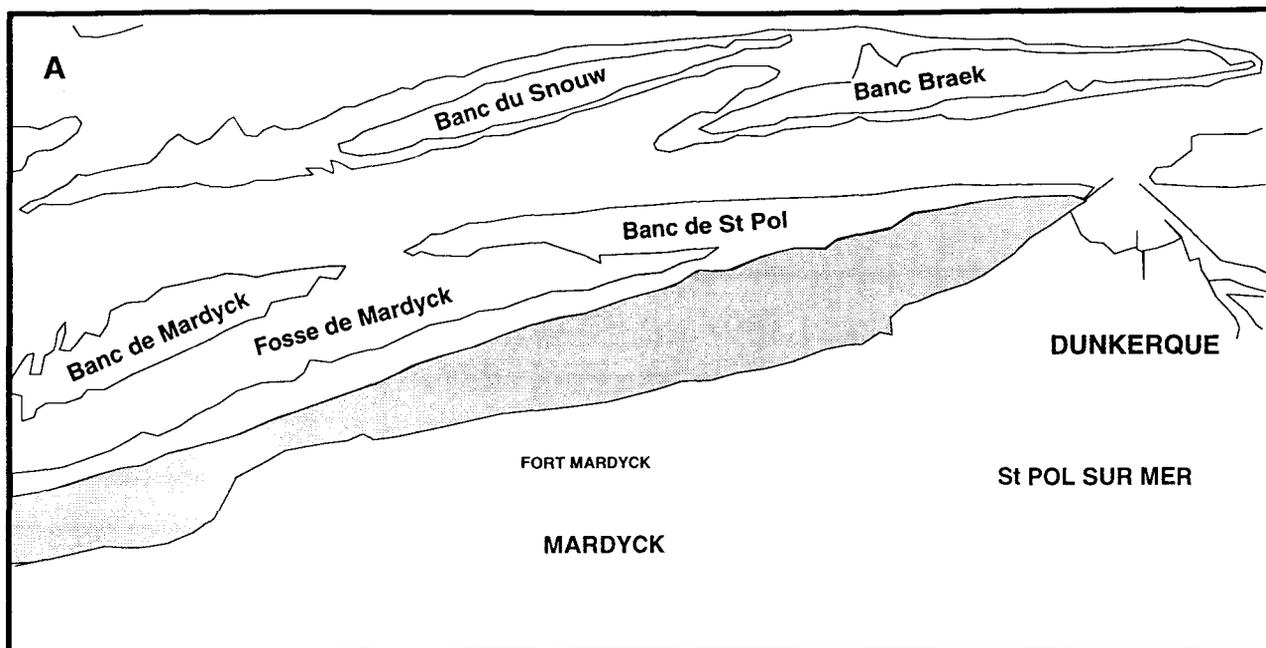


Figure I-11 : Les fonds marins actuels au large de Dunkerque d'après les cartes 6651D et 6652D du S.H.O.M. (1985)



**Figure I-12** : Evolution schématique du littoral de Dunkerque depuis le début du XXème siècle.

(A) Extrait de la carte marine 5094 du S.H.O.M. de 1902.

(B) Situation actuelle du littoral. (In Vicaire, 1991)

### Bancs sableux

L'étude réalisée par le Laboratoire National d'Hydraulique (E.D.F./L.N.H., 1971 ; Lepetit *et al.*, 1977) sur l'évolution du domaine marin compris entre Gravelines et le port Est de Dunkerque de 1879 à 1962 indique un déplacement des bancs vers l'Est de 1872 à 1962 (fig. I-13) et un engraissement des flancs Sud des bancs de Mardyck, du Snouw et de la pointe Ouest du Braek (fig. I-14). Cet engraissement traduit une avancée des bancs vers la côte à la vitesse moyenne de 1 à 5 m/an. Ces résultats sont confirmés par une comparaison directe de minutes bathymétriques du S.H.O.M. de 1932 à 1962 (Corbau, 1991) : les bancs sableux du Snouw, du Braek et du Hills sont le siège d'une accumulation sédimentaire sur leur flanc côtier, et d'une érosion sur le flanc exposé vers le large ; les phénomènes sont inversés sur la partie orientale du banc du Braek. Une telle migration des bancs vers la côte a déjà eu lieu au XVII<sup>ème</sup> siècle par la soudure du banc du Schürcken (Briquet, 1930).

### Chenal d'accès aux ports

La comparaison des reconnaissances hydrographiques du S.H.O.M. de 1914, 1930, 1932, 1962, 1978 et 1985 montre que le chenal d'accès est en engraissement permanent (Corbau, 1991). Cet engraissement du chenal n'est continu ni dans le temps, ni dans l'espace. Dans le détail, les phénomènes d'accumulation ou d'érosion se répartissent en bandes sub-parallèles à la côte en face des secteurs endigués, et de façon plus aléatoire en face des secteurs naturels bordés de dunes et au droit des jetées du port Est. L'engraissement naturel du chenal nécessite son entretien régulier par dragages qui atteignent un volume de l'ordre de 400 000 m<sup>3</sup>/an.

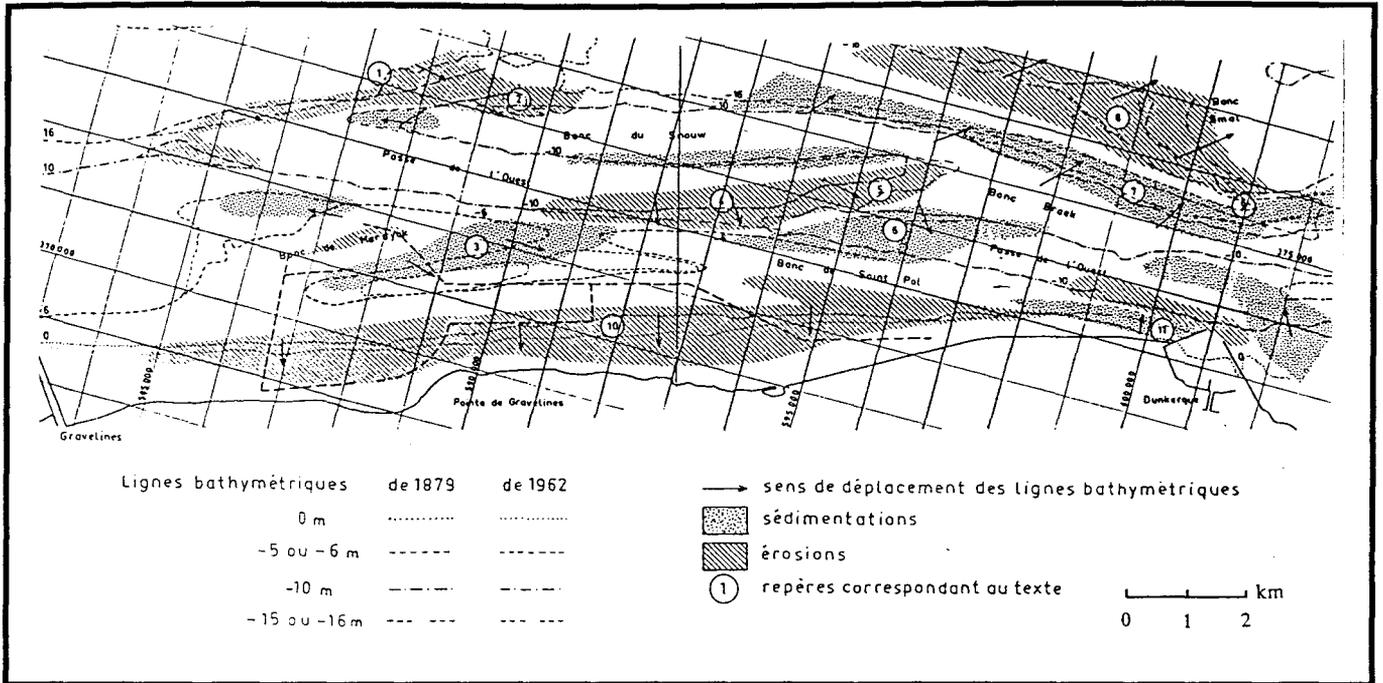


Figure I-13 : Evolution des bancs et des chenaux de 1879 à 1962 (Cliques, 1986)

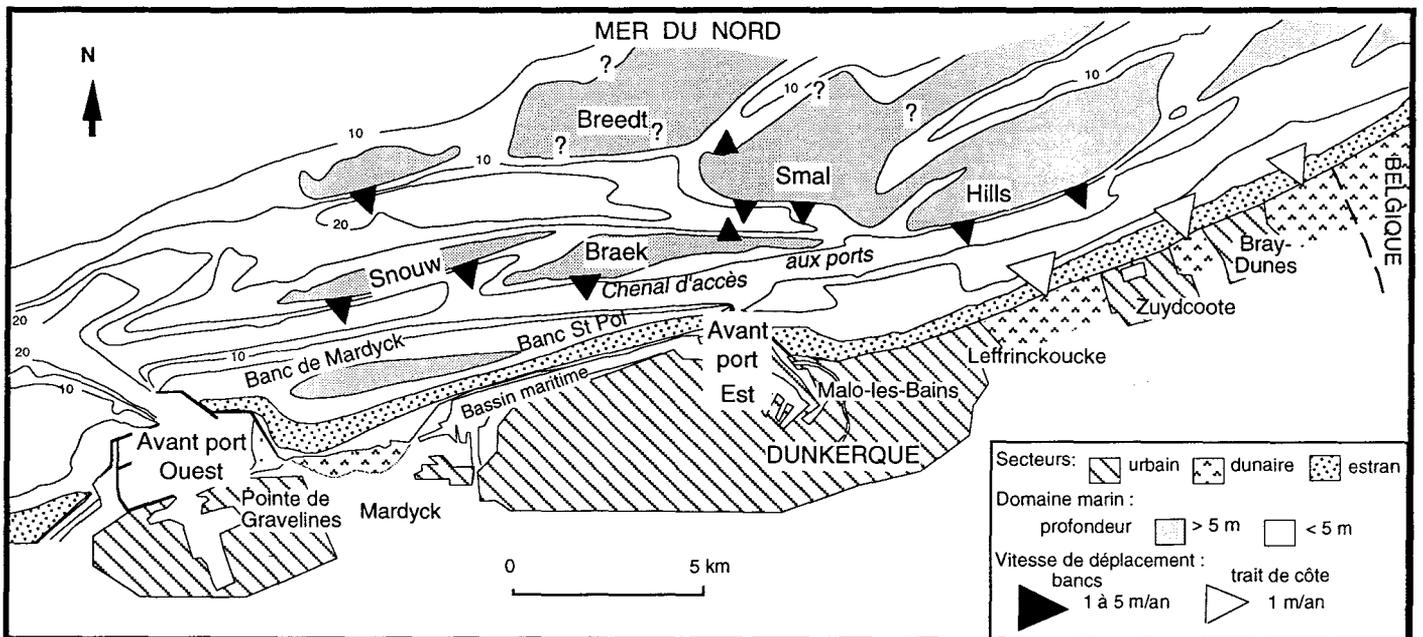


Figure I-14: Situation et modifications sédimentaires récentes du domaine côtier dunkerquois.

### I - 3 - 3 - 2 - Évolution de l'estran et aménagement du complexe portuaire et industriel de Dunkerque

L'évolution de l'estran du littoral dunkerquois au cours du XX<sup>ème</sup> siècle a été en grande partie conditionnée par **l'aménagement progressif du complexe portuaire de Dunkerque**. Les ouvrages côtiers ont pour but de protéger le littoral contre la mer ou de l'aménager dans un but économique et touristique. Ils sont principalement de deux types statiques et dynamiques. Leurs modes de fonctionnement et leurs conséquences sont présentés brièvement dans l'encadré I-1. Les principales étapes de l'aménagement du littoral dunkerquois sont les suivantes (fig. I-15) :

- De 1896 à 1908, la construction de la digue de Malo-centre et celle de Malo-terminus a entraîné la destruction des dunes du front de mer. La digue de Malo-centre a été construite à environ 3 m au-dessus du niveau de l'estran et en avant de la laisse de haute mer de vives-eaux, c'est-à-dire dans la zone de balancement des marées.
- En 1930, de nouvelles jetées convergentes sont édifiées devant le port Est de Dunkerque.
- En 1934, la jetée Est du port est prolongée de 700 m. La jetée Ouest, longue de 750 m et entièrement pleine, est construite.
- De 1949 à 1953, suite à la deuxième guerre mondiale, la digue située entre la jetée Est du port et le casino de Malo-les-Bains est reconstruite.
- De 1959 à 1962, la digue de l'Ouest est réalisée ainsi que celle du Braek.
- En 1962, la partie à claire-voie de la jetée Est du port est remplacée par une jetée pleine.
- De 1973 à 1974, la digue du Ruytingen est édifiée.
- De 1975 à 1978 le nouvel avant port Ouest de Dunkerque est construit ainsi que ses jetées.
- En 1978, les deux brise-lames situés en face de Malo-les-Bains sont mis en place. Parallèlement un rechargement hydraulique de sable de 250 000 m<sup>3</sup> est effectué (fig. I-16).
- En juillet 1988, le troisième brise-lames est construit et un nouveau rechargement hydraulique de 160 000 m<sup>3</sup> a lieu.

A l'Ouest de l'avant-port Est de Dunkerque, l'édification du complexe industriel et portuaire a reporté le trait de côte actuel à plus d'un kilomètre vers le large, par rapport à sa position de 1872 (fig. I-17).

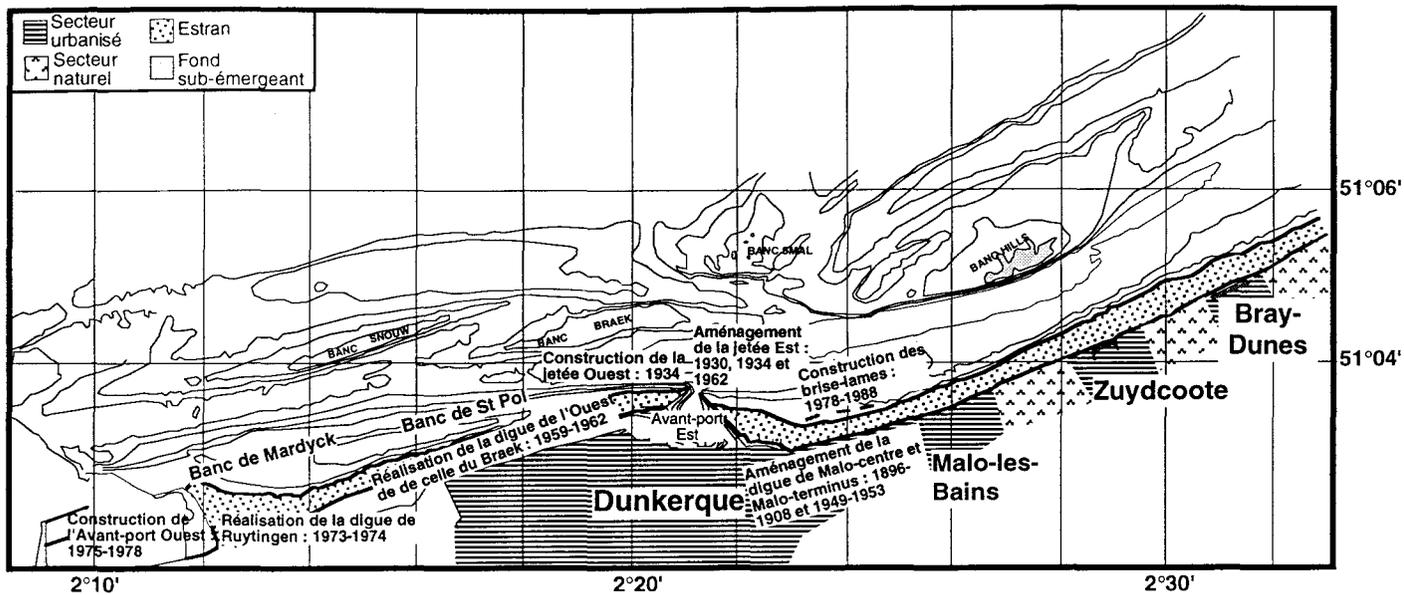


Figure I-15: Historique des aménagements

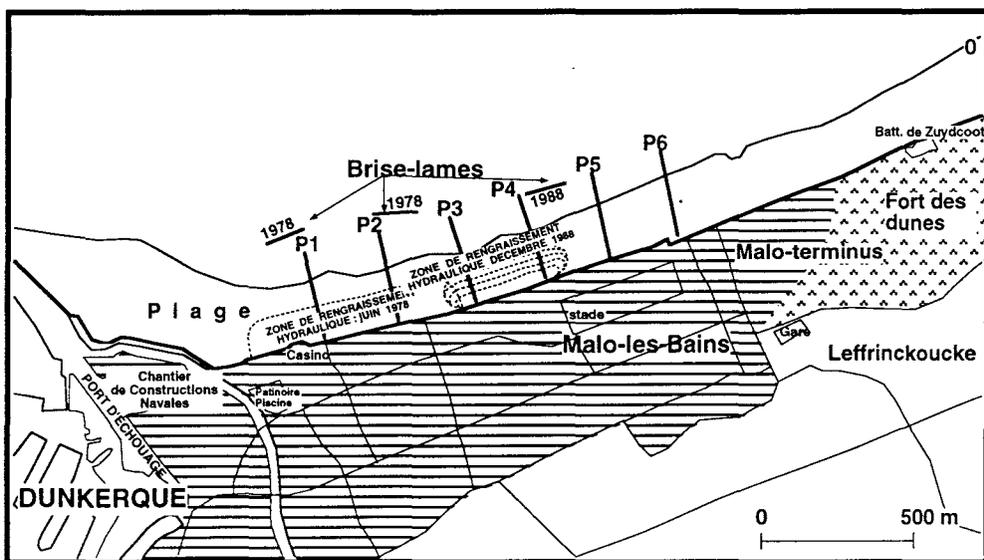


Figure I-16 : Position des profils anciens de P1 à P6 réalisés en face de Malo-les-Bains de 1884 à 1993 et "emplacement" des brise-lames et des rechargements hydrauliques.

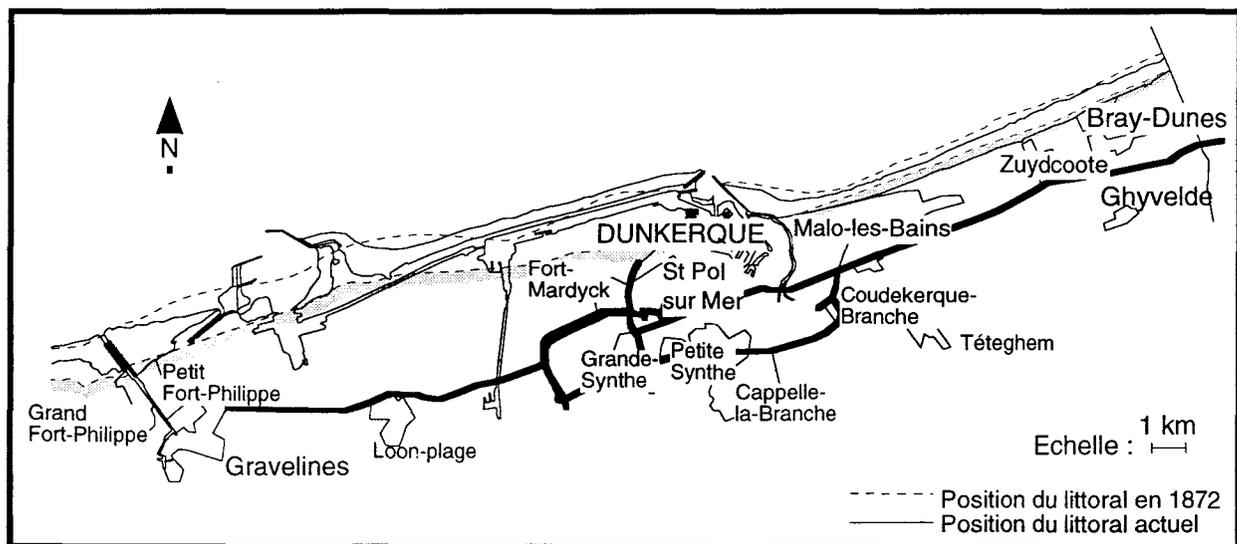


Figure I-17 : Position du littoral de 1872 à 1987 d'après I.G.N. (1832, 1939 et 1987).

d'après Migniot (1989) et Lalaut (1991 et 1992)

Deux types d'aménagements sont distingués : les ouvrages statiques qui demandent peu d'entretien et les ouvrages dynamiques qui nécessitent une action perpétuelle de l'homme. Chaque type de protection, statique ou dynamique, est réalisé pour répondre à un mode d'agression du littoral en fonction des conditions hydrodynamiques locales et des possibilités de mise en oeuvre : soit en stoppant plus ou moins le transit littoral, soit en atténuant l'énergie de la mer pour favoriser les dépôts de sédiment, soit en rétablissant artificiellement un équilibre par comblement d'un déficit en matériaux.

### **Les ouvrages statiques**

Les ouvrages statiques sont de trois types : les ouvrages transversaux ou épis, les ouvrages longitudinaux ou brise-lames et les ouvrages de haute plage.

- Les ouvrages transversaux ont pour rôle de stopper le transit littoral. Ils sont disposés perpendiculairement à la côte (annexe 2 fig. 1). A l'amont du transit littoral, il se crée une zone de dépôt. A l'aval de l'épi se produit une érosion en raison de la rupture de la dérive littorale (Horikawa, 1988 ; annexe 2 fig. 2). Pour remédier à cette érosion les épis sont souvent disposés en série ("batteries d'épis").

Ces ouvrages sont efficaces lorsque la dérive littorale est importante (Klingebiel, 1987). Ils permettent de constituer des cellules qui favorisent la sédimentation.

Les jetées des ports, souvent orientées perpendiculairement à la côte, constituent de ce fait un épi (Komar, 1983).

- Les ouvrages longitudinaux sont représentés principalement par les brise-lames et sont implantés parallèlement à la côte en bas d'estran ou par petits fonds. Ils déterminent une zone de calme favorisant la sédimentation (annexe 2 fig. 3) avec le plus souvent la formation d'un tombolo qui relie la plage à l'ouvrage (Klingebiel, 1987). Le but de ces brise-lames est de diminuer l'énergie de la houle en provoquant son déferlement avant qu'elle n'atteigne la plage.

- Les ouvrages de haute plage sont souvent des ouvrages longitudinaux (digues) qui fixent le trait de côte et empêchent par une barrière physique, l'agression et l'érosion des zones situées en arrière. Ces ouvrages doivent être conçus de façon à résister au mieux aux agressions de la mer en fonction de leur implantation par rapport à la laisse de haute mer mais également pour résister à l'affouillement dû à la réflexion de la houle qui amplifie son pouvoir érosif et dégrade de manière plus ou moins importante les plages (Pilkey & Whright, 1988).

### **Les "ouvrages" dynamiques**

Ils sont de plusieurs types : rechargement de plage, dragage ou extraction en mer, et colmatage des brèches du cordon dunaire.

Les rechargements de plage ont pour but de compenser le déséquilibre du littoral suite à une érosion importante. Les principes de rechargement sont assez variés (Dean, 1983) et dépendent des causes de l'érosion (zone soumise à des mouvements importants dans le profil ou au contraire à un transit littoral important). Ces rechargements sont souvent accompagnés d'un remodelage de la plage afin que son profil soit en équilibre avec des houles plus importantes. Ils sont parfois associés à la construction d'ouvrages statiques (épis ou brise-lames). Cette action est toujours efficace même que localement.

Les extractions d'agrégats en bordure de mer, les remblais ou les dragages d'entretien des chenaux de navigation ou des ports entraînent des perturbations dans l'équilibre du littoral qui se traduisent par des érosions importantes et une dégradation progressive de la côte. Par exemple les dragages d'entretien au chenal augmentent l'espace disponible pour le piégeage et le dépôt des particules en transit ce qui tend à accélérer son colmatage.

Enfin la dune bordière sert de barrière naturelle contre les attaques de la mer mais elle peut être dangereusement détériorée par des brèches. Il est alors nécessaire de disposer des fascines ou de revégétaliser artificiellement la dune (plantation d'oyat) afin de piéger le sable transporté par le vent et provoquer le colmatage de la brèche. (Paskoff, 1984)

## Estran

L'évolution récente de l'estran à proprement parler peut être résumée de la façon suivante :

- De 1850 à 1987, la largeur de l'estran du littoral Est dunkerquois a régressé par érosion à une vitesse de 1 m/an (SOGREAH, 1974 ; Clique, 1986, Corbau, 1991, 1993 ; Clabaut & Laboratoire de dynamique sédimentaire et structurale, 1992). L'érosion est la plus importante entre Leffrinckoucke et Bray-Dunes. Cette vitesse ne reflète cependant pas le calendrier réel des modifications puisque lors de fortes tempêtes, le recul du cordon dunaire peut atteindre plusieurs mètres par jour (exemples observés en 1990 ; A.G.U.R., 1983 ; S.M.N., 1987).

De 1879 à 1962 ,à l'Ouest de Dunkerque, de Gravelines au bassin maritime, l'isobathe 0 a progressé vers la côte à une vitesse moyenne de 0,5 à 1 m/an. A l'inverse, un engraissement s'est produit entre le bassin maritime et l'avant port Est (SOGREAH, 1974 ; Clique, 1986 ; L.C.H.F., 1984).

### Évolution morphologique du littoral de Malo-les-Bains de 1884 à 1993

Au niveau de Malo-les-Bains, six profils topographiques, numérotés de 1 à 6 et espacés de 500 m à partir du casino de Malo-les-Bains jusqu'à l'école de voile de Leffrinckoucke, ont été suivis depuis 1884 par le port autonome de Dunkerque et par les services municipaux de la mairie de Dunkerque - Malo-les-Bains (fig. I-16). Les levés ont été réalisés à des intervalles de temps non réguliers, mais spécifiquement après des tempêtes ou au moment des ré-engraissements hydrauliques de la plage lors de la construction des brise-lames en 1978 et 1988.

La plupart des profils a été réalisée avec un pas d'échantillonnage relativement espacé, d'environ 50 mètres. Cette résolution ne permet pas de prendre en compte toutes les variations morphologiques.

Les profils réalisés au niveau de Malo-les-Bains sont généralement concaves et présentent une faible pente. Leur morphologie se caractérise par un système de barres et de bâches. Les barres montrent généralement une morphologie asymétrique dont le flanc plus déclive est orienté vers la côte.

D'un point de vue de leur évolution générale depuis 1884, les différents profils topographiques s'inscrivent dans une enveloppe de 1 à 2 mètres d'épaisseur, caractérisée par deux ou trois points de resserrement ou points nodaux (fig. I-18).

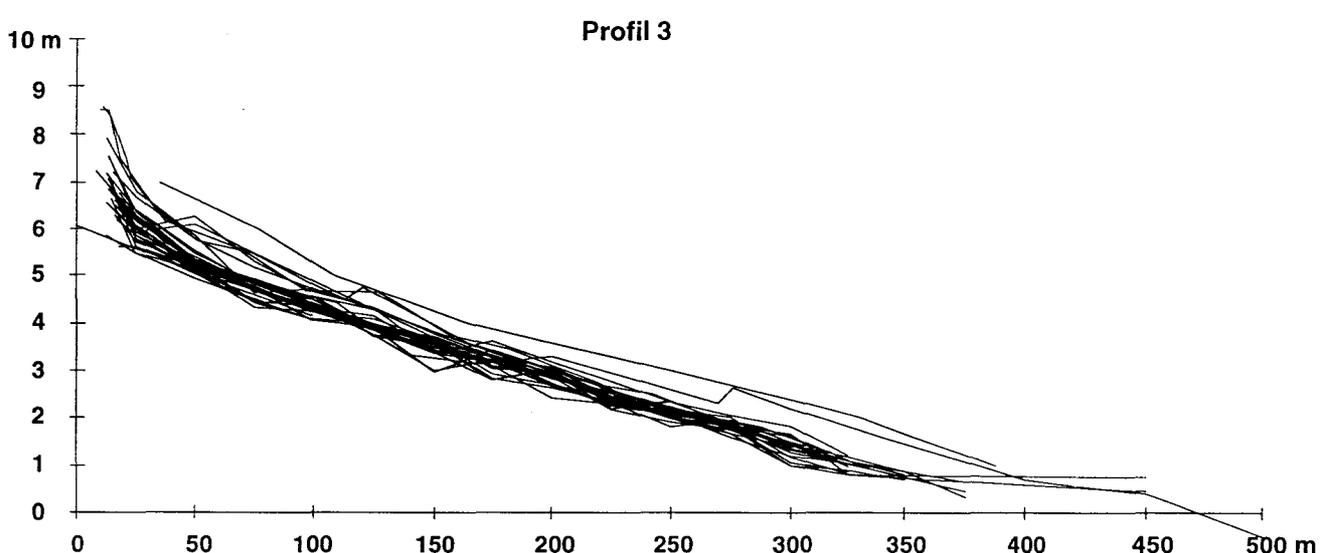
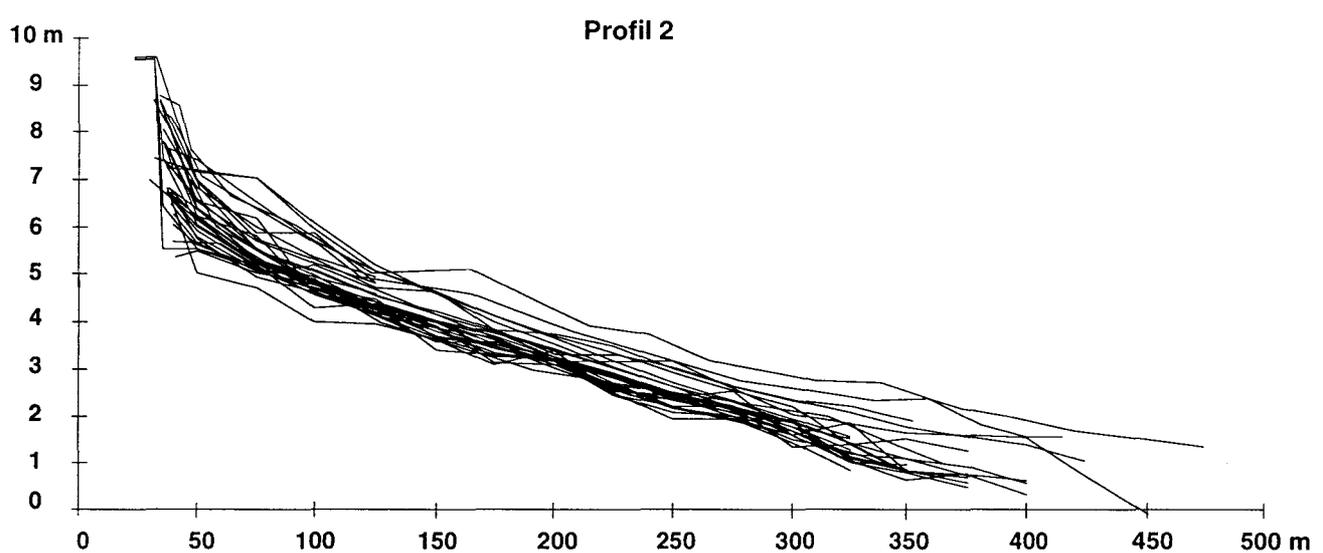
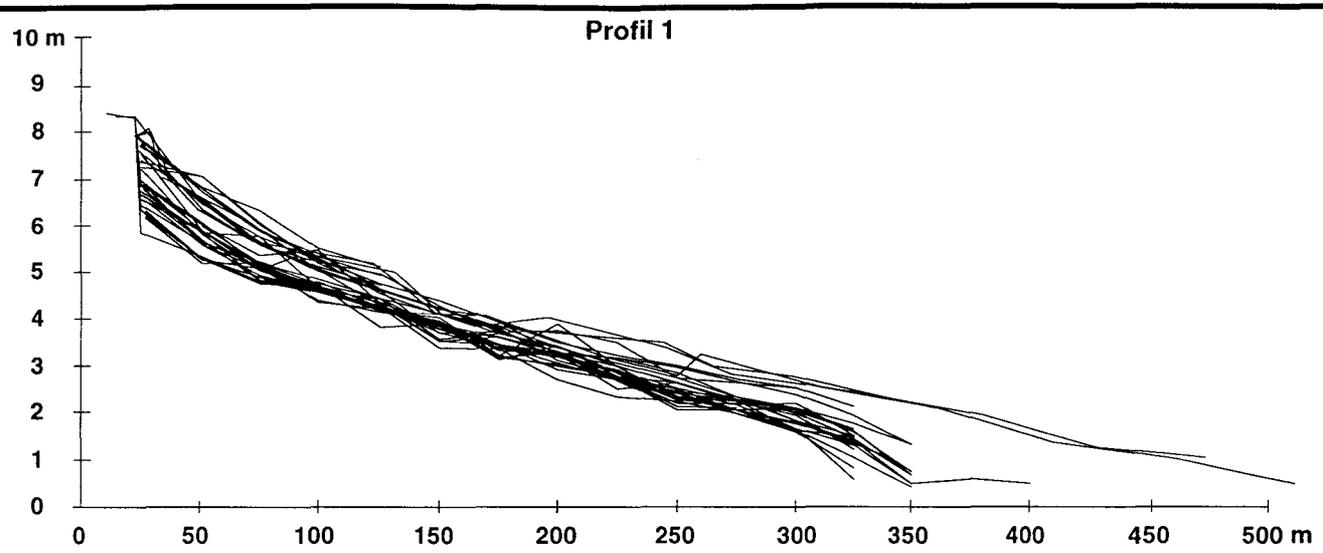


Figure I -18 : Profils réalisés à Malo-les-Bains de 1884 à 1993.

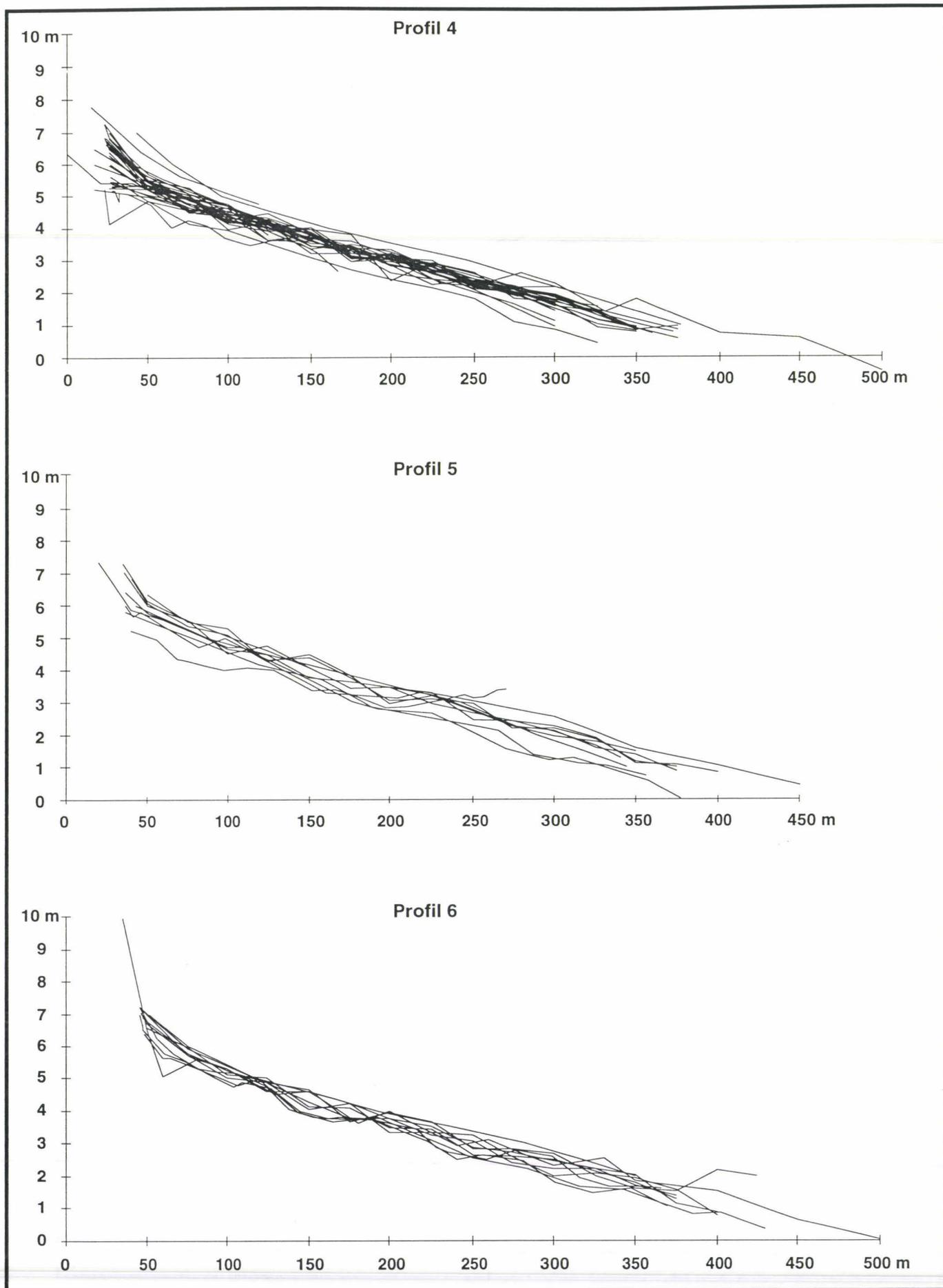


Figure II - 18 suite et fin : Profils réalisés à Malo-les-Bains de 1884 à 1993.

### *Profil P1 (fig. I-19a et I - 20a)*

De 1884 à 1992, d'une façon générale le profil traduit une accumulation sédimentaire. L'engraissement est important dans la partie haute du profil. En bas d'estran l'évolution est moins forte et des phénomènes d'érosion apparaissent. Les grandes étapes de cette évolution sont les suivantes:

De 1884 à septembre 1953, la pente du profil a augmenté de façon significative, la "rotation" s'étant effectuée autour d'un point situé vers 150 m définissant ainsi une érosion de la partie inférieure du profil et une sédimentation de la partie supérieure.

De septembre 1953 à mars 1971, l'évolution sédimentaire est globalement négative, une érosion importante en haut de plage s'observe entre janvier 1964 et janvier 1967.

De mars 1971 à novembre 1971, un engraissement est observé sur toute la longueur du profil.

De novembre 1971 à janvier 1972, la tendance est érosive surtout dans la partie haute du profil.

De janvier 1972 à octobre 1973, l'évolution sédimentaire révèle un équilibre.

Une érosion sur toute la longueur du profil est observée d'octobre 1973 à février 1974.

De février 1974 à mars 1976, les variations topographiques sont positives et reflètent une tendance à l'engraissement.

De mars 1976 à février 1977, le bas de plage subit une érosion importante.

De février 1977 à janvier 1979, le système s'engraisse sur toute sa longueur.

De janvier 1979 à février 1993, seule l'évolution du haut de plage est donnée sur une distance d'environ 100 m et montre une alternance d'érosion et de sédimentation.

### *Profil P2 (fig. I-19b et I - 20b)*

Ce profil présente un engraissement général sur toute sa longueur de 1884 à 1993, qui se traduit par une élévation de l'ordre de 0,5 à 1 mètre.

De 1884 à septembre 1953 seuls les 50 mètres supérieurs du haut de plage montrent un engraissement, le reste du profil étant en érosion.

De 1953 à janvier 1964, le profil montre un engraissement général et la tendance s'inverse de janvier 1964 à août 1968.

D'août 1968 à mars 1971, la tendance générale est soit à la sédimentation soit à l'équilibre.

De mars 1971 à novembre 1971, le profil traduit une érosion sur toute sa longueur.

De novembre 1971 à février 1975, l'évolution du profil se caractérise par une alternance de phénomènes d'érosion ou de sédimentation qui sont plus importants sur la partie haute de l'estran.

De février 1975 à septembre 1975, une érosion générale du profil est observée. Cette tendance sédimentaire s'inverse de septembre 1975 à août 1977.

D'août 1977 à août 1978, le profil montre un engraissement très important sur toute sa longueur.

D'août 1978 à janvier 1979 le profil montre une évolution soit en érosion soit en sédimentation, mais qui s'équilibre globalement.

De janvier 1979 à janvier 1988, seule la topographie du haut de plage a été relevée et montre d'un levé à l'autre une alternance des phénomènes sédimentaires : érosion/sédimentation.

Enfin de janvier 1988 à février 1993 le profil montre un engraissement général.

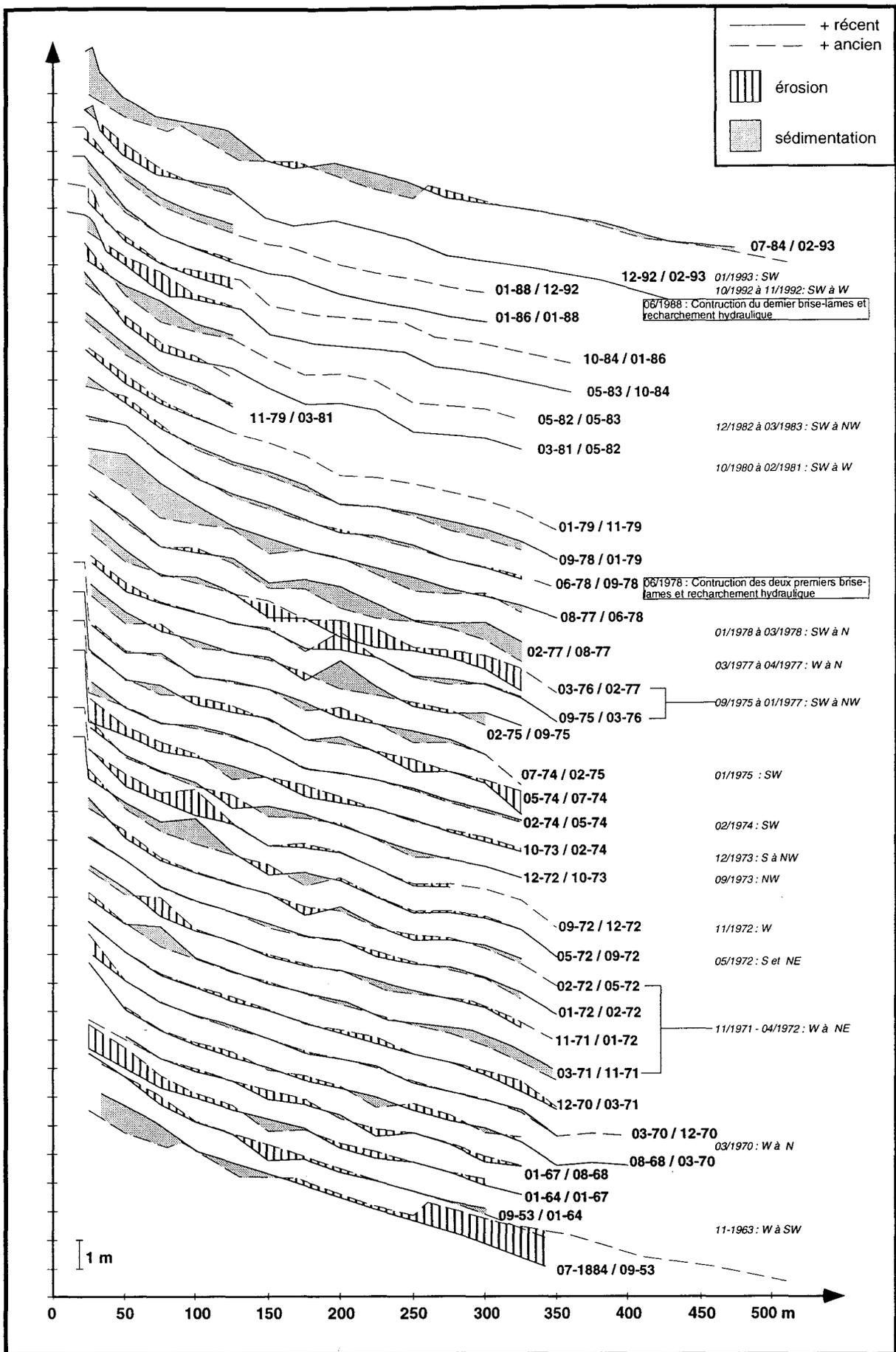


Figure I-19a : Evolution du profil 1 de 1884 à 1993

Les principales tempêtes de vitesse supérieure à 100 km/h sont données en italique et les aménagements sont encadrés

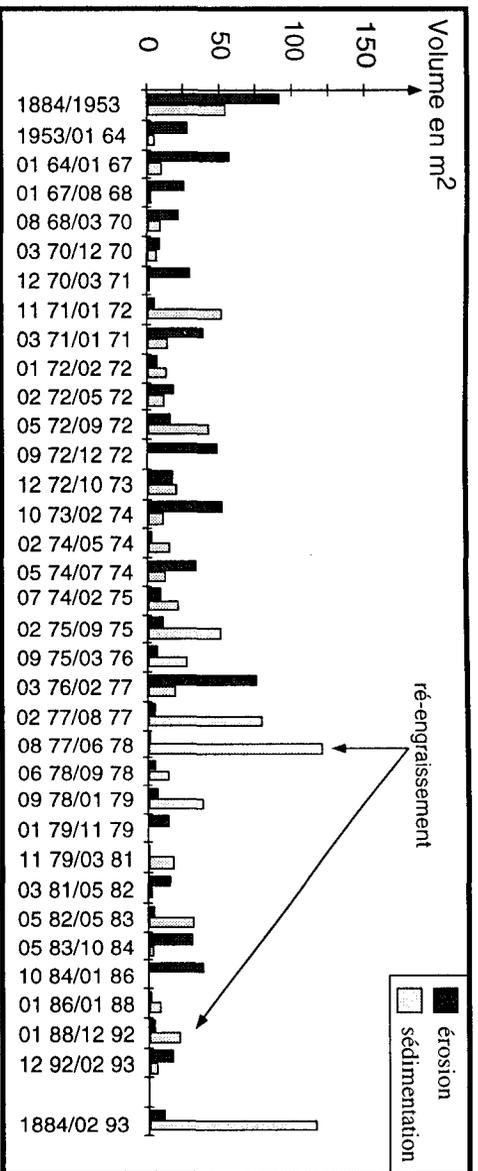


Figure I-20a : Quantification de l'érosion et de la sédimentation au niveau du profil P1 entre 1884 et 1993

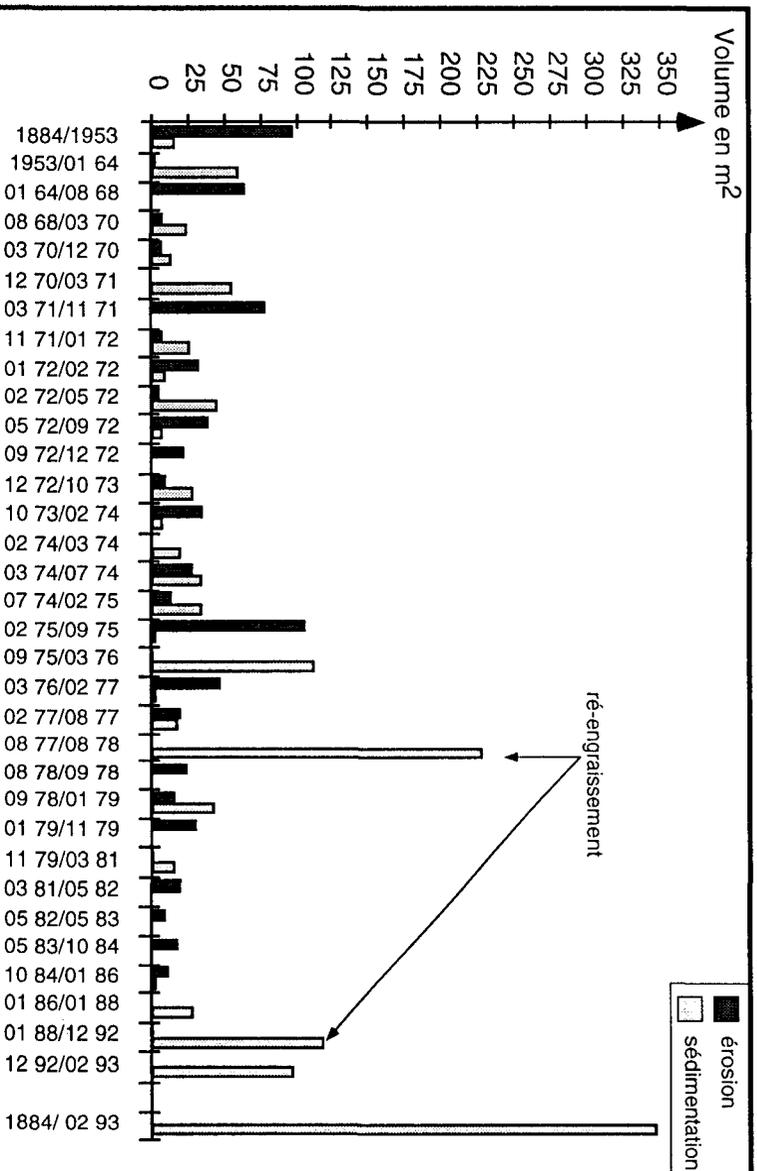


Figure I-20b : Quantification de l'érosion et de la sédimentation au niveau du profil P2 entre 1884 et 1993

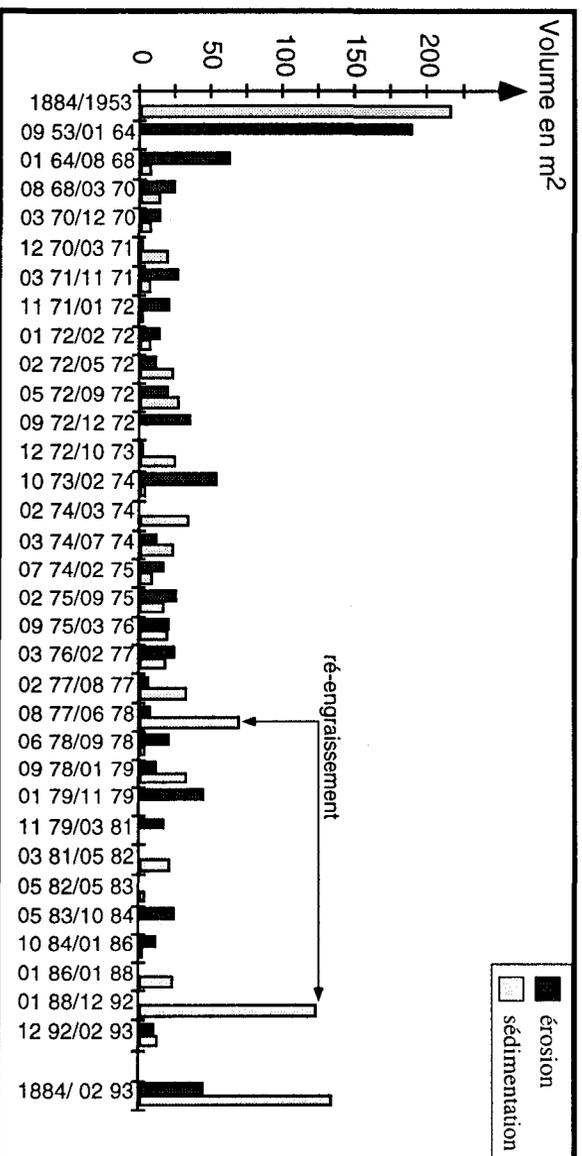


Figure I-20c : Quantification de l'érosion et de la sédimentation au niveau du profil P3 entre 1884 et 1993

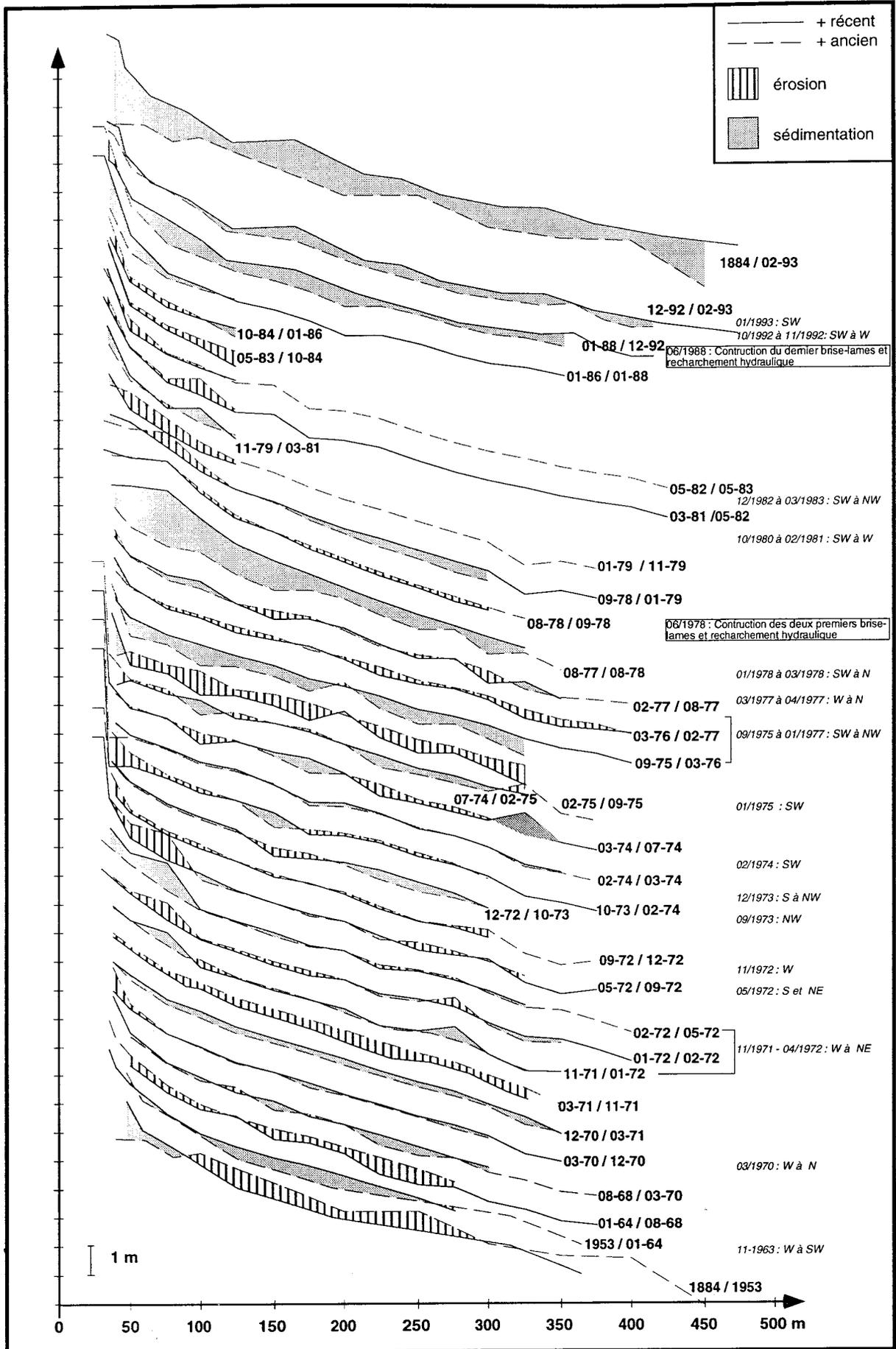


Figure I-19b : Evolution du profil 2 de 1884 à 1993

Les principales tempêtes de vitesse supérieure à 100 km/h sont données en italique et les aménagements sont encadrés

*Profil P3 (fig. I - 19c et I - 20c)*

De 1884 à 1993, le bilan global est en engraissement pour la partie haute du profil et en érosion pour la partie basse.

De 1884 à septembre 1953, le profil montre un engraissement général. En revanche une érosion a lieu de septembre 1953 à août 1968.

D'août 1968 à août 1977, les bilans sédimentaires sont faibles. Parfois les érosions sont plus importantes (d'octobre 1973 à février 1974), ou, au contraire la sédimentation domine (de février 1974 à mars 1974), mais l'évolution générale tend à s'équilibrer.

D'août 1977 à juin 1978, le profil montre un engraissement important sur toute sa longueur.

D'août 1978 à janvier 1979, les évolutions sédimentaires, de faibles amplitudes, s'équilibrent.

De janvier 1979 à janvier 1988, seule l'évolution de la partie haute du profil est donnée. Elle présente des phénomènes relativement importants qui alternent d'un levé à un autre.

De janvier 1988 à décembre 1992, un engraissement sur toute la longueur du profil est observé.

Enfin de décembre 1992 à février 1993 l'évolution est stable.

*Profil P4 (fig. I-19d et I - 20d)*

L'évolution globale du profil est à l'engraissement de 1884 à 1993. La partie inférieure du profil montre une érosion, l'engraissement concernant principalement sa partie supérieure.

De 1884 à septembre 1953, le profil s'engraisse sur toute sa longueur, alors que de septembre 1953 à janvier 1964 l'inverse est observé.

De septembre 1964 à décembre 1972, les variations topographiques sont faibles et les phénomènes sédimentaires alternent d'un levé à un autre.

De décembre 1972 à février 1973, le profil subit une érosion sur toute sa longueur.

Par contre de février 1974 à mars 1974, un engraissement général du profil est observé.

De mars 1974 à janvier 1979, les phénomènes sédimentaires sont de faible amplitude et alternent d'un levé à un autre.

De janvier 1979 à décembre 1992, le haut de plage montre des phénomènes d'érosion ou de sédimentation qui sont parfois importants.

Enfin de décembre 1992 à février 1993, les variations topographiques s'équilibrent.

*Profil P5 (fig. I-19e et 20e)*

Les levés de ce profil n'ont malheureusement pas été aussi fréquents que pour les profils précédents, ce qui ne permet pas une étude aussi détaillée. Néanmoins, on peut constater que la tendance générale de 1884 à février 1993 est à l'érosion, notamment dans la partie basse.

De 1884 à septembre 1954, le profil s'engraisse dans sa partie supérieure et subit une érosion dans sa partie inférieure.

De septembre 1954 à août 1977, l'évolution sédimentaire se caractérise par une alternance de phénomènes d'érosion et de sédimentation.

D'août 1977 à juin 1988, une érosion importante du profil est observée alors que de juin 1988 à décembre 1992 le phénomène s'inverse mais est moins intense. De décembre 1992 à février 1993, l'évolution sédimentaire est stable.

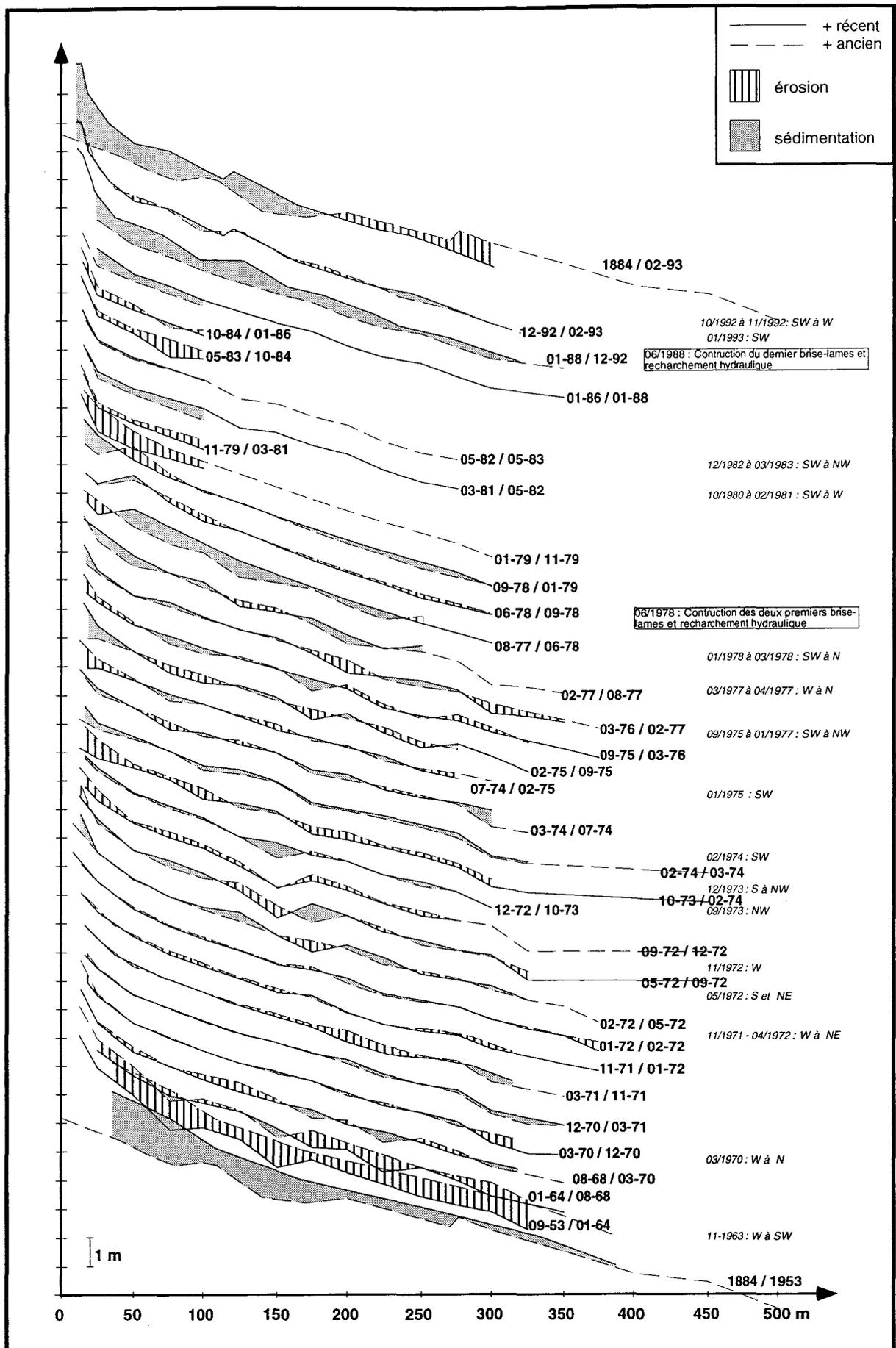


Figure I-19c : Evolution du profil 3 de 1884 à 1993

Les principales tempêtes de vitesse supérieure à 100 km/h sont données en italique et les aménagements sont encadrés

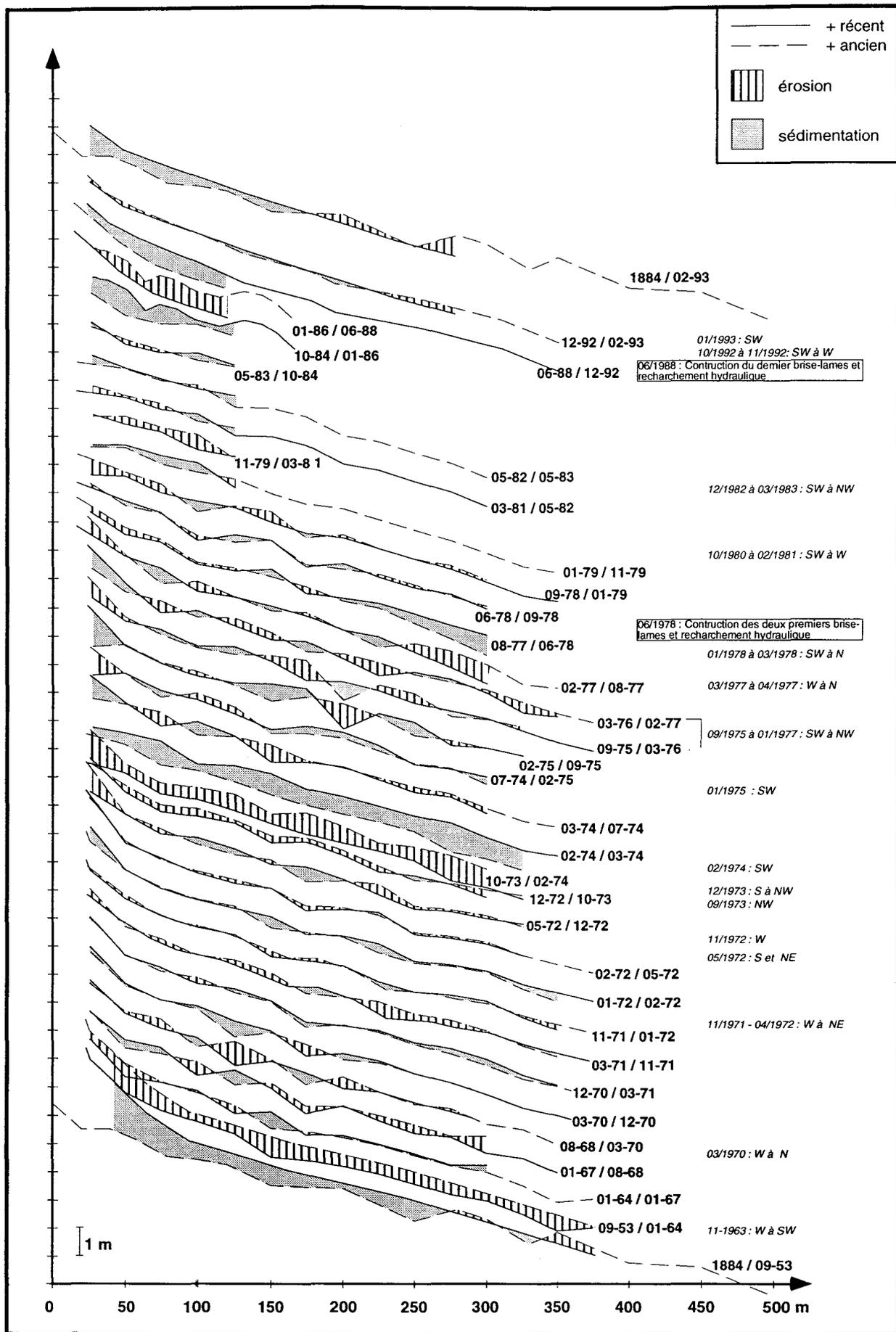


Figure I-19d : Evolution du profil 4 de 1884 à 1993

Les principales tempêtes de vitesse supérieure à 100 km/h sont données en italique et les aménagements sont encadrés

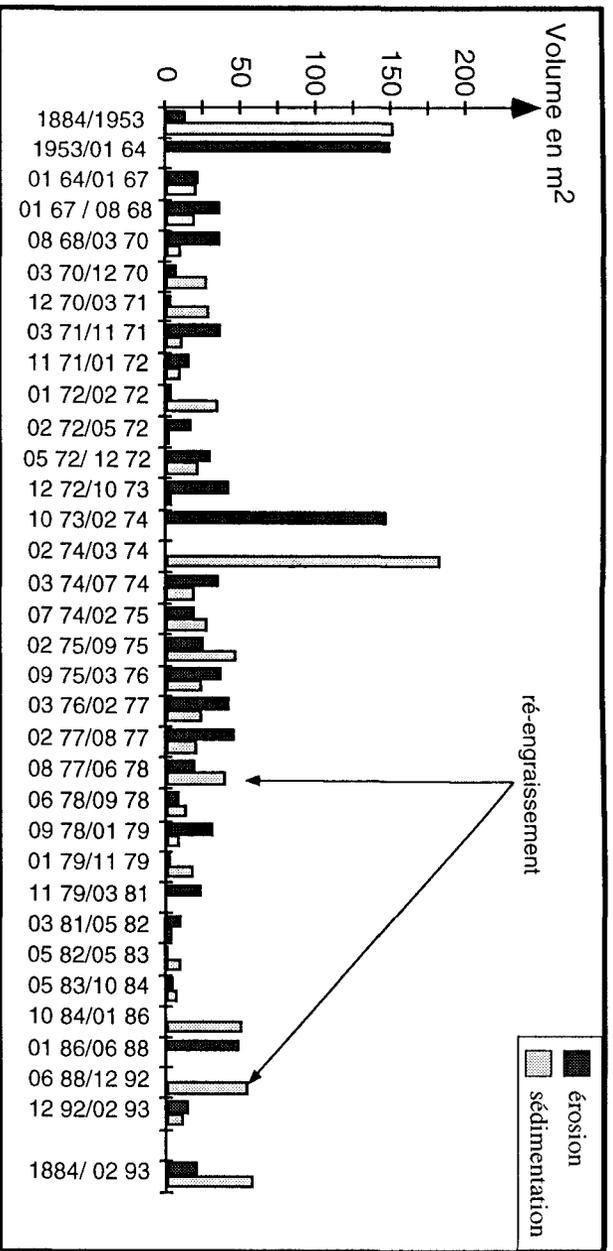


Figure I - 20d : Quantification de l'érosion et de la sédimentation au niveau du profil P4 entre 1884 et 1993

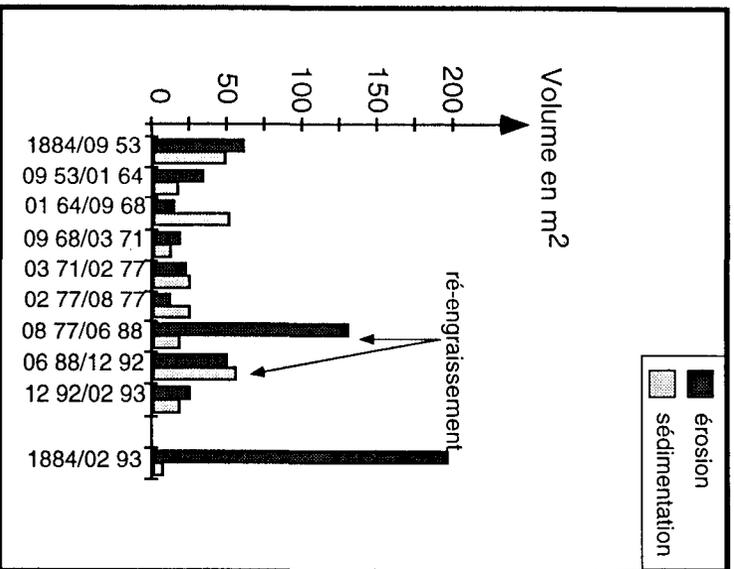


Figure I - 20e : Quantification de l'érosion et de la sédimentation au niveau du profil P5 entre 1884 et 1993

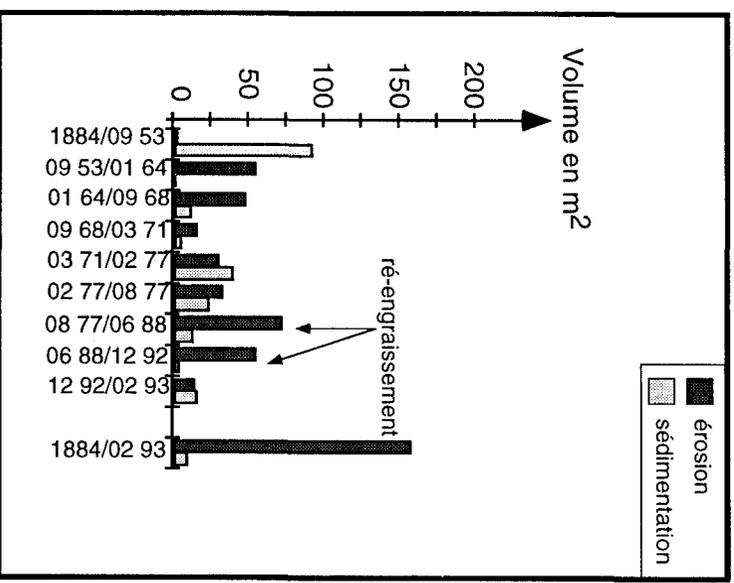


Figure I - 20f : Quantification de l'érosion et de la sédimentation au niveau du profil P6 entre 1884 et 1993

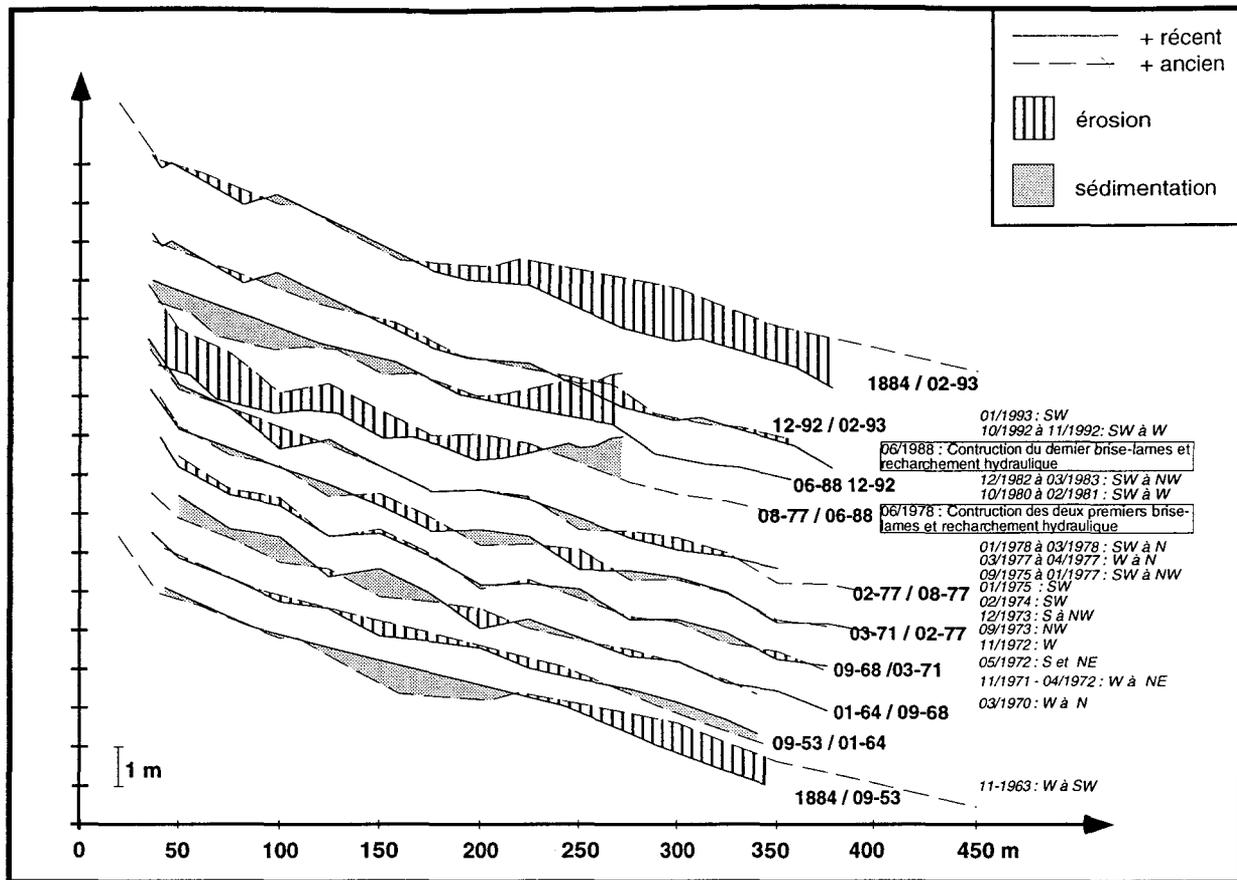


Figure I - 26e : Evolution du profil 5 de 1884 à 1993

Les principales tempêtes de vitesse supérieure à 100 km/h sont données en italique et les aménagements sont encadrés

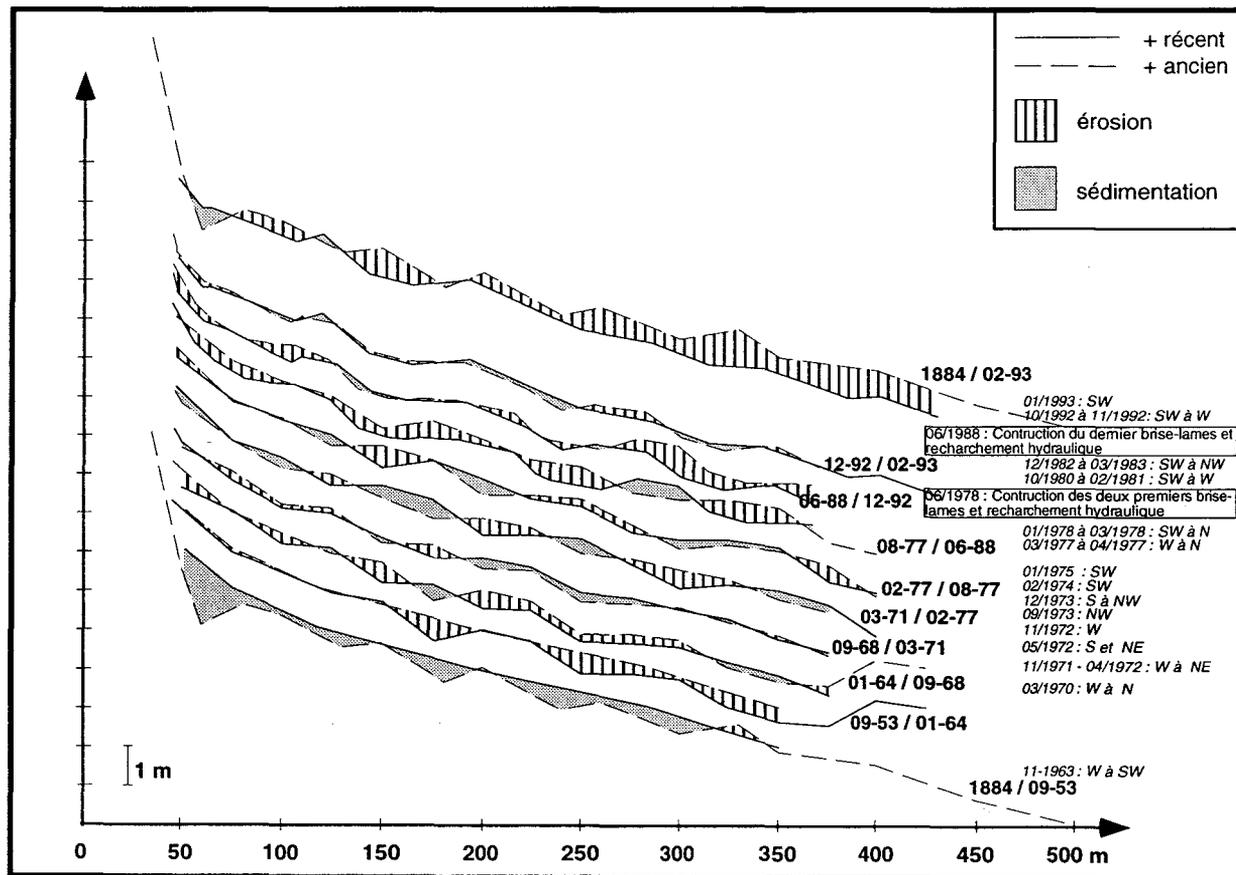


Figure I - 26f : Evolution du profil 6 de 1884 à 1993

Les principales tempêtes de vitesse supérieure à 100 km/h sont données en italique et les aménagements sont encadrés

### Profil P6 ( fig. I-19f et I - 20f)

Tout comme le profil 5, le suivi du profil 6 a été moins fréquent. Il montre une érosion globale de 1884 à février 1993 qui témoigne d'un abaissement général du niveau de la plage.

De 1884 à septembre 1953, le profil montre un phénomène d'engraissement sur toute sa longueur.  
De septembre 1953 à février 1993, le profil montre une évolution sédimentaire qui varie au cours du temps. Une érosion importante est toutefois observée entre le mois d'août 1977 et juin 1988.

De 1884 à 1993, la pente des profils P3 à P5 a augmenté avec une "rotation" autour d'un point situé au milieu du profil (vers les 150 m). Ce fait est également observé pour les profils P1 et P2 mais seulement pour la période de 1884 à 1953. Cette augmentation de la pente traduit une modification du système pour s'adapter aux conditions hydrodynamiques et aux différents aménagements côtiers.

**Le bilan sédimentaire général est stable.** La figure I-21 présente le bilan sédimentaire résultant au cours du temps. Elle montre que les variations topographiques se succédant sont souvent de faible amplitude (bilan sédimentaire résultant inférieur à 50 m<sup>2</sup>). Toutefois ces phénomènes sont parfois de plus forte amplitude et peuvent dépasser 150 m<sup>2</sup> d'érosion comme par exemple entre 1953 et janvier 1964, ou dépasser 200 m<sup>2</sup> comme entre février et août 1977.

Dans le détail, l'évolution topographique pluriannuelle a révélé de grandes disparités spatiales et temporelles (fig. I-20a à f). Des résultats identiques ont d'ailleurs été obtenus sur d'autres littoraux, notamment d'Aquitaine (Howa, 1987 ; Gassiat, 1989), de Hollande (de Ruig et al, 1991 ; Ruessink, 1994) et de l'Ouest Cotentin (Levoy, 1994).

L'étude de ces profils de la plage de Malo-les-Bains sur une période de plus de 100 ans (fig. I-21) met en évidence :

- 1) **des variations topographiques perpendiculaires et parallèles à la plage,**
- 2) **une évolution topographique variable dans le temps,**
- 3) **une influence des aménagements et notamment des ré-engraissements hydrauliques de plage de 1978 et 1988 ayant des effets locaux.**

#### *Variation topographique perpendiculaire à la plage*

Les variations topographiques dans le profil de plage sont souvent de faible amplitude et varient de sens d'une mission à l'autre. Ces variations topographiques reflètent les variations saisonnières de la morphologie (destruction/construction des barres et migration).

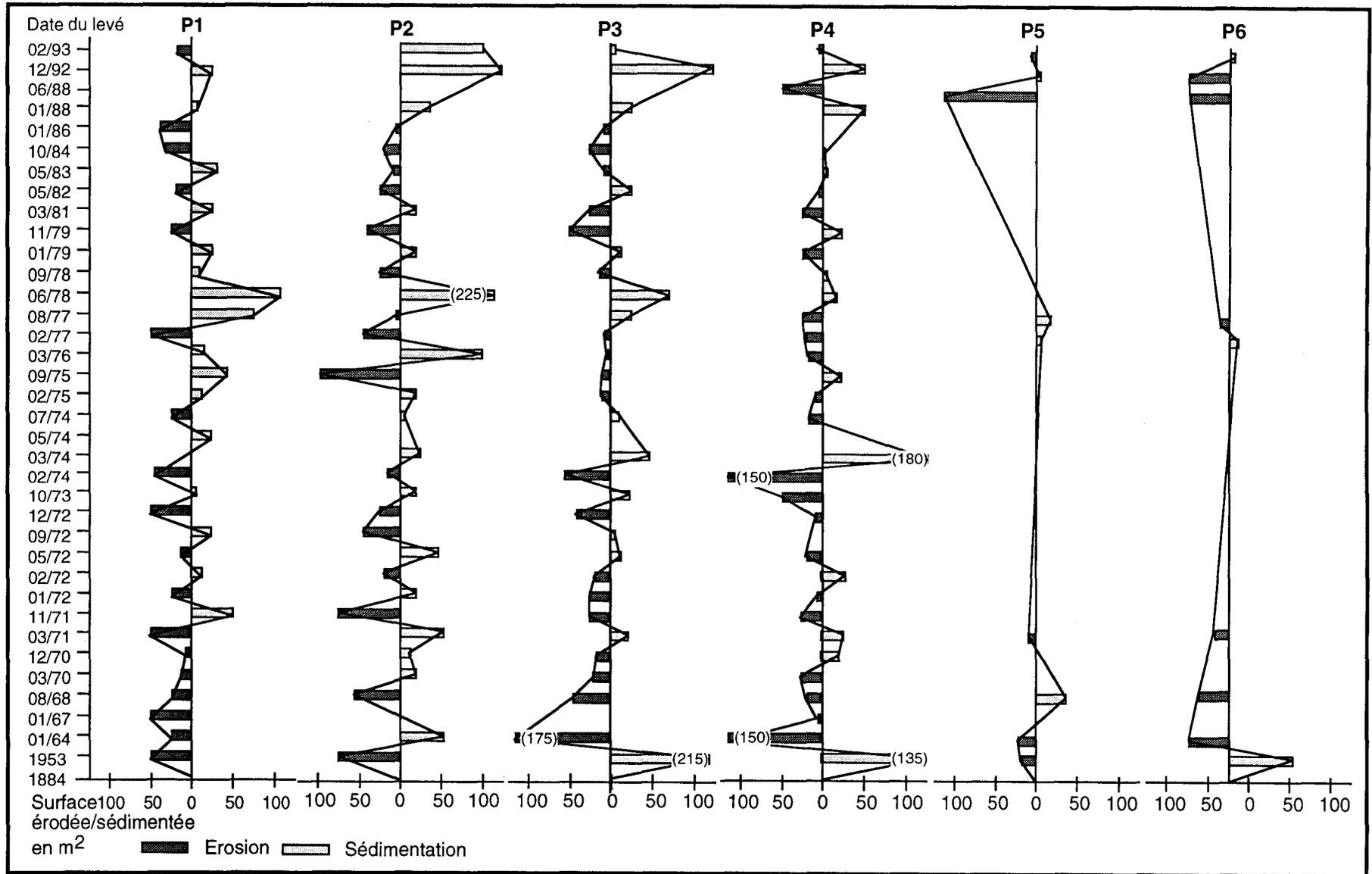


Figure I-21 : Bilan général de l'évolution topographique des profils 1 à 6 de 1884 à 1993 (Malo-les-Bains).

### *Variation topographique parallèle à la plage*

Les profils 1 à 6, espacés de 500 m, ont souvent été levés à une même époque, donc sous de conditions hydrodynamiques identiques. Les variations morphologiques ne sont cependant pas semblables (fig. I-21). Par exemple, la comparaison des levés de 1953 à ceux de 1964, qui a normalement enregistré les effets des tempêtes sévères de 1953, révèle que les profils 1, 3, 4, 5 et 6 sont en érosion (fig. I-20a, c, d, e et f) avec des valeurs parfois supérieures à 150 m<sup>2</sup> alors que le profil 2 est en sédimentation (fig. I-20b). Cette variation dans l'espace des phénomènes sédimentaires implique également une variation spatiale de la dynamique sédimentaire.

### *Variation topographique dans le temps*

Les variations topographiques positives ou négatives ne sont pas toujours dans le temps et permettent de définir les conditions d'érosion pour l'ensemble du site. Ce fait indique que certains phénomènes morphologiques observables à une plus grande échelle sont probablement dues à des actions hydrodynamiques de plus grande intensité.

Les tempêtes peuvent avoir des effets érosifs importants sur la côte. C'est le cas notamment de celles de l'hiver 1963-64, de l'hiver 1972, de février 1974, de février 1977, et de février 1993 qui ont provoqué l'érosion générale du site. Ces tempêtes correspondent à des périodes de vent violent continu de secteur SW à NW. Les autres tempêtes ont eu des effets plus limités et plus locaux. Les conséquences d'événements érosifs résultent donc des conditions de tempête c'est-à-dire de l'intensité de la tempête, de sa durée, de sa direction, de sa fréquence et du niveau de la marée. Toutefois il apparaît que les effets des tempêtes sont rarement irréversibles puisque dans la plupart des cas une érosion générale du profil est suivie par un engraissement général observé lors du levé suivant.

### *Influence des aménagements*

L'étude des variations topographiques montre que l'influence des ré-engraissements a été dans l'ensemble positif. Localement ils ont permis de relever le niveau de l'estran puis de le stabiliser pendant une période notable. C'est ainsi que les profils 1, 2, 3 sont nettement en sédimentation après le premier rechargement (fig. I-21). L'impact du deuxième ré-engraissement apparaît moins marqué compte tenu du temps écoulé entre ce dernier et le levé topographique suivant.

Cependant les conséquences de ces ré-engraissements sont locales, leurs effets sur les profils voisins étant minimes voire négligeables. Ainsi le profil 4 est en équilibre alors que les profils 5 et 6 sont en érosion. Ceci tend à démontrer que les échanges latéraux sont limités.

Le prolongement de la jetée est en 1884 et la construction de la jetée Ouest du port de

Dunkerque ont probablement déstabilisé le littoral Est dunkerquois. Ces nouvelles jetées ont pu bloquer une partie du transit sédimentaire et ont alors entraîné l'érosion de ce littoral. L'érosion observée de 1884 à 1953 au niveau des profils 1 à 3 témoigne peut-être de l'effets de ces travaux portuaires.

Le pas temporel entre chaque levé des profils est trop large pour qu'apparaisse clairement l'influence des divers aménagements qui se sont succédés depuis 100 ans sur le littoral.

### I - 3 - 3 - 3 - Évolution du système dunaire

A l'Est de Dunkerque l'évolution du système dunaire est étroitement liée à l'urbanisation :

- Les cartes topographiques de 1832 montrent un **cordon dunaire unique** s'étendant sur 11,5 km de Malo-les-Bains à la frontière belge et s'étalant sur une largeur de 1 000 à 1 600 m (Blanchard, 1906 ; I.G.N., 1832 ; Dubois, 1939).

- En 1939, le cordon dunaire est divisé en **deux secteurs** suite à la construction de Bray-Dunes Plage. Un premier secteur, de Malo-les-Bains à Bray-Dunes, s'étendait sur une longueur de 5 km et une largeur de 900 à 1000 m. Un deuxième secteur de Bray-Dunes à la frontière belge présentait une longueur de 1 600 m et une largeur de 1 200 à 1 600 m (I.G.N., 1939 ; Clabaut & Laboratoire de Dynamique Structurale et Sédimentaire, 1992).

- Depuis 1987, le système dunaire est divisé en **trois domaines** suite à la construction en front de mer de Zuydcoote et de son sanatorium. Il ne présente plus qu'une longueur totale de 5,8 km. Les dunes sont localement plus hautes en 1987 qu'en 1939. Ainsi des hauteurs de 25 m ont été relevées récemment alors qu'en 1939 la hauteur maximale était de 16 m (I.G.N., 1987, Clabaut & Laboratoire de Dynamique Structurale et Sédimentaire, 1992).

## I - 4 - CONCLUSION

**L'évolution Holocène** du littoral dunkerquois est surtout marquée par la succession des transgressions dunkerquiennes qui ont épisodiquement inondé le secteur jusqu'au XI<sup>ème</sup> siècle en pénétrant par les estuaires et des brèches entaillées dans les cordons littoraux.

**Du XI<sup>ème</sup> au XIX<sup>ème</sup> siècle** les divers aménagements côtiers conditionnent en partie l'évolution du site. Un des faits marquants de cette évolution est l'apparition d'un déséquilibre sédimentaire de part et d'autre du port Est de Dunkerque à partir de 1757. Le littoral Ouest dunkerquois s'engraisse tandis que le littoral Est recule. Cette double évolution apparaît étroitement liée à l'édification du port de Dunkerque. Les jetées du port Est de Dunkerque et temporairement celles du canal de Mardyck au XVIII<sup>ème</sup> siècle ont probablement joué le rôle

d'épis en s'opposant au transit dominant des sédiments. L'observation de la carte marine de 1802 de Beautemps-Beaupré laisse supposer que la limite d'influence des jetées du port Est de Dunkerque se situait au niveau de Zuydcoote puisqu'à l'Est de cette zone, l'estran s'élargit. La construction de digues successives a également pu contribuer à favoriser la progression du littoral Ouest dunkerquois.

L'analyse des cartes **du XX<sup>ème</sup>** siècle tend à démontrer que le littoral n'a pas subi récemment de profondes modifications. Globalement les petits fonds marins sont stables bien que les bancs migrent vers l'Est et vers la côte. En domaine d'estran, le déséquilibre entre les secteurs Est et Ouest dunkerquois subsiste. L'évolution complexe du domaine côtier résulte *a priori* surtout de l'augmentation des interventions humaines liées à l'aménagement.

## **CHAPITRE II :**

### **CADRE DYNAMIQUE DU LITTORAL DUNKERQUOIS**

#### **II - 1 - INTRODUCTION**

Le littoral Est dunkerquois évolue par érosion et sédimentation caractérisées par des modifications morphologiques et sédimentaires. Ces phénomènes s'expliquent principalement par une interaction complexe entre les facteurs hydrodynamiques et dynamiques propres au site.

A l'action de ces facteurs naturels qui sont le vent, la houle et les courants de marée, se surimpose de façon plus ou moins importante celle des facteurs d'origine anthropiques tels que les ouvrages de défense ou autres aménagements côtiers.

Le but principal de ce présent chapitre est :

- d'examiner successivement les trois principaux facteurs naturels gouvernant l'évolution actuelle d'un site que sont la marée et les courants de marée, le vent et la houle, et,
- de définir précisément les caractéristiques principales du cadre dynamique du littoral dunkerquois.

## II - 2 - LA MARÉE ET LES COURANTS DE MARÉE

Les courants tidaux constituent l'un des facteurs hydrodynamiques principaux qui agissent sur les littoraux de la Manche et de la Mer du Nord. Leurs causes et principes généraux sont donnés dans l'encadré II-1.

### Généralités sur la marée et les courants de marée

Encadré II-1

d'après Lacombe, 1971 ; Guilcher, 1979 ; Carré, 1983 ; Komar, 1983 ; Brown *et al.*, 1988 ; Dalrymple, 1992 (fig. II-1).

**La marée** est un mouvement ondulatoire due à l'attraction de la lune et du soleil sur les masses liquides terrestres. L'attraction étant proportionnelle à la masse de l'astre (lune ou soleil) sur le carré de la distance ( $M/D^2$ ) qui le sépare de la terre, la lune exerce une influence plus forte. Les forces attractrices solaires et lunaires qui s'exercent sur la terre sont maximales quand la lune et/ou le soleil sont au zénith ou au nadir.

La marée se manifeste par des variations périodiques du niveau de la mer. La période élémentaire, liée à la rotation de la terre sur elle-même par rapport à l'attraction lunaire, est de 12h24mn et détermine deux marées hautes et de marées basses par jour (**marée de type semi-diurne**). A cette période se surimpose une période de 24h50mn définie par l'inégalité d'amplitude des deux marées successives en raison de la déclinaison lunaire de période 12h24mn ou 12h. Cette inégalité détermine les marées dites semi-diurnes à inégalité diurne. Dans certains cas, la plus petite des deux marées peut devenir négligeable. On n'a plus alors qu'une marée haute et une marée basse par jour et la **marée est dite diurne**.

L'alternance de marée de vive-eau et de morte-eau résulte de la rotation de la lune autour de la terre en 28 jours. Les marées de **vives-eaux** s'observent quand la lune se trouve en conjonction (nouvelle lune) ou en opposition (pleine lune). Les forces d'attraction lunaire et solaire s'ajoutent alors et l'amplitude de la marée est maximale. A l'inverse les marées de **mortes-eaux** se rencontrent quand la lune forme un angle de 90° avec le soleil (c'est-à-dire aux quadratures). A ce moment les forces d'attraction se soustraient et l'amplitude de la marée est minimale. Ce cycle semi-lunaire vive-eau morte-eau se déroule sur une période de 14 jours.

Il existe également un cycle lunaire de 28 jours qui est dû à la position plus ou moins rapprochée de la lune par rapport à la terre (cycle GVE/PVE) et un cycle annuel en raison de la rotation elliptique de la terre autour du soleil (cycle Équinoxe/Solstice).

**Le marnage** correspond à la différence entre le niveau de pleine mer et celui de basse mer. En fonction de la valeur de ce paramètre trois types de régime tidal sont définis (Hayes, 1979) :

- si le marnage est inférieur à 2 mètres, le régime est microtidal,
- de 2 à 4 mètres, le régime est mésotidal,
- si le marnage est supérieur à 4 mètres, le régime est dit macrotidal.

Il est d'usage en France de définir l'importance du marnage par une valeur relative sans dimension, le **coefficient de marée**, calculé de la manière suivante :

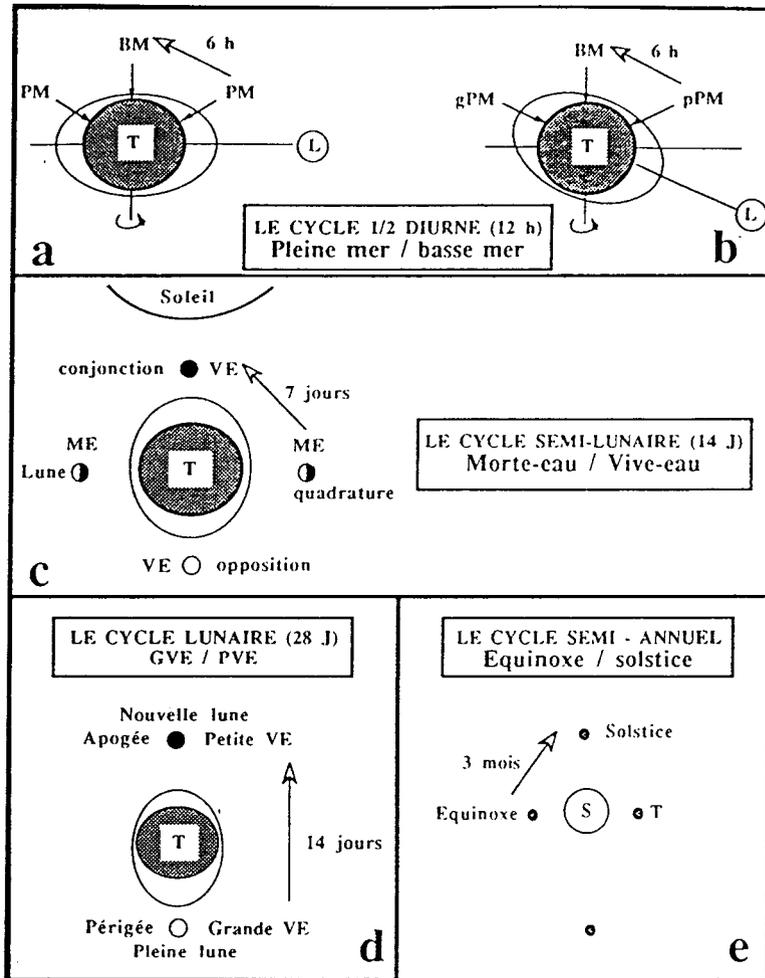
$$\text{Coefficient} = 120 \times \text{marnage du jour à Brest} / \text{marnage des V.E. d'équinoxe moyenne à Brest}$$

Pour une marée donnée, en tout point du littoral le coefficient est identique même si le marnage est différent. Les coefficients de marée varient de 20 à 120 selon l'importance du marnage (tab. II-1).

Coefficient de marée	Type de marée
120	Vive-eau exceptionnelle
95	Vive-eau moyenne
70	Marée moyenne
45	Morte-eau moyenne
20	Morte-eau exceptionnelle

Tableau II-1 : Les principaux coefficients de marée (d'après S.H.O.M., 1968)

L'oscillation verticale du niveau de la mer est accompagnée de mouvements horizontaux, **les courants de marée**. A la marée montante est associé le **flot** et à la marée descendante le **jusant**. Le moment pendant lequel les courants s'annulent avant de s'inverser, correspond à l'**étale**. Dans le temps les vitesses varient au gré des périodicités tidales, les courants de vives-eaux étant plus rapides que ceux associés aux mortes-eaux ceux d'équinoxes plus rapides que ceux de solstices. De plus, dans la plupart des cas un des courants (le flot ou le jusant) est **dominant** par rapport à l'autre, dit **subordonné**. Dans l'espace on distinguera principalement des variations de vitesse et de direction dues principalement à l'établissement de courants de type soit **alternatif**, soit **giratoire**.



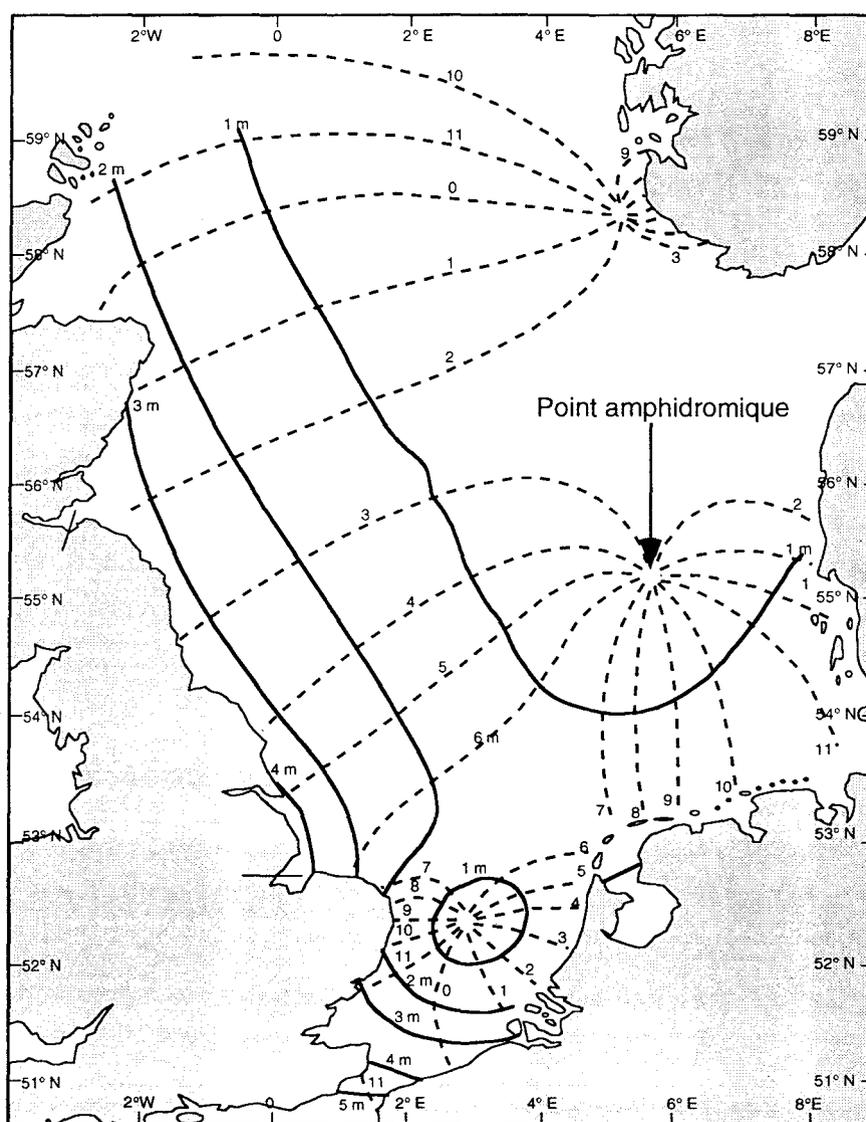
**Figure II-1** : Les différents cycles tidaux (Tessier, 1993).

(PM : pleine mer, BM : basse mer, pPM : petite pleine mer, gPM : grande pleine mer, VE : vive-éau, ME : morte-eau, NL : nouvelle lune, PL : pleine lune, S : soleil, T : terre, L : lune)

## La marée et les courants de marée à Dunkerque

### la marée

A Dunkerque la marée est de type **semi-diurne**. Elle résulte de l'interférence d'une onde tidale venant de l'Atlantique par la Manche en empruntant le détroit du Pas-de-Calais et d'une autre descendant par la Mer du Nord le long des côtes anglaises en contournant la pointe de l'Écosse. Il se crée un phénomène de réflexion sur le littoral du Nord de la France et de la Belgique qui donne naissance à une onde stationnaire (Vicaire, 1991). L'onde résultante de la marée longe la côte Est d'Angleterre puis se déplace progressivement des côtes de France vers celles de la Belgique et de la Hollande. Son amplitude diminue vers l'Est (fig. II-2).

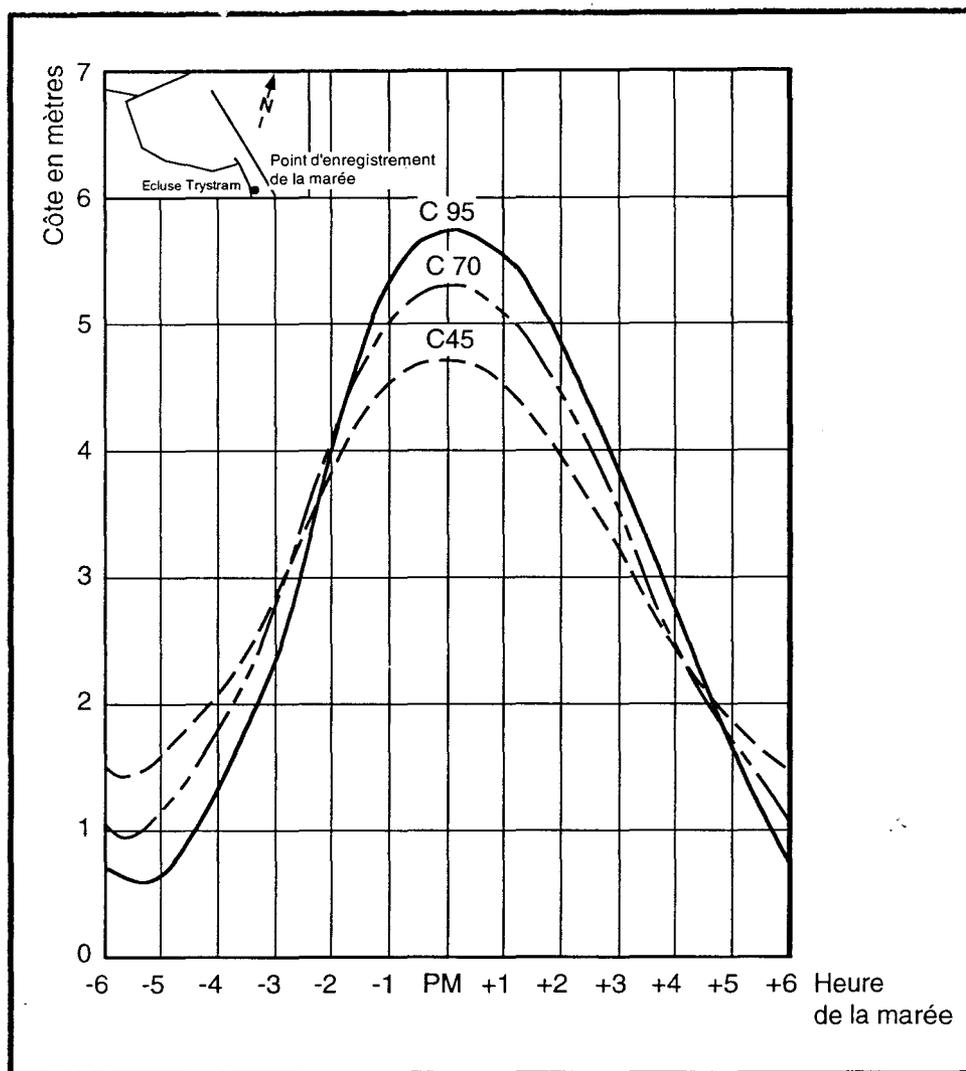


**Figure II-2** : La marée en Mer du Nord (Brown *et al.*, 1989).

(en trait plein : ligne d'égal marnage et en pointillé : ligne cotidale).

Le marnage est de **5,4 m** en période de vive-eau et de 3,4 m en période de morte-eau. Le régime de la marée est donc de type **mésotidal à macrotidal** (S.H.O.M., 1994).

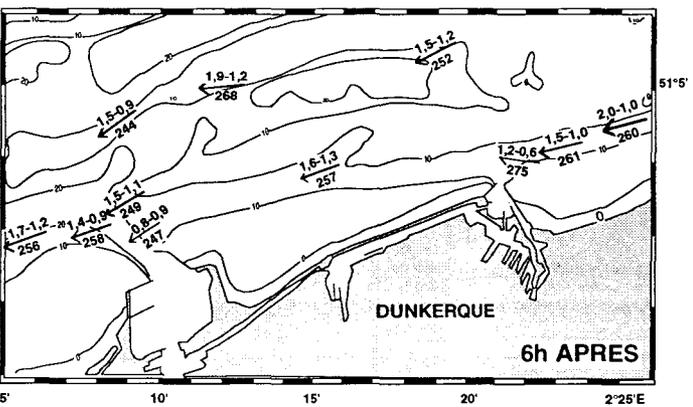
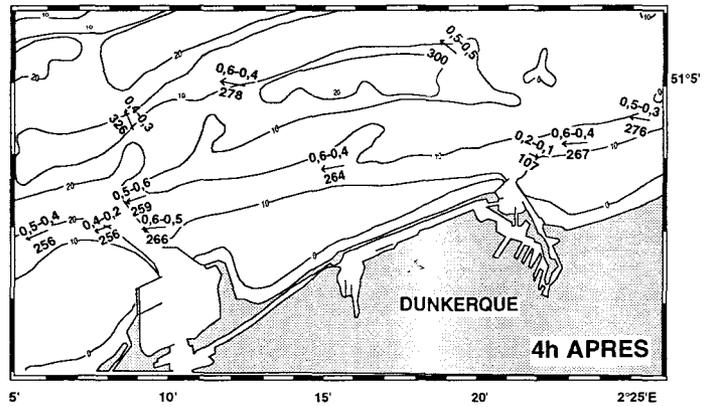
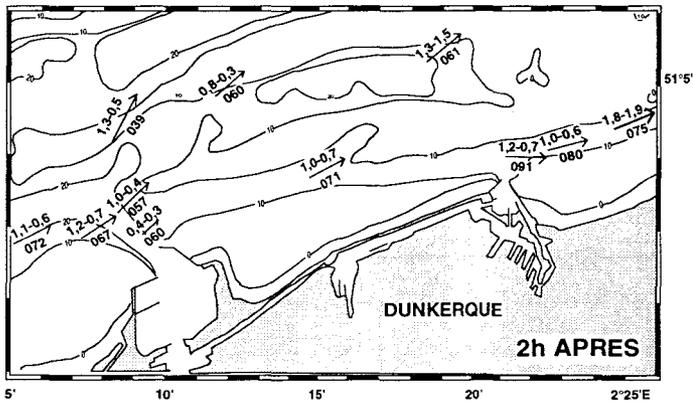
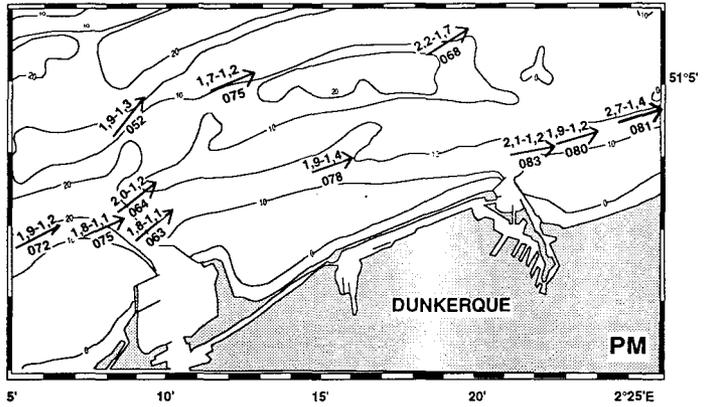
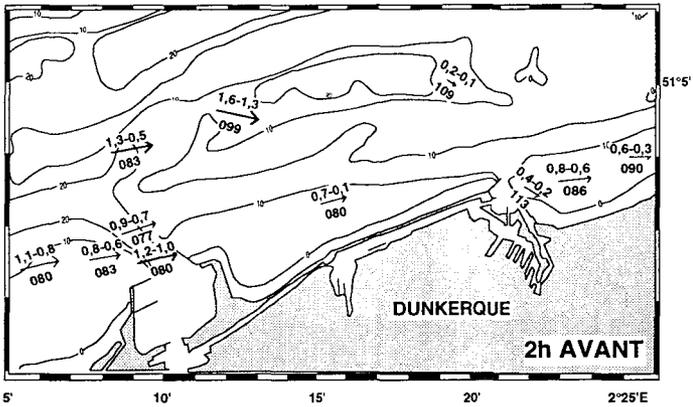
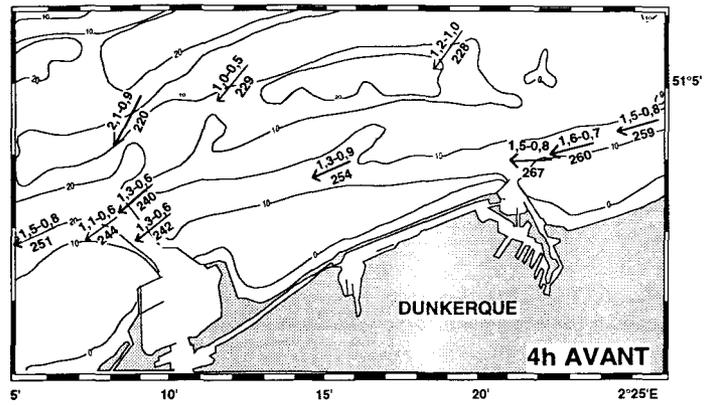
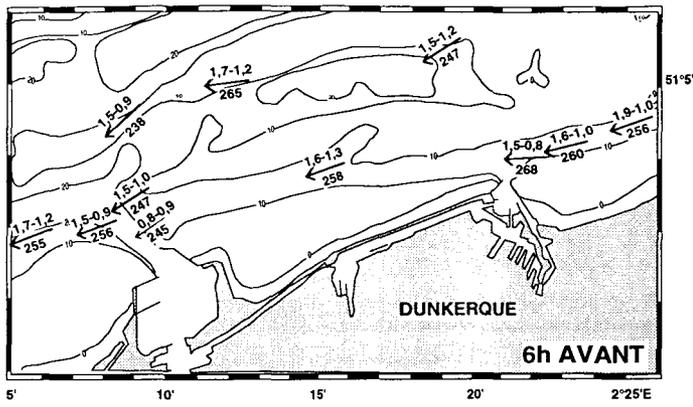
Les courbes de marée (fig. II-3) établies pour des coefficients de marée de 45, 70 et 95 sont dissymétriques (Bonnefille *et al.*, 1971). La marée montante est plus brève que la marée descendante.



**Figure II-3** : Courbe de la marée à Dunkerque pour des coefficients de 45, 70 et 95 (Bonnefille *et al.*, 1971).

#### *les courants de marée*

Les caractéristiques des courants de marée sont définies à partir des cartes de courant dans le Pas-de-Calais établies par le S.H.O.M. (1968, 1988), des résultats obtenus par Vicaire (1991), et des mesures effectués par le L.N.H. au cours de présente étude (Mancel, 1992).



**Figure II-4 : Les courants de marée aux abords de Dunkerque (d'après S.H.O.M., 1988).**

- Les cartes établies heure par heure par le S.H.O.M. (1988 ; fig II - 4) dans la région de Dunkerque montrent que les courants de marée alternatifs sont dirigés vers le **NE** ou **ENE** pour le **flot**, et vers le **SW** ou **WSW** pour le **jusant**. Les vitesses maximales de ces courants sont de **3 noeuds (env. 1,5 m/s)**. La vitesse du flot est supérieure à celle du jusant. Par ailleurs on constate que ces vitesses sont localement plus fortes à l'Est de Dunkerque. Enfin la direction des courants de marée est modifiée par les jetées du port Est de Dunkerque. Par exemple 4 heures après la pleine mer, les courants de marée sont dirigés vers l'ESE au niveau du port Est alors qu'ailleurs ils sont dirigés vers l'Est.

- Les mesures données par Vicaire (1991) ont permis d'établir un schéma général des courants de marée dans notre secteur d'étude (fig. II-5) et de confirmer les résultats précédents :

- Les mesures réalisées à trois mètres du fond entre les bancs du Breedt au Nord et les bancs du Snouw et du Braek au Sud, indiquent que pour un coefficient de marée de 95 les vitesses maximales sont de l'ordre de **80 à 100 cm/s pour le flot et 70 à 85 cm/s pour le jusant**. Le courant de **flot** porte en direction du **NE - Est** et le **jusant** vers le **SW - Ouest**.

- Les mesures réalisées entre les **bancs du Smal et du Hills** à 3 m du fond montrent des **vitesse maximale du flot et du jusant** respectivement voisines de **80 cm/s** et de **60 cm/s** pour des coefficients voisins de **70**.

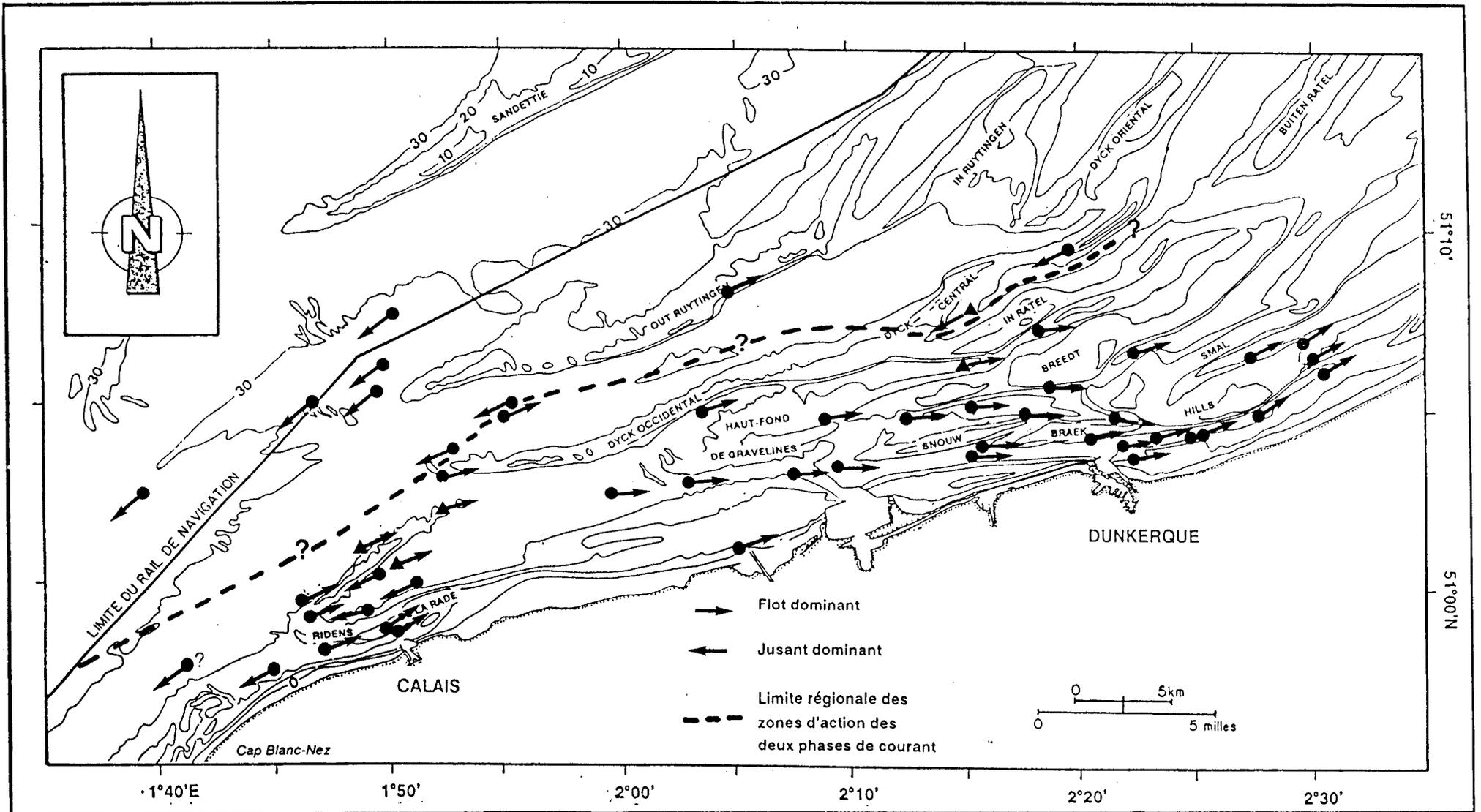
- Dans la Passe de Zuydcoote, les vitesses maximales en sub-surface au cours du **flot** varient de **43 à 75 cm/s** et au cours du **jusant** de **38 à 56 cm/s** pour des coefficients variant de 52 à 88.

- Dans le chenal de navigation les vitesses des courants de marée diminuent apparemment d'Ouest en Est :

*A l'Ouest de l'avant-port Ouest de Dunkerque*, la direction des courants de marée est comprise entre **N65° et N75°** pour le flot et entre **N250° et N255°** pour le jusant. En surface les vitesses maximales pour des coefficients moyens de 90 sont de **95 à 125 cm/s** pour le flot, et de **85 à 105** pour le jusant.

*Entre les deux ports*, le flot est la phase prépondérante. Il porte au **N55-65°** et le jusant au **N255-265°**. Les vitesses maximales du flot varient de **75 à 110 cm/s** et celles du jusant de **37 à 72 cm/s** pour des coefficients de 52 à 88. Ces vitesses sont plus élevées pour des coefficients de marée plus forts.

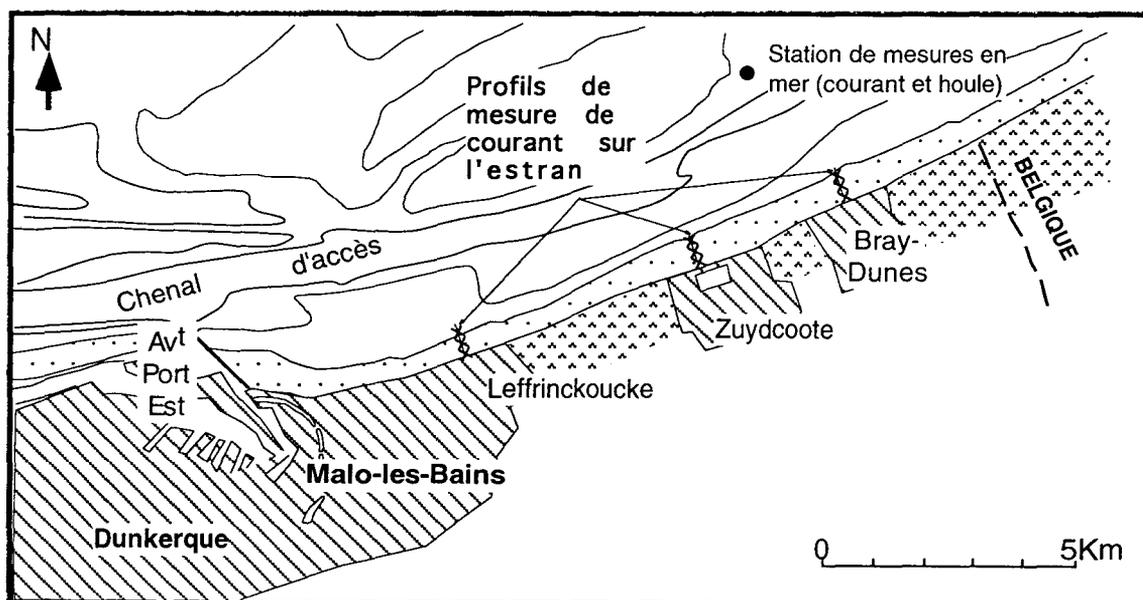
*A l'Est du port Est de Dunkerque*, pour des coefficients compris entre 40 et 89 les vitesses du **flot** sont de **53 à 104 cm/s** et de **57 à 96 cm/s** pour le **jusant**. La phase du jusant peut cependant être temporairement dominante grâce à des vents de NE de vitesse de 10 à 16 m/s.



**Figure II-5 :** Résultantes des courants de marée aux différents points de mesure et zones d'action dominante du flot et du jusant à l'échelle régionale (Vicaire, 1991)

La synthèse des enregistrements de surface réalisés dans le secteur d'étude montre que le flot est dominant ce qui favorise des transits sédimentaires orientés dans la direction de l'Est et du NE. Par ailleurs, à une échelle régionale les vitesses les plus élevées ont été observées au large de Calais et les vitesses les plus faibles à l'Est de Dunkerque, ce qui engendre un **gradient de vitesse décroissante d'Ouest en Est** et un **transit littoral tidal décroissant dirigé dans le même sens**.

- Dans le cadre de la présente étude les mesures de courant sur l'estran et en domaine marin réalisées par le L.N.H. (fig. II-6 ; Mancel, 1992) corroborent les résultats précédents.



**Figure II-6** : Position de la station de mesure en mer et des courantomètres installés sur l'estran (Mancel, 1992). A chaque site les courantomètres ont été mis successivement en haut, milieu et bas de plage.

- En domaine marin un courantographe a été immergé à la limite NE de la Passe de Zuydcoote par des fonds de 10 m environ. Les données recueillies montrent qu'en période de vive-eau les vitesses maximales sont de **1 m/s** et en période de morte-eau de **0,7 m/s**. Pour des coefficients compris entre 70 et 108 les vitesses moyennes sont de 0,7 m/s pour le courant de flot et de 0,5 m/s pour le courant de jusant (fig. II-7). Le flot porte vers le **NE** et le jusant vers le **SW**.

- Sur l'estran les mesures ont donné des résultats en accord avec les mesures du domaine marin. Les vitesses enregistrées sont toutefois plus faibles. La vitesse du flot est d'environ **0,70 m/s** et celle du courant de jusant de **0,40 m/s** (fig II - 8). Le flot porte vers l'**Est** et le jusant vers l'**Ouest** mais selon le coefficient de marée les courants sont soit alternatifs (coefficient inférieur à 70) soit giratoires (coefficient supérieur à 70).

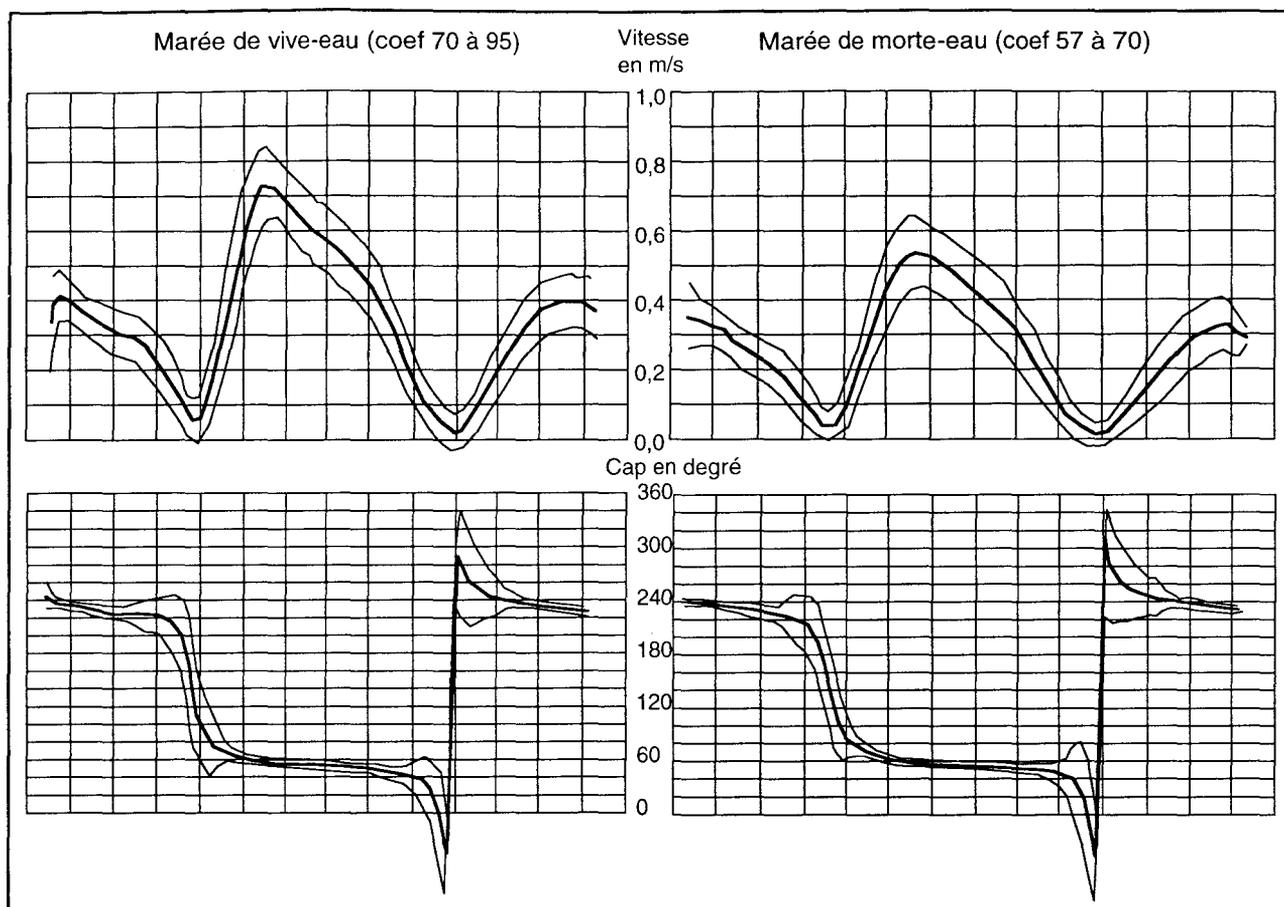


Figure II-7 : Courant de marée (vitesse et direction) au large de Bray-Dunes (Mancel, 1992)

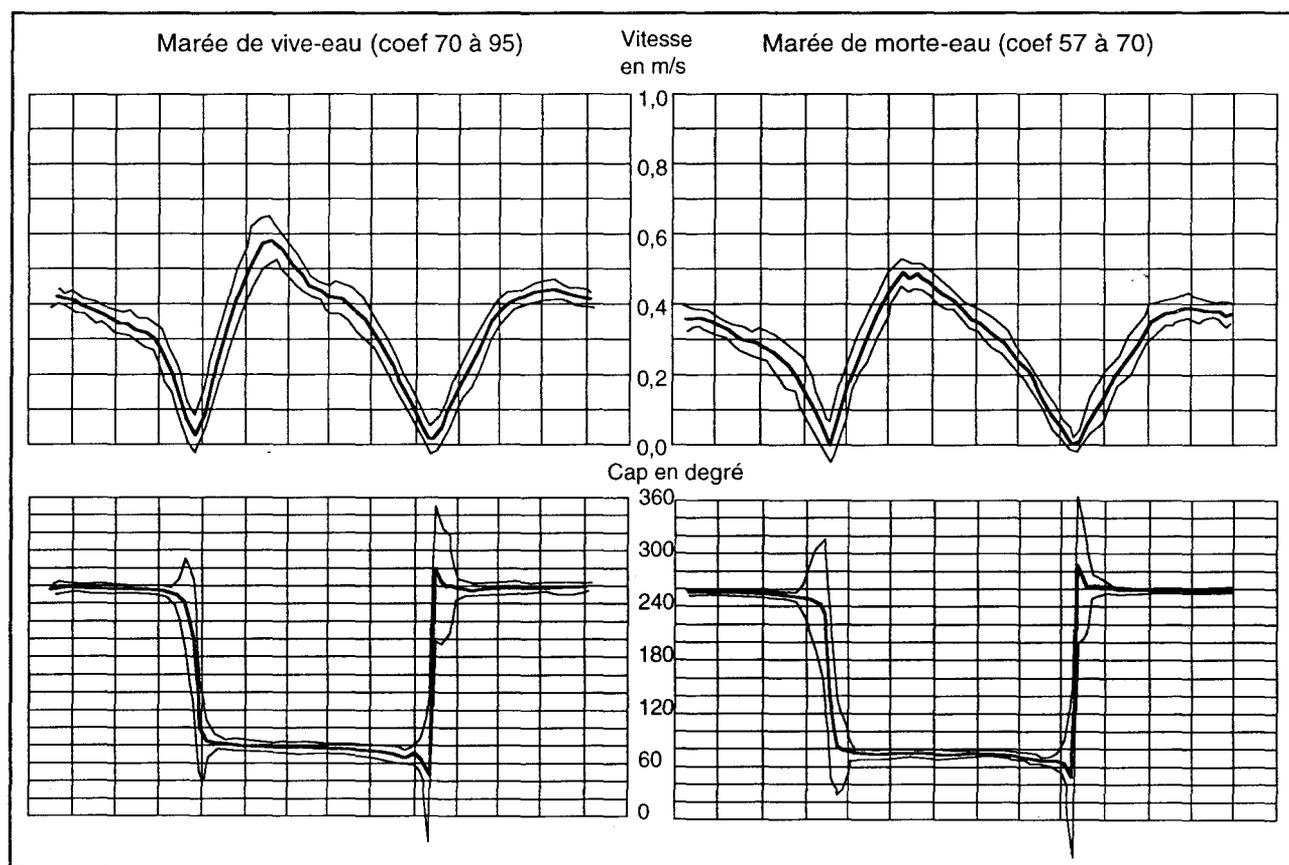


Figure II -8 : Courant de marée (vitesse et direction) sur l'estran de Malo-treminus (Mancel, 1992)

## II - 3 - LE VENT

Les vents jouent un rôle significatif sur la dynamique sédimentaire des littoraux en général (voir encadré II-2). Comme nous allons le voir maintenant, ils constituent un facteur dynamique primordial sur le littoral dunkerquois.

### Généralités sur le vent

Encadré II-2

d'après (Weber, 1978 et 1989; Davis, 1985 ; Froidefond, 1985 ; Despeyroux, 1989).

D'une manière très générale, l'**établissement du vent** est dû à un mouvement de l'air d'une zone de basse pression vers une zone de haute pression. Ce mouvement est dévié par la force de Coriolis (Froidefond, 1985). La vitesse du vent est d'autant plus forte que la différence de pression est élevée et que la distance entre les deux zones de pression est faible.

Le vent agit de deux façons sur le transport des sédiments indirectement et directement :

- **Indirectement** le vent engendre au large une houle appelée "**mer de vent**". La surface de génération des houles s'appelle le "**fetch**". A la côte il modifie localement la houle et crée des **courants de surface côtier** quand il souffle de façon durable dans une direction donnée.

Il peut **renforcer un courant de marée** au détriment de l'autre.

Il entraîne des **surcôtes** ou des **décôtes** par rapport aux hauteurs de marées prédites (Clique, 1986). Les vents violents engendrent sous certaines conditions des marées de tempête caractérisées par des surcôtes importantes. A ces phénomènes sont souvent associés des érosions considérables de la plage et de l'arrière-plage. Les dépôts qui en résultent sont constitués de "wind tidal flat" (sédiments des marais tidaux) ou des "washover fan" (lobes de débordements).

- **Directement**, il agit sur le transport des sédiments fins dans la zone émergée (**déflation éolienne**). Ce sont les dunes littorales qui témoignent de l'importance directe du vent. Le vent est en effet capable de mettre en mouvement du sable par déferlement, de le transporter sur des distances plus ou moins grandes et de le redéposer. Ainsi en période de tempête il provoque l'érosion du pied de dune et du haut de plage alors qu'en période de temps calme il favorise l'engraissement du pied de dune et du haut de plage (Carter & Hesp, 1990 ; Carter & Wilson, 1993, Burkinshaw, 1993 ; fig. II-9). Cette alternance de phénomène d'érosion et de sédimentation constitue un cycle saisonnier qui s'équilibre. Toutefois les vents les plus violents peuvent avoir des conséquences irréversibles sur un site.

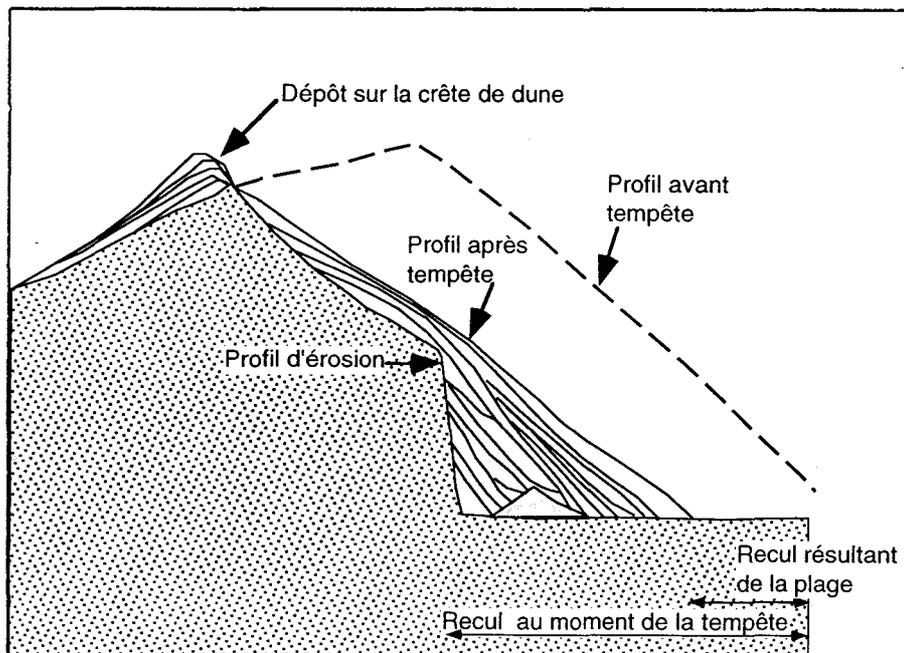


Figure II-9 : Effet du vent sur le système dunaire en période de tempête (d'après Carter & Wilson, 1993).

## Le régime des vents à Dunkerque

Sur le littoral dunkerquois, les vents dominants sont de secteurs **SW** et **NE** (Bonnefille *et al.*, 1971 ; fig. II-10). Ces deux directions de vent sont en rapport direct avec l'axe du détroit du Pas-de-Calais qui canalise ces vents (Vicaire, 1991).

Les vents frontaux susceptibles d'attaquer le littoral, c'est-à-dire de secteur NW à NE, soufflent principalement pendant le printemps alors que pendant les autres saisons, les vents sont principalement de secteur W à SW.

Une étude portant sur les vents de vitesse supérieure à 100 km/h (données de 1961 à 1994 de Météo France) révèle que ces vents violents sont principalement de secteur SW à NW et soufflent principalement en hiver (fig. II-11).

Les données relatives à la période de notre étude (données fournies par Météo France, 1990 à 1994 ; fig. II-12) indiquent que :

- Les vents dominants sont de secteur **S à SW** et de **N à NE**,
- Le régime des vents est variable d'une année à l'autre,
- **25%** des vents sont de vitesse **supérieure à 8 m/s**.

Par ailleurs, dans le cadre de cette étude, des mesures de transport éolien à partir des pièges à sédiment ont permis de réaliser quelques mesures ponctuelles (Corbau *et al.*, 1995). Ces pièges sont semblables à ceux utilisés par Jones & Willet (1979), Cherbonnier *et al.* (1985) et Froidefond & Prud'homme (1991). Ils sont de type 'tirelire' et permettent de collecter les grains provenant d'une direction déterminée et se déplaçant par reptation et saltation. Ces mesures permettent d'évaluer l'importance du facteur éolien dans la dynamique du site. Dans le cadre de la présente étude ils ont été installés soit dans le massif dunaire (sommet d'une dune, siffle-vent) soit en haut de plage.

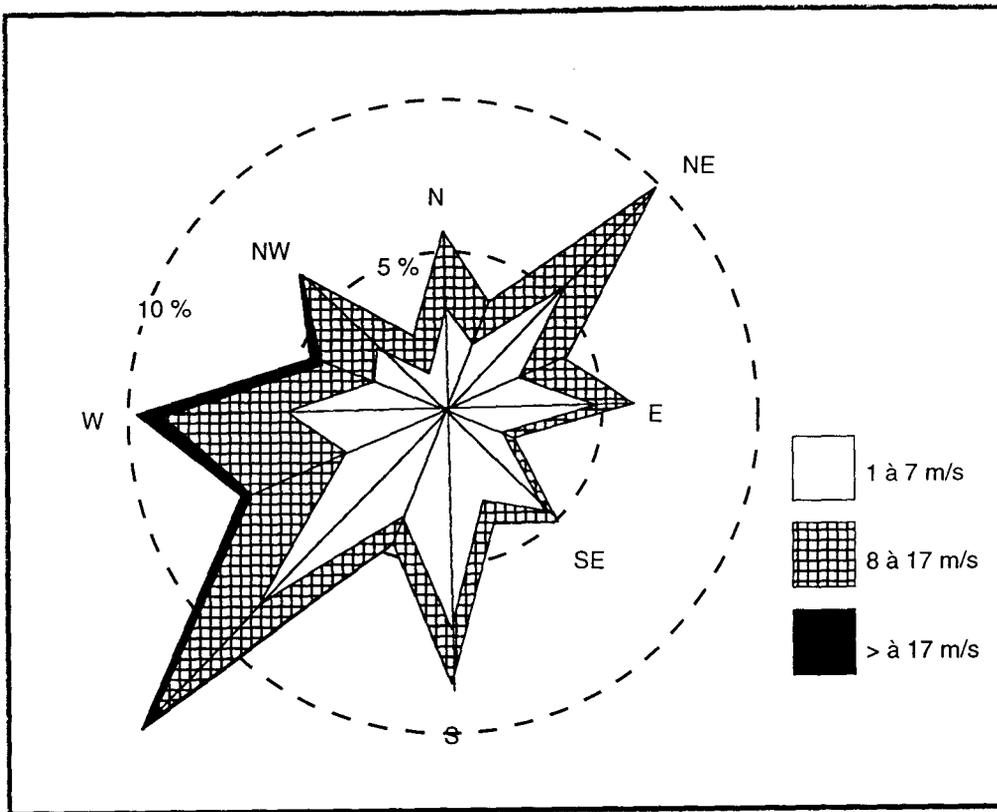


Figure II-10 : Rose des vents de 1951 - 1960 (d'après Bonnefille *et al.*, 1971)

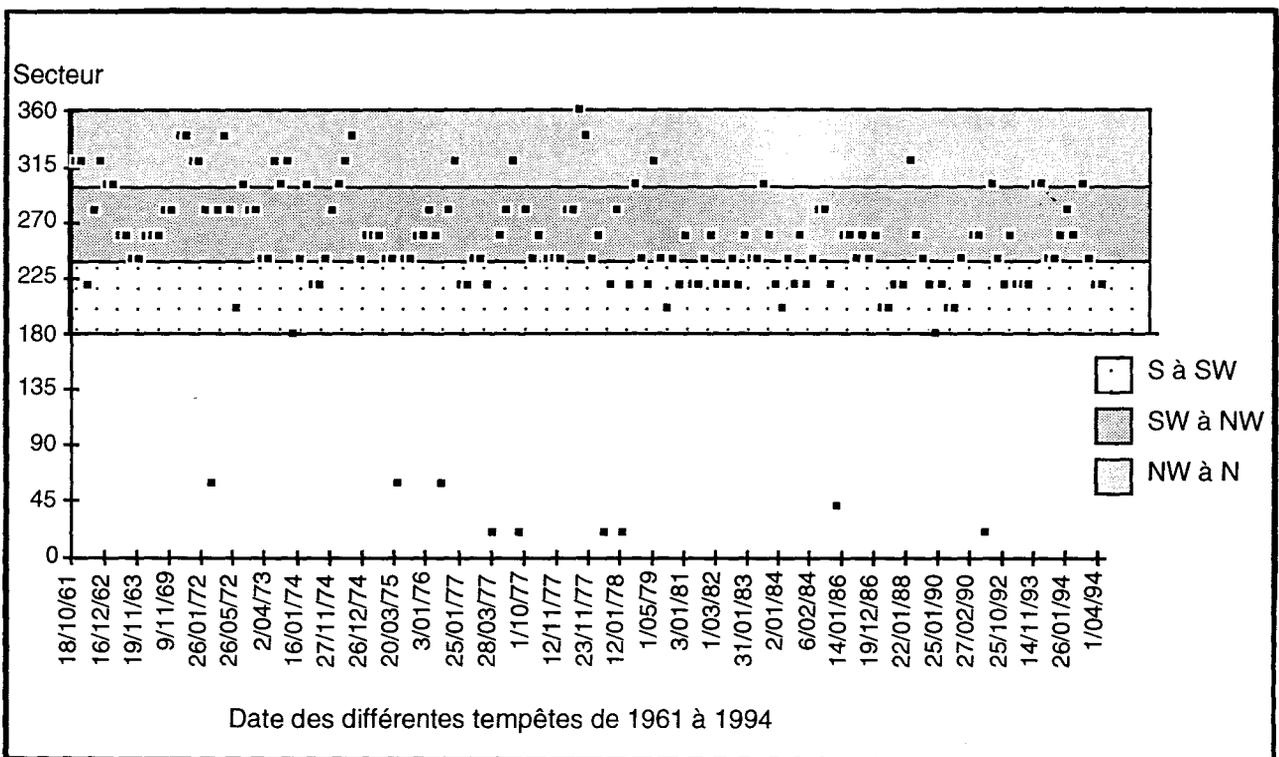
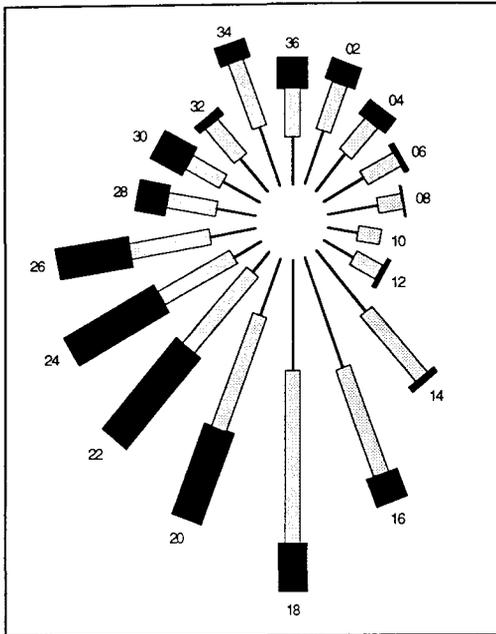
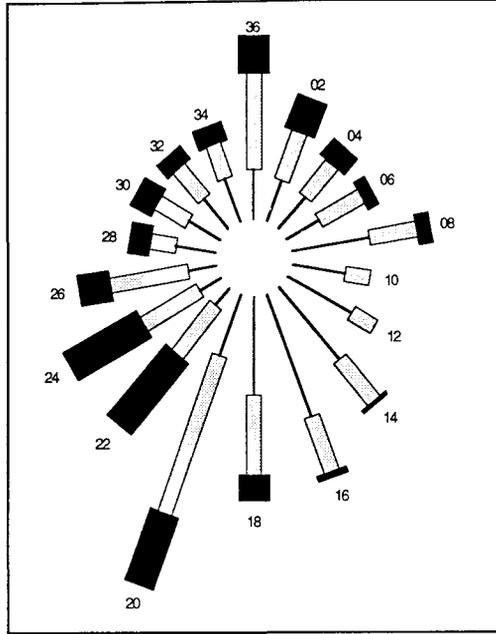


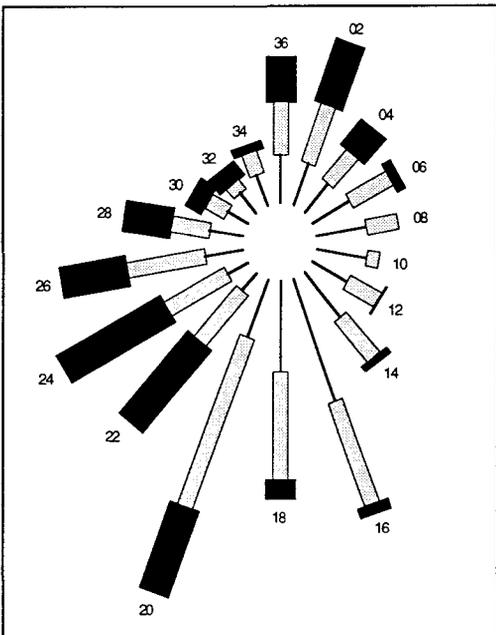
Figure II-11 : Secteurs des différentes tempêtes depuis 1961 (d'après les données de Météo France).



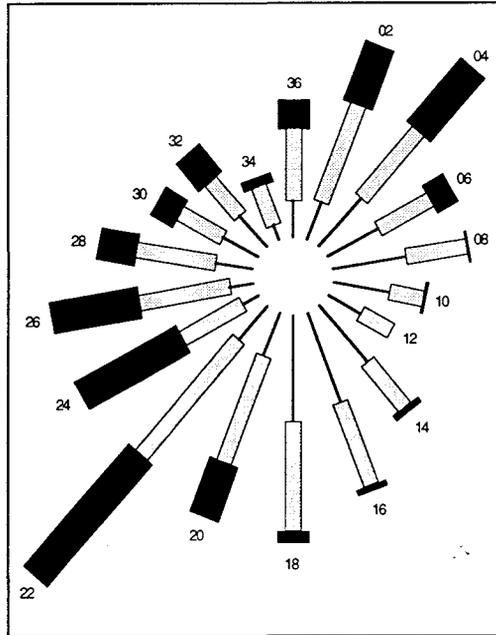
1990



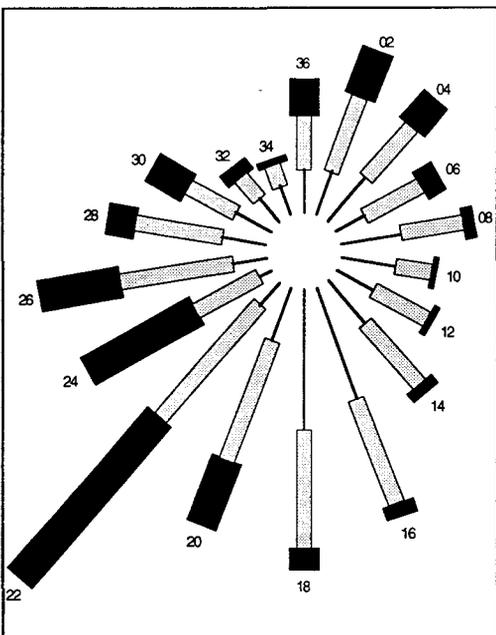
1991



1992



1993



1994

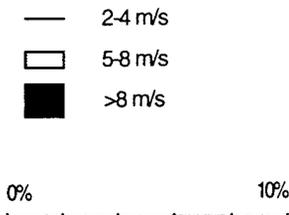


Figure II-12: Roses des vents de 1990 à 1994 à Dunkerque (données fournies par Météo France)

Le transit éolien n'est permanent que sur la partie émergée de la plage lorsque le vent excède toutefois la vitesse critique de mise en mouvement des particules. Les résultats indiquent que les vents de secteur WSW et plus particulièrement NW ont une action importante en domaine émergé et provoquent un débit éolien important (fig. II-13). Par exemple un vent de secteur NW et de vitesse 20 m/s engendre un débit éolien de l'ordre de 20 dm<sup>3</sup>/heure. A l'inverse, la dune bordière et le haut de plage sont protégés des vents de secteur SE, les débits éoliens mesurés sont très faibles (inférieurs à 1 dm<sup>3</sup>/heure pour des vents de 10 m/s et de secteur SE).

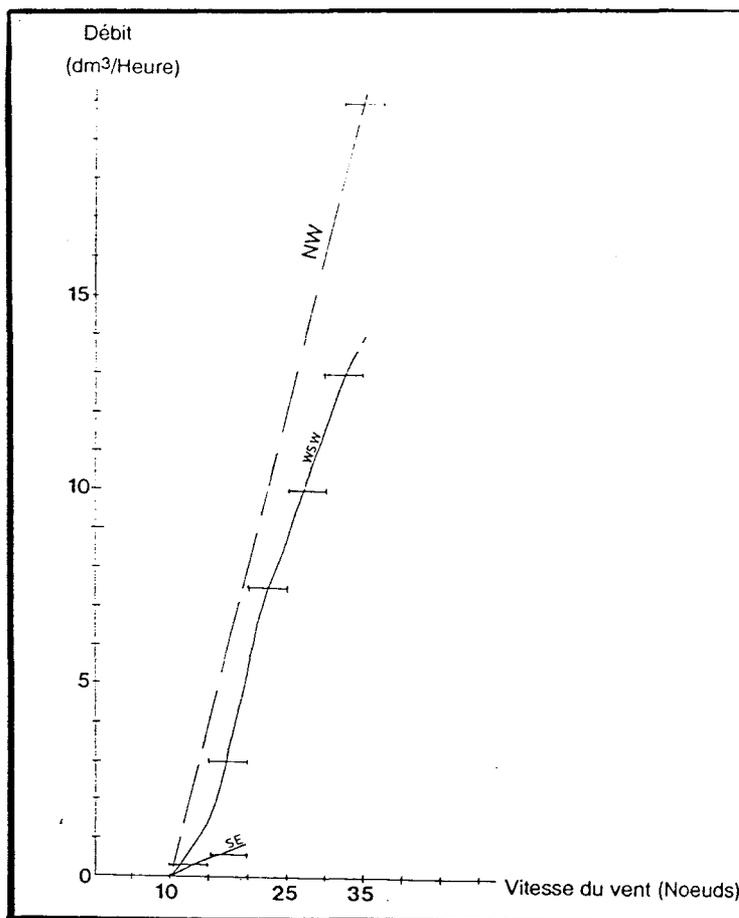


Figure II-13 : Courbes de variation du débit éolien sédimentaire (Corbau *et al.*, 1995).

## II - 3 - LA HOULE

En domaine côtier la houle est capable de remobiliser des stocks importants de sédiment et de générer des courants dont l'action sur la dynamique sédimentaire du site peut-être déterminante.

### Généralités sur la houle

Encadré II-3

d'après Ottmann, 1965 ; Lacombe, 1971 ; King, 1972 ; Lepetit, 1977 ; Guilcher, 1979 ; Brown *et al.* 1989 ; Bonnefille, 1992.

La **houle** est un mouvement ondulatoire que subit la surface de la mer sous l'influence directe du vent. Elle se caractérise par sa **longueur d'onde** ( $\lambda$ ), son **amplitude** (a), sa **période** (T) sa **célérité** (c), sa **direction de propagation** et sa **cambrure** (H/L avec H profondeur; fig. II-14). La direction de propagation est définie par des perpendiculaires aux crêtes de vagues dites **orthogonales**.

En eau profonde, c'est-à-dire quand la profondeur (H) est supérieure à la moitié de la longueur d'onde de la houle ( $\lambda$ ), l'**onde est dite progressive** et les particules décrivent un mouvement circulaire (fig. II-15). Les particules oscillent alors autour d'une position d'équilibre et il n'y a pas de transport général de l'eau. Seule se propage la déformation de la surface de l'eau.

Quand la profondeur d'eau diminue le mouvement des particules sur le fond devient elliptique. Les particules ont alors un mouvement alternatif.

A l'approche des côtes la houle est soumise à des déformations telles que la réfraction. La **réfraction** est provoquée par la morphologie des fonds marins ou la présence de courants qui modifient la provenance et la hauteur de la houle. La diminution de la profondeur provoque le pivotement de la houle et son gonflement (ou augmentation de son amplitude) jusqu'au moment où sa cambrure devient trop forte ce qui provoque son **déferlement**. Le déferlement s'accompagne d'une forte turbulence et d'une dissipation partielle de l'énergie de la houle.

On distingue quatre types de déferlement (fig. II-16) :

- Le déferlement glissant ou déversant (spilling breaker) a lieu principalement dans le cas d'une pente faible lorsque la cambrure est importante. L'eau coule en mouvement turbulent sur la face avant de la vague et l'énergie se dissipe progressivement.

- Le déferlement plongeant ou en volute (plunging breaker) se rencontre principalement dans le cas d'une pente de plage assez forte quand la houle est régulière et modérément cambrée. La crête plonge en avant de la lame et engendre un rouleau. L'énergie de la houle se dissipe sur une petite distance.

- Le déferlement à dégonflement (collapsing breaker) est comparable au déferlement plongeant mais au lieu que la crête de la vague s'enroule pour déferler c'est la face avant de la vague qui s'effondre. La cambrure des houles est intermédiaire et la pente modérée.

- Le déferlement frontal ou gonflant (surging breaker) s'observe dans le cas d'une pente forte quand la houle est longue. Une écume apparaît à mi-hauteur de la vague.

Le déferlement provoque un mouvement d'eau violent vers l'avant (uprush) compensé par un mouvement de retour (back wash). Ces deux mouvements opposés s'opèrent dans une zone dite zone de **jet de rive** ou de **swash**.

Lors de sa propagation vers la côte la houle peut rencontrer des obstacles (bancs, jetées ..) sur lesquels elle se réfléchit et qu'elle contourne par **diffraction**. La **réflexion** provoque un clapotis où l'agitation est plus forte que celle de la houle incidente. La diffraction représente un transfert d'énergie à travers les orthogonales de houle, des zones agitées vers les zones calmes.

La houle engendre des courants (fig II - 17), perpendiculaires ou parallèles à la côte, capables de transporter les sédiments soit par charriage soit par suspension :

- **Perpendiculairement** à la côte, ils assurent un transport vers la côte (**courant de masse**) ou vers le large (**courant de retour**). Par suite du déferlement des masses d'eau s'accumulent le long des côtes puis retournent vers le large sous forme d'un courant proche du fond dit **courant d'undertow**. Les **rip-currents** quant à eux sont des courants de refente dirigés vers le large qui assurent en surface le retour des eaux superficielles poussées à la côte. Ils se concentrent dans une zone étroite et sont espacés de façon régulière. La localisation de ces courants est liée à la topographie de la plage. Ils prennent naissance au point où l'amplitude la houle est la plus faible.

- Lorsque l'incidence de la houle est oblique au rivage, la houle engendre un courant côtier et un transport sédimentaire résultant parallèle à la côte dans la direction de propagation de la houle. Ce courant est appelé **dérive littorale**. Ce courant est un des facteurs les plus importants de transport des sédiments sur les côtes.

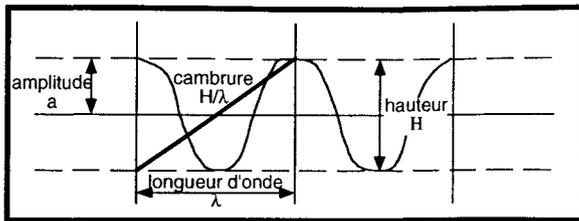


Figure II-14: Définition des paramètres de la houle (d'après Brown *et al.*, 1988).

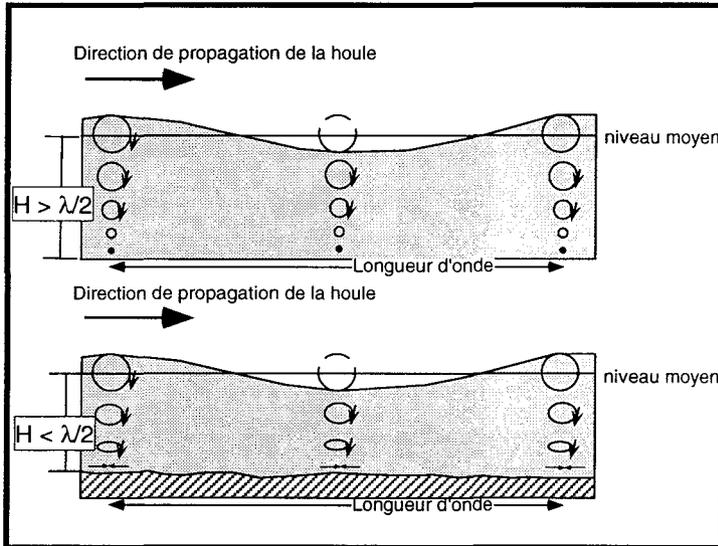


Figure II-15 : Propagation de la houle (a : en eau profonde, b : en eau peu profonde, d'après Lepetit, 1977)

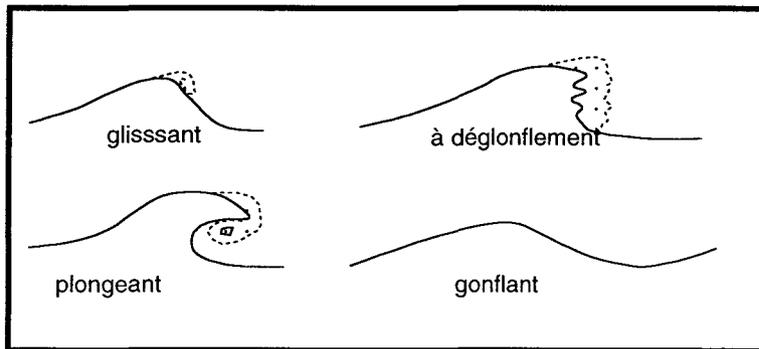


Figure II-16 : Les principaux types de déferlement (d'après Brown *et al.*, 1988).

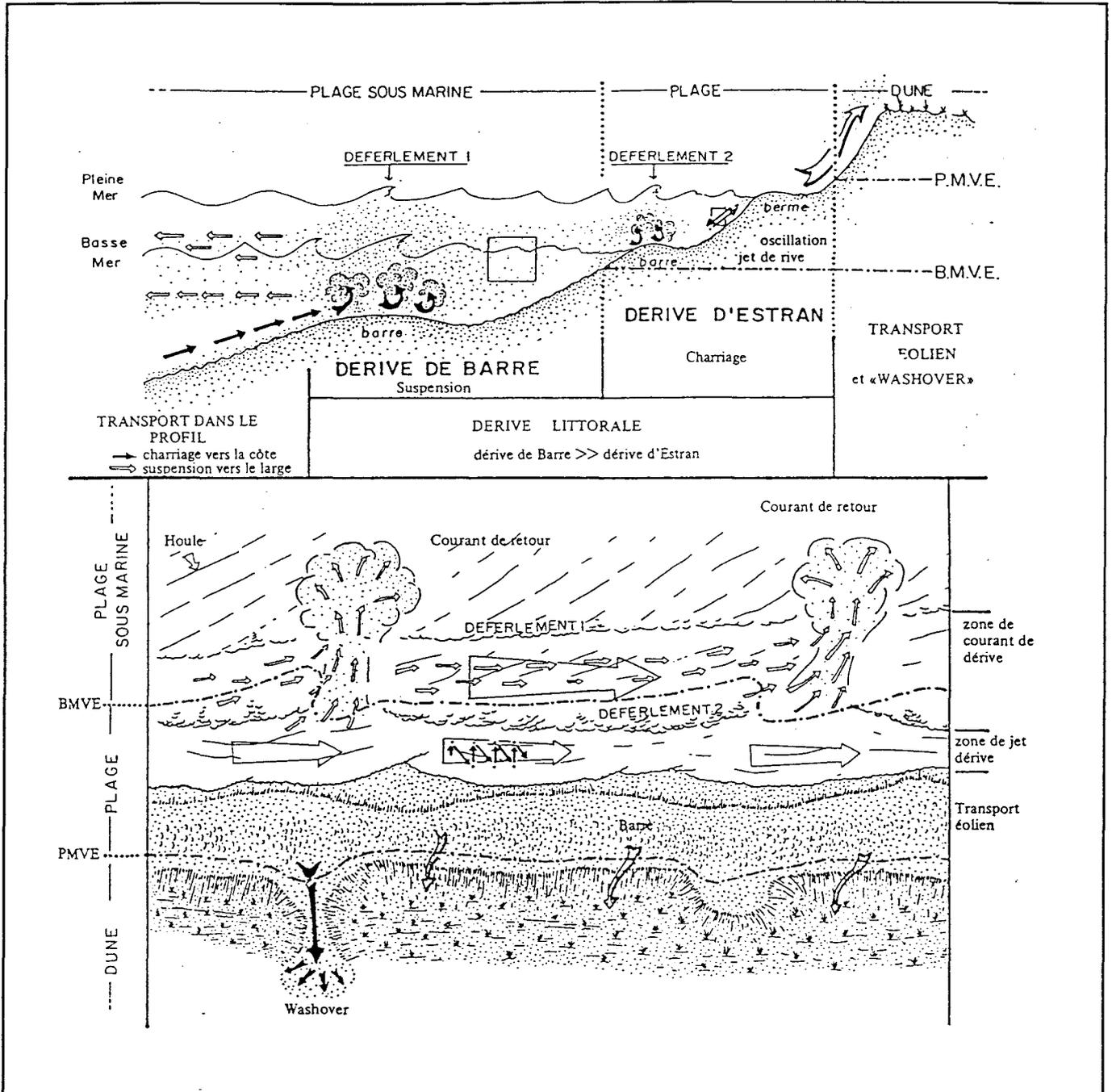


Figure II-17 : Les principaux courants engendrés par la houle (Weber, 1989)

## La houle à Dunkerque

Les données de houle à Dunkerque proviennent d'une étude faite par le L.N.H. en 1971 pour la construction de l'avant-port Ouest de Dunkerque (Bonnefille *et al.*, 1971), d'une synthèse des observations de houle et de mer du vent fournies par la Section de Climatologie Marine du Service Central d'Exploitation de la Météorologie Nationale (Clabaut, 1991), et des mesures réalisées par le LNH dans le cadre de cette étude (Mancel, 1993). Enfin des modèles de propagation de la houle ont été réalisés avec le code RECIF du L.N.H. (Dhellemmes, 1989) qui tient compte des phénomènes de réfraction et de diffraction de la houle (Peltier & Le Saux., 1992).

### *Synthèse générale des données anciennes*

#### Au large, à l'Ouest du littoral dunkerquois :

- les houles les plus fréquentes sont de secteur **NNE** (26 %) à **N** (16%) et de **SSW** (10%) à **WSW** (16%) ;
- les périodes sont le plus souvent inférieures ou égales à **5 s** ou de l'ordre de **6 à 7 s** (tab. II-2). Des périodes de 14 à 15 s ont parfois été observées ;
- l'amplitude moyenne des houles est de **1 à 1,5 m** mais peut atteindre 2 à 2,5 m (11,6 %) et 4 à 5,5 m (10%).

Période	Amplitude	Fréquence	Saison
14 à 15 s	1,5 m	10 - 14 % 4 - 9 %	hiver été
8 à 9 s	4 à 5,5 m	0 à 0,7 %	hiver
6 à 7 s	3 à 3,5 m	0 à 5 %	hiver
≤ à 5 s	1 à 1,5 m	40 à 47 %	toute l'année

**Tableau II-2** : Caractéristiques de la houle au large dans le secteur Ouest du site.

#### A la côte :

- Les houles de secteur **N** (42 %) et de secteur **NW** (18 %) prédominent (fig. II-18). La différence avec les houles du large s'explique par les modifications importantes des houles au cours de leur propagation vers la côte notamment en raison de la présence des bancs sableux sub-émergeants.
- Les houles décennales sont en moyenne de **5,7 m** d'amplitude et les houles centennales de **7,4 m**.

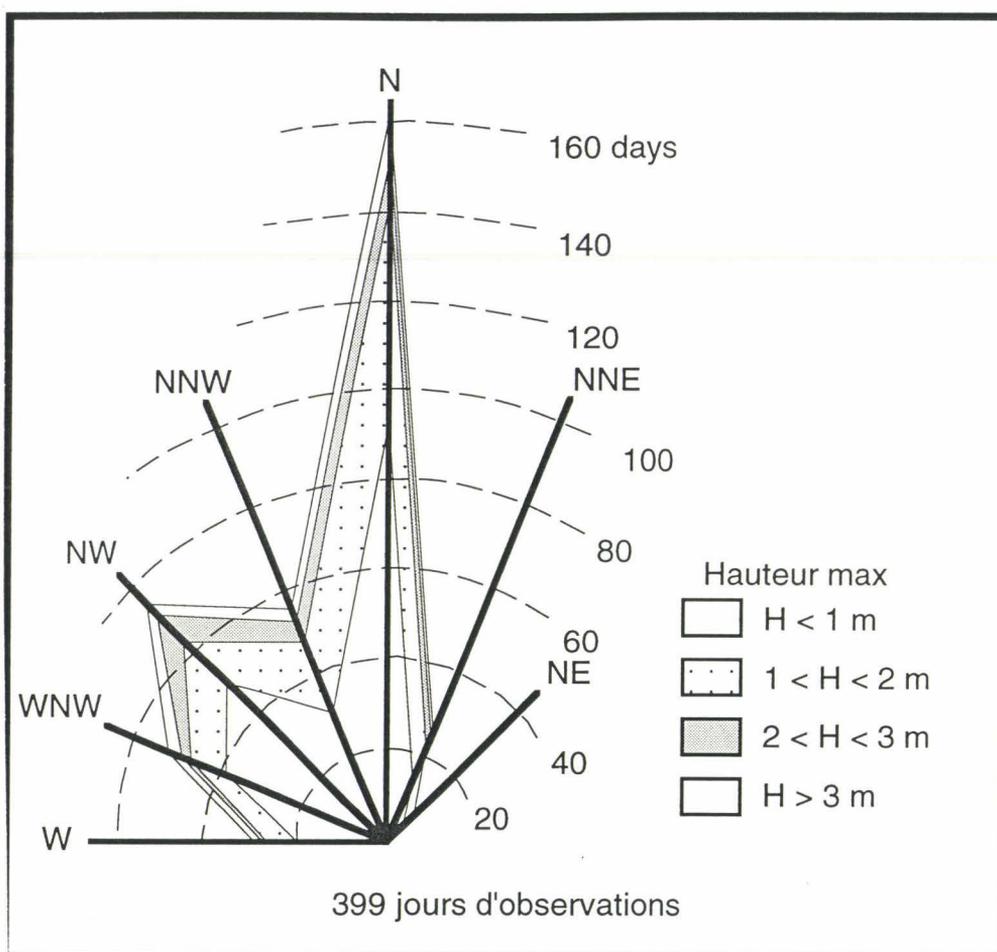


Figure II-18 : Rose des houles sur la plage de Dunkerque (Bonnefille *et al.*, 1971).

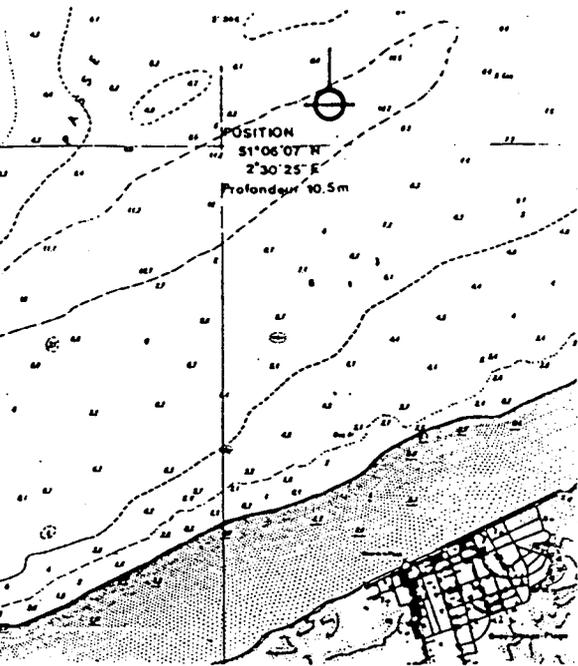
#### Données générales acquises pendant l'étude

Des mesures de houle entre novembre 1991 et juin 1993 (469 jours d'observations) ont été réalisées à l'aide d'une bouée houlométrique DATAWELL mouillée au large de Bray-Dunes. Les analyses ont été effectuées et interprétées par le Laboratoire National d'Hydraulique d'E.D.F.. Ces résultats montrent que (fig. II-19):

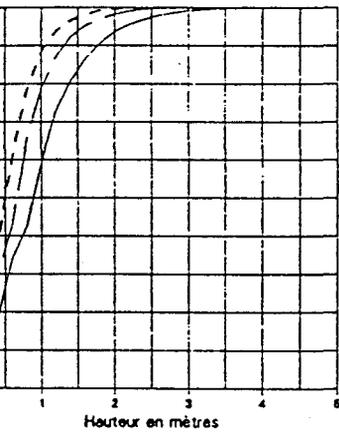
- La houle est principalement de **secteur W** (54 %) ;
- La **période** est généralement comprise entre **3 et 4 s** ;
- L'**amplitude** de la houle est le plus souvent **supérieure à 0,5 m** (70 %) ;
- La houle annuelle a été estimée à **2,60 m** (2,40 à 2,90 m) et la houle décennale à **3,20 m** (2,90 m à 3,60 m) ;

La comparaison de ces résultats avec les données anciennes de Bonnefille *et al.* (1971 ; fig. II-20) acquises à l'Ouest de Dunkerque indique que les amplitudes de houle sont comparables mais les périodes sont plus faibles à l'Est de Dunkerque (4s contre 8s). Cette différence est vraisemblablement liée à la morphologie des fonds marins qui modifie les caractéristiques de la houle.

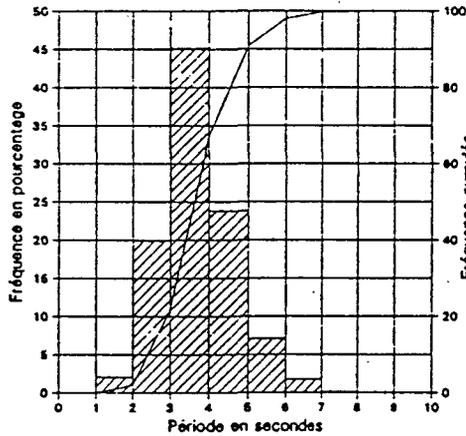
PERIODE DU 19.11.91 AU 08.06.93  
 469 JOURS D OBSERVATION - 5 JOURS DE CALME PLAT ( $H_{\text{moy}} < 0.05 \text{ M}$ )  
 PERIODES ANALYSEES



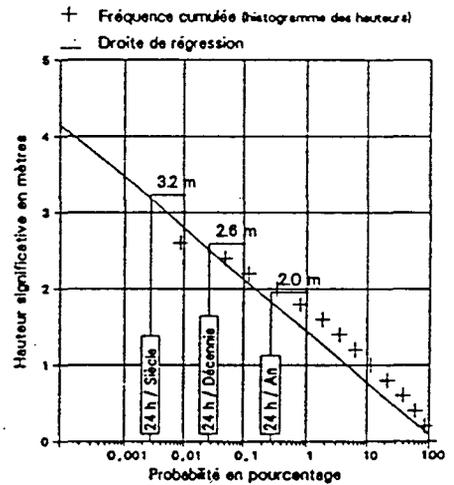
19.11.91 au 20.11.91	03.12.92 au 10.01.93
28.11.91 au 07.12.91	19.01.93 au 12.02.93
09.12.91 au 23.01.92	13.02.93 au 06.04.93
23.01.92 au 24.03.92	06.04.93 au 03.06.93
24.03.92 au 03.06.92	03.06.93 au 08.06.93
04.06.92 au 05.09.92	
08.09.92 au 19.09.92	



FRÉQUENCE DES HAUTEURS

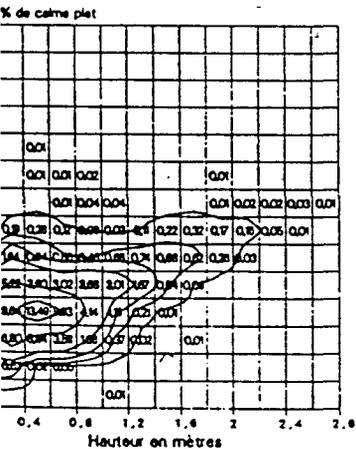


HISTOGRAMME DE LA PERIODE SIGNIFICATIVE  $T_{1/3}$

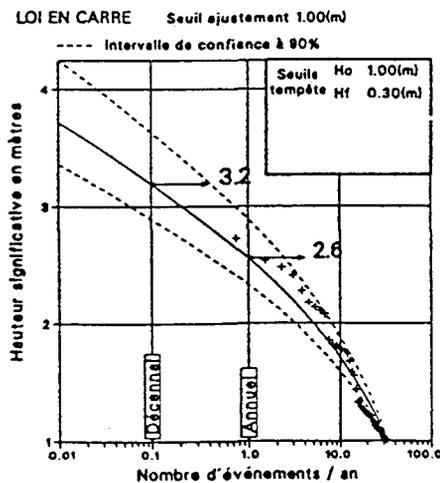


EXTRAPOLATION DE LA DUREE CUMULEE DE DEPASSEMENT

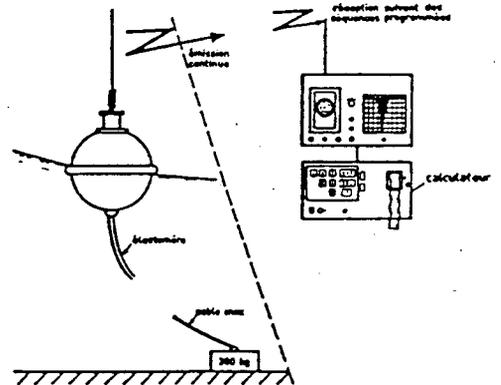
-----  $H_0$  -----



RELATION HAUTEUR PERIODE DES VAGUES SIGNIFICATIVES



ESTIMATION DES HOULES ANNUELLE ET DECENNALE



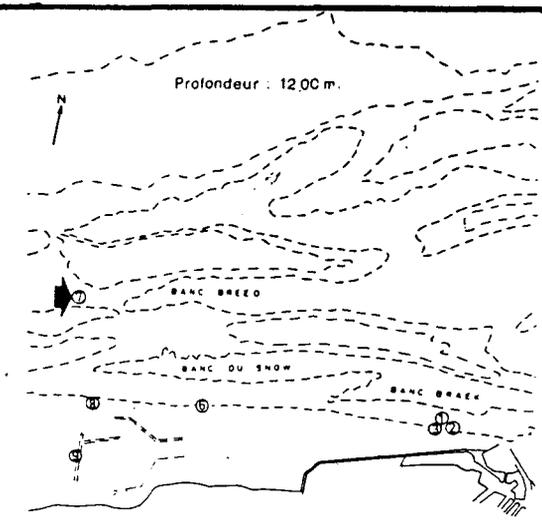
Dépouillement par la méthode du "passage à zéro par valeurs croissantes" (up zero crossing)

- $H_{\text{max}}$  = plus forte hauteur de l'enregistrement
- $H_{\text{sig}}$  ou  $H_{1/3}$  = moyenne des 33% plus fortes hauteurs
- $T_{\text{sig}}$  ou  $T_{1/3}$  = moyenne des périodes des vagues prises en compte pour le calcul de  $H_{\text{sig}}$

Méthode d'enregistrement et de dépouillement

Figure II-19 : Statistiques de la houle mesurée à Dunkerque Est (Mancel, 1992)

La confiance à accorder à ces résultats dépend du nombre de jours de mesure, ainsi que de leur répartition saisonnière.



PERIODE DU 3- 3-66 AU 6- 1-68  
 318 JOURS D OBSERVATION - 36 JOURS DE CALME PLAT ( $H_{max} < 0.25m$ )  
 PERIODES ANALYSEES

3- 3-66 AU 1- 4-66	31- 1-67 AU 10- 3-67
17- 8-66 AU 1- 9-66	31- 3-67 AU 16- 5-67
6-10-66 AU 10-11-66	16- 5-67 AU 22- 5-67
23-11-66 AU 23-12-66	3- 7-67 AU 12- 8-67
24-12-66 AU 27-12-66	24-10-67 AU 6- 1-68

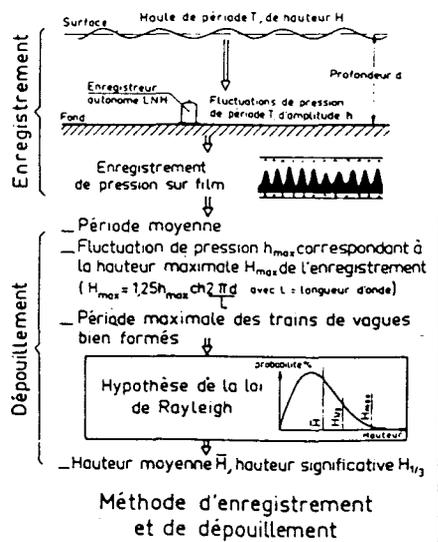
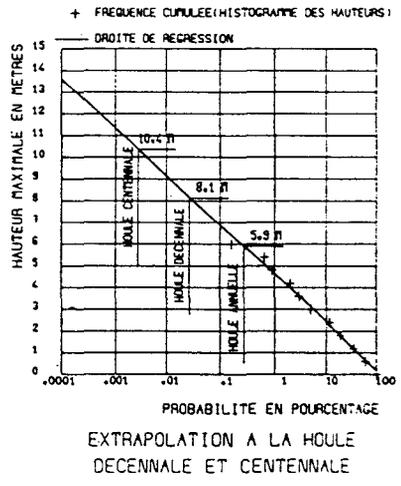
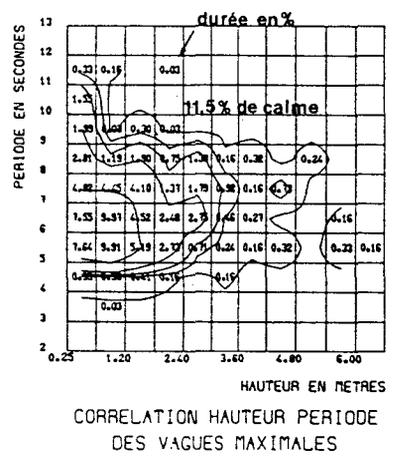
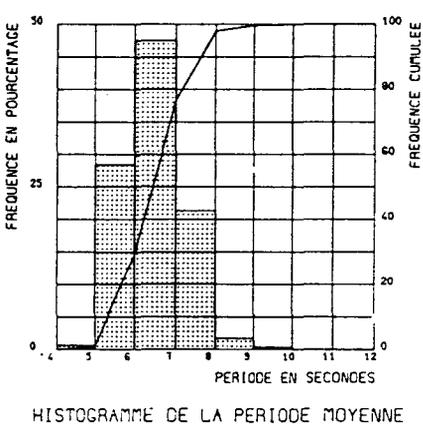
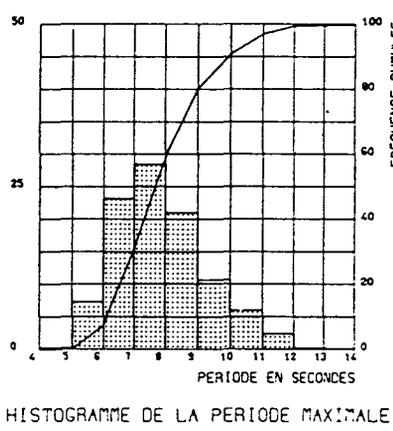
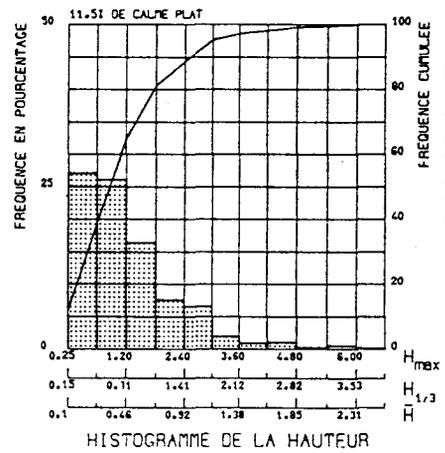


Figure II-20 : Statistiques de la houle mesurée à l'Ouest de Dunkerque (Bonnetillb et al, 1971)

### Modèle de propagation de la houle

La réfraction de la houle sur les fonds marins de Dunkerque engendre des zones de concentration d'énergie, comparables à celles observées au niveau d'un cap, et des zones de dissipation de l'énergie comme celles observées au niveau d'une baie (Ottmann, 1965 ; Brown *et al.*, 1988,). Des modèles simples de propagation de la houle peuvent être réalisés manuellement (Berthois, 1954). Cependant la complexité de la morphologie des fonds marins au large de Dunkerque empêche la réalisation manuelle de tels modèles en raison de la convergence et la divergence des orthogonales impliquant des transferts d'énergie.

Le Laboratoire National d'Hydraulique a développé des programmes (RECIF et REFRAC) qui tiennent compte de ces problèmes. La propagation de la houle vers la côte a été calculée avec le code de calcul RECIF (Dhellemmes, 1989 ; Peltier & Le Saux, 1992). Ces calculs ont été réalisés pour trois directions principales de houle incidente : WSW, NNW et NNE (tab. II-3 et fig. II-21).

Provenance au large	Observations
WSW (H : 1 m)	La houle s'affaiblit sur l'ensemble du littoral et notamment sur la plage.
NNW (H : 1 m)	La houle se concentre à Malo-les-Bains et à Bray-Dunes.
NNE (H : 1m)	La houle se concentre à Malo-les-Bains et à Bray-Dunes. Entre ces deux sites les houles sont nettement atténuées.
NNE (H : 4m)	Les résultats sont identiques aux précédents.

**Tableau II-3** : Principaux résultats obtenus par le calcul RECIF (Peltier & Le Saux, 1992)

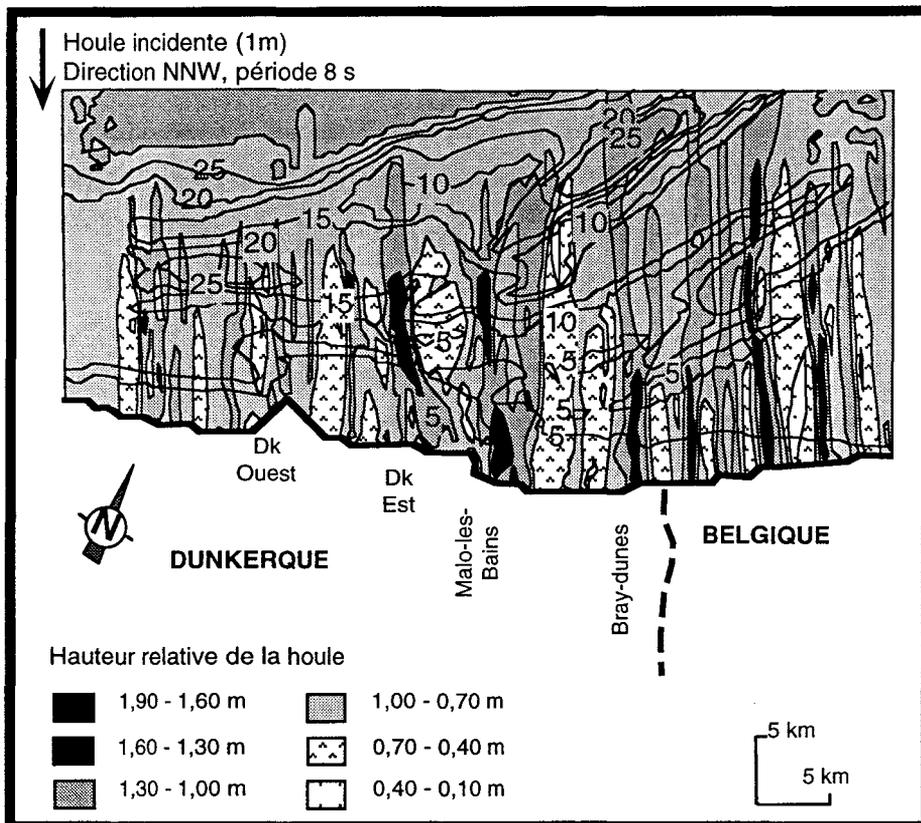
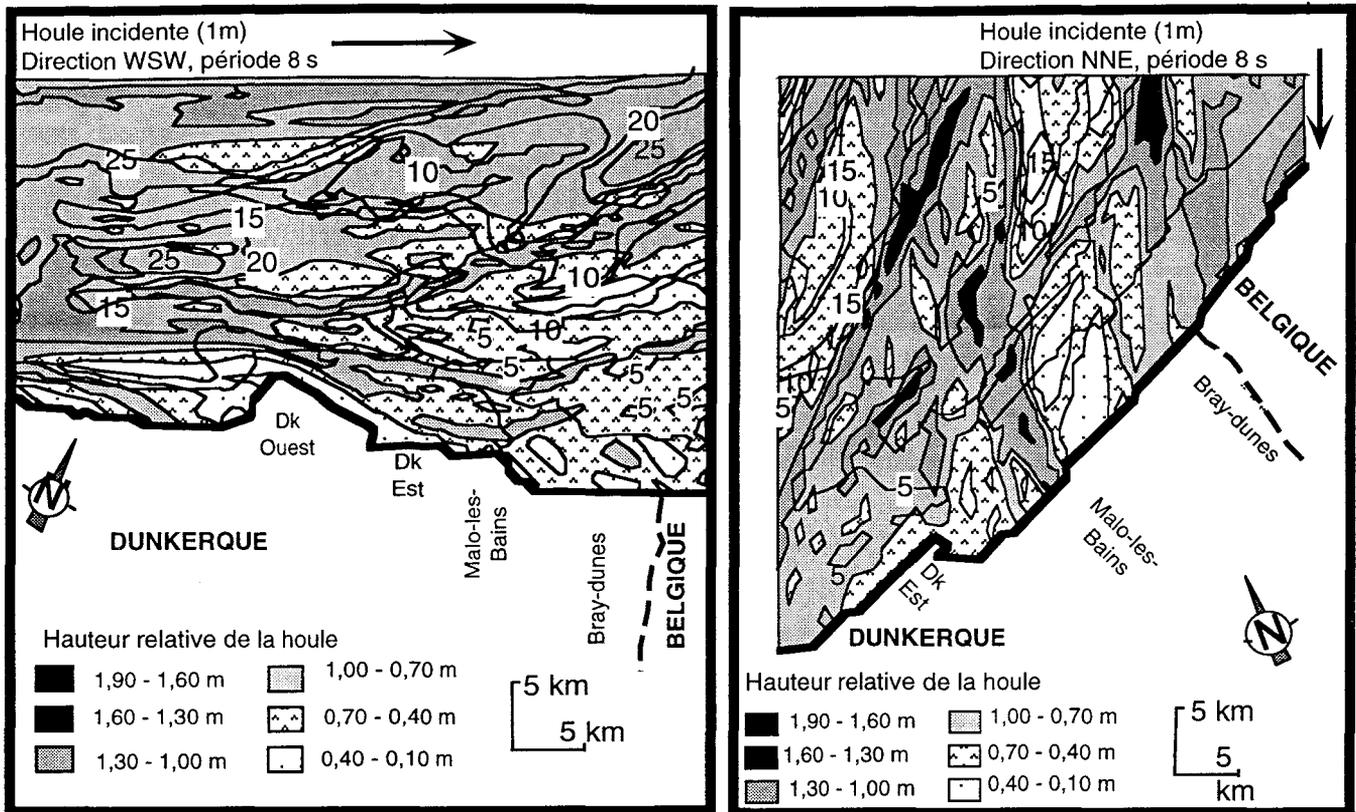


Figure II-21 : Modèles de propagation de la houle pour trois directions (Peltier & Le Saux, 1992)

## II - 4 - CONCLUSION

Le littoral dunkerquois est un environnement complexe et original du fait de son contexte dynamique.

**La marée** est de type semi-diurne et caractérise un environnement macrotidal. Les courants de marée associés sont alternatifs. Le flot dominant porte vers le NE et le jusant vers le SW. Ces courants engendrent un transport tidal résultant vraisemblablement dirigé vers l'Est.

**Le vent** agit principalement sur la zone émergée, c'est-à-dire sur le haut de plage et la dune bordière. Le régime des vents pendant la durée de l'étude se caractérise par des vents de secteur Sud à SW et de secteur N à NE. Il convient de noter qu'aucune tempête n'est survenue pendant cette période.

L'action de **la houle**, qui s'amplifie quand elle se rapproche du littoral, se manifeste par des transports perpendiculaires et parallèles à la côte. Pendant la durée de l'étude la houle était caractérisée par une amplitude supérieure à 0,5 m, une période de 3 à 4 s et elle était principalement de secteur Ouest et Nord.

En conséquence, le littoral dunkerquois est un littoral macrotidal dominé à la fois par la marée, ses courants associés et la houle où l'action de l'homme est localement importante.

## **CHAPITRE III :**

### **ÉTUDE DU DOMAINE MARIN**

#### **III - 1 - INTRODUCTION**

Afin de comprendre la dynamique sédimentaire agissant sur l'ensemble du domaine côtier dunkerquois il était indispensable d'étudier d'abord celle des petits fonds marins puis de la comparer à celle des domaines d'estran.

Les limites de la zone d'étude ont été choisies pour tenir compte de l'influence des bancs côtiers et des ouvrages portuaires sur la dynamique côtière actuelle. Le secteur étudié s'étend sur une longueur de 35 km de l'avant-port Ouest de Dunkerque jusqu'à la frontière franco-belge, et sur une largeur de 4 km depuis la côte au premier alignement de bancs du large (fig. III-1).

La démarche adoptée a consisté à déterminer l'évolution morpho-sédimentaire superficielle des fonds marins et à définir l'organisation de la structure interne de deux bancs sableux.

#### **III - 2 - DÉFINITION DU SECTEUR D'ÉTUDE**

Les fonds marins situés au large de Dunkerque sont accidentés par de nombreux bancs sableux qui se répartissent suivant une succession d'alignements sub-parallèles à la côte. Ces bancs appartiennent à l'ensemble des Bancs de Flandres (fig. III-2), qui s'étendent de Calais à la Belgique.

Au sein de cet ensemble, les Bancs de Dunkerque désignent les bancs sableux de Mardyck, de Saint Pol, du Snouw, du Braek, du Breedt, du Hills, du Smal, d'In Ratel et du Buiten Ratel (fig. III - 1). Les Bancs de Dunkerque, sensiblement parallèles à la côte, ont en général une morphologie asymétrique. Le flanc le plus déclive est orienté vers la côte à l'exception de la partie Est du banc du Braek caractérisée par une asymétrie inverse. Des chenaux, profonds de 15 à 20 m, séparent les bancs, et leurs crêtes sont distantes l'une de l'autre de 3 km en moyenne. Leur longueur est comprise entre 8 et 32 km pour une largeur de 1,5 à 3 km. Les sommets sont à des profondeurs inférieures à 5 m par rapport au niveau moyen de la mer et sont de ce fait sub-émergeants, voire même émergeants comme celui des bancs du Hills et du Smal en période de vives-eaux à marée basse.

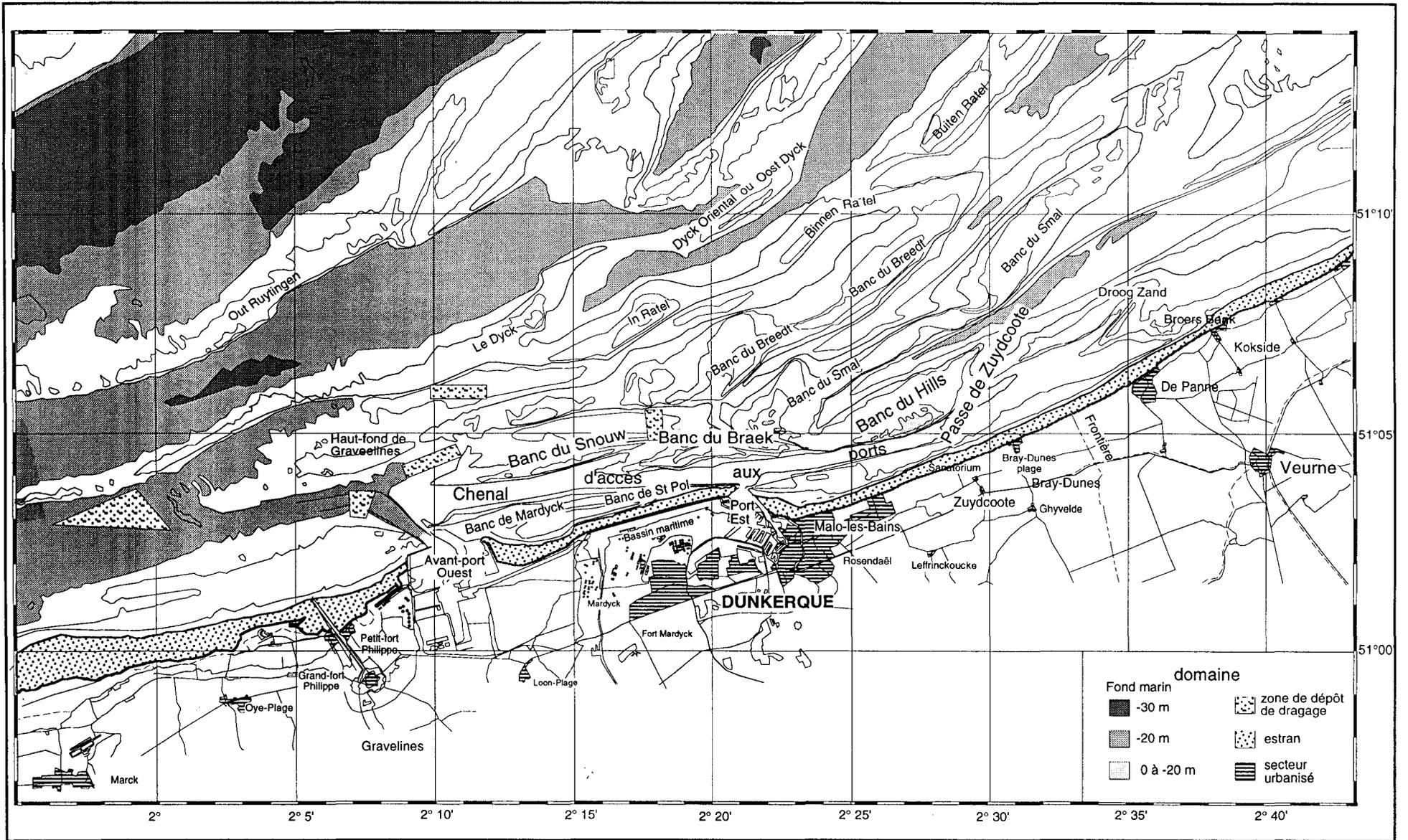
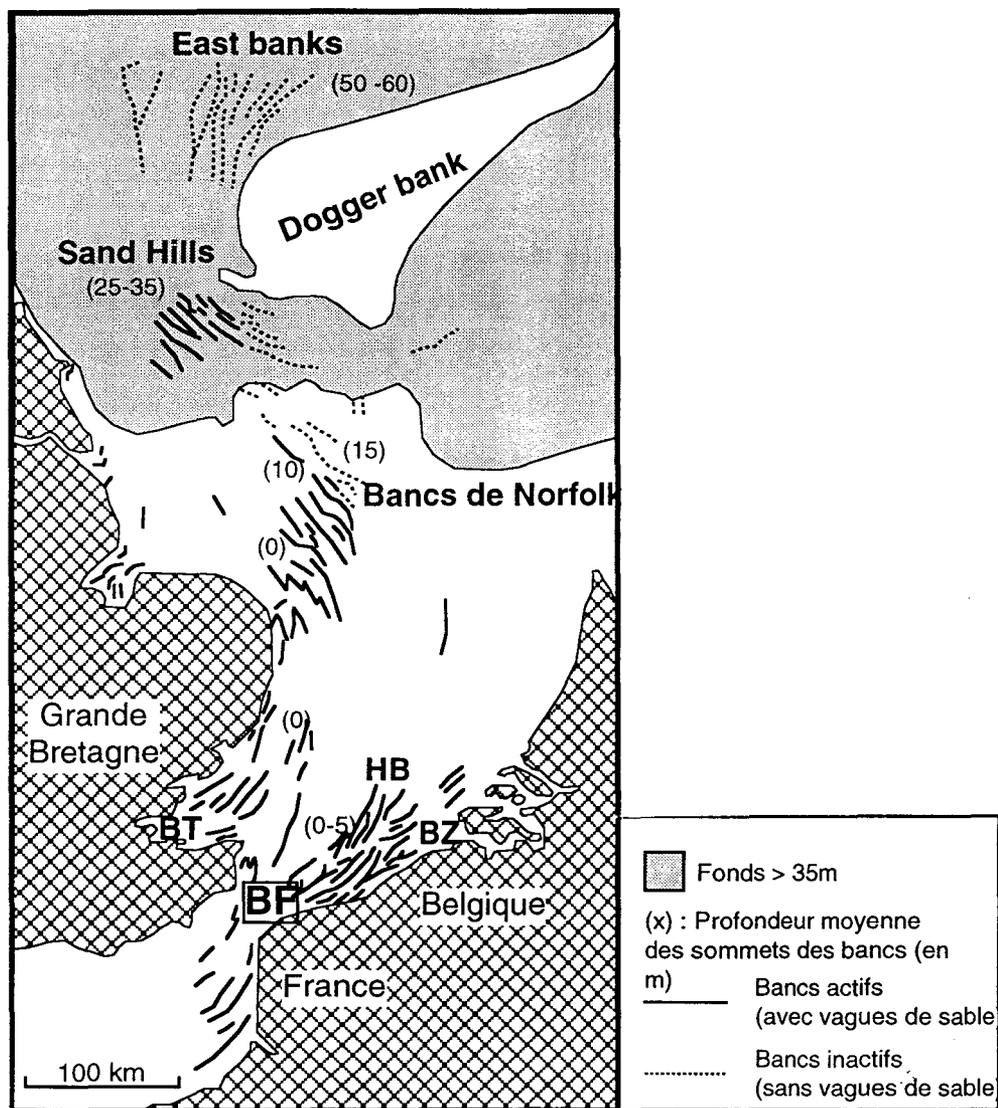


Figure III-1 : Situation générale d'après les cartes du S.H.O.M. n° 6651D et 6652D (1985).



**Figure III-2 :** Localisation des différents groupes de bancs de sable dans la partie SW de la Mer du Nord (d'après Kenyon *et al.*, 1981, modifié par Vicaire, 1991, BF : Bancs de Flandres, BT : Bancs de la Tamise, BZ : Bancs de Zélande, HD : Hinder Banks).

Le secteur considéré s'étend depuis le bas de plage jusqu'au premier alignement de bancs et comprend le talus littoral, auquel appartiennent les bancs de Mardyck et Saint Pol, le chenal d'accès aux ports de Dunkerque, ainsi que les bancs du Snow, du Braek et du Hills qui constituent le premier alignement.

Les principales caractéristiques de ces bancs sont données dans le tableau III-1.

Zone	Nom	Longueur L en km	Largeur l en km	Profondeur du sommets en m	Orientation générale
Talus littoral	Mardyck	4	0,4	- 1,8	N 080
	Saint Pol	6	0,4	- 0,8	N 080
Chenal d'accès					
Premier alignement de banc	Snouw	10,2	1,5	- 2,1	N 078
	Braek	7,8	1,5	- 0,4	N 082
	Hills	9,5	3	+ 0,1	N 075 045

**Tableau III-1** : Principales caractéristiques des bancs sableux appartenant au secteur d'étude.  
(Les valeurs positives indiquent que le banc émerge lors des plus grandes basses mers).

### III - 3 - MÉTHODES UTILISÉES

Afin de mettre en évidence les variations morpho-sédimentaires du domaine marin, des campagnes de prélèvements d'échantillons marins et de levés bathymétriques ont été réalisées à différentes époques. A ces travaux s'ajoute une étude de l'organisation interne des bancs sableux par prospection sismique très haute résolution. L'ensemble des opérations est reporté dans le tableau III-2.

Période	Organisme	Objectif	Zone
1988	Univ. de Lille (Vicaire, 1991)	- Prélèvements de sédiments à la benne	Toute la zone
Avril 1992	EUROSENSE	- Bathymétrie fine	Talus littoral à l'Est de Dunkerque
Sept 1992	Univ de Lille (cette étude)	- Prélèvements de sédiments à la benne - Bathymétrie	Toute la zone
Oct. 1992	L.N.H.	- Bathymétrie et topographie fine	Talus littoral à l'Est de Dunkerque
Juin 1993	L.N.H.	- Bathymétrie et topographie fine	Talus littoral à l'Est de Dunkerque
Juin 1993	Univ de Lille (cette étude)	- Prélèvements de sédiments à la benne	Toute la zone
Sept. 1993	Univ de Lille (cette étude)	- Prélèvements de sédiments à la benne	Toute la zone
Sept. 1993	L.N.H.	- Bathymétrie et topographie fine	Talus littoral à l'Est de Dunkerque
Nov. 1993	Univ de Lille (cette étude) GENAVIR	- Sismique très haute résolution (2,5 khz)	Bancs du Snouw et Braek
Juin 1994	L.N.H.	- Bathymétrie et topographie fine	Talus littoral à l'Est de Dunkerque
Déc. 1994	L.N.H.	- Bathymétrie et topographie fine	Talus littoral à l'Est de Dunkerque

**Tableau III-2** : Récapitulatif des opérations effectuées en mer de 1988 à 1994.

#### III - 3 - 1 - PRÉLÈVEMENTS D'ÉCHANTILLONS MARINS

##### *Campagnes en mer*

Trois campagnes complètes de prélèvements d'échantillons marins ont été accomplies en septembre 1992, juin 1993 et septembre 1993, auxquelles s'ajoute celle réalisée par Vicaire au cours de l'année 1988 (Vicaire, 1991) et qui sert de référence à cette présente étude.

Les échantillons de sédiments marins sont prélevés de manière ponctuelle à l'aide d'une benne Van Veen (Jago *et al.*, 1981) à bord du navire océanographique côtier de l'I.N.S.U./C.N.R.S. : SEPIA 2. Ce bateau possède un faible tirant d'eau (1,3 m) et permet la navigation sur les bancs sableux sub-émergeants.

La première campagne en septembre 1992, a permis de recueillir 161 échantillons. Pour autoriser une première comparaison, le positionnement des points de prélèvements est identique à la grille de prélèvements établie par Vicaire en 1988 et orienté selon les hyperboles DECCA (fig. III-3). Par la suite il nous est apparu plus judicieux de positionner les 237 points de prélèvements selon des lignes sub-perpendiculaires à la côte et à l'axe des bancs (fig. III-4) afin de coupler les informations sur la morphologie et la granularité des sédiments. Le positionnement en mer et le système de navigation employés pendant la durée de l'étude ont été assurés par un GPS (Global Positioning System) associé à une table traçante. La mission du mois de juin 1993 a dû être écourtée en raison de l'établissement de mauvaises conditions météorologiques.

#### *Analyse en laboratoire*

En laboratoire, les échantillons ont fait l'objet d'une analyse de la granulométrie par tamisage dont le principe général est donné dans l'encadré III-1.

#### **Techniques d'analyse granulométrique**

Encadré III-1

L'analyse granulométrique s'effectue sur une quantité de 100 à 125 g de sédiment sec représentatif de l'échantillon brut. Un premier tamisage sous l'eau permet de récolter la fraction argileuse de diamètre inférieur à 0,063 mm. Un tamisage "mécanique" à sec est ensuite réalisé avec des tamis à mailles carrées de progression géométrique et de raison  $\sqrt[10]{10}$  (série A.F.N.O.R.) allant de 5 mm à 0,08 mm. La durée du tamisage est de 15 à 20 mm pour éviter les effets de broyage dus aux chocs des grains au cours de l'opération (Berthois, 1975). Quand la fraction argileuse est importante, une analyse par sédiographie est effectuée pour définir sa répartition granulométrique (Catalyud, 1981).

Une fois le tamisage terminé, le refus de chaque tamis est pesé. De plus, la teneur en  $\text{CaCO}_3$  des échantillons est mesurée par le calcimètre de Bernard (Vatan, 1967).

Les données brutes sont ensuite traitées par ordinateur à l'aide d'un logiciel (Dewez, 1988).

Le traitement informatique des données permet de définir pour chaque échantillon, la répartition granulométrique et calcule les différents paramètres sédimentologiques tels le mode, le grain moyen, la médiane et l'indice de classement (Clabaut, 1988 ; Dewez 1988).

- A partir du mode, paramètre correspondant au diamètre des grains les plus fréquents, et selon la classification de Larssonneur (1977) et Vaslet *et al.* (1978), différents types sédimentaires sont distingués par ordre de granularité croissante (Vicaire, 1991 ; tab. III-3).

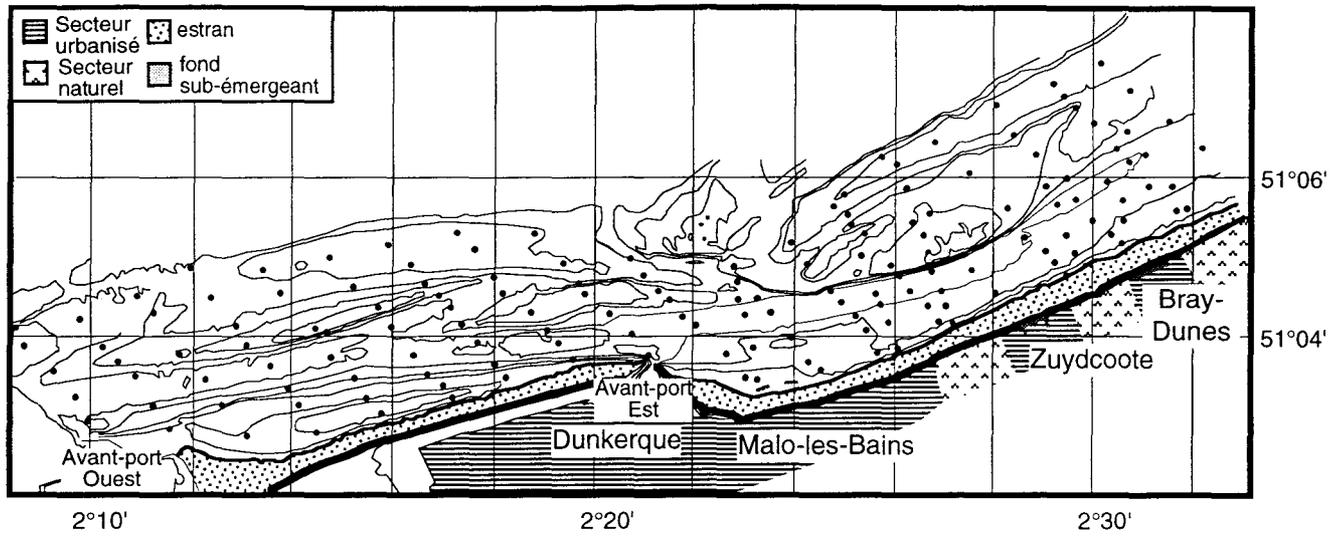


Figure III-3 : Carte de positionnement des prélèvements en 1988 et en septembre 1992

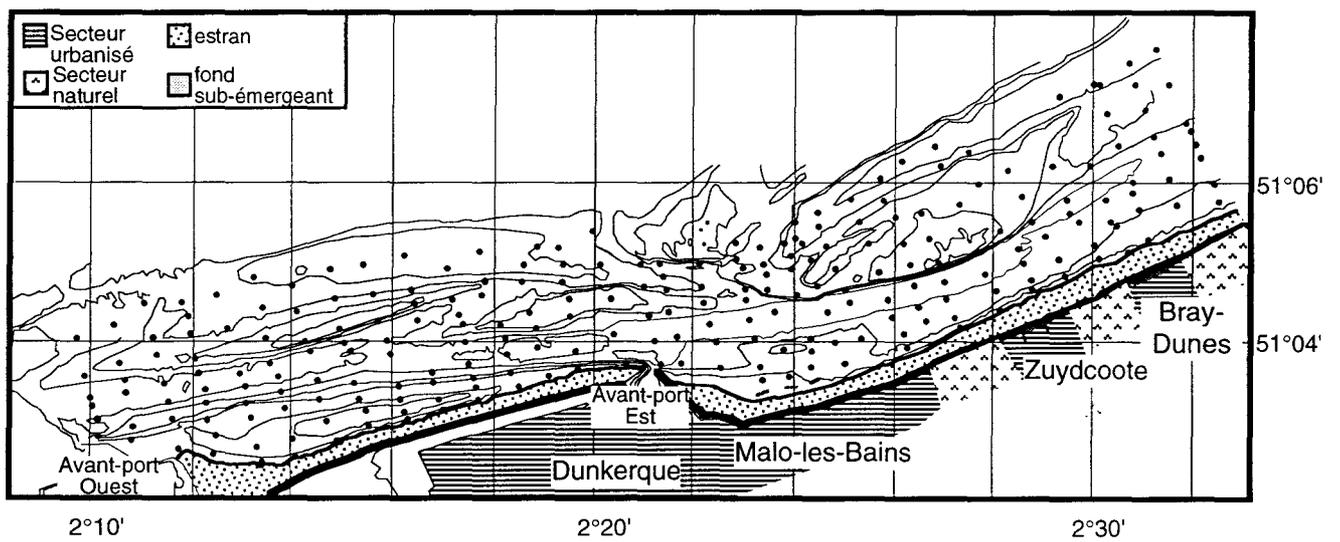


Figure III-4 : Carte de positionnement des prélèvements en juin et septembre 1993

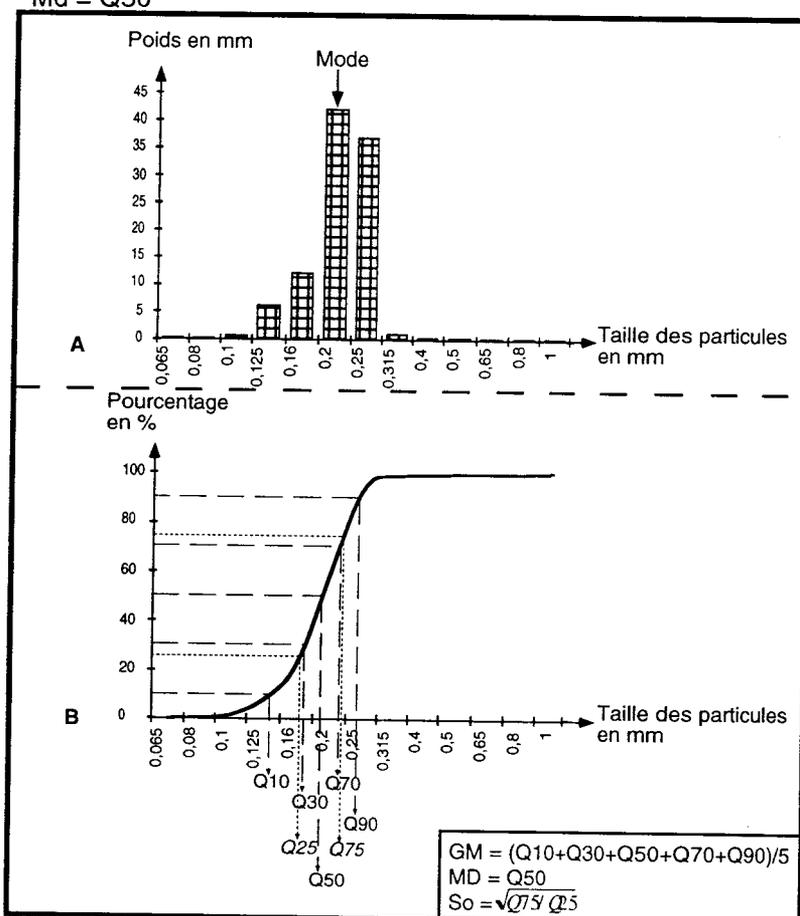
Type	Description	Mode en $\mu\text{m}$	Classification Larsonneur, Vaslet <i>et al.</i>
type I	- sédiment sablo vaseux - fraction fine > à 5 %	125 - 250	- VL1a: sable lithovaseux - VL1b : vase sableuse - VL1c : vase - VL2a : sable lithobioclastique vaseux
type II	- sable fin gris à gris beige - existence d'une fraction fine	125 - 200	- SL1e : sablon lithoclastique
type III	- sable moyen beige	200 - 315	- SL1d : sable lithoclastique fin
type IV	- sable moyen - stock bioclastique important > à 30 %	200 - 400	- SL2d sable moyen coquillier bien classé - SB1d sable moyen terrigène avec une fraction coquillière élevée

**Tableau III-3** : Les principales caractéristiques des quatre types sédimentaires (d'après Vicaire, 1991).

- Afin de caractériser plus précisément la répartition sédimentaire le grain moyen, la médiane et l'indice de classement sont définis en appliquant les formules suivantes (Berthois, 1975 ; Tucker, 1991 et fig. II - 5) :

- grain moyen  
 $GM = (Q10 + Q30 + Q50 + Q70 + Q90) / 5$

- médiane  
 $Md = Q50$



**Figure III-5** : Histogramme et courbe de fréquence cumulée de la répartition granulométrique d'un échantillon (A: histogramme, B : courbe de fréquence, GM: grain moyen, MD : médiane, SO : indice de classement).

Signalons que le mode, le grain moyen et la médiane sont des paramètres de taille qui reflètent la granulométrie moyenne des sédiments (Folk & Ward, 1957 ; tab. III-4). Ces paramètres sont exprimés dans ce texte dans une échelle métrique, millimétrique ou micrométrique. Cependant, le grain moyen tient plus fidèlement compte de la distribution des différentes classes granulométriques qui composent l'échantillon que la médiane.

Médiane en $\mu\text{m}$	Médiane en $\phi$	Nomenclature
> à 2000	< à -1	gravier
1000 à 2000	0 à -1	Sable très grossier
500 à 1000	1 à 0	sable grossier
250 à 500	2 à 1	sable moyen
125 à 250	3 à 2	sable fin
63 à 125	4 à 3	sable très fin
2 à 63	9 à 4	silt
< à 2	> à 9	argile

**Tableau III-4** : Classement des échantillons selon leur paramètre de taille (d'après Folk & Ward 1957).

- indice de classement

$$So = \sqrt{Q75 / Q25}$$

L'indice de classement, à l'inverse des autres paramètres, n'est pas un indice de taille mais il caractérise le tri du sédiment (Berthois, 1975). C'est un indice de dispersion. Plus cet indice est proche de 1, plus l'échantillon est considéré comme bien classé, homogène et propre, et inversement.

Ainsi pour chaque mission, une carte de répartition des types sédimentaires a été établie manuellement. Les paramètres grain moyen, médiane et indice de classement ont également été reportés sous forme cartographique grâce à un logiciel de contourage (Mac Gridzo).

### III - 3 - 2 - RELEVÉS BATHYMÉTRIQUES

Deux techniques ont été exploitées pour suivre les évolutions morphologiques des fonds marins : des relevés bathymétriques généraux et des relevés topo-bathymétriques à très haute résolution.

#### III - 3 - 2 - 1 - Relevés bathymétriques généraux

Les relevés bathymétriques permettent de préciser la morphologie des fonds et de mettre en évidence d'éventuelles modifications de grande ampleur.

### *Campagnes en mer*

Les profils bathymétriques, au nombre de 32, couvrent une zone comprise entre l'avant-port Ouest de Dunkerque et la frontière franco-belge (fig. III-6). D'une longueur moyenne de 4 000 m, ils s'étendent de la côte vers la mer depuis la laisse de basse mer jusqu'au flanc externe peu déclive de la première ligne de bancs sableux. Deux campagnes bathymétriques complètes ont eu lieu au mois de septembre 1992 et juin 1993 conjointement aux campagnes de prélèvements.

Les relevés ont été réalisés à partir du Sépia 2 qui est équipé d'un écho-sondeur FURUNO 881 à faisceau étroit (5°) et de fréquence 200 khz. Les profils sont obtenus directement sur papier.

### *Méthode d'exploitation*

Les profils bathymétriques ont été dans un premier temps scannerisés puis restitués à une même échelle pour être directement comparés.

La précision de la navigation, relative aux écarts de route, à la précision de positionnement et à la variation verticale du plan d'eau due au mouvement de la mer, n'autorise pas une étude quantitative de l'évolution de la morphologie des fonds marins. L'étude et la comparaison des relevés sont restées par conséquent très générales et n'ont permis que de définir les grands traits de la morphologie sous-marine et d'éventuelles modifications majeures.

### III - 3 - 2 - 2 - Relevés topo-bathymétriques à très haute résolution

Ces relevés de haute précision, effectués par le L.N.H. et l'entreprise EUROSENSE, nous ont permis de suivre l'évolution de profondeur et d'altitude le long de profils continus depuis le haut de plage jusqu'au chenal d'accès (1,5 km de large), entre l'avant-port Est de Dunkerque et la frontière franco-belge (fig. III-7). Au total six levés sont disponibles : avril 1992, octobre 1992, juin 1993, septembre 1993, juin 1994 et décembre 1994 (EUROSENSE, 1992 ; Pujo, 1992, 1993 a et b et 1994 a et b).

Ces suivis ont été essentiellement menés par le LNH à l'exception des opérations d'avril 1992 et des levés bathymétriques de juin 1993 qui sont l'oeuvre d'EUROSENSE dans le cadre d'une collaboration franco-belge inscrite dans le programme européen INTERREG. Ces derniers, pour être comparés aux levés du LNH, ont dû être transférés dans le même système de nivellement (N.G.F.) et de projection cartographique (Lambert 1). Les aspects techniques de ces relevés topographiques sont donnés dans l'encadré III-2.

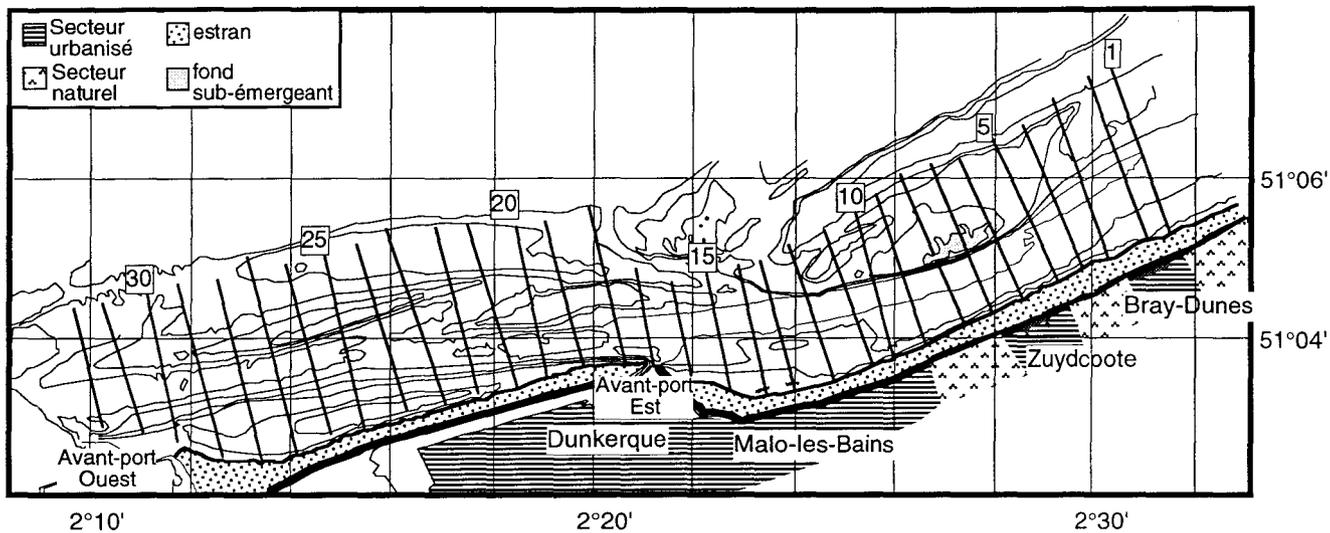


Figure III-6 : Localisation des profils bathymétriques

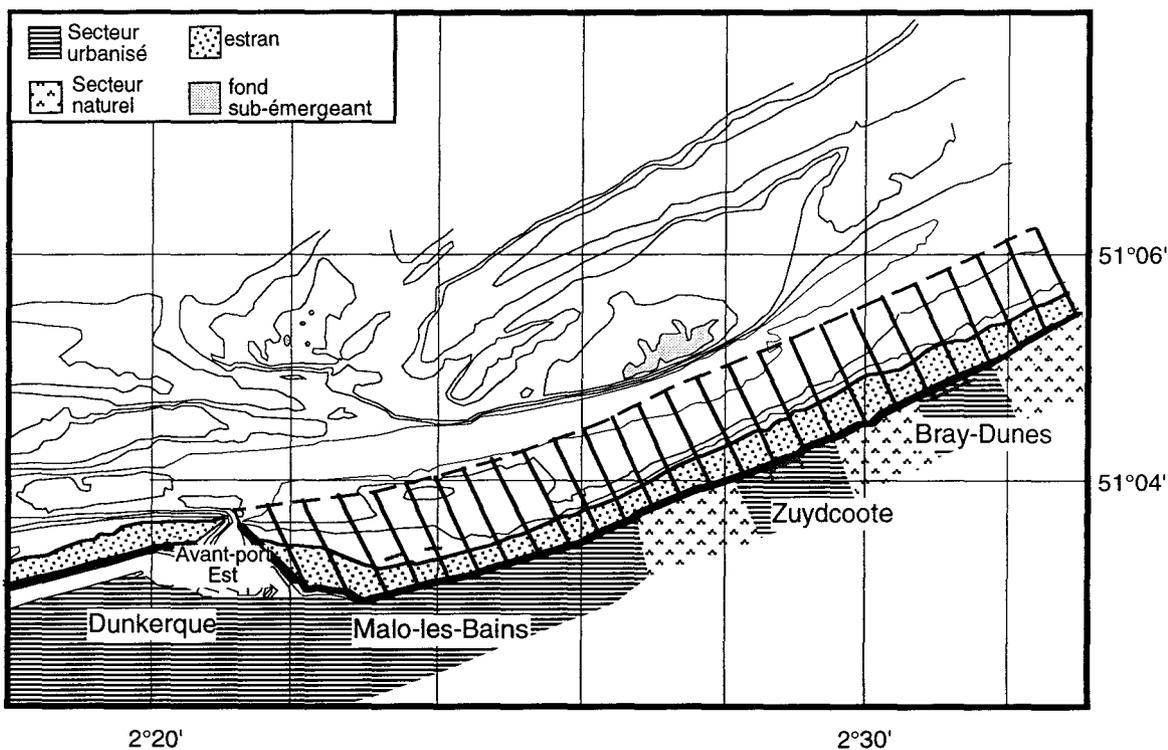


Figure III-7 : Localisation de la topo-bathymétrie du LNH

Le **Laboratoire National d'Hydraulique** a développé une méthode qui mesure en même temps et en continu la profondeur, la position du point de mesure et le niveau du plan d'eau (fig. III-8).

Le positionnement de la sonde est obtenu à l'aide d'un système de radiolocalisation courte et moyenne portées.

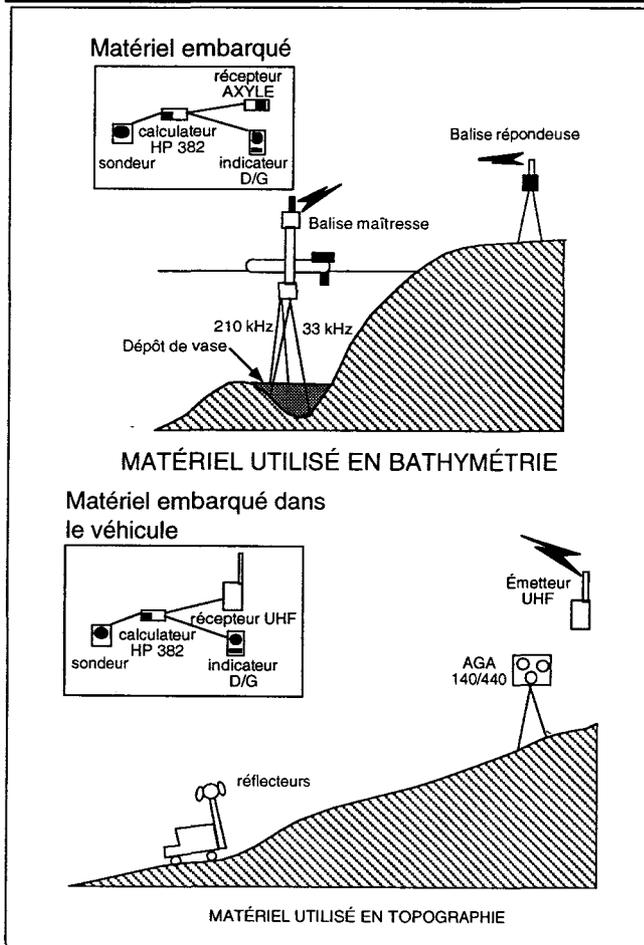
La bathymétrie est réalisée à l'aide d'un sondeur à ultra son, ATLAS KRUPP DESON 20, bi-fréquence (33 et 210 khz) embarqué sur un petit bateau. Ce sondeur enregistre la distance entre le fond et la base des transducteurs.

Le pas de mesure est en moyenne de 1 mètre.

En continuité avec le profil bathymétrique, le profil topographique en X, Y et Z est réalisé grâce à un véhicule 4x4 à partir d'une station à terre. Les mesures s'effectuent à l'aide d'un géodimètre Aga 140.

La méthode utilisée par la société **EUROSENSE** s'effectue à partir d'un hovercraft équipé d'un système hydrographique BEASAC. Les avantages d'un tel système sont multiples : rapidité de manoeuvre, faible profondeur d'eau, bonne maniabilité. Le problème essentiel réside dans le taux d'acquisition des données qui est fonction de la vitesse de navigation, de l'intégration simultanée des positions et du système de compensation des mouvements du bateau. Pour résoudre ce problème, l'hovercraft a été équipé de deux systèmes complémentaires de positionnements le trisponder et le toran. Les mouvements du bateau sont enregistrés à l'aide de 6 senseurs indépendants ultrasoniques et d'un gyro vertical. La bathymétrie s'effectue à l'aide d'un echo sounder Deso 20. Des corrections des mouvements de la mer (marée et houle) et du bateau sont effectuées sur les mesures enregistrées avant de restituer les minutes bathymétriques (Houthyus *et al.*, 1994).

Toutes les données recueillies ont été numérisées au **LNH** pour élaborer, par traitement informatique sous système UNIX, des **cartes dites de différentiel**. Le traitement informatique utilisé, "DALY", consiste à 1) archiver les données, 2) effectuer les corrections de la marée, 3) réaliser les minutes bathymétriques, 4) établir une grille par extrapolation des sondes bathymétriques pour 5) réaliser des cartes de différentiels et 6) calculer des cubatures. Les cartes de différentiel apportent des informations très précises sur l'évolution de profondeur et d'altitude entre deux levés successifs.

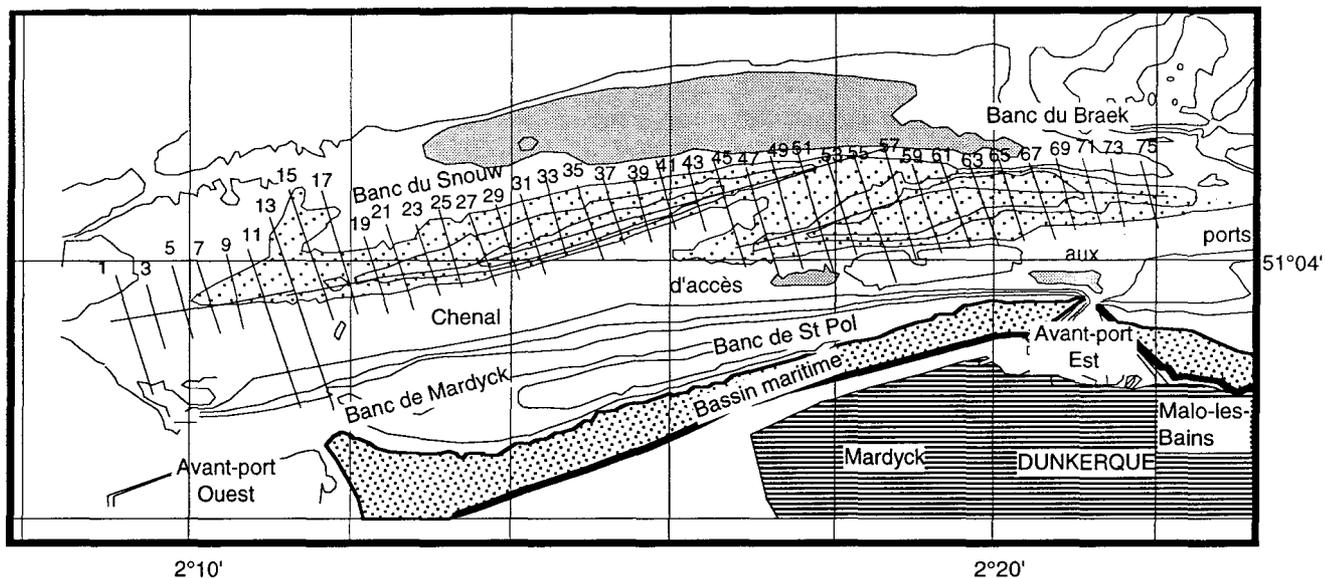


**Figure III-8** : Méthode de mesure de la topographie et de la bathymétrie utilisée par le L.N.H. (Pujo, 1992)

Ces relevés topo-bathymétriques ont été exploités afin d'établir cinq cartes de différentiel. Ces cartes permettent de localiser les zones soumises à érosion et les zones en sédimentation, et d'identifier les secteurs les plus sensibles.

### III - 3 - 3 - PROSPECTION SISMIQUE TRÈS HAUTE RÉOLUTION DES BANCS SABLEUX

Afin de mieux comprendre le mécanisme d'évolution des bancs sableux, une étude de leur structure interne par prospection sismique très haute résolution a été menée les 19 et 20 novembre 1993 (fig. III-9).



**Figure III-9 :** Plan de positionnement des profils sismiques.

#### *Campagne en mer*

Seuls deux bancs ont pu être prospectés : le Snow et le Braek. Cette campagne sismique a été réalisée du 19 au 20 novembre 1993. Les profils sismiques ont été réalisés à partir du SEPIA 2, à l'aide du sondeur de sédiment EDO de très haute fréquence 2,5 khz de GENAVIR/IFREMER. Cette source sismique permet des pénétrations de l'ordre d'une dizaine de mètres dans les sables moyens à grossiers (Berné, 1991). La précision est de l'ordre de 50 cm.

En théorie, le poisson (émetteur-recepteur) doit être immergé suffisamment pour éviter l'apparition trop rapide du fantôme (signal initialement réfléchi à la surface de l'eau). Dans le cas présent, en raison de la faible profondeur d'eau au-dessus du sommet des bancs, le poisson a été maintenu en sub-surface à environ 0,5 m de la surface de l'eau. Le fantôme est alors confondu avec le signal.

Par ailleurs la faible tranche d'eau provoque l'apparition rapide du multiple qui perturbe le signal utile notamment sous le sommet des bancs.

Trente profils transverses, sub-perpendiculaires à l'axe des bancs, et deux profils longitudinaux ont pu être réalisés. Ils ont été enregistrés directement sur papier et de ce fait aucun traitement ultérieur n'a été réalisé. Le positionnement des différents profils sismiques a été obtenu à l'aide d'un G.P.S. dont la précision est décimétrique (Cornelius *et al.*, 1994). Les profils transverses, d'une longueur moyenne de 1 500 m, sont espacés de 400 à 500 m. Les deux profils longitudinaux, longs de 10 et 8 km, suivent respectivement la crête du banc du Snouw et celle du banc du Braek.

#### Méthode d'exploitation

Dans un premier temps chaque profil a été observé minutieusement pour répertorier les principaux réflecteurs composant la structure interne de chaque profil. Puis une deuxième étape a consisté à établir les relations spatiales entre les différents profils pour proposer un schéma général de la structure interne des deux bancs.

### III - 4 - DONNÉES DES LEVÉS BATHYMÉTRIQUES

Rappelons qu'en raison de la précision d'acquisition des levés, l'analyse des différents profils bathymétriques a pour but de caractériser la morphologie générale des fonds marins et de préciser son évolution globale à court terme.

#### III - 4 - 1 - PRINCIPAUX RÉSULTATS

Pendant la période des levés bathymétriques, les conditions météorologiques et hydrodynamiques sont de faible énergie caractérisées par des vents faibles et des coefficients de marée de vive-eau moyenne (voir III - 5 - 1).

Les deux séries de profils bathymétriques, acquis en septembre 1992, c'est-à-dire en situation post-estivale, et juin 1993, en situation post-hivernale, montrent une **morphologie d'ensemble très comparable**, aucune modification majeure n'est observable (fig. III-10a et b)

**Dans le détail** apparaissent toutefois des différences dans la morphologie des différentes entités qui façonnent les fonds : bancs, chenaux et talus littoral (tab. III-5).

- Les **bancs** présentent une asymétrie orientée vers la côte, à l'exception de la partie orientale du banc du Braek. En effet, les profils 15 à 18, situés sur la partie Est du Braek, montrent un flanc plus abrupt du côté large. Cette inversion de la polarité du flanc le plus déclive s'observe également sur les profils 3 et 4, situés sur l'extrémité orientale du banc du Hills.

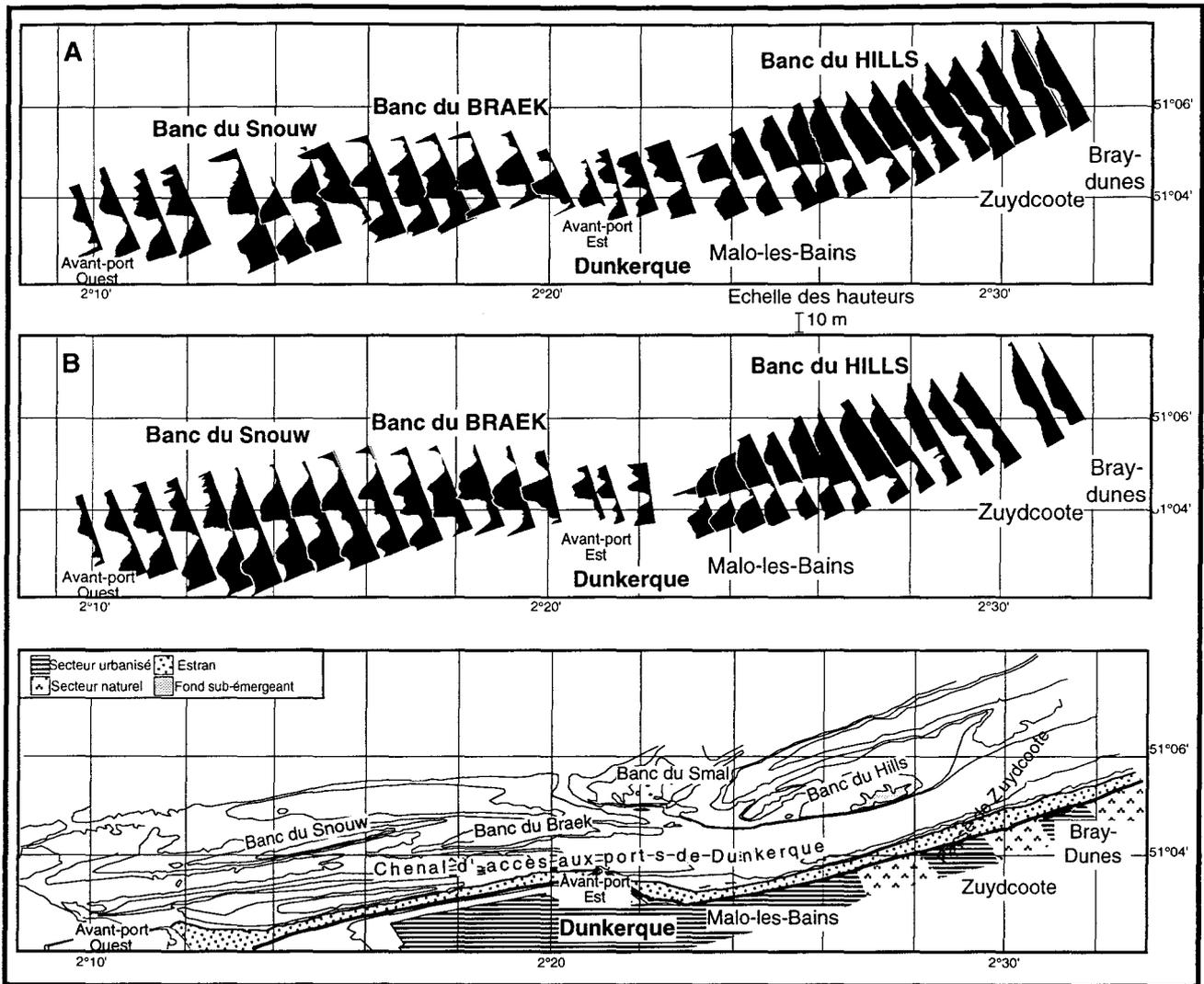


Figure III-10 : Profils bathymétriques réalisés en septembre 1992 (A) et en juin 1993 (B).

Banc	Hauteur max.	Pente du flanc côtier		Pente du flanc large	
		max	min	max	min
Snouw	14,7 m	4,16°	1,15°	1,39°	0,79°
Braek	16 m	4,21°	1,80°	5,10°	0,99°
Hills	18 m	5,40°	0,86°	1,701°	0,66°

**Tableau III-5** : Principales caractéristiques des bancs sableux côtiers au large de Dunkerque obtenus à partir de l'analyse des profils bathymétriques  
(les hauteurs des bancs sont mesurées à partir du fond des chenaux latéraux).

- La profondeur et la largeur du **chenal d'accès aux ports de Dunkerque** sont variables. La profondeur diminue globalement vers l'Est en passant de 20 m à moins de 10 m. Par ailleurs à l'Est de Dunkerque la largeur de ce chenal est comprise entre 300 et 600 m. Au niveau du profil 5, situé entre Zuydcoote et Bray-Dunes, la largeur est minimale, de l'ordre de 300 m. A l'Est du profil 5 le chenal s'élargit à nouveau et devient moins profond. La morphologie générale tend à s'aplanir. A l'Ouest de Dunkerque, la largeur est de l'ordre de 600 à 1200 m. C'est au niveau du profil 24, situé en face du Bassin Maritime de Dunkerque à la jonction du banc du Snouw et du Braek, qu'elle est maximale, de l'ordre de 1200 m.

- A l'Est de Dunkerque et notamment à l'extrémité Est de la zone d'étude, le **talus littoral** est caractérisé par une pente relativement faible, de l'ordre de 0,4° à 0,6°. Il est en outre façonné par une ou deux "barres" pré-littorales, bien visibles au niveau des profils 4, 5 et 6. A l'Ouest, la pente du talus est plus importante en raison de la présence des bancs de Mardyck et de Saint Pol. Elle est de l'ordre de 1°. Ces bancs présentent une morphologie typique caractérisée par un flanc plus abrupt orienté vers la côte. Par leur taille réduite (500 m de large et 5 m de hauteur) ils peuvent être assimilés à des barres d'avant-plage.

- Les **épaves** présentent une signature bathymétrique particulière, observée sur les profils 6 (fig. III-10b), 26, 28 (fig. III-10a et b) et 29 (fig. III-10a).

- Des **figures sédimentaires transverses**, également étudiées sur les profils bathymétriques, ont été observées sur les flancs doux des bancs, dans les chenaux et parfois sur le talus littoral (fig. III-11). Il s'agit, selon la terminologie de Ashley (1990) et de Berné (1991) de dunes hydrauliques de grande taille. Les dunes hydrauliques dont la taille est la plus grande, présentes dans les chenaux et sur les profils 27 à 30 passant par le flanc marin du banc du Snouw, sont caractérisées par une longueur d'onde de 50 à 150 m et par une amplitude de 1 à 3 m. Les structures de plus petites tailles se surimposent à ces grandes structures. Elles sont soit symétriques soit asymétriques. Dans ce dernier cas, celles sur les flancs marins des bancs montrent un flanc abrupt dirigé vers la crête des bancs. Dans les chenaux l'asymétrie des dunes est tournée soit vers le large soit vers la côte. Les principales zones où se retrouvent les dunes hydrauliques (chenal, flanc marin du Snouw) se retrouvent sur les deux séries de profils.

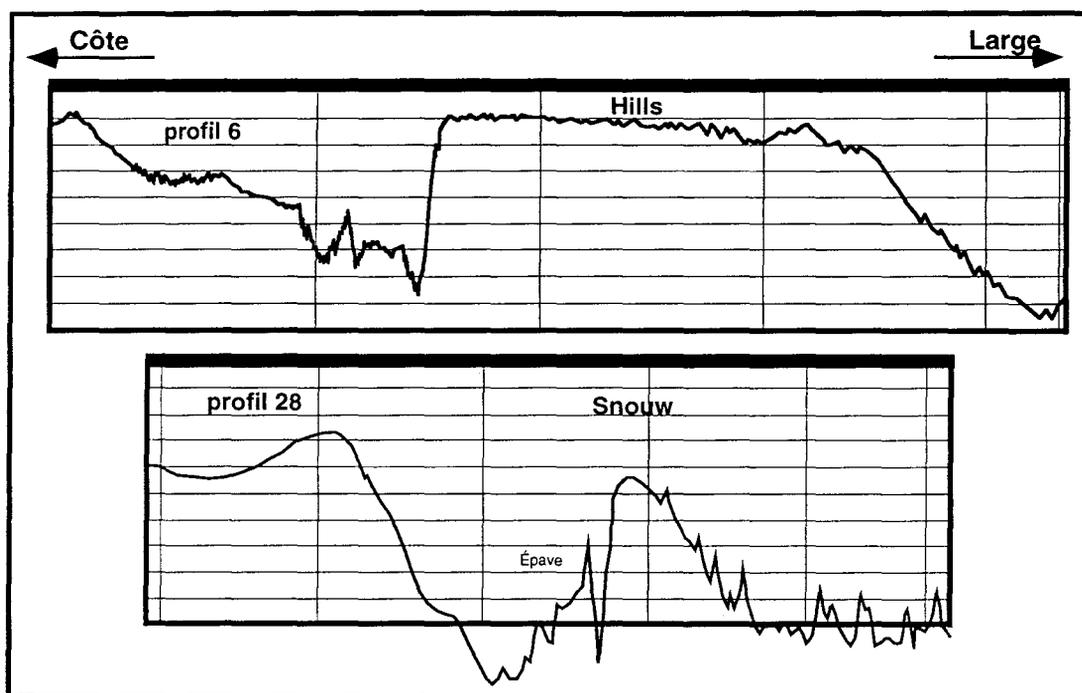


Figure III-11 : Exemples de profils bathymétriques montrant des dunes hydrauliques.

#### III - 4 - 2 - INTERPRÉTATION

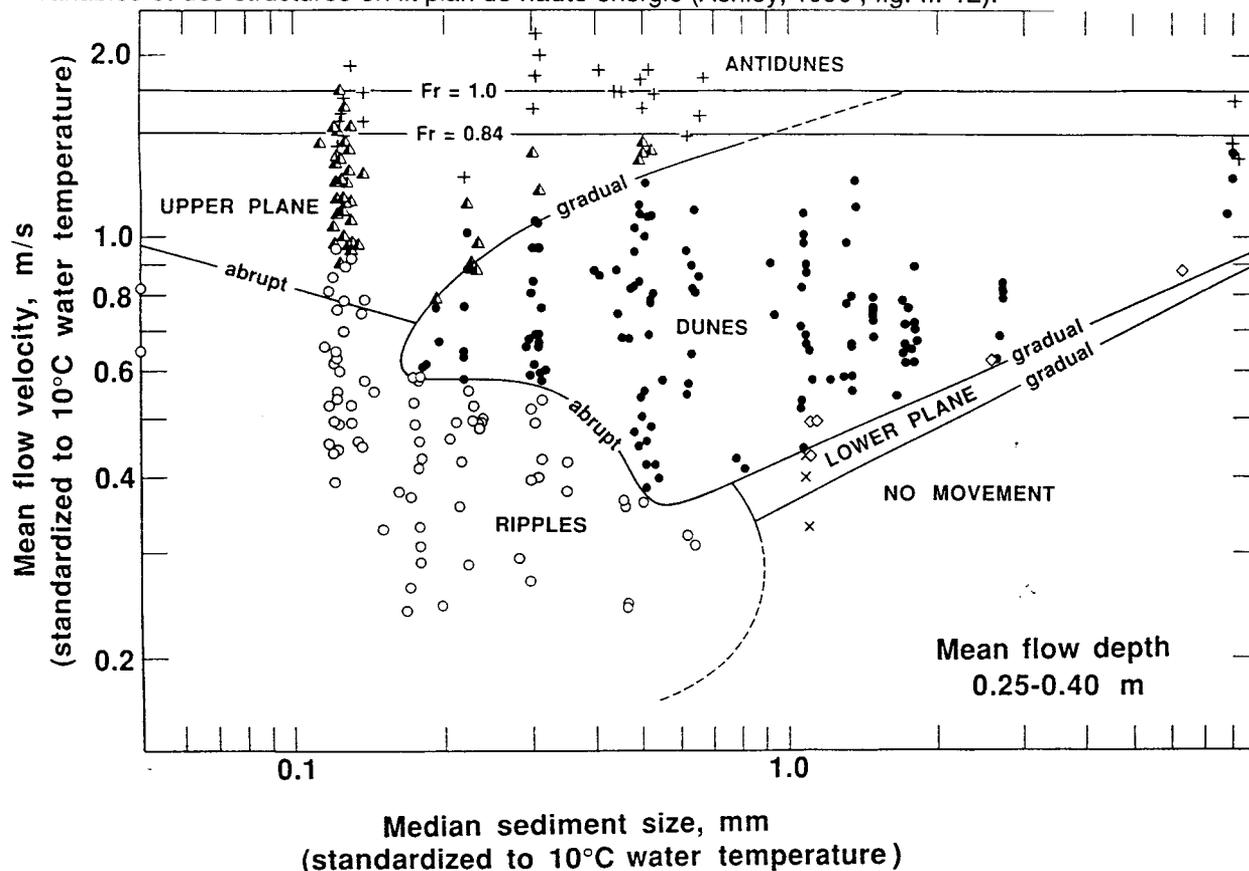
##### III - 4 - 2 - 1 - Morphologie générale des fonds marins

L'étude de la morphologie des fonds marins à deux époques différentes, **post estivale** (fig. III - 10a) et **post hivernale** (fig. III-10b) indique une **stabilité du domaine marin**, qui est **en équilibre avec les conditions météorologiques et hydrodynamiques de beau temps**. Il est donc vraisemblable que pour de telles conditions les **courants de marée** assurent le maintien morphologique des fonds sous-marins, le rôle de la houle étant secondaire. Dans la partie Est du secteur d'étude, l'augmentation de la largeur du chenal et l'aplatissement de la morphologie à proximité de la passe de Zuydcoote, contribuent vraisemblablement à la diminution du transit sédimentaire tidal par dissipation d'énergie.

L'**asymétrie des bancs** quasi constante vers la côte traduit leur déplacement dans cette même direction comme cela a été décrit dans le chapitre I (Lepetit et Leroy, 1977 ; Corbau, 1991). En raison de leur profondeur très réduite, de l'absence de dunes sur leur sommet il est probable que ce déplacement soit induit lors des **tempêtes**. Cette hypothèse est confirmée par le fait que la partie orientale du banc du Braek, protégée des effets de la houle frontale par le banc du Smal, migre vers le large sous l'influence des courants de marée.

### III - 4 - 2 - 2 - Présence ou absence de dunes hydrauliques

En domaine tidal, les structures transverses sont notamment engendrées par les courants de marée (Dalrymple *et al.*, 1978 ; Jonhson *et al.*, 1982 ; Belderson & Kenyon, 1982 ; Amos & King 1984). La présence ou l'absence de dune hydraulique est liée aux conditions hydrodynamiques de formation et de stabilité de ces structures ainsi qu'à la granularité des sédiments (Ashley, 1990). Dans le cas de Dunkerque, les bancs sont constitués de sable fin homogène caractérisé par un grain moyen de l'ordre de 120 à 300  $\mu\text{m}$  (Vicaire, 1991). Les vitesses des courants sont de l'ordre de 70 à 100  $\text{cm/s}$  (Augris *et al.*, 1991 ; Beck *et al.*, 1991 ; Vicaire, 1991). De telles conditions définissent un domaine où coexistent des dunes de tailles variables et des structures en lit plan de haute énergie (Ashley, 1990 ; fig. III-12).



**Figure III-12 :** diagramme de la vitesse moyenne du flux en fonction de la taille des particules qui indique le domaine de stabilité des différentes structures transverses. Les vitesses et la taille des sédiments ont été normalisées pour une température d'eau de 10°C (Ashley, 1990).  
 x : pas de mouvement, O : rides, ● : dunes, ◊ : lit plan de faible énergie,  
 ▲ : lit plan de haute énergie, + : antidunes, Fr : nombre de Froude.

Ce fait peut également témoigner de l'action des vagues, notamment sur les bancs. La formation des dunes hydrauliques de grande taille par les courants de marée requiert trois conditions (Mc Cave, 1971) : 1) la vitesse élevée des courants de marée, 2) la forme allongée de l'ellipse de marée, et 3) l'action faible de la houle. Or les petits fonds marins situés au large

de Dunkerque, entre 0 et 15 m de profondeur, sont soumis à une houle moyenne qui peut empêcher la formation ou le maintien des structures transverses. Par contre, dans les chenaux où ces trois conditions sont remplies, les dunes hydrauliques sont plus fréquentes.

### III - 4 - 2 - 3 - Conditions d'application à la mesure des mouvements de bancs et de figures sédimentaires

L'utilisation des profils bathymétriques est souvent utilisée pour quantifier les volumes érodés ou sédimentés ou déterminer les vitesses de déplacement des bancs ou des structures sédimentaires (De Moor, 1989 ; Berné, 1991 ; Lanckneus, 1993 ; Trentesaux, 1993 ; Houthuyus *et al.*, 1994). Cette méthode est délicate, elle n'a pas pu être utilisée dans le cadre de mon étude en raison des écarts de navigation et de la précision insuffisante du système de positionnement. De plus aucun système de navigation ne permet d'emprunter rigoureusement deux fois la même route ce qui n'autorise pas une comparaison précise entre deux levés successifs.

Dans notre cas, l'étude des relevés bathymétriques nous permet seulement :

- de caractériser plus ou moins la morphologie d'ensemble des fonds marins ;
- d'identifier des secteurs où dominent l'action des courants de marée de façon prédominante conduisant à la formation de dunes hydrauliques (chenaux, flancs marins des bancs) et d'autres secteurs où la houle joue un rôle probablement important (sommet de bancs) ;
- de constater qu'il n'y a aucune modification majeure entre une morphologie post-estivale et post-hivernale ce qui nous conduit à conclure que le domaine des petits fonds marins du littoral dunkerquois est en équilibre à cette échelle de temps avec les conditions hydrodynamiques d'énergie modérée.

## III - 5 - ÉTUDE DES PRÉLÈVEMENTS SÉDIMENTAIRES

La distribution sédimentaire sur le fond marin (type, grain moyen, médiane indice de classement) résulte de diverses actions hydrodynamiques et, notamment des conditions qui ont précédé la campagne de prélèvements. Afin d'interpréter ces données et de les comparer, la connaissance de ces conditions est donc nécessaire.

### III - 5 - 1 - CONDITIONS HYDRODYNAMIQUES ET MÉTÉOROLOGIQUES PRÉCÉDANT CHAQUE CAMPAGNE DE PRÉLÈVEMENTS

Les conditions hydrodynamiques et météorologiques ont été définies pour la période de 15 jours précédant chaque mission (tab. III-6) :

Période	Marée	Houle	État de la mer	Vent
sept. 1992	vives-eaux petites à moyennes 70 à 89	H max 0,3 - 2 m T = 2 à 6 s	calme	SE à SW et SW à NW V < à 14 m/s
juin 1993	vives-eaux moyennes 82 à 93	H max 0,5 à 1,5 T 3 à 4 s	calme	SE à SW 16 m/s max V moyenne 4 à 6m/s
sept. 1993	vives-eaux moyennes mortes-eaux moyennes 34 à 88			NW à NE V < à 12 m/s SE à SW V 5 à 10 m/s

**Tableau III-6** : Conditions hydrodynamiques et météorologiques précédant les campagnes des mois de septembre 1992, juin 1993 et septembre 1993.

*Mission de 1988 (Vicaire, 1991)*

Les données hydrodynamiques et météorologiques ne sont pas indiquées (Vicaire, 1991), car les échantillons ont été récoltés au cours de plusieurs campagnes.

*Mission de septembre 1992*

Du 1<sup>er</sup> au 15 septembre 1992, les vents étaient de secteur SE à SW ou de secteur SW à NW avec des vitesses inférieures à 14 m/s voire inférieures à 8 m/s (fig. III-13). Ces conditions météorologiques peuvent être qualifiées de calmes.

Les coefficients de marée, de petites à moyennes vives-eaux, ont augmenté de 70 à 89.

Les données de houle enregistrées par le LNH indiquent des hauteurs maximales de 0,3 à 2 m, et des hauteurs significatives de 0,25 à 1,25 m pour des périodes de 2 à 6 secondes (Mancel, 1993).

*Mission de juin 1993*

Du 2 au 6 juin 1993 les vents étaient de secteur variable (fig. III-13). Les vitesses maximales ont atteint 16 m/s pour des vents de secteur SE à SW mais, la plupart du temps, les vitesses étaient inférieures à 10 m/s et généralement de l'ordre de 4 à 6 m/s. Pendant la durée de la mission, les vents étaient de secteur NW à NE et de vitesse faible, n'excédant pas 8 m/s.

La houle, enregistrée par le LNH, se caractérisait par une période significative de 3 à 4 secondes, une hauteur maximale de 0,5 à 1,5 m et une hauteur significative de 0,25 à 1 m. (Mancel, 1993)

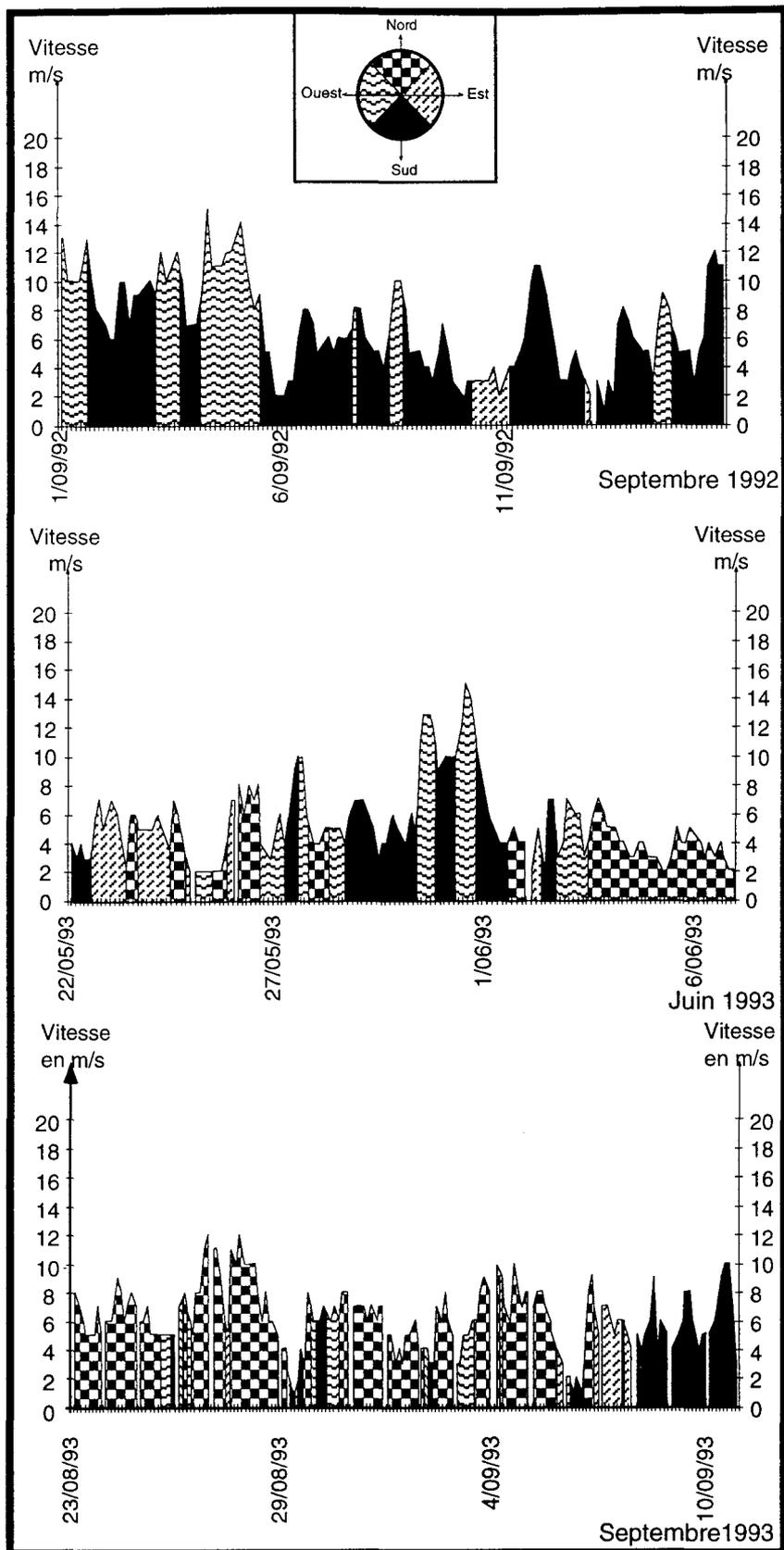
Les coefficients de marée, de vives-eaux moyennes, étaient croissants (82 à 93).

*Mission du mois de septembre 1993*

- Du 23 août au 6 septembre 93 les vents étaient de secteur NW à NE avec des vitesses inférieures à 12 m/s (de l'ordre de 5 à 8 m/s). En fin de période, les vents sont passés à des secteurs SE à SW avec des vitesses de 5 à 10 m/s (fig. III-13).

Pour cette campagne il n'existe pas de donnée de houle car la station de mesure du LNH située dans la passe de Zuydcoote avait été retirée quelques mois auparavant.

Du 26 août au 2 septembre, les coefficients de marée augmentaient (de 44 à 88) alors que pendant le déroulement de la mission ils diminuaient (de 88 à 34).



**Figure III-13 :** Conditions météorologiques au cours des missions de septembre 1992, juin 1993 et septembre 1993 (données fournies par Météo France).

Ainsi les trois missions ont-elles été réalisées après et pendant des **périodes de temps calme**, marquées par des vitesses de vent n'excédant pas 12 m/s en moyenne. La seule différence notable d'un point de vue des conditions hydrodynamiques concerne les coefficients de marée : ils étaient croissants vers une vive-eau moyenne pour les missions de septembre 1992 et juin 1993, et décroissants vers une morte-eau pour la mission de septembre 1993.

### III - 5 - 2 - CARTES DE RÉPARTITION SÉDIMENTAIRE

Les données obtenues sur les sédiments concernent la répartition des grands types sédimentaires en général, celle de la granularité et du classement en particulier. Ces différents paramètres sont ici comparés successivement pour chaque période d'échantillonnage.

#### III - 5 - 2 - 1 - Répartition du type sédimentaire de 1988 à 1993

Les quatre types sédimentaires rencontrés ont été classés par ordre de granularité croissante, le type I désignant les sédiments les plus fins.

D'une manière générale, les sédiments de type III (sables moyens) constituent l'essentiel de la couverture sédimentaire et se trouvent à toutes les profondeurs, quelle que soit l'époque (fig. III-14, III-15, III-16 et III-17).

Les sédiments de type II (sables fins) forment une bande côtière qui s'étend de l'avant-port Ouest à la frontière franco-belge, depuis la côte jusqu'au chenal d'accès aux ports. Cette zone correspond au talus littoral. Ces sables fins se trouvent également sur la partie Est des bancs du Snouw, du Braek et du Hills. Ils se rencontrent à des profondeurs inférieures à 10 m.

La répartition des sédiments de type I et IV est très variable.

Les sédiments de type I (sédiments vaseux) sont le plus souvent présents dans des zones plus profondes (20 m) correspondant aux chenaux (fig. III-14, III-16 et III-17). Ils sont également répartis au niveau du talus littoral (fig. III-15), et sont généralement abondants à l'Est de Dunkerque. Ces sédiments sont répartis soit en bandes plus ou moins continues sub-parallèles à la côte comme dans le chenal d'accès à l'Est de Dunkerque (fig. III-14, III-16 et III-17), soit en tâches de forme quelconque (fig. III-15).

Les sédiments de type IV (sables moyens coquilliers), peu fréquents, ont une répartition sporadique et sont localisés dans des zones plus profondes, de l'ordre de 20 m.

Type sédimentaire	Caractéristiques	Fréquence	Localisation
I	Sédiment vaseux	Plus ou moins fréquent	Le plus souvent dans les zones plus profondes (chenaux), parfois sur le talus littoral
II	Sable fin	Abondant	Profondeur inférieure à 10 m : talus littoral et bancs
III	Sable moyen	Très abondant	Toutes les profondeurs
IV	Sable moyen coquillier	Peu fréquent	Profondeurs relativement importantes (chenaux)

Tableau III-7 : Caractéristiques générales et répartitions des différents types sédimentaires

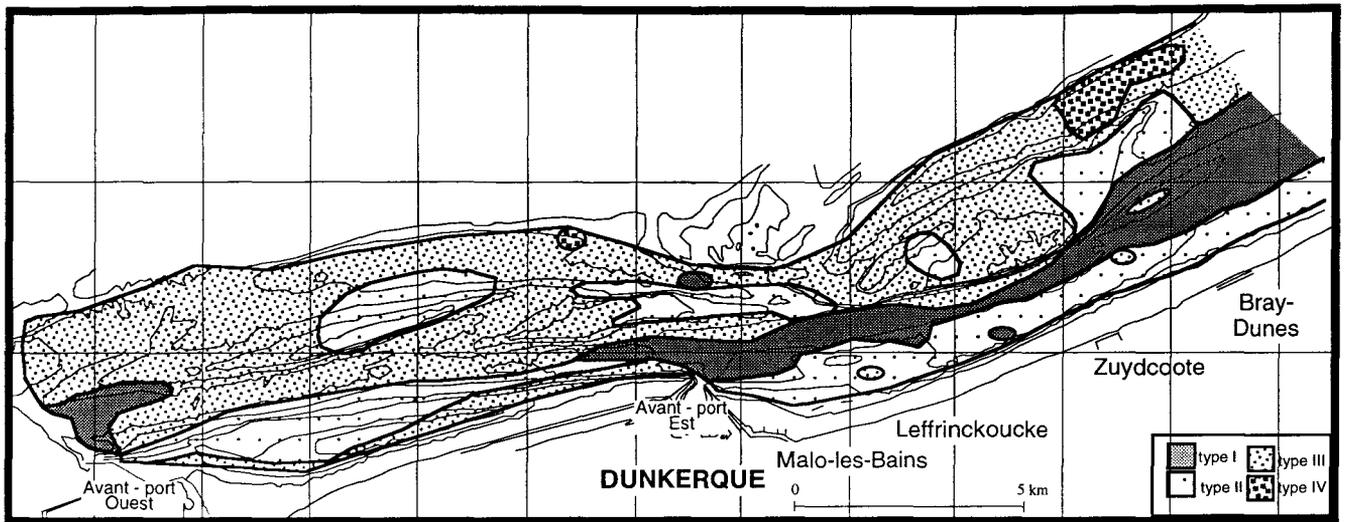


Figure III -14 : Carte de répartition des types sédimentaires établie par Vicaire (1991)

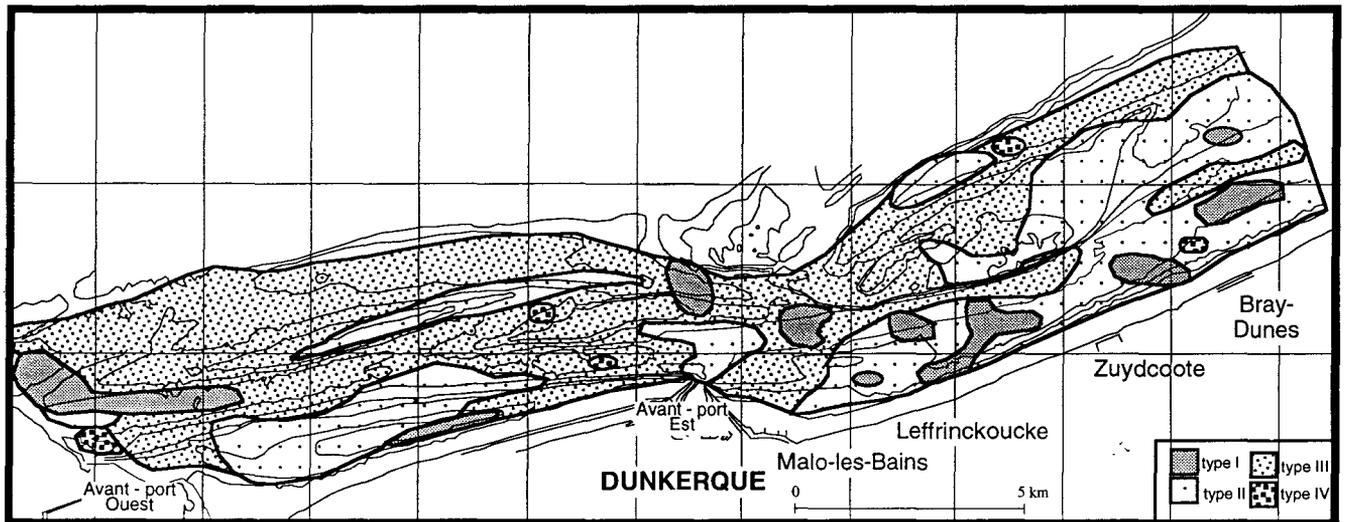


Figure III-15 : Carte de répartition des types sédimentaires en septembre 1992

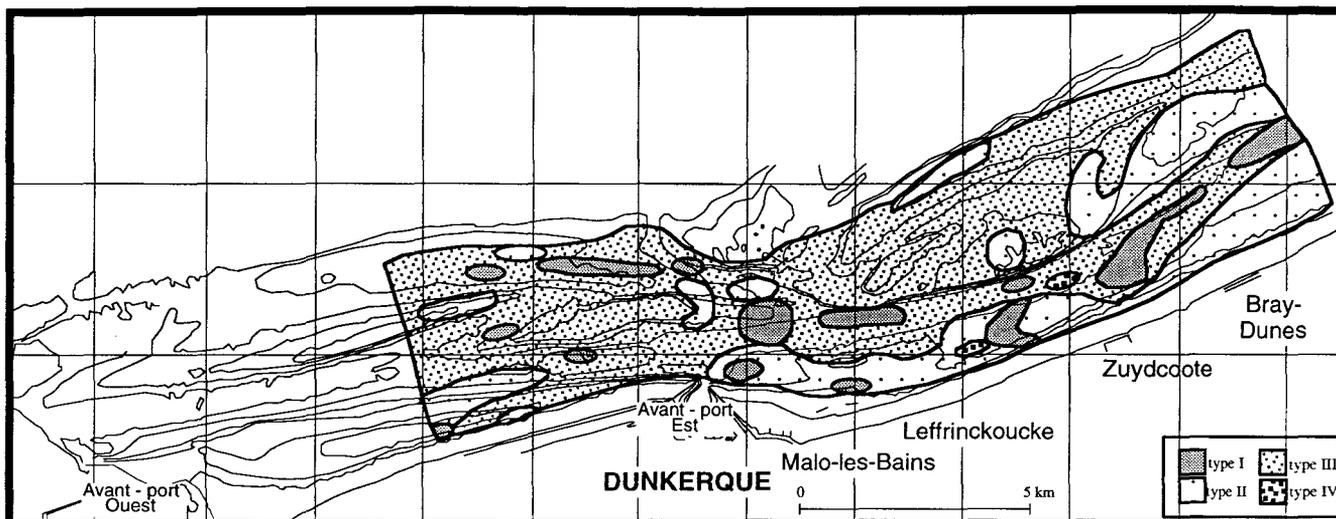


Figure III-16: Carte de répartition des types sédimentaires en juin 1993

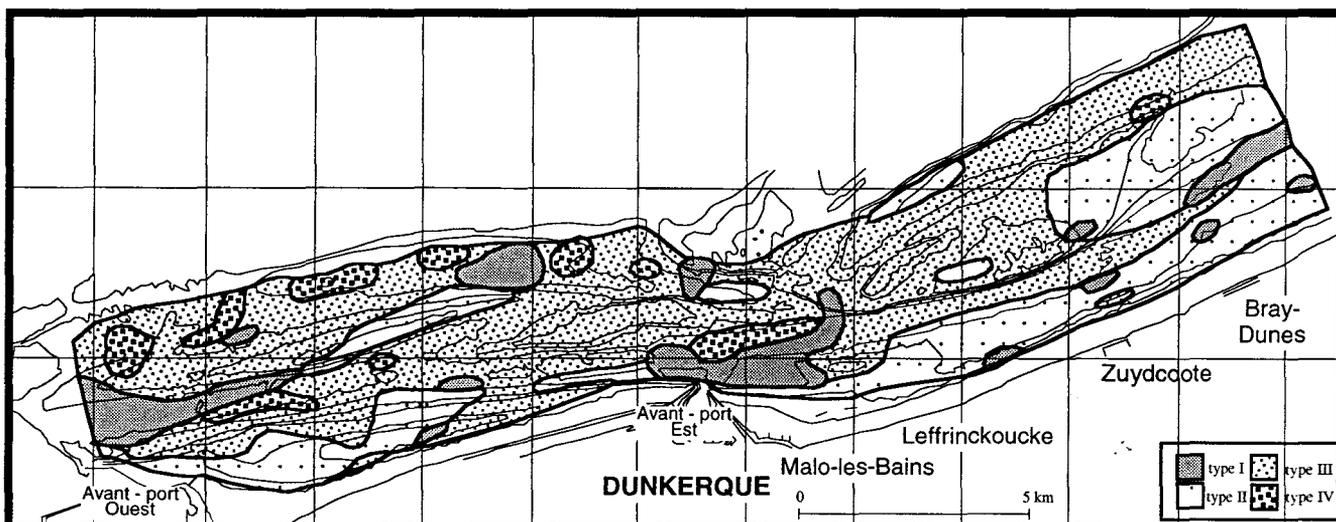


Figure III-17 : Carte de répartition des types sédimentaires en septembre 1993

**Ainsi la comparaison de la répartition sédimentaire à différentes époques montre donc que la couverture sédimentaire est relativement constante et est contrôlée en grande partie par la profondeur (tab. III-7). Toutefois les limites d'extension des différents types sédimentaires présentent des variations dans le temps et dans l'espace.**

### III - 5 - 2 - 2 - Répartition du grain moyen et de la médiane

Pour chaque mission une carte de répartition du grain moyen et une carte de répartition de la médiane ont été réalisées à l'aide d'un logiciel de contourage automatique. Bien que les valeurs du grain moyen soient en règle générale sensiblement supérieure à celles de la médiane, la répartition de ces deux paramètres est tout à fait comparable. Seules les cartes relatives à la dispersion du grain moyen (fig. III-18 à III-21) sont donc présentés dans ce présent paragraphe, les cartes concernant la médiane étant en annexe 3

D'une époque à l'autre, le schéma de répartition du grain moyen ne montre pas de différences et se caractérisent par les mêmes tendances générales :

- Globalement le grain moyen diminue vers l'Est, ainsi que de façon très nette vers la côte.
- Les sédiments à grain moyen faible (0 à 210  $\mu\text{m}$  ; sable fin à très fin) se répartissent sur les bancs sableux et sur le talus littoral, c'est-à-dire entre la côte et le chenal d'accès aux ports de Dunkerque. Les sédiments localisés sur les parties orientales des bancs du Snouw, du Braek et du Hills présentent des valeurs généralement plus faibles par rapport à celles des sédiments situés sur les parties occidentales. Au niveau des avant-ports, les sédiments présentent également des valeurs faibles de grain moyen.
- Les sédiments les plus grossiers, caractérisés par un grain moyen supérieur à 210  $\mu\text{m}$ , se rencontrent principalement dans les chenaux. Ces sédiments sont également déposés en dehors du chenal d'accès aux ports de Dunkerque, près de la côte, à proximité de Bray-Dunes.

La comparaison de la répartition du grain moyen entre les différentes missions met en évidence quelques variations :

- Au cours du temps, les sédiments ont tendance à présenter des valeurs de grain moyen plus fortes ; les valeurs de septembre 1993 sont globalement plus élevées (fig. III-21) que celles de 1988 (fig. III-18) ou de septembre 1992 (fig. III-19).

- La zone située au large de l'avant-port Est de Dunkerque témoigne d'une variabilité sédimentaire particulièrement marquée au cours du temps. Cette zone, site où s'effectuent des dépôts de dragage, est localisée à l'extrémité Est du chenal séparant le banc du Braek du banc du Breedt, et se caractérise par des valeurs faibles de grain moyen (fig. III-18 et III-19), moyennes (fig. III-21) ou fortes (fig. III-20), selon l'époque.

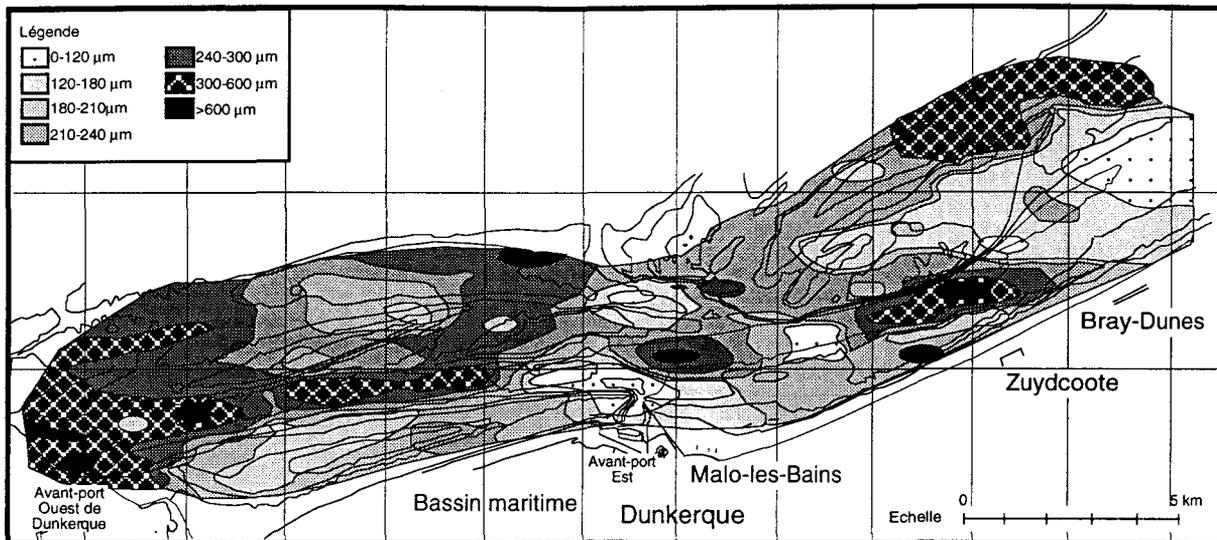


Figure III-18 : Répartition du grain moyen en 1988 ( en  $\mu\text{m}$  )

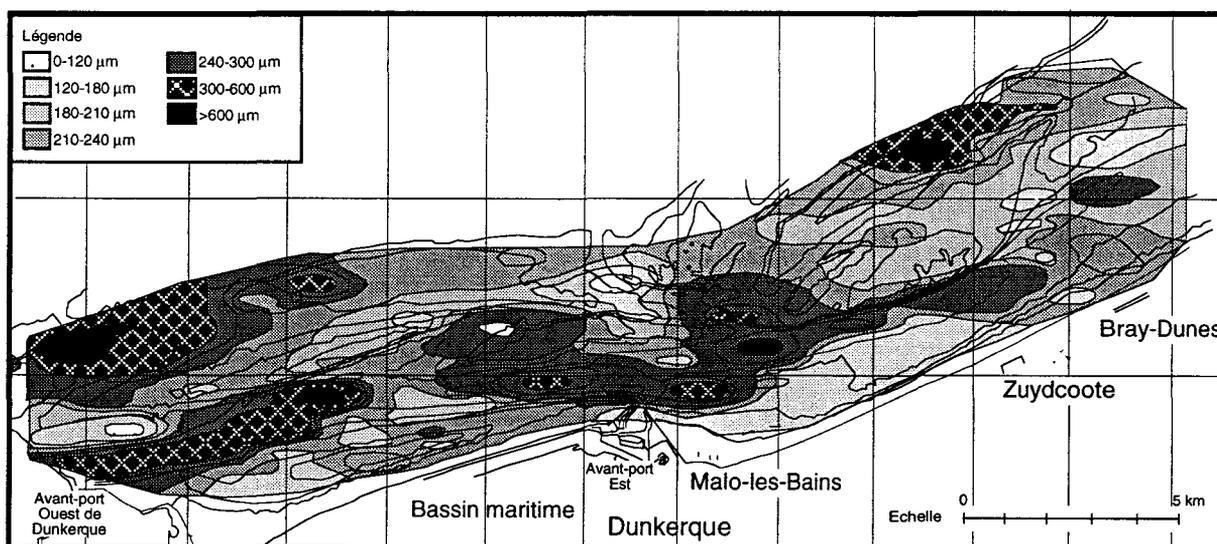


Figure III-19 : Répartition du grain moyen en septembre 1992 ( en  $\mu\text{m}$  )

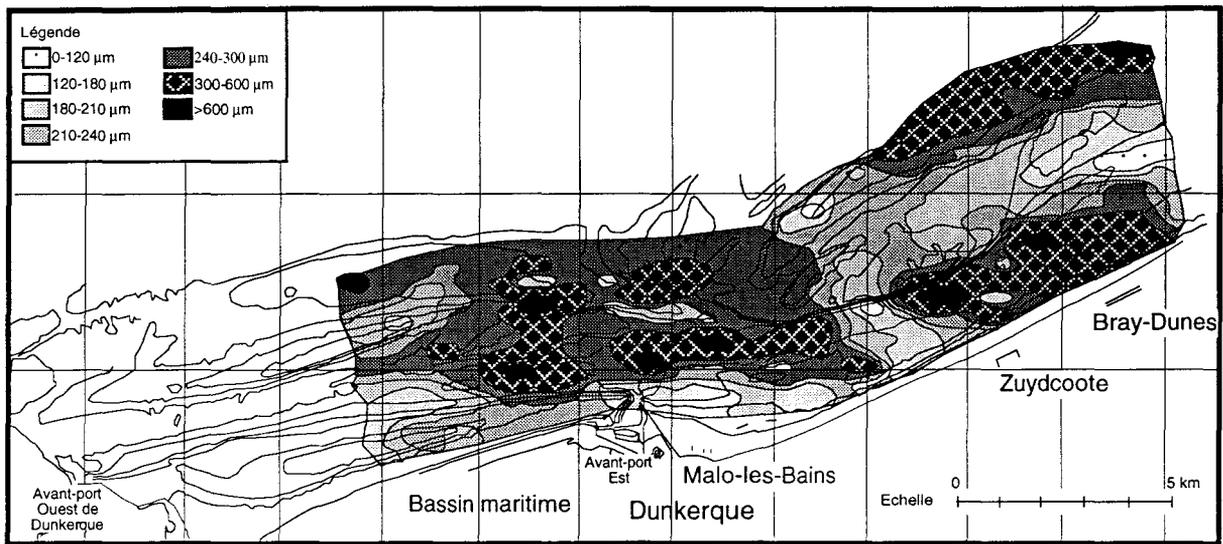


Figure III-20 : Répartition du grain moyen en juin 1993 (en µm)

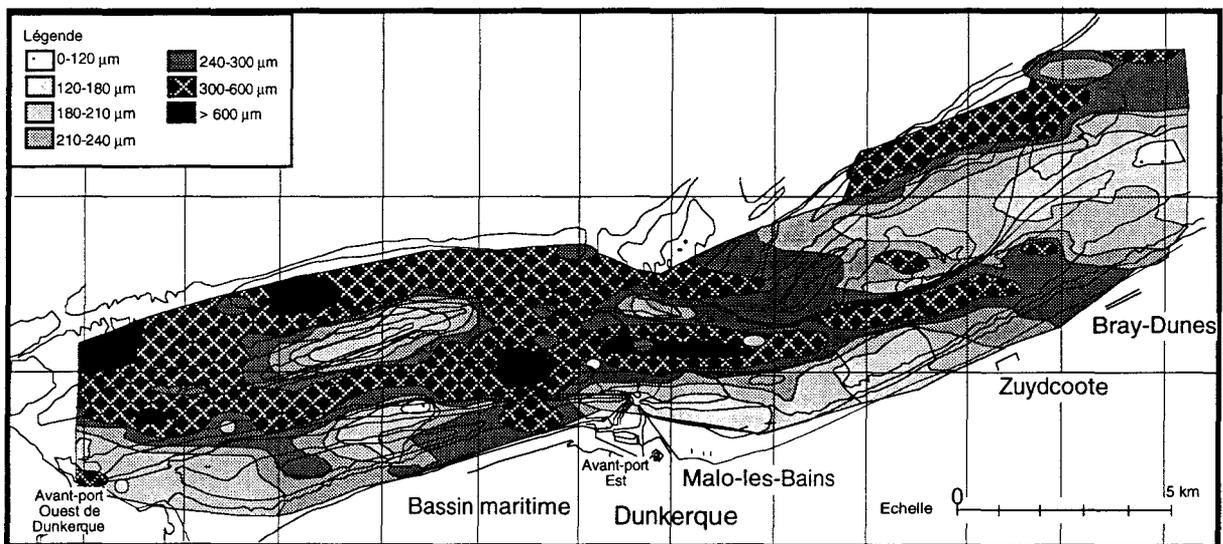


Figure III-21 : Répartition du grain moyen en septembre 1993 (en µm)

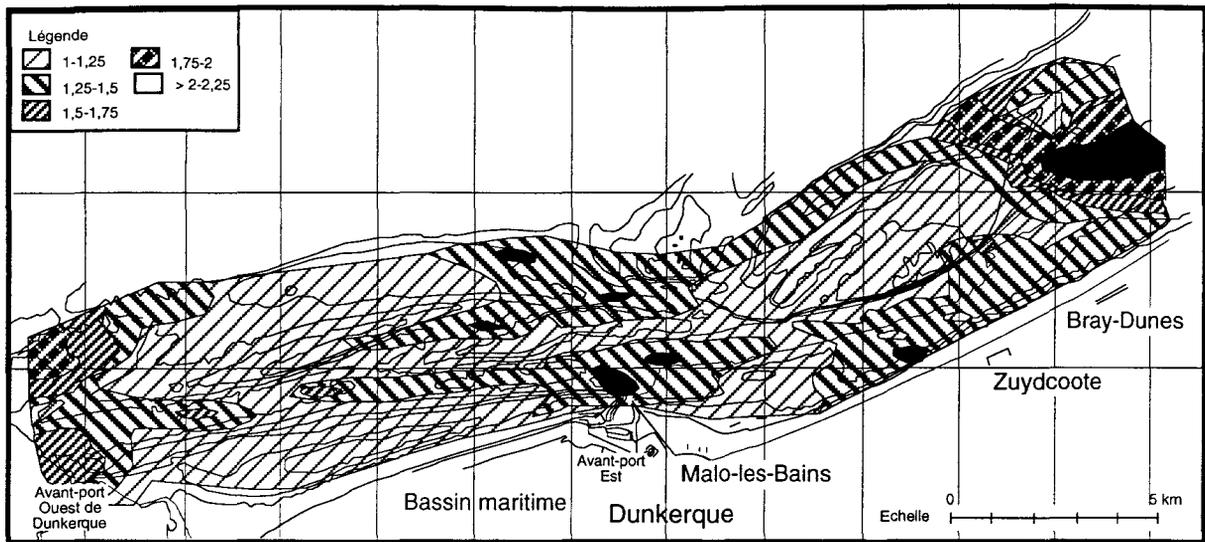


Figure III -22 : Répartition de l'indice de classement en 1988

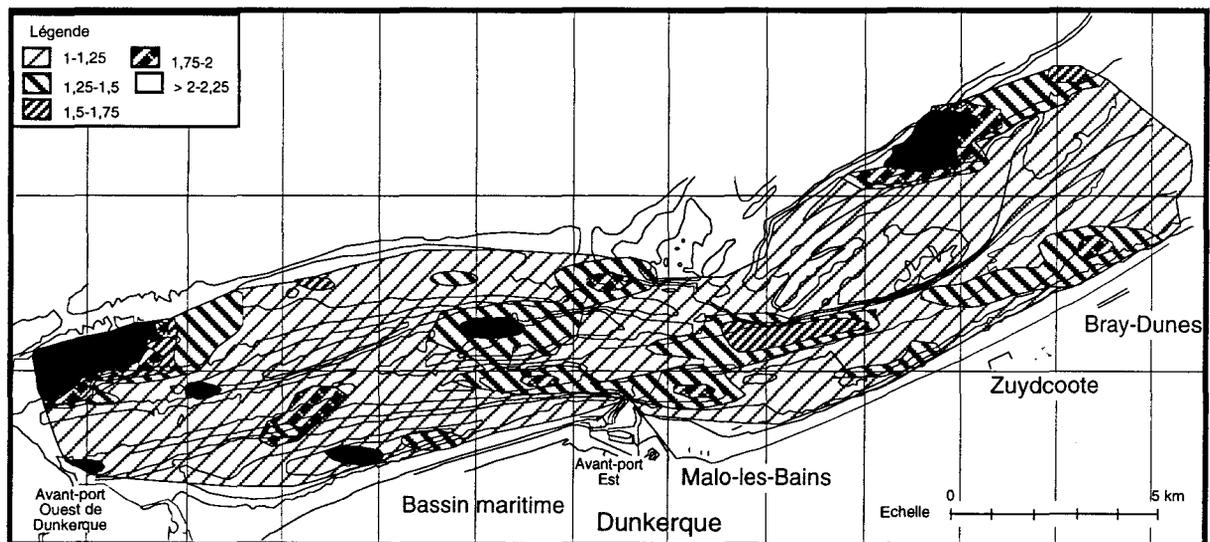


Figure III-23 : Répartition de l'indice de classement en septembre 1992.

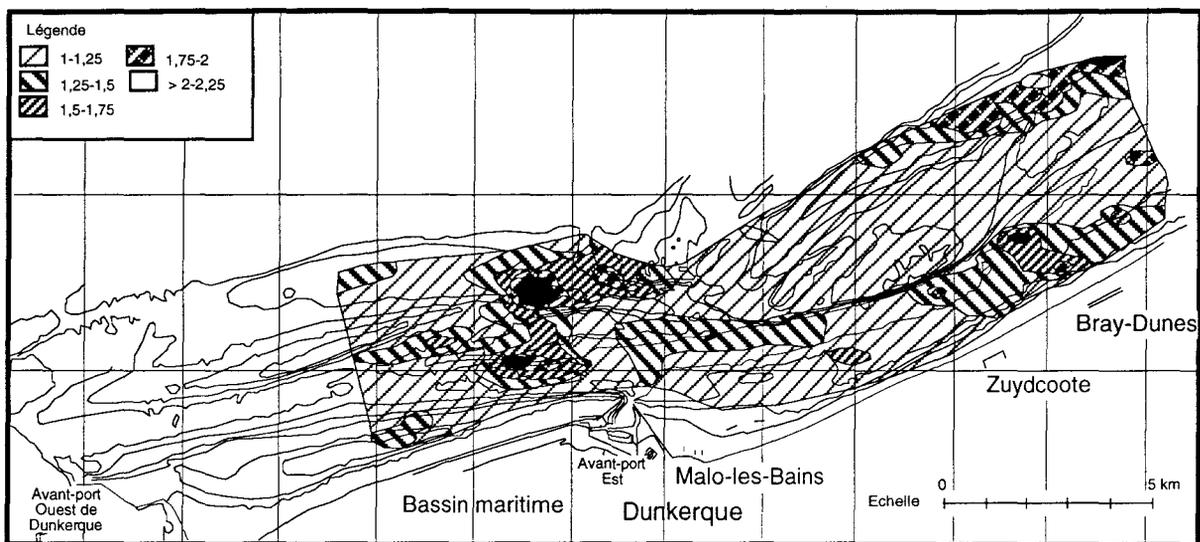


Figure III-24 : Répartition de l'indice de classement en juin 1993

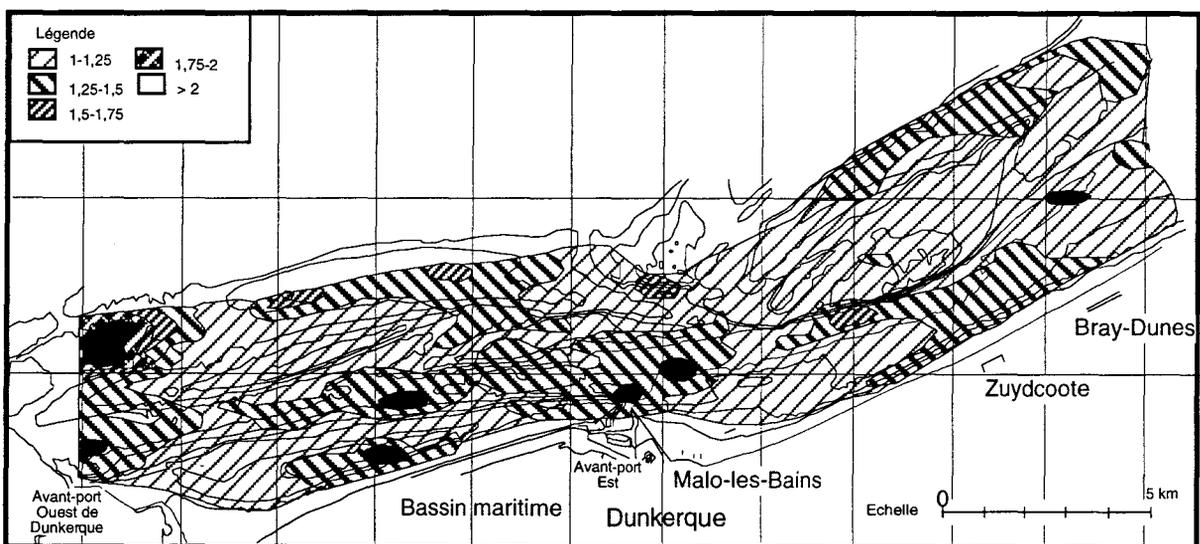


Figure III-25: Carte de répartition de l'indice de classement en septembre 1993

### III - 5 - 2 - 3 - Répartition de l'indice de classement

Les quatre cartes obtenues pour la répartition des sédiments en fonction de leur indice de classement sont assez semblables (fig. III-22 à III-25). De manière générale, les sédiments récoltés dans le domaine d'étude sont caractérisés par un indice de classement compris entre 1 et 1,25. Ils sont donc très bien classés, propres et homogènes. Les sédiments sont parfois bien à moyennement bien classés avec un indice de classement de 1,25 à 1,5.

Toutefois, à l'entrée du port Est de Dunkerque, face à Bray-Dunes, et localement, dans les chenaux plus profonds, les sédiments récoltés sont mal classés. Ces zones présentent des sédiments soit à faible valeur de grain moyen comme à l'entrée de l'avant-port Est de Dunkerque, soit au contraire à de forte valeur comme en face de l'avant-port Ouest de Dunkerque.

### III - 5 - 3 - INTERPRÉTATION

**Deux faits généraux** sont mis en évidence :

1) La **distribution générale des sédiments est très comparable au cours du temps**. En effet, les différentes cartes de distribution sédimentaire établies pour septembre 1992, juin 1993 et septembre 1993 sont semblables, ce qui résulte de conditions hydrodynamiques similaires, typiques d'un temps calme. Il est vraisemblable que cette répartition sédimentaire représente l'état le plus courant du site d'étude, en équilibre avec les conditions hydrodynamiques de faible énergie ;

2) **Cette distribution générale de faible énergie se corrèle assez bien aux variations de profondeur**. Ces dernières constituent par conséquent un élément de contrôle primordial de l'action des agents hydrodynamiques dans le domaine côtier étudié.

**Dans le détail**, les sédiments marins se répartissent en différents domaines dont les limites sont plus ou moins modifiées au cours du temps.

#### III - 5 - 3 - 1 - Distribution générale des sédiments

- Des **gradients de granularité décroissante** apparaissent d'une part du **large vers la côte**, et d'autre part **d'Ouest en Est**.

- Les **sédiments fins et moyens caractérisés par un bon indice de classement** sont localisés dans des zones de profondeur inférieure à 10 m, comme l'avant-plage entre l'avant-port Ouest de Dunkerque et Bray-Dunes, ainsi que les bancs du Snow, du Braek et du Hills.

- Les **sédiments fins possédant un mauvais indice de classement** sont observés en

domaine plus profond (jusqu'à 20 m), comme à l'entrée des avant-ports de Dunkerque et à l'extrémité Est du chenal d'accès aux ports.

- Les **sédiments les plus grossiers et hétérogènes** se situent souvent dans les zones plus profondes, au-delà de 10 m, comme dans les passes interbancs et le chenal d'accès aux ports de Dunkerque. Cependant, ils s'observent également à Bray-Dunes dans des zones moins profondes (talus littoral).

Une répartition sédimentaire comparable a déjà été observée en Mer du Nord. Du Cap Blanc Nez à la frontière franco-belge, Vicaire (1991) a mis en évidence que les chenaux sont formés de sédiments caillouteux et de sables grossiers, et les bancs de sables moyens à fins. Reineck & Singh (1980) indiquent, au niveau de l'Outer Jade en Mer du Nord, la présence de sables moyens ou grossiers mal classés dans les chenaux alors que les bancs sont constitués de sables fins et homogènes. De même, l'étude réalisée sur le banc d'Ostende par De Mayer & Wartel (1988) montre que les sédiments récoltés au sommet sont caractérisés par un diamètre moyen inférieur à 200  $\mu\text{m}$  et par un très bon indice de classement (sédiment homogène), cependant que le chenal comprend des sédiments grossiers très mal classés. Des observations similaires s'appliquent à d'autres bancs de la mer du Nord (Houbolt, 1968 ; Stride, 1982 et 1988 ; Mc Cave, 1985 ; Antia, 1993) et également sur la plate-forme continentale de l'océan Atlantique (Smith, 1969 ; Swift *et al.*, 1972, Davis *et al.*, 1993).

### III - 5 - 3 - 2 - Processus hydro-sédimentaires

- **L'action des courants de marée** est *a priori* responsable de la distribution des sédiments observée au cours de la présente étude, puisqu'aucune tempête ou période de mauvais temps n'a précédé les missions de prélèvement. Les conditions météorologiques de beau temps se caractérisent par une houle permanente de faible énergie. Rappelons que les courants de marée sont alternatifs. Le courant de flot, dominant, porte vers l'ENE et le courant de jusant, subordonné, vers l'WSW. Leurs vitesses sont plus élevées à l'Ouest qu'à l'Est, et elles sont minimales au niveau de la passe de Zuydcoote (Vicaire, 1991). Le transport tidal résultant se dirige donc vers l'ENE.

En général les courants de marée sont plus actifs et rapides dans les chenaux. Cela s'observe notamment dans la zone située à l'Ouest de l'avant-port Ouest de Dunkerque (Dewez, 1988 ; Clabaut 1988 ; Augris *et al.*, 1990 ; Vicaire 1991), et favorise l'érosion du substratum. L'érosion alimente les chenaux en matériel relativement grossier (cf. également Houbolt, 1968 ; King, 1972 ; Reineck & Singh, 1980).

L'atténuation du transit tidal résultant vers l'Est engendre un **gradient de granularité décroissante vers l'Est**. Ceci s'accorde aux résultats obtenus ailleurs par divers auteurs

(Amos é Nadeau, 1988 ; Grochowski *et al.*, 1993 ; Frihy *et al.*, 1994) qui ont également mis en évidence un affinement des sédiments dans le sens du transit dominant. Il en résulte que le **gradient granulométrique décroissant** est un indicateur de transport sédimentaire.

- Les **modèles de transport sédimentaire** établis à partir des paramètres granulométriques (Mc Laren 1981 ; Mc Laren & Bowles, 1984 ; Mc Laren *et al.*, , 1993 ; Gao & Collins 1991, 1992 ; Gao *et al.*, 1994 ; Masselink, 1992 et le Roux, 1994) montrent que le transport s'effectue généralement dans la direction où se trouvent les sédiments les mieux classés. Cela conduit à penser que le chenal contribue à alimenter les bancs et le talus littoral ce qui s'accorde avec la distribution des sédiments sur les bancs. Le processus envisagé comme responsable du maintien des bancs sableux serait alors un **transport sédimentaire par le courant de flot sur le flanc marin et par le courant de jusant sur le flanc côtier** comme l'ont proposé Kenyon *et al.* pour d'autres bancs (1981). Une telle interprétation est conforme au modèle établi par Caston (1972). Les bancs du Snouw et du Hills peuvent être conformes à un tel schéma et être de type a, c'est-à-dire de forme longitudinale (fig. III-26). Par contre, bien qu'il présente un contour sinueux (en forme de "S") de type c, le banc du Braek ne suit pas le modèle de Caston puisque son asymétrie est orientée vers la terre pour la partie Ouest et vers le large pour la partie Est.

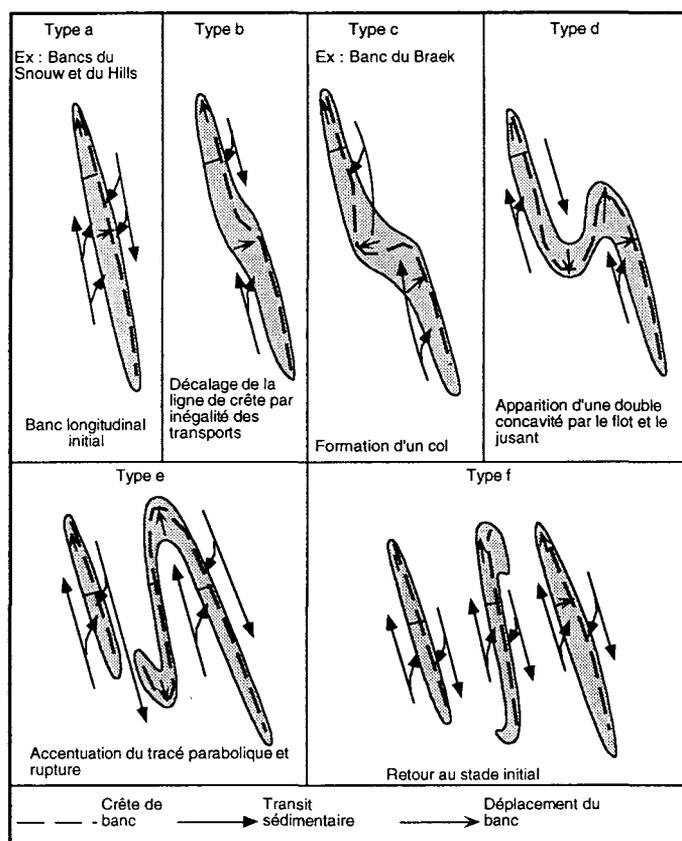


Figure III-26 : Les stades évolutifs d'un banc (Caston, 1972).

- Ces particularités de distribution sédimentaire suggèrent que le contrôle hydrodynamique des bancs côtiers de Dunkerque est mixte et résulte de l'action combinée des courants de marée et des houles de tempêtes, comme l'ont observé certains auteurs pour d'autres bancs (Amos & Nadeau, 1988 ; De Mayer & Wartel, 1988). En **période de conditions hydrodynamiques calmes, l'action dominante des courants de marée**, décrite précédemment, est probablement combinée à une action minimale des vagues dans la partie supérieure du banc. En **période hydrodynamique plus active, la houle deviendrait l'agent hydrodynamique** dominant. Le déferlement de la houle sur le flanc exposé remobiliserait les sédiments, transportés dans le sens de propagation de la houle. Les sédiments peuvent être ensuite redéposés sur le flanc abrité par dissipation de l'énergie de la houle. Sous de telles conditions **les bancs se déplacent dans le sens de la houle dominante** c'est-à-dire **principalement vers la côte** (Corbau, 1991). Ce schéma semble mieux adapté à notre secteur d'étude en raison de la faible profondeur d'eau et du cadre hydrodynamique général.

**Dans le domaine plus côtier** du talus littoral l'action de la houle de beau temps se combine à celle des courants de marée, favorisant la remise en suspension des sédiments, le tri puis le dépôt de **matériaux plus fins**.

Comme l'a montré le suivi de la répartition sédimentaire, c'est dans la zone située entre le port Est et le banc du Smal qu'on observe la plus grande variabilité de distribution granulométrique au cours du temps. Une zone de dépôt de dragage est située dans ce secteur et induit un apport régulier de matériaux très hétérogènes redistribués progressivement par les courants de marée. Ces dépôts de dragage contribuent donc à la variabilité sédimentaire de ce secteur. En outre, le banc du Smal présente une morphologie particulière, beaucoup plus étalée en largeur que les autres bancs. Son sommet émerge à marée basse. La partie Est du banc du Braek comprise dans la même zone est protégée de la houle frontale par le banc du Smal, sur lequel elle peut déferler. **Cet effet de brise-lames naturel favorise la migration vers le large de la partie occidentale du banc du Braek**, probablement sous l'action des courants de marée, tandis que sa partie occidentale non protégée se déplace vers la côte vraisemblablement sous l'action de tempêtes.

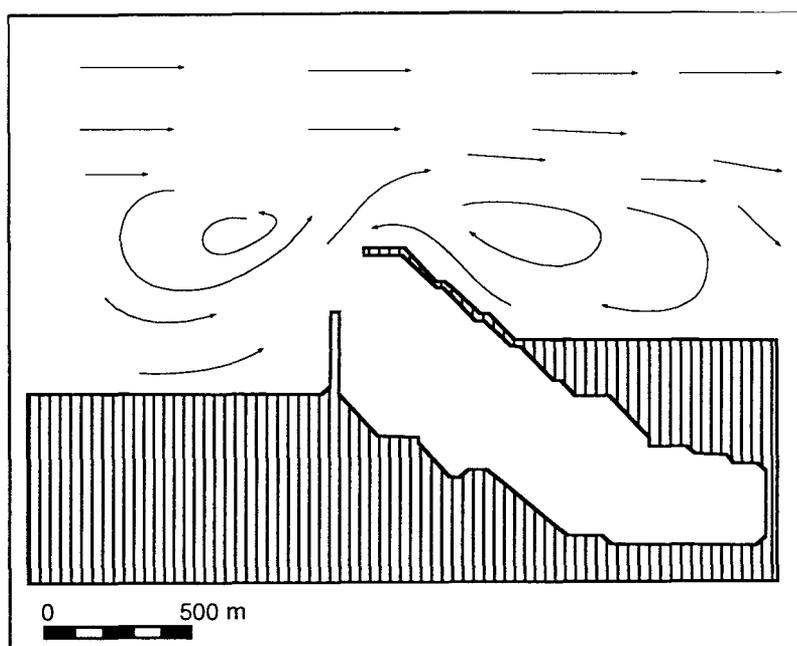
### III - 5 - 3 - 3 - Points particuliers

#### *Convergence des courants de marée vers la côte*

Les courants de marée, qui agissent dans le chenal d'accès à l'Est de Dunkerque, semblent être déviés vers la côte au niveau de Bray-Dunes, où les sédiments sont plus grossiers. Cette convergence des courants de marée paraît traduire une **réflexion du courant de flot sur le flanc abrupt du banc du Hills**. De la même façon, le resserrement du chenal, lié au déplacement du banc du Hills vers la côte, perturberait le transit sédimentaire tidal.

### *Influence des jetées du port Est*

Les **jetées** du port Est de Dunkerque, orientées de façon sub-perpendiculaire à la dérive sédimentaire tidale résultante, **constituent un obstacle au transit comparable à celui d'un épis** (Horikawa, 1988). Les sédiments plus grossiers sont retenus en amont, seuls les sédiments plus fins sont transportés au-delà du port Est. La diffraction des courants de marée sur les jetées du port Est entraîne un mouvement tourbillonnaire caractérisé par une convergence du courant de flot vers la côte à l'Est de Dunkerque (fig. III-27). **Les sédiments plus fins** sont de ce fait déposés **en aval-courant des jetées**, qui déterminent ainsi une zone d'"ombre".



**Figure III-27** : Schéma de transport par les courants de marée au niveau des jetées d'un port (L.N.H., 1978).

Les limites de cette influence des jetées portuaires demeurent à préciser. Par exemple pour le port de Calais, les modèles numériques indiquent que l'influence des jetées est de l'ordre du kilomètre (Latteux, 1979). Le détail des conditions hydrodynamiques doit intervenir, notamment l'intensité des courants de marée ainsi que l'orientation et l'intensité de la houle et du vent. L'influence des jetées du port Est de Dunkerque est moindre en période de tempête, marquée par des houles frontales de secteur NW à NE qui déterminent préférentiellement des transports perpendiculaires à la côte. Les houles sont probablement dans ce cas l'agent prédominant. Du reste les modèles de propagation établis par le LNH indiquent que l'énergie de la houle se concentre au niveau de Malo-les-Bains (Peltier & Le Saux, 1992).

Les jetées de l'avant-port Ouest de Dunkerque sont peut-être responsables d'un phénomène comparable, de dépôt des sédiments fins en aval-courant à la faveur d'une zone

"d'ombre". Si tel était le cas les limites d'influence du port Ouest seraient plus importantes qu'à l'Est car ses jetées sont plus étendues vers la mer.

### **III - 6 - ÉTUDE DE LA STRUCTURE INTERNE DES BANCS DU SNOUW ET DU BRAEK PAR SISMIQUE TRÈS HAUTE RÉOLUTION**

Diverses études ont été réalisées sur les différents types de bancs sableux afin de déterminer leurs origines et comprendre la dynamique actuelle (Off, 1963 ; Swift, 1973 ; Kirby & Oele, 1975 ; Stubbefield & Swift, 1976 ; Huthnance, 1982 ). Les levés bathymétriques, les prélèvements d'échantillons marins, l'acquisition de données hydrodynamiques, la prise de vue vidéo et la sismique de haute et très haute résolution sont les principales techniques mises en oeuvre dans ces études. Dans le cas présent les bancs du Snouw et du Braek ont fait l'objet d'une étude sismique très haute résolution (fig. III-9).

#### **III- 6 - 1 - PRÉSENTATION DE L'ÉTUDE**

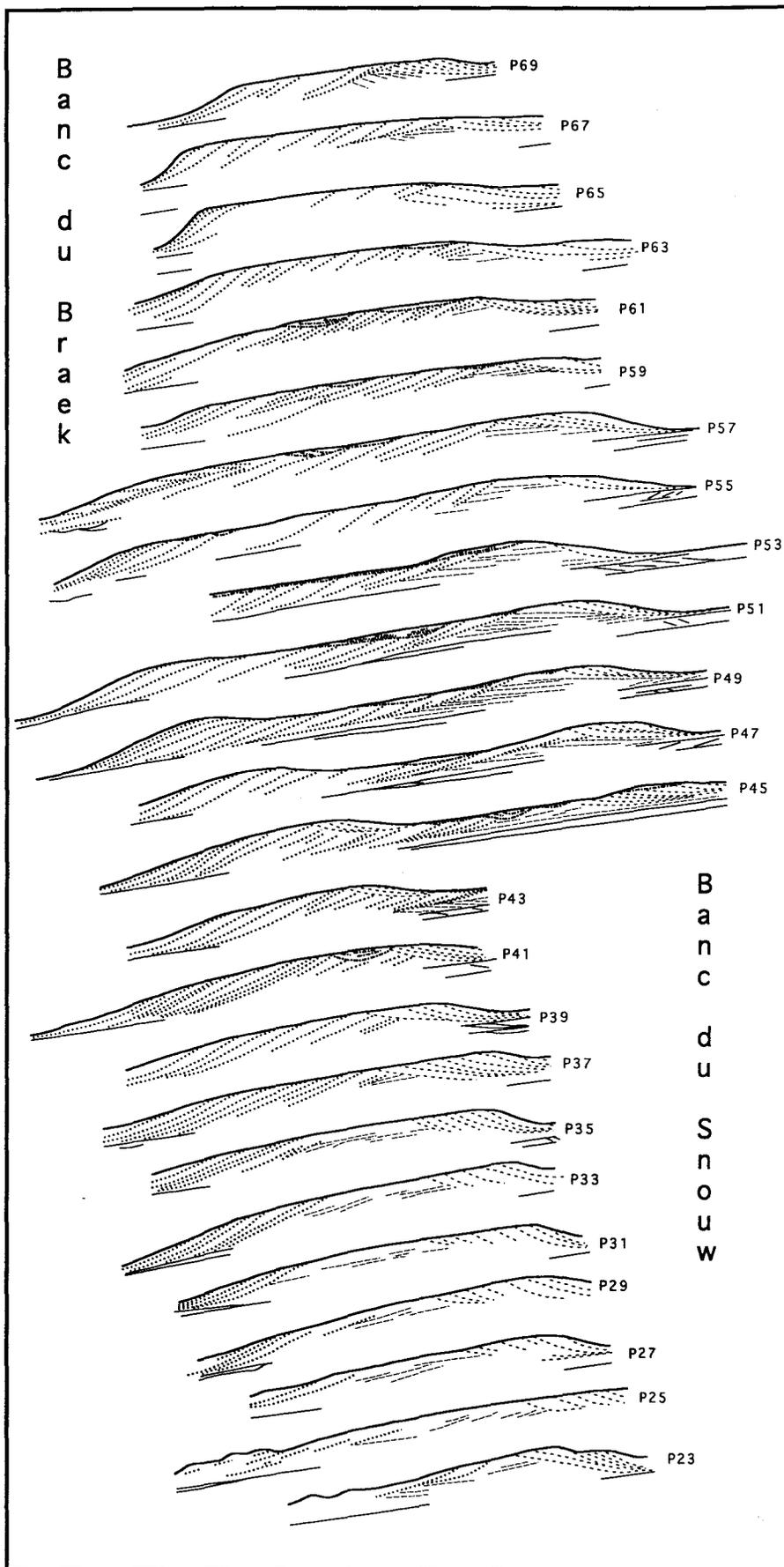
Suite aux premiers résultats obtenus sur les bancs côtiers de Dunkerque mettant en évidence un déplacement général de ces bancs en direction de la côte (Corbau, 1991, 1992) et vers l'Est (Lepetit & Leroy., 1977), nous avons entrepris une étude par sismique très haute résolution afin d'identifier leur structure interne et de mieux comprendre leur mode de mise en place et de migration (Tessier *et al.*, 1995). Pendant la mission les conditions météorologiques et hydrodynamiques étaient de faible énergie.

#### **III - 6 - 2 - ORGANISATION INTERNE DES BANCS DU SNOUW ET DU BRAEK**

Cinq types de réflecteurs sont différenciés sur les profils sismiques (fig. III-28). Ces réflecteurs sont décrits successivement par ordre d'importance relative décroissant :

- Les réflecteurs de **type 1** correspondent aux réflecteurs de base. Ils sont généralement continus, plans et faiblement inclinés en direction du Nord c'est-à-dire vers le large. Dans la partie la plus proximale du banc, ils sont fréquemment associés à un second réflecteur plus élevé dans le profil (ex : profils 27, 35, 39 à 57, 63, et 65). Entre les deux réflecteurs apparaissent parfois des réflecteurs plus obliques, orientés en direction soit du Sud (côte) soit du >Nord (large).

- Les réflecteurs de **type 2** sont situés au coeur du banc. Ils sont souvent discontinus, horizontaux, ou très faiblement inclinés vers le large. Les relations entre les réflecteurs 2 et 1 sont très difficilement observables, le multiple masquant une partie de l'information.



**Figure III-28 :** Reconstruction de la structure interne des bancs du Snow et du Break (d'après Tessier *et al.*, 1995).

- Les réflecteurs de **type 3** sont localisés sous le flanc extérieur, tourné vers le large. Ils sont continus et montrent une inclinaison proche de celle du banc. A la base, ils deviennent tangentiels aux réflecteurs de type 1. Au sommet ils rejoignent également la surface du banc. Il en résulte une morphologie sigmoïdale.

- Les réflecteurs de **type 4** sont observés sous le flanc interne, tourné vers la côte. Ils sont continus et leur pente est généralement plus forte que celle du flanc. Ils se terminent comme les réflecteurs de type 3 tangentiellement aux réflecteurs de type 1. Par contre leur terminaison sommitale est tronquée par la surface du banc.

- Les réflecteurs de **type 5** sont localisés à la surface du banc. Ils ne s'observent pas sur tous les profils et se situent essentiellement dans les dépressions entre les deux bancs (profils 45 à 51). Ils possèdent en général une forme en chenal.

Les relations entre les réflecteurs de type 2 et 3 et de type 2 et 4 sont de nature érosive mais elles ne sont pas toujours clairement exprimées.

La description est qui précède concerne la majorité des profils (profils 23 à 55) à l'exception de ceux localisés dans la partie orientale du Braek (profils 63 à 69) qui présentent une asymétrie inverse. Dans cette partie du banc, l'organisation interne diffère par les points suivants :

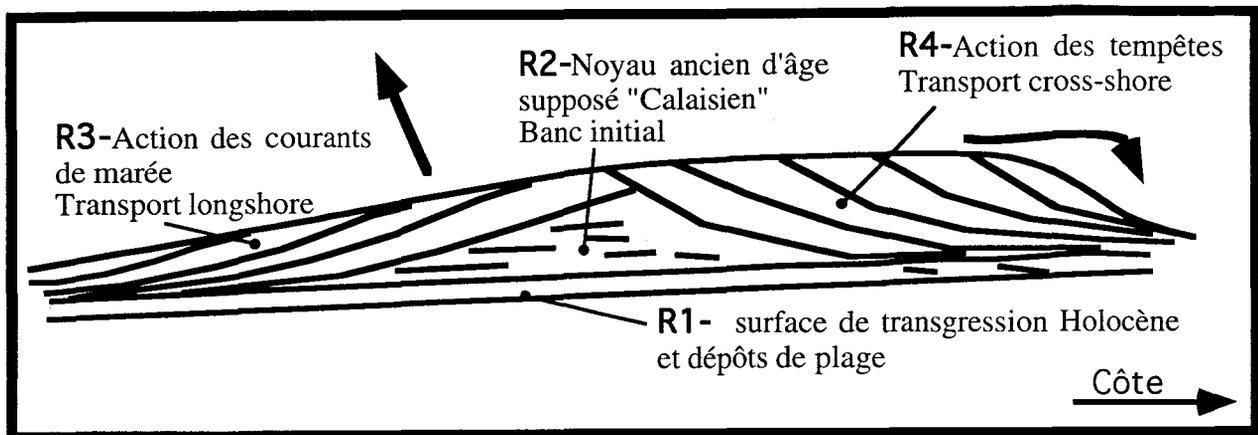
Les réflecteurs de type 3, associés au flanc externe plus déclive, sont plus pentés. Néanmoins leurs terminaisons sommitales et basales restent tangentielles respectivement à la surface du banc et aux réflecteurs de type 1.

Les réflecteurs de type 4, associés dans ce cas au flanc doux, sont moins inclinés. Au sommet ils sont tronqués par la surface du banc, à la base ils sont tangentiels aux réflecteurs de type 1.

Par ailleurs les relations entre les réflecteurs de type 3 associés au flanc externe et ceux de type 4 liés au flanc interne ne présentent pas un modèle constant. Sur la partie orientale du banc du Snouw les réflecteurs de type 3 sont recoupés par les ceux de type 4 (profils 37 à 43). A l'inverse sur la partie orientale du banc du Braek (profils 65 à 69) les réflecteurs de type 4 sont érodés par ceux de type 3.

### III - 6 - 3 - INTERPRÉTATION DE L'ORGANISATION INTERNE DES BANCs DU SNOUW ET DU BRAEK

L'organisation interne des bancs du Snouw et du Braek traduit à la fois leur **mécanisme de formation** et les **processus sédimentaires responsables de leur édification** (fig. III-29).



**Figure III-29** : Schéma général de l'organisation interne des bancs  
(d'après Tessier *et al.*, 1995).

#### *Base du banc*

Les réflecteurs de type 1, qui marquent la surface de base du banc, correspondent probablement à la **surface de transgression holocène**, comme cela est suggéré récemment par Collins *et al.* (1995) pour les bancs de Norfolk en Mer du Nord. Cette surface, d'épaisseur métrique, est liée à la présence de galets et de cailloutis qui constituent la semelle des bancs (Houbolt, 1968 ; Augris, 1990 ; Vicaire, 1991). L'origine supposée de ces cailloutis est fluviale et d'âge anté holocène (Vicaire, 1991). Les réflecteurs plans associés à ces réflecteurs représentent vraisemblablement le premier stade de transgression du banc et peuvent être interprétés comme des dépôts de plage.

#### *Développement du banc*

Les réflecteurs de type 2 situés au centre du banc sont considérés comme **noyau à l'origine du banc** (Laban & Schüttenhelm, 1980). Ils sont probablement liés à l'**assise de Calais** et sont supposés comme antérieurs à 4 000 B.P. (voire plus ancien). Ces réflecteurs très irréguliers sont mal identifiables, ce qui résulte d'un contraste d'impédance acoustique très faible pouvant caractériser un faciès sableux relativement homogène.

De toute évidence, ce noyau constitue un relief initial à partir duquel les bancs actuels ont pu se développer comme l'ont montré Laban & Schüttenhelm (1980) pour les "Zeeland Ridges". Il faut donc imaginer qu'au cours des premières transgressions de l'Holocène un premier alignement de bancs s'est formé (Assise de Calais). Ces bancs initiaux ont ensuite été en partie remaniés puis complètement submergés lors des dernières phases transgressives (Assise de Dunkerque). A partir de ce moment les bancs ont commencé à se développer.

#### *Mécanisme de migration actuelle des bancs*

La morphologie, la profondeur et l'organisation interne du banc du Snouw et de la partie occidentale du Braek conduisent à les assimiler à des **barres d'avant-côte**. L'organisation interne reproduit sensiblement la morphologie externe. Ce fait suggère que l'organisation reflète le mécanisme actuel de migration des bancs, qui serait le suivant :

- En **période de tempêtes accompagnées de houles frontales**, le flanc externe (marin) est érodé ; les sédiments sont transportés sur le flanc interne qui prograde vers la côte. Les transports sont essentiellement perpendiculaires à la côte mais une composante parallèle à la côte peut subsister sous l'action des courants de marée.

- En **période de beau temps**, l'action des courants de marée contribue vraisemblablement à une lente reconstruction du flanc externe. Les transports ont une composante parallèle à la côte dirigée vers l'Est sous l'effet du flot dominant. Les bancs tendent à migrer dans cette direction.

Dans le cas de la partie orientale du Braek le mécanisme paraît différent et contrôlé principalement par les courants de marée. En effet, elle est protégée des houles frontales par le banc du Smal qui agit comme un brise-lames. La migration sédimentaire s'effectue principalement vers le NE sous l'action du flot dominant.

**Ainsi les bancs du Snouw et du Braek se sont formés à partir d'un noyau interne et se sont progressivement développés en deux temps correspondant vraisemblablement aux deux événements transgressifs intra-holocène (Calais et Dunkerque).**

La dynamique actuelle des bancs est mixte, liée à la fois à la houle en période de mauvais temps et aux courants de marée en période de beau temps. Il apparaît donc que ces bancs sableux ne sont pas des formes exclusivement tidales comme l'ont suggérés certains auteurs (ex : Swift, 1975 qui considère que les courants de marée ne participent qu'au maintien du banc).

### **III - 7 - ÉTUDE DES CARTES DE DIFFÉRENTIEL OBTENUS À PARTIR DE LEVÉS TOPO-BATHYMETRIQUES**

Les six levés bathymétriques et topographiques effectués d'avril 1992 à décembre 1994 par le LNH et EUROSENSE entre Dunkerque Est et la frontière franco-belge ont permis de réaliser 5 cartes de différentiel.

#### **III - 7 - 1 - CONDITIONS MÉTÉOROLOGIQUES ET HYDRODYNAMIQUES**

Les levés d'octobre 1992, de juin 1994 et décembre 1994 ont été réalisés sous des conditions hydrodynamiques plus énergétiques que les levés d'avril 1992, de juin 1993 et septembre 1993 (tab. III-8). Le levé de décembre 1994 correspond à des coefficients de grandes vives-eaux (107).

Levés	Vents : secteurs et vitesses en m/s	Coeff. de marée
Avril 1992	26 - 28 mars : NW à N et 10 - 13 m/s Après le 28 : Sud et < à 10 m/s.	73 à 86 : moyenne ve
Octobre 1992	N à NE avec des vitesses atteignant 17 m/s	47 à 71 : me à pve
Juin 1993	Du 30 au 31 mai : SSW et 10 à 13 m/s. Juin : conditions météorologiques calmes	59 à 93 : me à ve
Septembre 1993	W à WNW et 12m/s	40 à 85 : me à ve
Juin 1994	NW à N et 17 m/s max	du 3 au 12 - 45 à 79 : me à pve du 12 au 18 - 79 à 58 : pve à me
Décembre 1994	WSW à W et 11 à 17 m/s (25 m/s max)	du 28/11 au 4/12 - 57 à 107 : me à gve du 4 au 12 - 107 à 45 : gve à me

**Tableau III 8** : les conditions météorologiques précédant les levés topo-bathymétriques

(ve : vive-eau, me: morte-eau, pve : petite vive-eau, gve : grande vive-eau)

### III - 7 - 2 - DIFFÉRENTIEL ÉTABLI ENTRE AVRIL 1992 ET OCTOBRE 1992

Le levé d'avril 1992 a été reporté manuellement dans le même système de projection cartographique et positionné par rapport au même zéro de référence que le levé d'octobre 1992. Cette opération a entraîné quelques erreurs qui n'ont pas permis d'effectuer le calcul des cubatures, normalement obtenu directement par traitement informatique.

La carte de différentiel présente une alternance de secteurs en érosion et en sédimentation (fig. III-30) :

#### *Évolution du talus littoral et du chenal*

Une première zone de sédimentation s'observe en face de la jetée Est du port de Dunkerque. Les valeurs de sédimentation sont de l'ordre de 0 à + 0,6 m. Cette zone d'environ 500 m de large s'étend jusqu'au chenal.

Ensuite, l'érosion domine depuis l'écluse Tixier jusqu'au camping de Malo-les-Bains. Les valeurs sont de l'ordre de -0,2 à -0,4 m, voire localement plus élevées. Notons que des phénomènes locaux de sédimentation sont observés au large du camping de Malo-les-Bains.

Entre l'extrémité Ouest de Malo-terminus et les dunes du terrain de manoeuvre de Leffrinckoucke, les phénomènes d'engraissement, de l'ordre de + 0,1 à + 0,4 m, prédominent à nouveau. Néanmoins, l'érosion est légèrement supérieure en face des dunes du terrain de manoeuvre de Leffrinckoucke .

La partie orientale de la zone d'étude n'a pas pu être prospectée en raison de mauvaises conditions météorologiques.

#### *Évolution de l'estran*

La topographie n'ayant pas été réalisée jusqu'en haut de l'estran au mois d'avril 1992, les informations obtenues de ce fait demeurent incomplètes. Les zones en érosion et en engraissement, s'organisent en bandes sub-parallèles à la côte depuis l'extrémité Ouest de Malo-terminus jusqu'à Zuydcoote. Localement des valeurs relativement élevées sont observées, notamment entre Malo-terminus et la batterie de Zuydcoote.

Immédiatement autour des brise-lames, des engraissements de très faible ampleur s'observent, mais au Sud et au Nord apparaissent des érosions d'intensité plus forte.

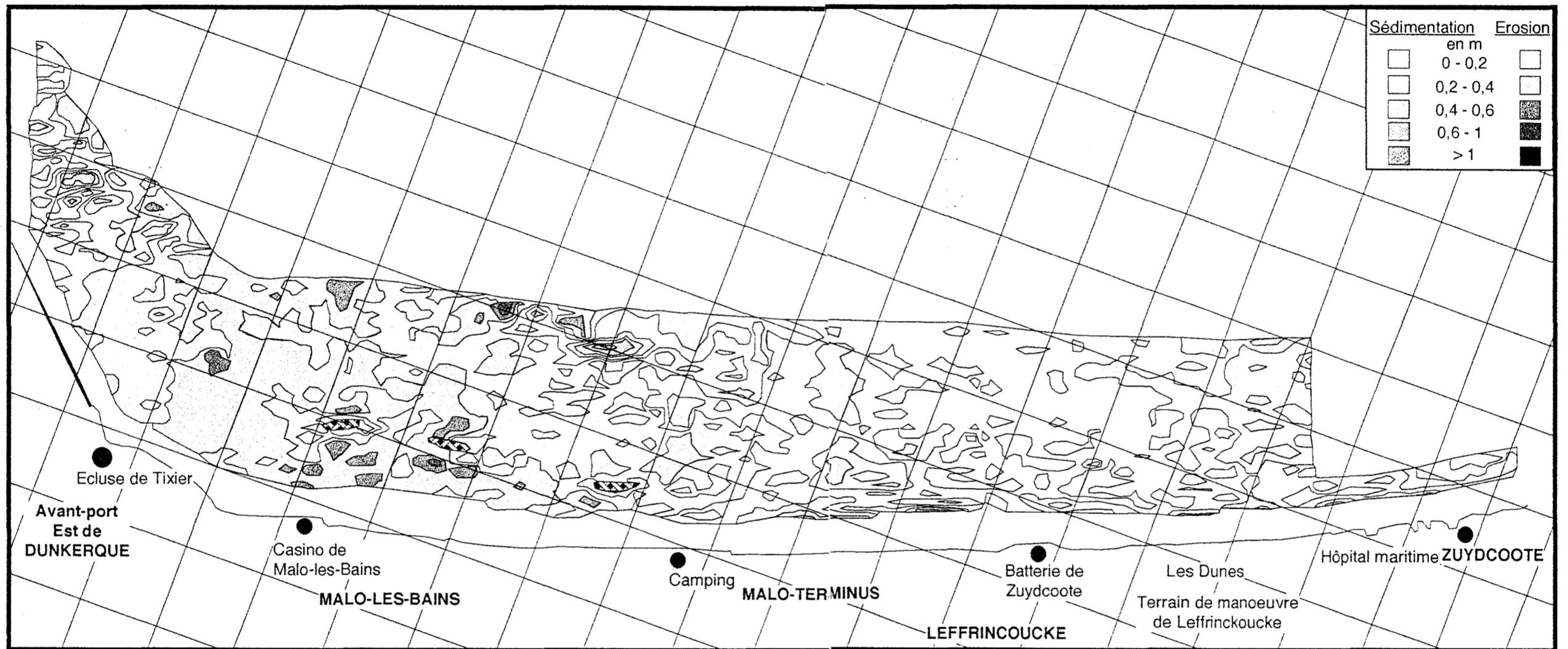


Figure III - 30 : Carte de différentiel établi entre avril 1992 et octobre 1992

### III - 7 - 3 - DIFFÉRENTIEL ÉTABLI ENTRE OCTOBRE 1992 ET JUIN 1993

L'allure générale de la carte de différentiel montre une tendance à l'engraissement. Dans le détail les érosions et les sédimentations se répartissent en différents secteurs (fig. III-31) :

#### *Évolution du talus littoral et du chenal*

Une première zone en érosion s'étend en face de la jetée Est de Dunkerque sur une distance de 500 m environ ; des valeurs importantes d'érosion s'observent, dépassant localement 1m.

L'évolution bathymétrique devient ensuite positive dans un domaine qui s'étend jusqu'à l'extrémité Est de Malo-les-Bains. Les valeurs sont comprises entre +0,2 et +0,4 m. Toutefois quelques secteurs en érosion s'observent, en particulier au large du camping de Malo-les-Bains.

L'érosion augmente vers l'Est et devient prédominante entre Malo-terminus et les dunes du terrain de manoeuvre de Leffrinckoucke.

#### *Évolution de l'estran*

L'évolution se caractérise par des bandes sub-parallèles à la côte, alternativement en érosion et en engraissement. Elles sont surtout développées à l'Est de Malo-terminus mais les amplitudes des variations sont limitées. L'estran de Malo-les-Bains est caractérisé par des engraissements de forte amplitude.

De faibles érosions sont localisées autour des brise-lames, au Nord et au Sud desquels s'observent une sédimentation importante.

Le calcul des volumes indique que l'évolution de la zone est plutôt positive déterminant un léger engraissement sédimentaire:

engraissement : **1 492 075 m<sup>3</sup>**

érosion : **953 275 m<sup>3</sup>**

### III - 7 - 4 - DIFFÉRENTIEL ÉTABLI ENTRE JUIN 1993 ET SEPTEMBRE 1993.

L'engraissement domine sur l'ensemble de la zone avec des valeurs de l'ordre de +0,2 à +0,4 m. Dans le détail, on observe les changements suivants (fig. III-32) :

#### *Évolution du talus littoral et du chenal*

En face de la jetée Est du port de Dunkerque, les valeurs d'engraissement sont importantes et de l'ordre de +0,4 à +0,6 m en moyenne. Elles peuvent localement dépasser le mètre. La zone située entre l'écluse de Tixier et Malo-terminus présente un engraissement de +0,3 à +0,6 m. Entre l'extrémité Est de Malo-terminus et la Batterie de Zuydcoote l'engraissement devient faible. Les valeurs sont comprises entre +0,1 et +0,2 m en moyenne. Au large du terrain de manoeuvre militaire une zone d'engraissement important, large de plus de 1000 m, réapparaît (entre +0,3 et +0,4 m). Ensuite les valeurs d'engraissement diminuent progressivement vers l'Est (+0,1 à +0,2 m). Enfin, à l'extrémité Est du secteur d'étude les valeurs d'engraissement augmentent à nouveau pour atteindre +0,4 m.

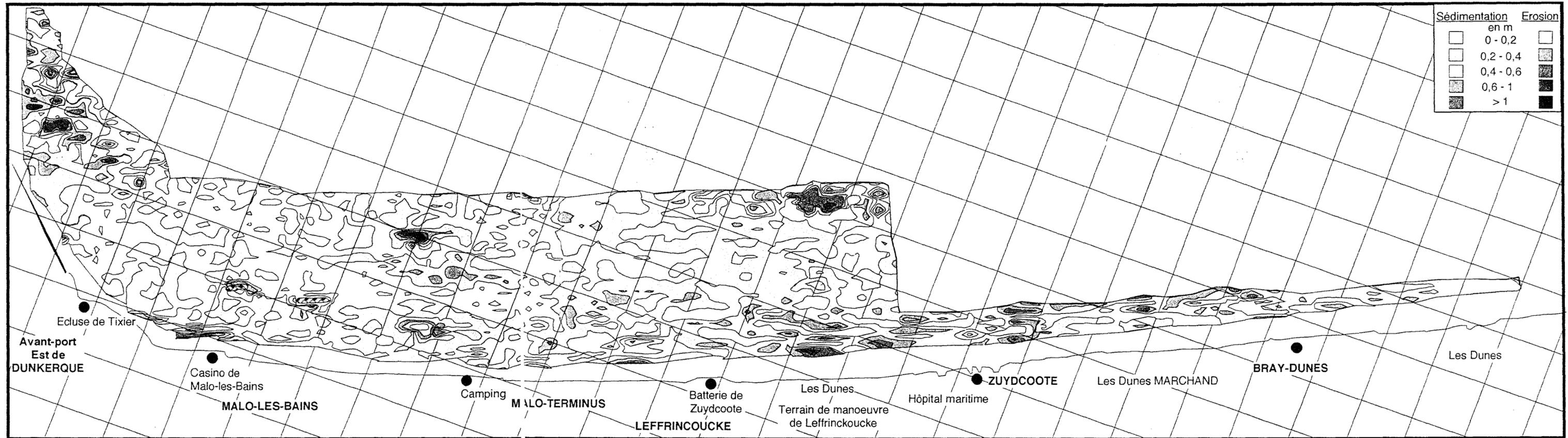


Figure III - 31 : Carte de différentiel établi entre septembre 1992 et juin 1993.

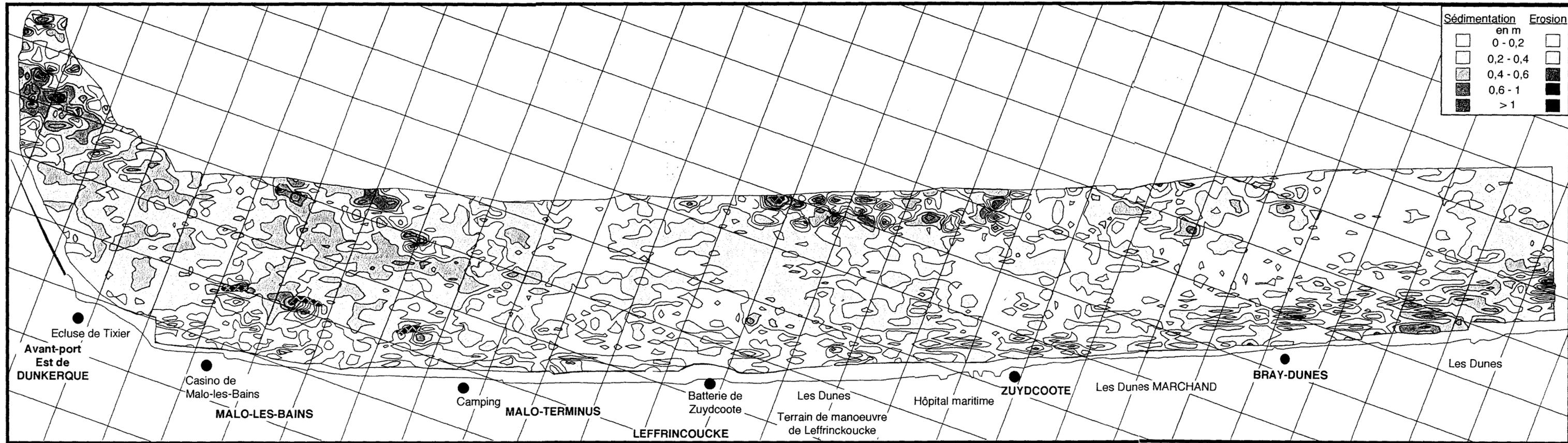


Figure III - 32 : Carte de différentiel établi entre juin 1993 et septembre 1993.

### *Évolution de l'estran*

L'engraissement tend également à dominer en domaine d'estran mais son amplitude est généralement plus faible que dans le chenal ou sur le talus littoral. Seul l'estran à l'Est de Bray-Dunes montre de fortes valeurs d'élévation atteignant + 0,8m. A nouveau les phénomènes s'organisent en bandes parallèles à la côte principalement à l'extrémité Est du secteur.

Autour des brise-lames des valeurs d'engraissement de +0,7 m s'observent, alors qu'au Nord et au Sud dominant des érosions de -0,1 à -0,4 m apparaissent.

Le calcul des volumes érodés et sédimentés indique que l'engraissement est important et l'érosion faible :

engraissement : **5 061 300 m<sup>3</sup>**

érosion : **359 550 m<sup>3</sup>**

### III - 7 - 5 - DIFFÉRENTIEL ÉTABLI ENTRE SEPTEMBRE 1993 ET JUIN 1994

L'érosion est dominante surtout dans le secteur Ouest au niveau de Malo-les-Bains et à l'extrémité orientale du secteur d'étude (fig. III-33) :

### *Évolution du talus littoral et du chenal*

En face de la jetée Est du port de Dunkerque les zones en érosion ou en engraissement se répartissent de façon aléatoire et définissent un secteur d'évolution "mixte" qui s'étend sur une largeur d'environ 1 km. Les valeurs des variations dépassent localement un mètre. Les fortes valeurs d'érosion se situent en domaine plus profond au niveau de l'entrée du port Est.

Entre l'écluse de Tixier et Malo-terminus les valeurs d'érosion atteignent -0,4 m. Néanmoins des valeurs plus importantes, jusqu'à -1 m, sont relevées plus au large. Très localement apparaissent des zones en engraissement.

Le domaine situé entre Malo-terminus jusqu'à la Batterie de Zuydcoote présente également une évolution mixte. L'accumulation, de l'ordre de +0,1 à +0,4 m, tend à dominer, mais des valeurs d'érosion de même amplitude sont notées.

De la Batterie de Zuydcoote à la limite Ouest de l'Hôpital maritime l'évolution bathymétrique redevient globalement négative (-0,1 à -0,4 m). Dans le chenal d'accès, les phénomènes d'érosion et d'engraissement sont importants et s'organisent plus ou moins en bandes parallèles à la côte.

Le secteur compris entre l'Hôpital maritime de Zuydcoote et les dunes de Bray-Dunes est dans son ensemble caractérisé par un léger engraissement de +0,1 à +0,2 m.

Enfin le domaine situé à l'Est du secteur d'étude est en nette érosion sur une largeur de 1000 m. Les valeurs augmentent progressivement vers la frontière pour atteindre -0,6 m.

### *Évolution de l'estran*

Sur l'estran les phénomènes d'engraissement ou d'érosion, d'amplitude relativement élevée, alternent et s'organisent en bandes parallèles à la côte. A nouveau bien moins développées à l'Ouest du secteur, sur l'estran de Malo-les-Bains, ces bandes alternent sur une largeur de 600 m à l'Est du secteur.

Autour des brise-lames la sédimentation domine, avec localement une certaine érosion.

Le calcul des cubatures indique que l'érosion est prépondérante :

engraissement : **1 940 975 m<sup>3</sup>**

érosion : **3 495 500 m<sup>3</sup>**

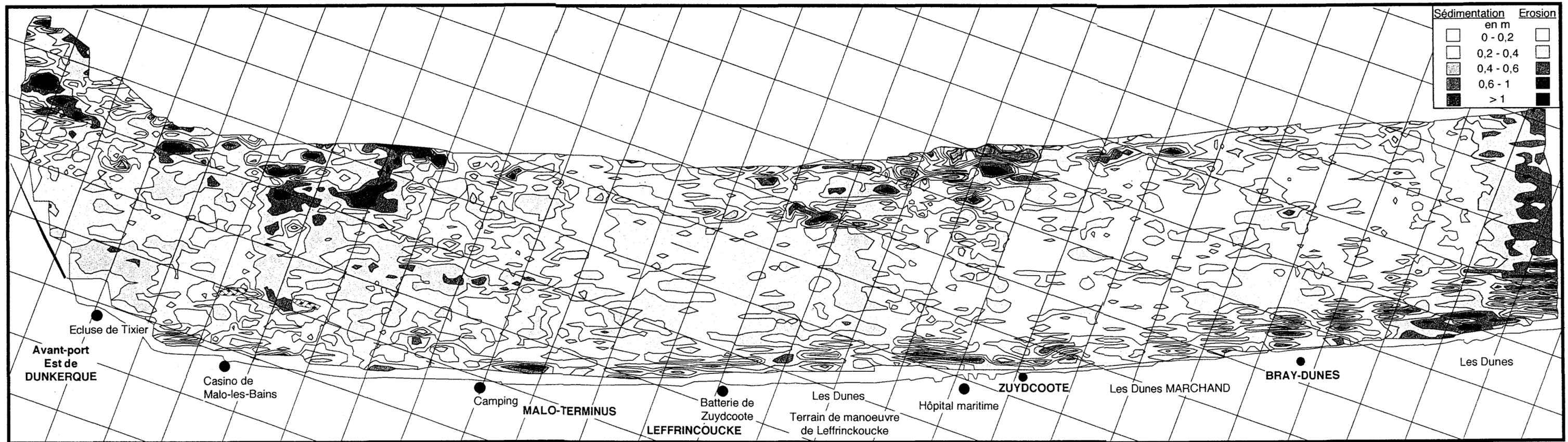


Figure III - 33 : Carte de différentiel établi entre septembre 1993 et juin 1994

### III - 7 - 6 - DIFFÉRENTIEL ÉTABLI ENTRE JUIN 1994 ET DÉCEMBRE 1994

#### *Évolution du talus littoral et du chenal*

L'érosion est dominante sur tout le secteur et tend à s'intensifier d'Ouest en Est (fig. III-34). Les valeurs sont en moyenne de -0,2 à -0,4 m.  
La zone située au large de l'écluse de Tixier se distingue par un engraissement de l'ordre de +0,1 à +0,4 m. En domaine plus distal, l'engraissement s'étend localement jusqu'à Malo-terminus.  
Au niveau de Malo-terminus l'érosion devient un peu plus importante et dépasse plus d'un mètre dans le chenal.  
De Malo-terminus à l'Hôpital maritime de Zuydcoote, l'érosion est faible sur le talus littoral (de -0,1 à -0,2 m), et plus forte dans le chenal (de -0,3 à -0,6 m).  
La zone située entre l'hôpital maritime de Zuydcoote et Bray-Dunes se caractérise par une augmentation de l'érosion (-0,3 à -0,8 m).

#### *Évolution de l'estran*

L'estran montre une évolution à caractère mixte avec des bandes d'érosion et de sédimentation parallèles au rivage. La partie supérieure de l'estran est dominée par l'engraissement.  
Les brise-lames semblent favoriser un engraissement sur les côtés Nord et Sud, et une érosion sur les côtés Est et Ouest.

Le calcul des volumes de sédiments érodés ou accumulés indique que l'érosion est dominante :

engraissement : **942 225 m<sup>3</sup>**

érosion : **3 984 175 m<sup>3</sup>**

### III - 7 - 7 - COMPARAISON ET INTERPRÉTATION

**Chaque carte de différentiel exprime de manière directe les variations de profondeur et d'altitude d'une époque à l'autre.** Ces cartes permettent ainsi de localiser les processus d'érosion et de sédimentation et de les rattacher à certaines conditions hydrodynamiques et météorologiques. Nous avons considéré que ces processus étaient liés aux conditions précédant directement l'époque du levé bathymétrique et topographique, aucune tempête n'ayant affecté de façon sévère la zone entre avril 1992 et décembre 1994 (cf. données Météo France).

L'étude des cartes de différentiel revient donc à comparer deux états temporaires de la zone. Pour expliquer ces états temporaires et prendre en considération les évolutions d'origine saisonnière (situation "estivale", situation "hivernale"), les conditions hydrodynamiques et météorologiques des 15 jours précédant chaque mission ont été prises en compte, ainsi que les conditions générales qui ont régné entre les levés successifs.

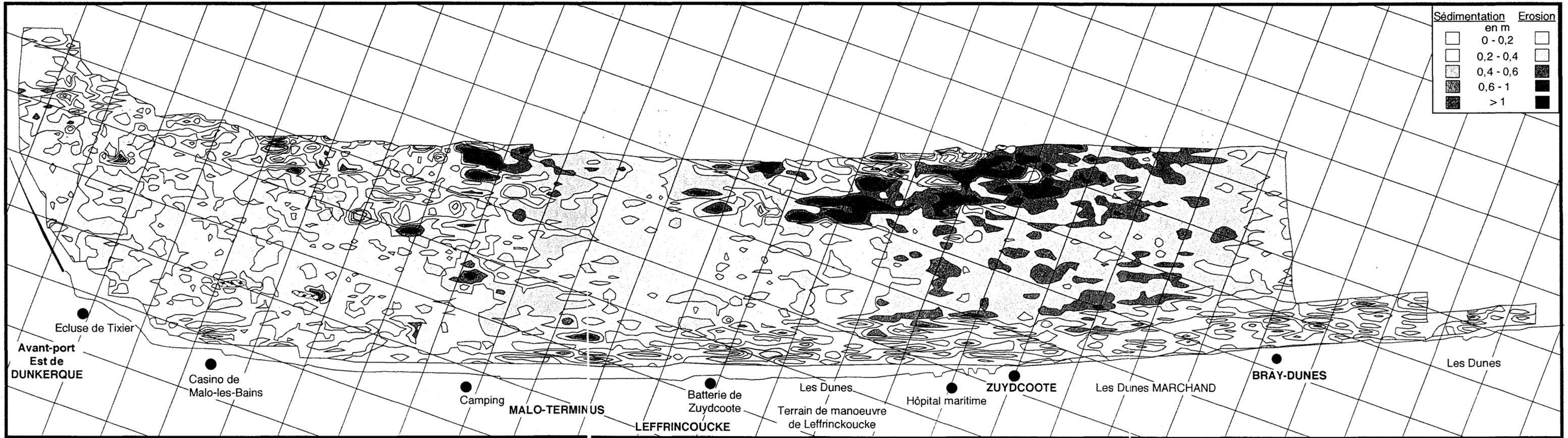


Figure III - 34 : Carte de différentiel établi entre juin 1994 et décembre 1994

L'examen des différentes cartes de différentiel met en évidence les **faits principaux suivants** :

1) La **distribution globale des phénomènes d'érosion ou de sédimentation le long du littoral Est dunkerquois n'est pas aléatoire au cours du temps** et permet de définir **cinq secteurs** : l'entrée du port de Dunkerque, Malo-les-Bains, de Malo-terminus à l'Hôpital maritime de Zuydcoote, de Zuydcoote à Bray-Dunes, et de Bray-Dunes à la frontière franco-belge (tab. III - 9). Ces secteurs sont assez bien individualisés mais leurs limites fluctuent d'une époque à l'autre.

2) Le **bilan global de septembre 1992 à décembre 1994 est positif** : sédimentation = 9 436 575 m<sup>3</sup>, érosion = 8 792 500 m<sup>3</sup>. L'examen des conditions hydrodynamiques et météorologiques permet de rattacher les processus **d'engraissement principalement aux périodes de beau temps ainsi que localement à des phénomènes plus ponctuels**. Les processus d'érosion sont associés aux conditions hivernales, et aux houles frontales et aux grandes marées en particulier. En général les érosions sont compensées par les engraissements de l'été.

3) Sur l'estran les zones en érosion ou en sédimentation se répartissent de façon quelconque du port de Dunkerque à Malo-les-Bains. Elles s'organisent par contre en bandes sub-parallèles à la côte de Malo-terminus à la frontière franco-belge.

Dans le détail, l'étude des cartes de différentiel apporte de nombreux enseignements sur les facteurs qui contrôlent les mouvements sédimentaires sur l'estran et le talus littoral. Elle met par ailleurs en évidence l'existence de secteurs plus mobiles que d'autres.

Agitée W gVE	<b>Déc. 1994 à Juin 1994</b>					s : 942 225 m <sup>3</sup>  <b>E :</b> <b>3 984 175 m<sup>3</sup></b>	Bas du talus et chenal en érosion par flot renforcé. Engraissement de la plage par déferlement et érosion "hivernale".	
Assez agitée NW N pVE		<b>Juin 1994 à Sept. 1993</b>					s : 1 940 975 m <sup>3</sup>  <b>E :</b> <b>3 495 500 m<sup>3</sup></b>	Érosion par houle frontale et "érosion hivernale".  Secteurs protégés des houles par banc du Hills.
Calme ME VE	<b>Sept. 1993 à Juin 1993</b>						<b>S :</b> <b>5 061 300 m<sup>3</sup></b>  e : 359 550 m <sup>3</sup>	Engraissement général estival par beau temps
Calme ME VE		<b>Juin 1993 à Oct. 1992</b>					<b>S :</b> <b>1 492 075 m<sup>3</sup></b>  e : 953 275 m <sup>3</sup>	Équilibre des phénomènes entre engraissement par temps calme et érosion hivernale
Agitée N NE ME pVE	<b>Oct. 1992 à Avril 1992</b>						<b>S &gt; e</b>	Effet houle frontale à Malo-les-Bains Effet de retenu par les jetées Secteurs protégés des houles par banc du Hills
Assez calme VE								
<b>ÉPOQUE</b>		Entrée port Est	Malo-les-Bains	de Malo-terminus à l'Hôpital maritime de Zuydcoote	de Zuydcoote à Bray-Dunes	Est de Bray- Dunes	<b>BILANS</b>	<b>INTERPRÉTATIONS</b>
<b>SECTEURS</b>							<b>SECTEURS</b>	

	Érosion forte		Sédimentation forte		Érosion et sédimentation forte
	Érosion faible		Sédimentation faible		Érosions en bandes sub-parallèles à la côte
	Érosion et sédimentation en bandes sub-parallèles à la côte				

**Tableau III - 9 :** Principaux résultats obtenus à partir des cartes de différentiel.  
 (VE : vive-eau, ME : morte-eau, p VE petite vive-eau, g VE : grande vive-eau, **E** : érosion dominante, e : érosion, **S** : sédimentation dominante, s : sédimentation)

Les conditions hydrodynamiques et météorologiques, dont les effets sont comparés grâce aux cartes de différentiel, peuvent être classées en trois catégories principales :

beau temps avec coefficients de marée moyens et croissants (BT, VE).

mauvais temps relatif avec coefficients de marée moyens et croissants (MT, VE)

mauvais temps relatif avec grande vive-eau (MT, g VE).

A ces conditions, s'ajoutent deux situations faisant état des tendances saisonnières post-hivernale et post-estivale (tab. III-10).

	Conditions météorologiques et hydrodynamiques		Tendances saisonnières
décembre 1994	MT	GVE	hivernal
juin 1994	MT	VE	post-hivernal
septembre 1993	BT	VE	post-estival
juin 1993	BT	VE	post-hivernal
octobre 1992	MT	VE	post-estival
avril 1992	BT	VE	hivernal

**Tableau III-10 :** Conditions météorologiques et hydrodynamiques et tendances saisonnières.

(MT : mauvais temps, BT : beau temps, GVE : grande vive-eau, VE : vive-eau).

### III - 7 - 7 - 2 - Mouvements sédimentaires par beau temps et marées moyennes

Cette situation correspond aux cartes de différentiel entre octobre 1992 et juin 1993 et, entre juin 1993 et septembre 1993.

#### **Les bilans sédimentaires sont globalement positifs.**

En situation **post-estivale** (juin 93 - sept. 93), les phénomènes d'accumulation l'emportent largement sur l'érosion. L'estran, soumis aux **vagues de beau temps**, s'engraisse. Les valeurs d'accumulation diminuent progressivement vers l'Est et plus particulièrement à partir de Zuydcoote. Ce secteur constitue la limite de la zone d'ombre à forte sédimentation déterminée par les jetées du port Est de Dunkerque. Enfin les faibles valeurs d'accumulation notée face à Bray-Dunes témoignent peut-être d'une concentration d'énergie due à la convergence des courants de marée vers ce secteur, comme cela a pu être détecté à partir de l'étude des répartitions sédimentaires.

En situation **post hivernale** (oct. 92 - juin 93), les bilans tendent à s'équilibrer. **Les accumulations par temps calme semblent compenser l'érosion générale hivernale.** Malgré tout, les bilans au niveau de l'estran restent déficitaires, et les érosions dominent à l'entrée du port Est et entre Malo-terminus et l'Hôpital maritime de Zuydcoote. Ce dernier fait tend à démontrer que les jetées du port Est provoquent des phénomènes actifs d'érosion. La zone "d'ombre" ne présente qu'une faible extension après les conditions hivernales.

### III - 7 - 7 - 3 - Mouvements sédimentaires par mauvais temps relatifs et marées moyennes

Cette situation est représentée par les cartes de différentiel entre avril 1992 et octobre 1992, ainsi qu'entre septembre 1993 et juin 1994.

**Les bilans sont négatifs.**

En situation **post-estivale** (avr. 92 à oct. 92) l'érosion dominante est de faible amplitude. La zone la plus soumise à l'érosion est située face à Malo-les-Bains qui subit directement l'**action des houles frontales de secteur N à NE**, tandis que les sédiments semblent rester bloqués au niveau des jetées du port (engraissement). Les bilans positifs observés également entre Malo-les-Bains et l'Hôpital maritime de Zuydcoote tendent à démontrer que ce secteur est protégé par le banc du Hills de l'action directe des houles frontales de secteur N à NE.

En situation **post-hivernale** (sept 93 à juin 94), les bilans sont cette fois-ci très négatifs. **Les effets de la houle frontale de NW se concentrent particulièrement à Malo-les-Bains et à l'Est de Bray-Dunes**. La dissipation d'énergie de ces houles par leur déferlement sur le banc du Hills se marque principalement entre Zuydcoote et Bray-Dunes (secteur en sédimentation). Le banc du Hills joue donc le rôle naturel de brise-lames.

III - 7 - 7 - 4 - Mouvements sédimentaires par mauvais temps relatif et grandes marées

Cette dernière situation correspond à la carte de différentiel entre juin 1994 et décembre 1994.

**Les bilans sédimentaires sont très largement déficitaires** et seul le secteur face au Casino de Malo-les-Bains et l'estran sont en accumulation.

Les érosions sont vraisemblablement provoqués par **les forts coefficients de marée canalisés dans le chenal**, et notamment le flot renforcé par des vents de secteur Ouest. L'action de la houle est probablement limitée puisque les modèles du LNH révèlent une dissipation de l'énergie de la houle de secteur WSW entre Malo-les-Bains et Bray-Dunes (Peltier & Le Saux, 1992). La zone d'ombre en arrière des jetées du port Est semble, dans ces conditions d'intenses courants, limitée en face du Casino de Malo-les-Bains. Enfin ces conditions apparaissent favorable à l'engraissement de l'estran.

III - 7 - 7 - 5 - Mouvements sédimentaires propres à l'estran

Le plus souvent les phénomènes d'érosion et de sédimentation se répartissent à l'Est de Malo-les-Bains en bandes sub-parallèles à la côte. Cette répartition s'explique par **la formation, la migration et la destruction des barres et bâches parallèles à la côte typiques de la zone d'estran** (cf. ch IV).

A Malo-les-Bains, les bandes sont mal définies. Les **brise-lames** et les jetées du port sont

vraisemblablement responsables de ce phénomène. En effet, le déferlement de la houle permanente de beau temps sur les brise-lames dissipe son énergie et empêche la formation de barres en période de beau temps. Les jetées constituent un obstacle sur lequel les courants de marée vont réfracter provoquant ainsi un mouvement tourbillonnaire. L'influence de ces ouvrages portuaires paraît s'étendre jusqu'à Malo-terminus à l'Est de laquelle apparaissent les bandes sub-parallèles au trait de côte.

### III - 7 - 8 - CONCLUSION

L'évolution topo-bathymétrique présente des disparités le long du littoral dunkerquois et nous a permis d'identifier cinq secteurs : l'entrée de l'avant-port Est, Malo-les-Bains, Malo-terminus à Zuydcoote, Zuydcoote à Bray-Dunes, et l'Est de Bray-Dunes. Les évolutions ont été appréhendées pour diverses conditions hydrodynamiques et météorologiques :

En période de beau temps et de marée moyenne, le système s'engraisse sous l'action des vagues de beau temps et des courants de marée.

En période de mauvais temps et de marée moyenne, la concentration de l'énergie de la houle à Malo-les-Bains et à l'Est de Bray-Dunes est responsable de l'essentiel des actions d'érosion. A l'Est, la dissipation de l'énergie de la houle favorise la sédimentation en face de la Batterie de Zuydcoote pour le différentiel d'avril 1992 - septembre 1992, et au niveau de la zone située en face de l'hôpital maritime de Zuydcoote à Bray-Dunes pour le différentiel de septembre 1993 - juin 1994.

En période de temps moyen et de grande marée, les courants de marée, renforcés par les vents de secteur Ouest entraînent l'érosion du secteur de Zuydcoote. Toutefois ces conditions sont favorables à l'engraissement de l'estran.

### III - 8 - CONCLUSION GÉNÉRALE À L'ÉTUDE DU DOMAINE MARIN

La **dynamique sédimentaire des fonds marins** du littoral Est dunkerquois a pu être appréhendée par une **étude pluridisciplinaire** incluant une approche sédimentaire, des données bathymétriques et une prospection sismique.

D'un point de vue morphologique, les fonds marins sont constitués par le talus littoral, le chenal d'accès aux ports et un alignement de bancs sub-émergeants. Les suivis bathymétriques annuels montrent que cette **morphologie est stable**.

L'analyse des divers résultats obtenus permet de proposer deux modèles de circulation contrôlée par la morphologie des fonds marins : l'un en période de beau temps, l'autre en période de mauvais temps. Ces termes ne correspondent pas toujours respectivement à des périodes estivales et hivernales mais désignent des conditions hydrodynamiques (de houle notamment), respectivement de faible énergie et de haute énergie.

- **En période de beau temps** (fig. III-35), les fonds marins sont constitués de sédiments

fins à moyens présentant un grain moyen de l'ordre de 120 à 300  $\mu\text{m}$ . Les écarts granulométriques, peu importants, témoignent d'une **dynamique de faible énergie**. Les chenaux (zones les plus profondes) sont constitués de sédiments hétérogènes grossiers ou vaseux. Les bancs et le talus littoral sont constitués de sédiments fins, homogènes et propres.

**Les courants de marée, notamment le courant de flot, paraissent gouverner l'évolution des fonds marins, l'action des vagues permanentes étant limitée.** Ce courant, canalisé par les chenaux, permet aux particules plus grossières de s'y déposer (profondeur supérieure à 10 m). Ce matériel plus grossier provient vraisemblablement de l'érosion du substratum. Dans les zones moins profondes, l'action modérée des vagues remobilise les particules sédimentaires de petite taille qui sont ensuite transportées vers la côte, expliquant ainsi l'engraissement du talus littoral.

La diminution du transit sédimentaire tidal d'Ouest en Est explique l'existence d'un gradient sédimentaire décroissant dans le même sens.

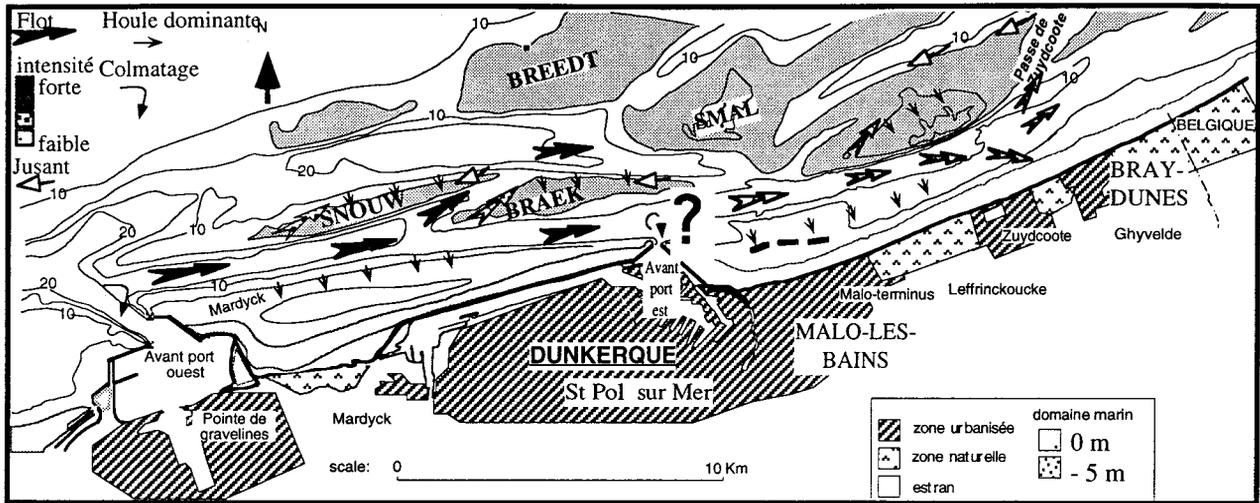
Le déferlement des vagues de beau temps engendre la formation de barres sur l'estran et leur migration ultérieure vers le haut de plage.

- En **période de mauvais temps** (fig. III-36), caractérisée par une **houle frontale dominante de secteur NW à NE**, la pellicule sédimentaire est constituée de matériel plus grossier. Conformément aux modèles de propagation de la houle développés par le L.N.H., la répartition des sédiments s'organise en bandes sub-perpendiculaires à la côte. Les sédiments plus grossiers se trouvent en face de l'avant-port Ouest, de l'avant-port Est, de Malo-les-Bains et de Bray-Dunes.

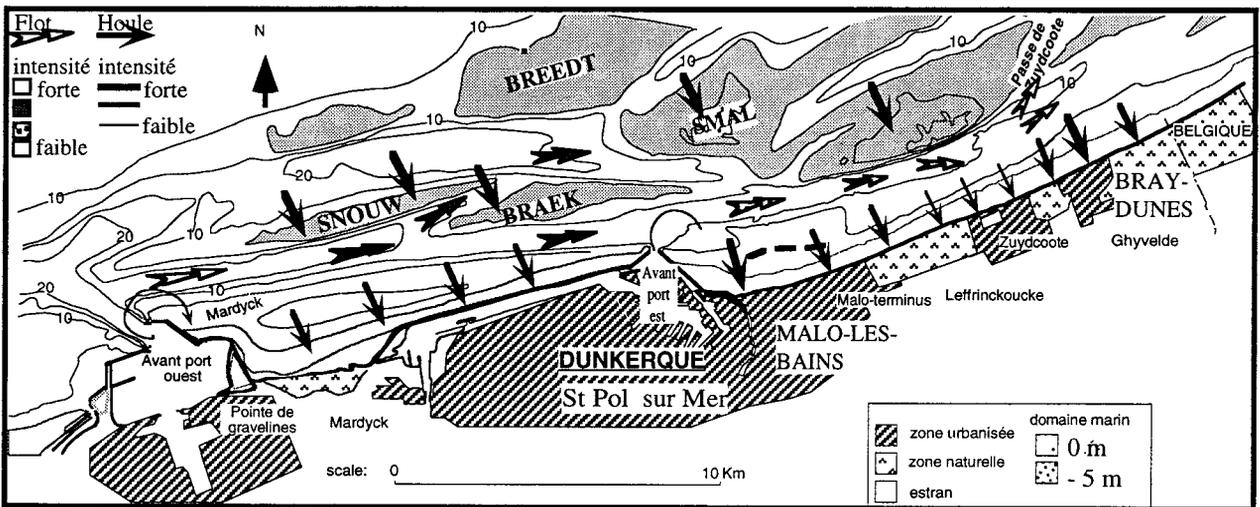
Les courants de marée sont, comme par beau temps, canalisés par les chenaux. Sur les bancs, la houle remobilise les sédiments qui sont transportés dans la direction de propagation de la houle, c'est-à-dire vers la côte, provoquant le déplacement des bancs vers la côte. Sur le talus littoral les sédiments remobilisés par la houle sont transportés vers le large par des courants de retour provoquant son érosion.

On note que le **banc du Hills**, qui émerge à marée basse en période de vive-eau, constitue une **protection naturelle contre les effets de la houle et protège le domaine côtier situé en arrière**. Il contribue ainsi à protéger la zone située au niveau de Bray-Dunes et Zuydcoote de la houle de secteur Nord.

Sur l'estran l'action plus énergétique des vagues de tempêtes conduit à détruire la disposition en barres de l'estran.



**Figure III-35 :** Modèle de circulation dominante en période de beau temps établi à partir de l'analyse des variations sédimentaires et de bathymétrie de 1988 à 1994.



**Figure III-36 :** Modèle de circulation dominante en période de "tempêtes" établi à partir de l'analyse des variations sédimentaires et de bathymétrie de 1988 à 1994.

Ces deux modèles ne rendent pas compte du détail des phénomènes observés, notamment ceux identifiés en face de Bray-Dunes, à l'extrémité Est du banc du Braek, et en face du port Est de Dunkerque. Ces trois secteurs présentent une évolution plus complexe :

- **En période de beau temps le courant de flot semble être dévié vers la côte au niveau de Bray-Dunes**, créant localement une dynamique plus forte expliquant le dépôt de sédiment plus grossier, ainsi que des valeurs d'engraissement plus faibles. Ce phénomène est accentué lors de conditions de plus forte énergie qui renforcent l'action du flot, notamment en périodes de grandes vives-eaux associées à des vents de secteur W.

- **La dynamique des bancs sableux du Snouw et du Braek, formés au cours de la transgression holocène à partir d'un noyau plus ancien, sont actuellement gouvernés par un contrôle hydrodynamique mixte.** Le déplacement des bancs vers la côte est dû à l'action des tempêtes, à l'exception de la partie Est du banc du Braek. Ce secteur, protégé de la houle frontale par le sommet émergeant du Smal, se déplace vers le large, vraisemblablement sous l'action du courant de flot. Ces résultats demandent à être étayés, notamment grâce à la réalisation de carottages qui nous permettraient d'effectuer des datations et de corrélérer les réflecteurs sismiques à des faciès sédimentaires.

- **La zone située en face de Dunkerque présente un secteur à évolution morpho-sédimentaire plus complexe.** probablement engendrée par une interférence des facteurs naturels (protection du banc du Smal) et anthropiques (jetées du port Est, zone de dépôt de dragage) Le manque de données hydrodynamiques empêche actuellement une interprétation.

L'étude effectuée a mis en évidence l'**influence des facteurs anthropiques**, tels ceux liés à la construction des jetées du port Est de Dunkerque. Ces dernières créent en aval une zone "d'ombre" où des sédiments plus fins peuvent se déposer, et favorisent les phénomènes d'accumulation sédimentaire en période estivale. L'influence de ces jetées devrait être négligeable lors de période de houle de secteur NW à NE.

Aucune mission n'ayant été réalisée après une tempête importante, ou une succession de tempêtes, les résultats reflètent plutôt un état général des fonds marins sous conditions hydrodynamiques banales. Il serait intéressant d'acquérir des données pour des périodes postérieures à des tempêtes, afin d'observer et mesurer les conséquences directes de tels événements sur les fonds marins et l'estran.

En outre, il serait nécessaire que des mesures de houles et de courants puissent être effectuées en différents points du secteur, notamment au niveau des zones d'évolution les plus complexes, afin de mieux comprendre les mécanismes mis en jeu. De telles données permettraient notamment de mieux comprendre le mode de migration et de maintenance de ces bancs côtiers et de proposer des modèles précis de transport.

# CHAPITRE IV :

## ÉTUDE DU DOMAINE D'ESTRAN

### IV - 1 - INTRODUCTION

Les zones d'estran constituent une interface instable et fragile entre le domaine marin et le domaine terrestre. Sous l'action des différents agents naturels (marée, houle et vent) et anthropiques, l'estran subit des variations morphosédimentaires parfois très rapides.

Les phénomènes d'érosion générale que subit depuis longtemps le littoral Est dunkerquois sont particulièrement sensibles au niveau de l'estran. Pour en comprendre les causes et les effets précis, et dans le but de les contrôler, il s'avère indispensable de définir la dynamique sédimentaire agissant sur la plage à court terme.

La méthode adoptée a consisté à caractériser l'évolution morphosédimentaire du site et à quantifier les transits sédimentaires de façon à définir les conditions de stabilité de cette portion du littoral.

### IV - 2 - PRÉSENTATION DU SITE ET DÉMARCHE ADOPTÉE

#### IV - 2 - 1 - PRÉSENTATION GÉNÉRALE DU DOMAINE D'ESTRAN EST DUNKERQUOIS

Le littoral sableux situé à l'est de Dunkerque s'étend sur 13 kilomètres depuis l'avant-port Est de Dunkerque jusqu'à la frontière franco-belge. Il se caractérise par **une alternance de secteurs urbanisés et de trois secteurs naturels**, ces derniers étant bordés d'un cordon dunaire actif (fig. IV-1)

- Un premier secteur urbanisé s'étend de la jetée Est de l'avant-port Est de Dunkerque à Leffrinckoucke. Il est protégé par une digue longue de 3,8 km, par trois anciens épis à proximité de l'avant port Est ainsi que par trois brise-lames construits en 1978 et 1988. Ces brise-lames sont situés à la côte -1m NGF et émergent à marée basse.

- La ville de Zuydcoote et l'Hôpital maritime de Zuydcoote constituent un deuxième secteur urbanisé. Néanmoins, la partie située en front de mer est très peu protégée, et dépourvue d'une véritable digue.

- Un troisième secteur endigué s'étend sur 1,2 km, il correspond à la ville de Bray-Dunes Plage.

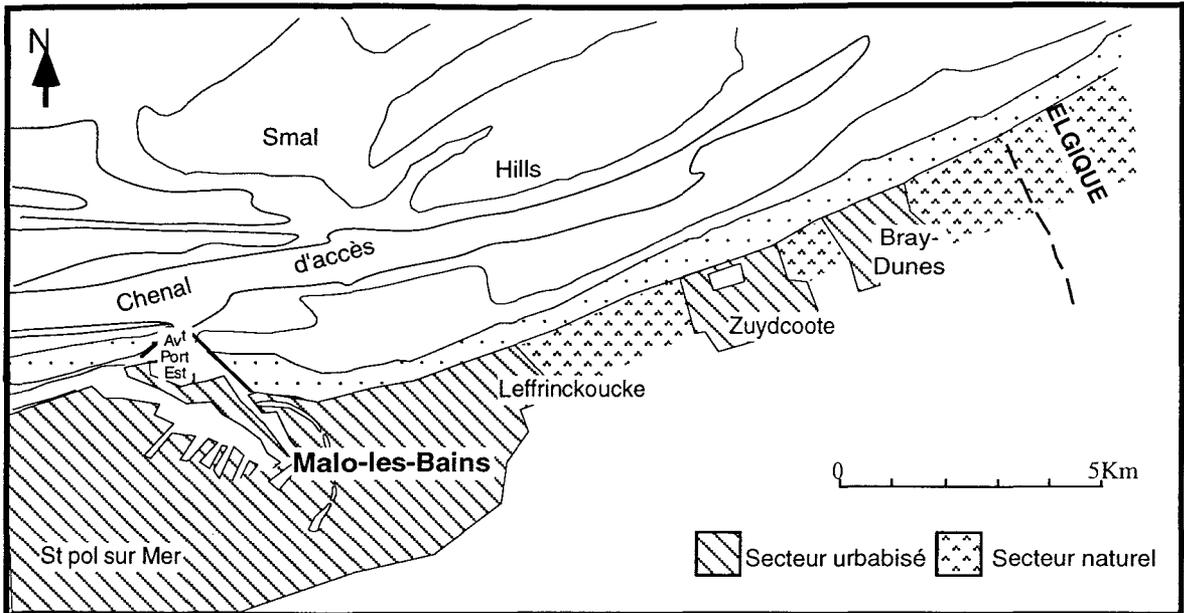


Figure IV - 1 : Présentaion générale du site

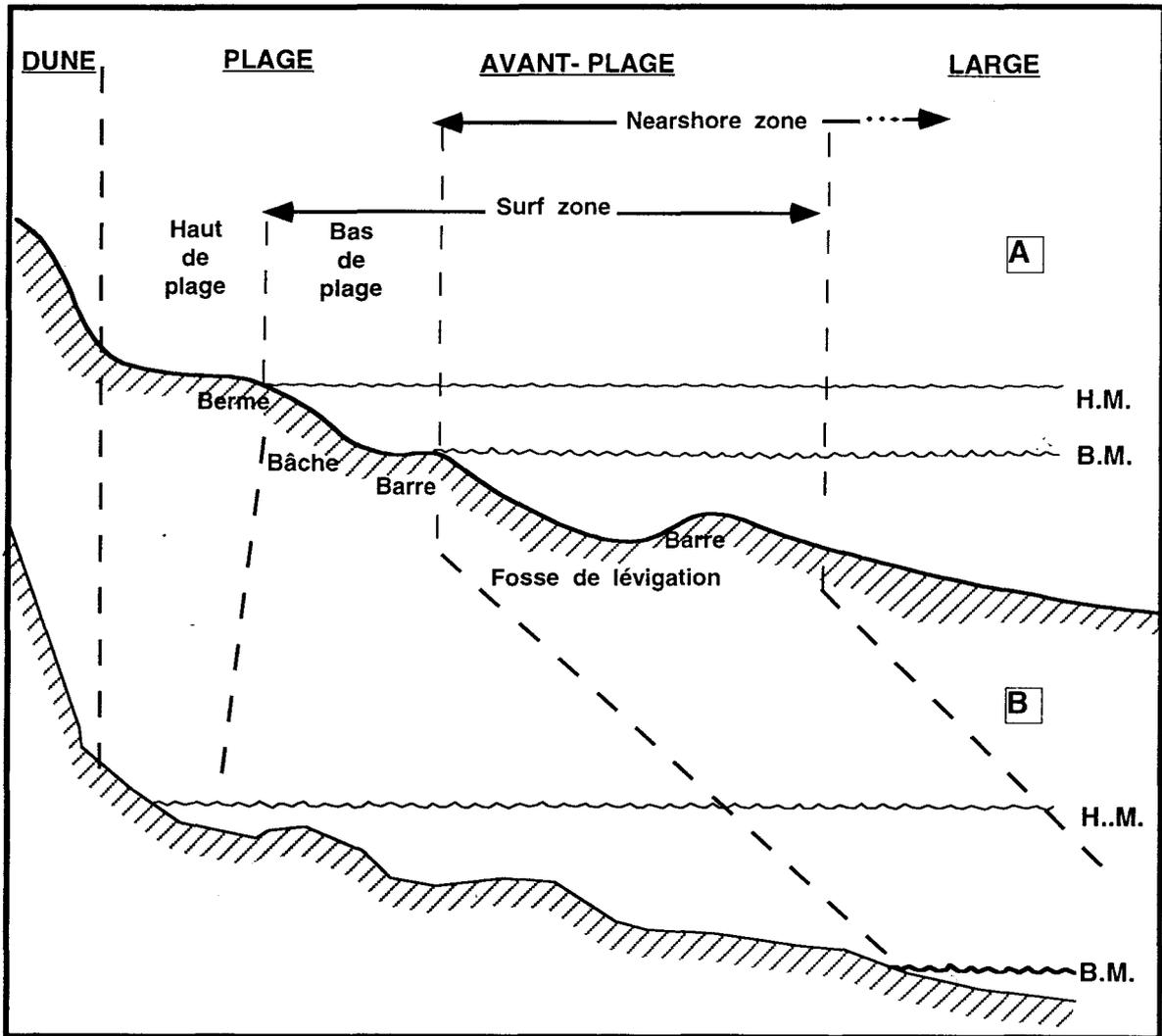


Figure IV- 2 : Coupe morphologique, A : général, B : à Dunkerque

- La première zone naturelle s'étend sur 3 km de Leffrinckoucke à Zuydcoote. Elle correspond à une ancienne zone militaire et comprend le Fort des Dunes et le terrain de manœuvre de Leffrinckoucke à l'Est.

- Une deuxième zone de 2 km, les Dunes Marchand, se situe entre Zuydcoote et Bray-Dunes.

- Le troisième secteur naturel s'étend à l'Est de Bray-Dunes et se poursuit au-delà de la frontière franco-belge.

Le système dunaire, dont l'étude, dans le cadre du projet S.I.L.E., a été confiée à P. Clabaut, se caractérise par une morphologie particulière. Il est constitué d'un cordon unique en front de mer. Vers l'intérieur, il se différencie par des dunes paraboliques qui ceignent des zones basses ou des pannes. Dans les dunes situées à l'Est de Bray-Dunes, une brèche naturelle, particulièrement bien développée, est régulièrement entretenue et inondée lors des tempêtes.

#### IV - 2 - 2 - CARACTÉRISTIQUES MORPHOLOGIQUES GÉNÉRALES DES PLAGES DU LITTORAL EST DUNKERQUOIS

Le littoral Est dunkerquois peut-être défini comme une côte basse sableuse à profil transverse typique (Komar, 1980 ; Reineck & Singh, 1980.; Davis, 1985 ; Brown *et al.*, 1989 ; fig. IV-2a) composé par les éléments morphologiques suivants (fig. IV-2b) :

- Une **dune bordière**. Elle constitue un élément essentiel de l'équilibre dynamique d'une plage pour laquelle elle représente une réserve de sable (Carter, 1990 ; Psuty, 1990 ; Ritchie & Penland, 1990 ; Paskoff, 1993).

- Un **haut de plage** (haut estran ou backshore) qui s'étend du pied de dune à la limite des hautes mers moyennes. Ce haut de plage est absent en système urbanisé et occupe une largeur de 50 mètres en secteur naturel. Il est le plus souvent constitué d'une ou plusieurs bermes généralement plates et légèrement pentues vers la dune. L'absence de berme correspond à un système soumis à l'érosion.

- Une **plage** (foreshore) qui s'étend entre les niveaux des hautes mers et des basses mers moyennes. Elle correspond à la zone intertidale ou zone de balancement des marées. Elle se caractérise par une pente faible de 1 à 3°, une largeur de l'ordre de 400 m et la présence de 3 à 4 systèmes de barres et de bâches ("ridges and runnels") particulièrement bien développés après une période de beau temps.

La **formation des barres** s'explique par l'action d'un vortex sous l'effet du déferlement des vagues à l'approche de la côte (Wünderlich, 1972 ; Long & Ross, 1989 ; Durand *et al.*, 1990 ; Zhang *et al.*,

1994 et Bauer *et al.*, 1995 ; fig IV-3a et b). Le modèle établi par Zhang (1994) montre la relation existant entre le nombre de barres et le nombre de vortex. D'autres hypothèses existent. Greenwood (1979) suggère que la formation et l'équilibre des barres résultent du transport de sédiment vers la côte par le déferlement mais également le long du littoral et vers la mer par les courants de dérive littorale et de retour. Le schéma rend compte de la formation des barres d'avant-côte de type Evans (in Long & Ross, 1989). Ces barres sont asymétriques avec le flanc plus abrupt orienté vers la côte. Leur amplitude est de 0,25 à 3 m et se développent en séries parallèles à la côte (3 à 4 barres à Dunkerque).

Les barres se forment lors de conditions d'énergie faible à modérée avec des houles décroissantes, puis migrent vers la côte, restituant ainsi une partie du sable perdu pendant les tempêtes.

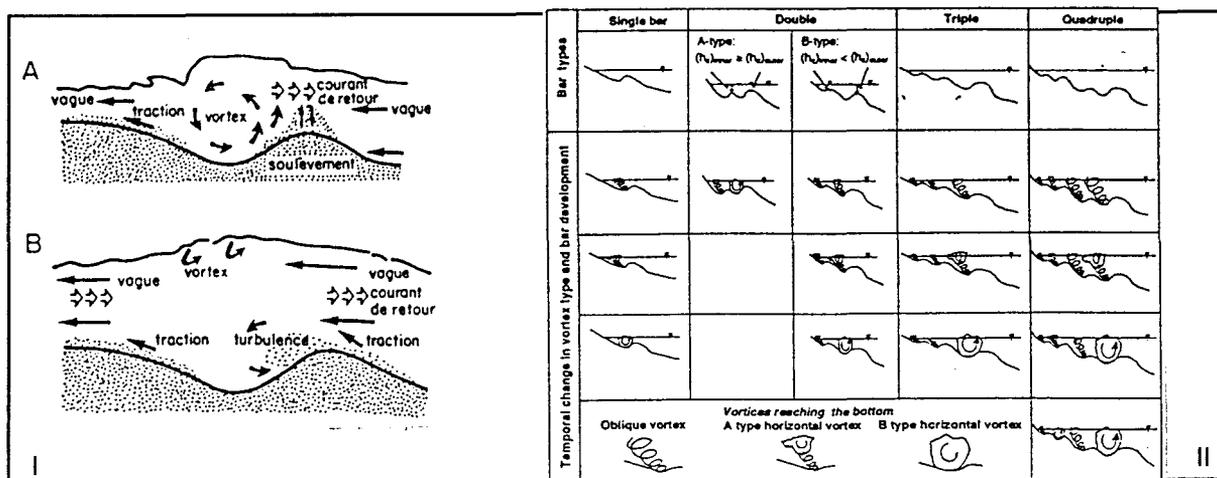


Figure IV-3 : Formation des barres (d'après I : Long & Ross, 1989 et II : Zhang *et al.*, 1994).

- Une **avant-plage** (shoreface supérieur ou nearshore) située sous la limite des basses mers moyennes. Cette zone appartient déjà au système marin.

#### IV-2 - 3 - CLASSIFICATION DES PLAGES ET CARACTÉRISTIQUES MORPHODYNAMIQUES

Les plages, selon l'énergie des facteurs naturels (houles, courants) auxquelles elles sont soumises, et la nature des sédiments qui les forment, peuvent être définies en fonction de leur "état" morphodynamique, c'est-à-dire de leur état le plus courant (état modal). La classification la plus fréquemment utilisée est celle de Wright *et al.* (1979) qui distinguent les plages dissipatives, intermédiaires et réfléchives (voir encadré IV-2).

## Classification morphodynamique des plages

Encadré IV-1

Une classification morphodynamique développée par Guza (1975) et Wright *et al.* (1979, 1982 et 1984) permet de distinguer plusieurs états de plage en fonction des processus hydrodynamiques auxquels elle est soumise. Cette classification différencie trois grands types de plage, dissipatif, intermédiaire et réfléchif, et six états morphologiques depuis le pôle dissipatif au pôle réfléchif. Les limites entre ces trois types morphodynamiques ont été définies à partir d'un paramètre sans dimension  $\Omega$  qui permet de prévoir l'état modal de la plage :

$$\Omega = \frac{H_b}{\omega_s \cdot T_b}, \text{ où } H_b = \text{hauteur significative de la houle, } \omega_s = \text{vitesse moyenne de chute des}$$

sédiments et  $T_b$  = période significative de la houle.

La vitesse de chute des particules est obtenue en utilisant la formule empirique de Van Rijn (1989).

$$\omega_s = \frac{10 \cdot \nu}{d} \cdot \left[ \sqrt{1 + \frac{0,01 \cdot (s-1) \cdot g \cdot d^3}{\nu^2}} - 1 \right], \text{ avec } \nu = \text{coefficient de viscosité cinématique de l'eau,}$$

$d$  = diamètre du grain moyen de sable,  $g$  = accélération de la pesanteur ( $9,81 \text{ g/s}^2$ ),  $s$  = densité spécifique du sable ( $2,65 \text{ g/cm}^3$ ).

Dans le cas où le diamètre des particules est compris entre 0,1 et 2 mm, la vitesse de chute des particules sableuses correspond à un régime semi-turbulent et répond à l'équation (Migniot, 1989):

$$\omega_s = \frac{8,9}{D_n} \cdot \left[ \sqrt{\left(1 + 95 \cdot \left(\frac{\rho_s - \rho_0}{\rho_0}\right) \cdot D_n^3\right) - 1} \right], \text{ avec } \rho_s : \text{masse spécifique de la particule en}$$

$\text{kg/m}^3$ ,  $\rho_0$  : masse spécifique de l'eau ( $1000 \text{ kg/m}^3$ ).

$D_n$  est le diamètre nominal des grains par rapport au diamètre déterminé par tamisage mécanique, les vitesses de chute étant d'autant plus faibles que les grains sont plus plats. Dans la pratique un abaque établi par le L.C.H.F. permet d'estimer la vitesse de chute des particules à l'aide du diamètre des grains mesuré par tamisage mécanique (fig. IV-4)

- si  $\Omega < 1$  : la plage est dite réfléchive
- si  $1 < \Omega < 6$  : la plage est dite intermédiaire
- si  $\Omega > 6$  : la plage est dite dissipative.

Les variations de  $\Omega$  désignent les variations temporelles de l'état de la plage.

- Le type **dissipatif** (annexe 4 fig. 1) désigne l'état de la plage après un épisode d'érosion majeur et ressemble à un profil de tempête ou de printemps répondant à des variations saisonnières. Les profils sont souvent plats ou présentent des systèmes de barres multiples. Le haut de plage est souvent érodé et présente un profil concave. La plage est dissipative sur toute sa longueur. Dans ce cas de figure, les vagues se cassent et déferlent (spilling). L'énergie se dissipe progressivement jusqu'à devenir très faible en parvenant au front de plage. Ce type de plage se rencontre dans les zones de haute énergie éloignée d'une source sédimentaire.

- Le type **intermédiaire** possède des éléments dissipatifs et réfléchifs le long du profil et le long du rivage. Les différents états morphologiques correspondent à une diminution progressive de la houle et au passage d'un système en érosion (dissipatif) à un système en accrétion (réflectif). Le déferlement caractérisant ce type est plutôt de type plongeant.

Le passage du type dissipatif au type réfléchif témoigne d'une diminution de l'énergie de la houle. Les types intermédiaires sont les formes les plus instables.

- Si les conditions d'accrétion persistent, le type de la plage devient **réflectif**. Ce type est rare dans le cas des mers ouvertes et correspond à un profil d'été en voie d'accrétion. Ce type se trouve facilement dans les systèmes constitués de sédiment grossier ou dans des secteurs semi-protégés. La houle présente un déferlement à gonflement. La turbulence due au déferlement se concentre dans la zone à forte pente située en haut de plage.

Ce concept morphodynamique a été appliqué aux plages macrotidales (Short, 1991) puis modifié par Masselink *et al.* (1993 ; annexe 4 fig. 2). Ce modèle introduit un nouveau paramètre 'RTR : relative tide range) qui rend compte de l'importance du marnage donc l'influence de la marée :

$$RTR = TR/H_b, \text{ où } TR \text{ correspond au marnage.}$$

Ainsi huit types de plages ont été définis en fonction de l'énergie des vagues et de la marée.

Dans le cas des plages du littoral Est dunkerquois les données hydrodynamiques et sédimentologiques recueillies pendant l'étude ont servi de base à des calculs nous permettant de caractériser le type morphodynamique auquel elles se rattachent à différentes époques.

Date	Diamètre en m	Viscosité de l'eau	$\omega$ Van Rijn	$\omega$ LCHF	T 1/3	H <sub>1/3</sub>	$\Omega$ VanRijn	$\Omega$ LCHF	RTR
05 /92	$2.10^{-4}$	$1,27.10^{-6}$	0,0217	0,022	4	0,4	4,6	4,55	12,5
06/92	$1,91.10^{-4}$	$1,17.10^{-6}$	0,0213	0,022	4	1	11,7	11,36	5
07/92	$1,9.10^{-4}$	$1,08.10^{-6}$	0,0225	0,022	4	0,5	5,55	5,68	10
09/92	$1,8.10^{-4}$	$1,52.10^{-6}$	0,0207	0,022	5	1	9,66	9,09	5
03/93	$2,1.10^{-4}$	$1,47.10^{-6}$	0,019	0,022	5	0,8	8,42	7,27	6,25
05/93	$2,1.10^{-4}$	$1,27.10^{-6}$	0,023	0,022	6	1	7,24	7,57	5

**Tableau IV-1** : Définition du type des plages du littoral dunkerquois d'après le concept

morphodynamique de Wright *et al.* (1979) et Masselink (1993).

Voir encadré IV-1 pour le détail des calculs. Les données de viscosité proviennent de Le fevre-Lehoerff *et al.* (1991) et les données de houle de Mancel (1993). ( $\omega$  : vitesse de chute des particules calculée selon l'équation de Van Rijn ou selon l'abaque établie par le L.C.H.F.)

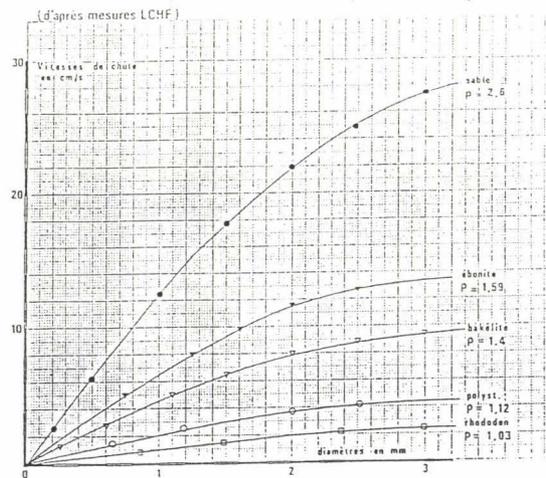


Figure IV-4 : Abaque établie par le L.C.H.F. donnant la vitesse de chute des particules

Quelle que soit la méthode de calcul de la vitesse de chute des particules, les résultats permettent de qualifier les plages de Dunkerque de dissipatives selon Wright *et al.* (1979) et de "non-barred dissipative" à "ultra-dissipative" selon Masselink (1993).

#### IV - 2 - 4 - DÉMARCHE

Pour préciser les comportements morphosédimentaires de la plage nous avons considéré son évolution morphosédimentaire au cours d'une année. Cette étude a été complétée par une expérience de traçage fluorescent en bas de plage pour définir les transits sédimentaires. Les différentes opérations sont résumées dans le tableau IV-2

##### IV - 2 - 4 - 1 - Suivis topographiques mensuels

Afin d'étudier l'évolution saisonnière des plages sableuses du littoral Est dunkerquois, nous avons réalisé avec l'aide des services techniques de Malo-les-Bains le suivi régulier de sept profils topographiques depuis Malo-les-Bains jusqu'à la frontière franco-belge (fig. IV-5). Pour préciser l'influence des ouvrages de protection sur cette évolution sédimentaire, nous avons

défini des secteurs ateliers qui correspondent à l'alternance des secteurs naturels et urbanisés. Ainsi trois de ces profils sont situés en domaine urbanisé (P0, P7 et P11), les quatre autres en domaine naturel (P8, P9, P10 et P12).

- P0 : en face du casino et du premier brise-lames de Malo-les-Bains ;
- P7 : en face de l'avenue du large à Leffrinckoucke ;
- P8 : à l'Est de la batterie de Zuydcoote ;
- P9 : à l'Ouest de l'hôpital de Zuydcoote. A noter que ce profil n'a été suivi qu'en juin, juillet 1992 et février 1993. Il a ensuite été remplacé par le profil 11 situé à Bray-Dunes en domaine urbanisé ;
- P10 : entre Zuydcoote et Bray-Dunes ;
- P 11 : au milieu de la digue de Bray-Dunes (septembre 1992 à mai 1993) ;
- P12 : à l'Est de Bray-Dunes à proximité du camping.

Date	Opération	Intervenant
mai 1992	Topographie Prélèvement	Services techniques de Malo-les-Bains Université de Lille I
juin 1992	Topographie Prélèvement	Services techniques de Malo-les-Bains Université de Lille I
juillet 1992	Topographie Prélèvement	Services techniques de Malo-les-Bains Université de Lille I
septembre 1992	Topographie Prélèvement	Services techniques de Malo-les-Bains Université de Lille I
octobre 1992	Topographie Prélèvement	Services techniques de Malo-les-Bains Université de Lille I
novembre 1992	Topographie Prélèvement	Services techniques de Malo-les-Bains Université de Lille I
février 1993	Topographie	Services techniques de Malo-les-Bains
mars 1993	Topographie Prélèvement	Services techniques de Malo-les-Bains Université de Lille I
avril 1993	Traçage fluorescent Topographie	Universités de Lille I et de Bordeaux I
mai 1993	Topographie Prélèvement	Services techniques de Malo-les-Bains Université de Lille I
janvier 1994	Traçage fluorescent Topographie	Services techniques de Malo-les-Bains Universités de Lille I et de Bordeaux I

**Tableau IV-2** : Récapitulatif des opérations réalisées sur l'estran.

Les têtes de profils ont été repérées par des marques sur la digue ou, pour le secteur dunaire, sur des blockhaus. Leur position en coordonnées géographiques est déterminée avec précision. Les profils ont été réalisés à fréquence quasi-mensuelle sur une période d'un an : mai, juin, juillet, septembre, octobre et novembre 1992, et février, mars et mai 1993. Malheureusement aucun profil n'a été suivi en période de tempête. Des échantillons de sédiments ont été récoltés de façon systématique le long de chaque profil (voir encadré IV-3).

Les principaux objectifs sont les suivants :

- Quantifier les **surfaces sableux respectivement érodés et déposés** au long de chaque profil et définir les zones soumises à des érosions plus intenses.

- Déterminer l'**évolution morphosédimentaire** annuelle de la plage et proposer un **modèle d'évolution saisonnière**.

- Préciser l'**influence des ouvrages de protection** sur cette évolution morphosédimentaire.

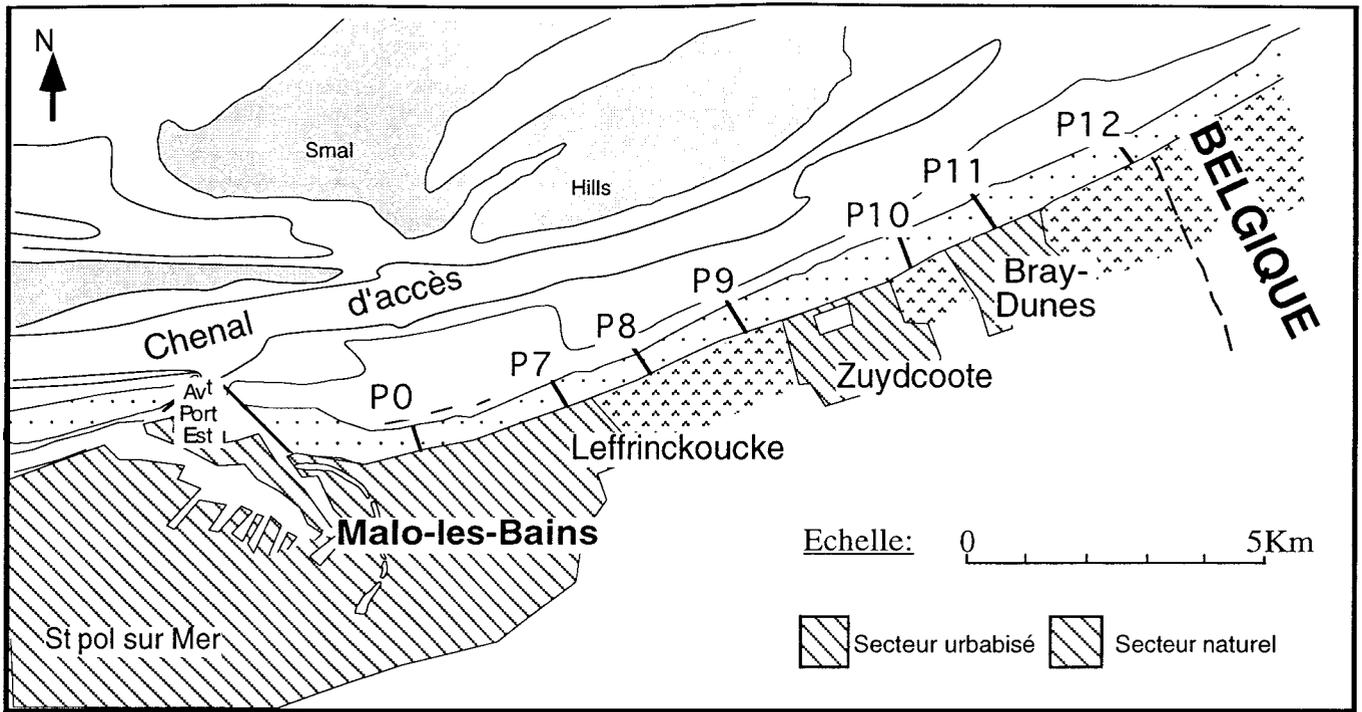


Figure IV -5: Position des profils topographiques suivis de mai 1992 à mai 1993

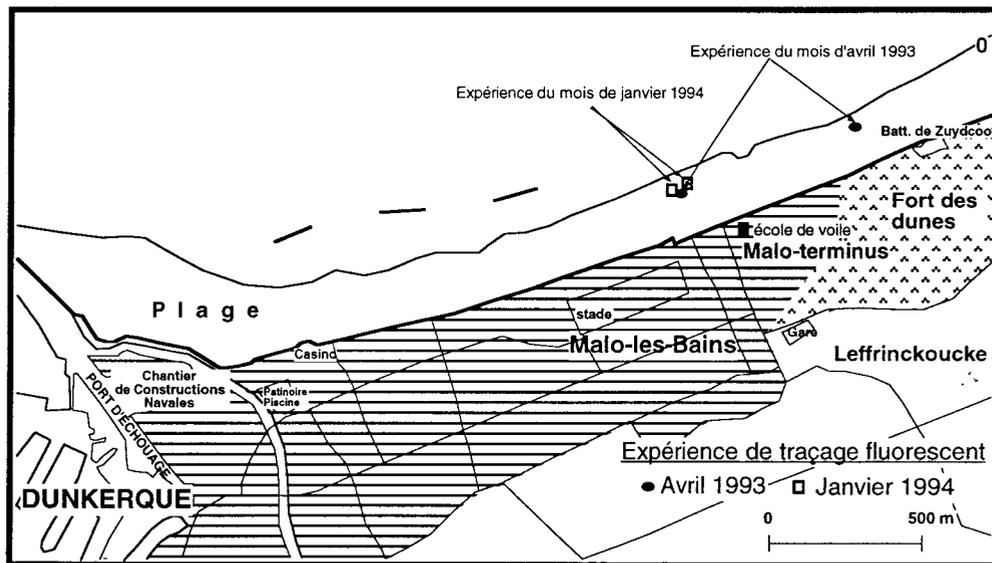


Figure IV-6 : Position des points d'immersion des deux expériences de traçage fluorescent.

## Méthode topographique utilisée

Encadré IV-2

Le matériel utilisé pour le suivi topographique est de haute précision et se compose d'un tachéomètre, c'est-à-dire d'un théodolite électronique Wild T1600 combiné à un distancemètre à infrarouge Wild DI 1001. Le principe de cet appareil repose sur l'envoi d'une onde infrarouge réfléchie sur un prisme réflecteur (mire). Les mesures, réductions et calculs sont automatiques tout comme l'enregistrement des données grâce à un terminal de terrain numérique Wild GRE3. Ces instruments sont alimentés par une batterie rechargeable.

Après acquisition des données sur le terrain, celles-ci sont transférées sur un ordinateur à l'aide d'une interface adaptée. Un traitement informatique permet de tracer les profils topographiques et de calculer les altitudes des points, les distances et les pentes entre chaque point, puis de dessiner les profils à l'aide d'une table traçante.

## Traitement des sédiments

Les échantillons prélevés parallèlement aux profils topographiques ont subi le même traitement que ceux du domaine marin (granulométrie et traitement informatique) mais la méthode de tamisage utilisée n'a pas été la même pour tous les échantillons. Un tamisage mécanique a été effectué sur les échantillons prélevés de mai à septembre 1992 alors qu'un granulomètre laser a été utilisé pour analyser les échantillons d'octobre 1992 à mai 1993.

Le granulomètre laser, de marque MASTERSIZER X malvern, est un appareil basé sur la diffraction de la lumière. Il comprend une unité de mesure optique déterminant la taille des particules de base et un ordinateur contrôlant la mesure et effectuant l'analyse et la présentation de résultats. Le logiciel a également été reprogrammé pour permettre une exploitation personnalisée et obtenir les mêmes paramètres granulométriques que ceux donnés par le logiciel GRANULO (Dewez, 1988) utilisé lors des tamisages mécaniques.

Les avantages d'utilisation de cet appareil sont multiples :

- mesure à très haute précision de 0,1 à 2000  $\mu\text{m}$  ;
- exploitation rapide et entretien facile ;
- grande flexibilité du logiciel dans le choix des opérations.

Des inconvénients sont néanmoins à noter :

- Le granulomètre ne mesure pas les particules de diamètre supérieur à 2 mm, ce qui implique un tamisage mécanique préliminaire. Les différents pourcentages de particules de diamètre supérieur à 2 mm sont ensuite pris en compte lors de la détermination par traitement informatique de la distribution granulométrique.

- La quantité de matériel nécessaire pour effectuer les mesures est très faible (quelques grammes). Cette quantité est plus ou moins représentative du sédiment surtout dans le cas d'un sédiment hétérogène.

Enfin signalons que les valeurs obtenues avec le granulomètre laser sont différentes de celles données par le tamisage mécanique. Elles sont en effet légèrement supérieures. Par conséquent la comparaison directe des résultats obtenus avec les deux méthodes est malaisée.

### IV - 2 - 4 - 2 - Détermination des transports sédimentaires par traçage fluorescent

Afin d'aborder la question des mécanismes responsables du transport sédimentaire sur l'estran le sédimentologue dispose diverses méthodes, dont celles de traçage fluorescent ou radioactif (Courtois & Monaco ; 1969, Tola, 1982 ; Caillot, 1985. De telles méthodes permettent de suivre la mobilité des sédiments dans le temps et dans l'espace (Crickmore, 1967 ; Boon, 1969 ; Komar, 1976 ; Pizzuto, 1987 ; Levoy, 1994), notamment pour quantifier les flux sédimentaires sur l'estran (Ingle, 1966 ; Howa, 1987 ; Gassiat, 1989 ; Michel *et al.* 1995) mais également en domaine marin (Lees, 1981 ; Avoine *et al.*, 1984 ; Hoslin, 1989 ; Sherman *et al.*, 1990).

La technique de traçage fluorescent a été mise en oeuvre sur les plages du littoral Est

dunkerquois. Une première expérience a été réalisée du 17 au 29 avril 1993, puis une deuxième du 10 au 18 janvier 1994 (fig. IV-6). Ces deux études ont été menées en collaboration avec le laboratoire d'Océanographie de l'Université de Bordeaux I (voir encadré IV-3 pour détails de la méthode).

### Méthode du traçage fluorescent

Encadré IV-3

La méthode consiste à suivre l'évolution spatio-temporelle d'un marqueur. Le traceur est un sable prélevé sur notre site d'étude, coloré avec une peinture fluorescente orange. Il possède donc les mêmes caractéristiques que le sable naturel (White & Inman, 1989 a et b).

Dans un premier temps une quantité de 50 à 100 kg de sable a été déposée à marée basse dans un trou creusé sur l'estran puis recouvert de sable naturel. Les caractéristiques du trou et la quantité de sable fluorescent dépendent des conditions hydrodynamiques du site. Par comparaison avec les plages de plus haute énergie de la côte d'Aquitaine (Castaing et al, 1991, Michel, 1993), 200 à 300 kg de traceur ont été utilisés.

Pendant la pleine mer suivante le traceur et le sable naturel sont exposés aux conditions hydrodynamiques locales. Le déplacement du traceur est suivi à la basse mer suivante à l'aide d'un appareil développé par le laboratoire d'Océanographie de l'Université de Bordeaux I, appareil qui réalise de jour comme de nuit directement le comptage des grains fluorescents sur le site d'étude (de Resseguier, 1987 ; Castaing *et al.*, 1991 ; Howa & de Resseguier, 1994). *Une autre méthode consiste à réaliser un échantillonnage complet de la zone donnant lieu à une quantification au laboratoire dans une chambre noire, soit manuellement, soit par comparaison à des photographies étalons (Gourlez *et al.*, 1978).* Grâce à la méthode développée par l'Université de Bordeaux I, les données du comptage sont directement mémorisées sur le terrain grâce à un ordinateur de poche. Un logiciel de contourage appelé SURFER permet ensuite d'établir des cartes d'iso-grains au laboratoire, et de visualiser et de quantifier la dispersion du nuage fluorescent.

Des carottes faites au point d'immersion permettent de définir le volume de sable fluorescent remanié en surface. A partir de ces premières données deux types d'approches sont possibles.

#### Approche qualitative

- Pour chaque point les déplacements du centre de gravité sont suivis, ce qui indique la direction apparente du transport sédimentaire.
- Le suivi de la forme du nuage de grains et de son déplacement conduit à préciser les directions du transport et l'étendue du remaniement en surface (surface de nuage de points).

#### Approche quantitative

- Un calcul du volume de traceur érodé à la source ( $= X \text{ m}^3$ ) est obtenu à l'aide des carottes réalisées au point d'immersion.
- A partir des cartes de répartition du traceur en surface, le volume de traceur retrouvé est calculé ( $= Y \text{ m}^3$ ) en tenant compte de la surface comprise entre chaque courbe d'isoc concentration multipliée par l'épaisseur de la couche en mouvement.

*Ces deux calculs (X et Y) nous permettent de valider l'expérience. Pour cela il faut que Y soit supérieur ou égal à 50% de X. Ils indiquent également le volume de traceur perdu.*

- La vitesse de déplacement du centre de gravité du nuage de point est également calculée.
- Enfin le transport de sable est exprimé en poids de sable immergé (g) par unité de largeur (m) et par unité de temps (h).

Pour valider les résultats obtenus par traçage fluorescent un suivi topographique des mêmes secteurs a été réalisé parallèlement.

Un de nos objectifs étant de préciser l'influence des ouvrages de protection et notamment des brise-lames, au cours de l'opération d'avril 1993. Un premier point, ML93, a été localisé à l'Est du troisième brise-lames, en face de l'école de voile. Un deuxième point, DUN93, a été immergé au niveau du système dunaire le plus proche, c'est-à-dire à l'Est de l'avancée de la Batterie de Zuydcoote.

Les objectifs de la seconde mission étaient comparables, et fondés sur l'espoir de conditions

hydrodynamiques différentes. Malheureusement, les conditions de janvier 1994 se sont avérées comparables à celles d'avril 1993. Pour cette raison, nous avons décidé de changer la position des points et de nous attacher à l'étude des processus s'opérant sur la barre sableuse qui supportait en avril 1993 le point ML93. Le point ML94 a été placé à son sommet, et le point MLE94 sur son flanc marin, le moins déclive.

#### IV - 3 - ÉVOLUTION MORPHOSÉDIMENTAIRE DES PLAGES DE MAI 1992 À MAI 1993

##### IV - 3 - 1 - CONDITIONS HYDRODYNAMIQUES ET MÉTÉOROLOGIQUES

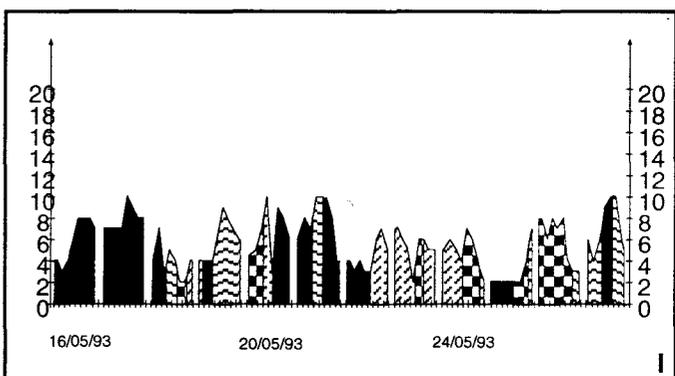
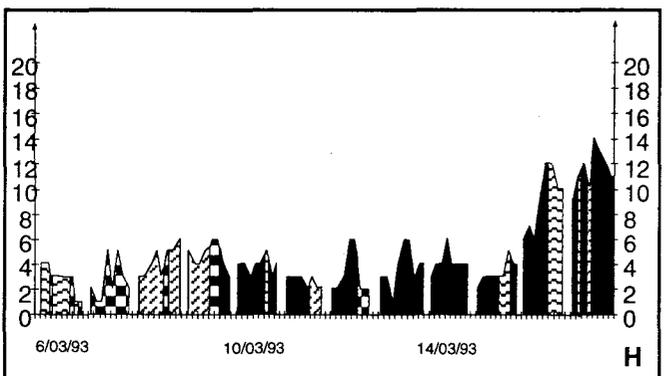
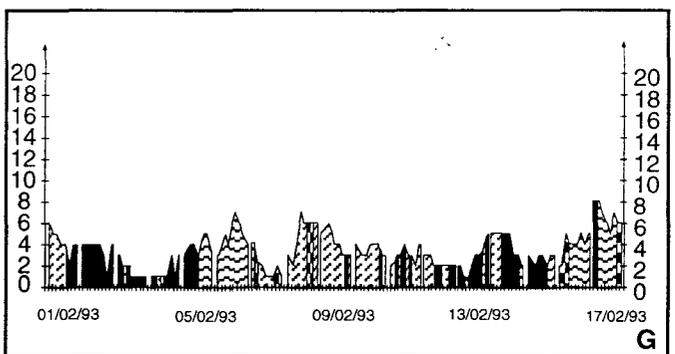
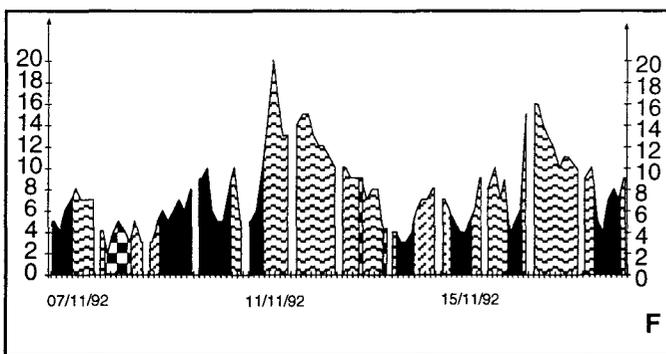
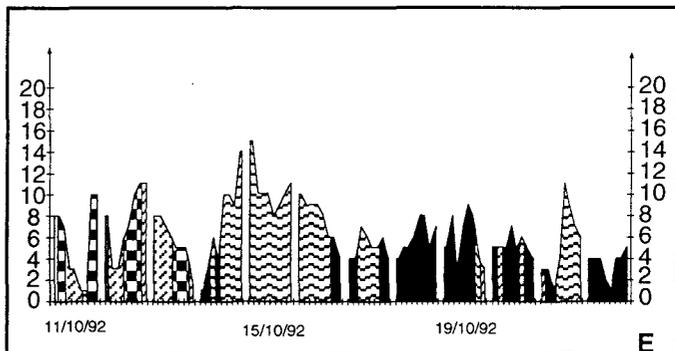
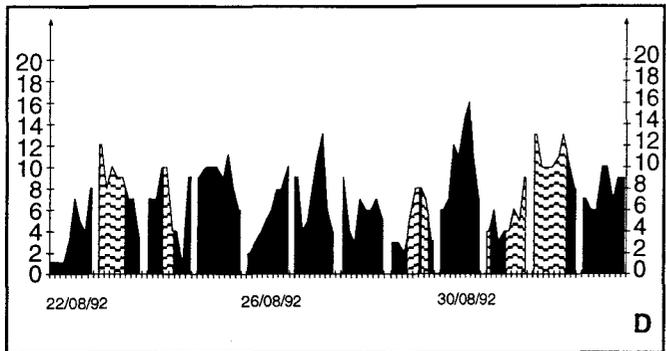
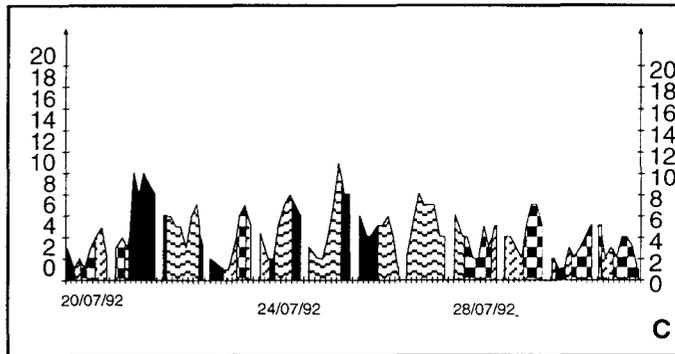
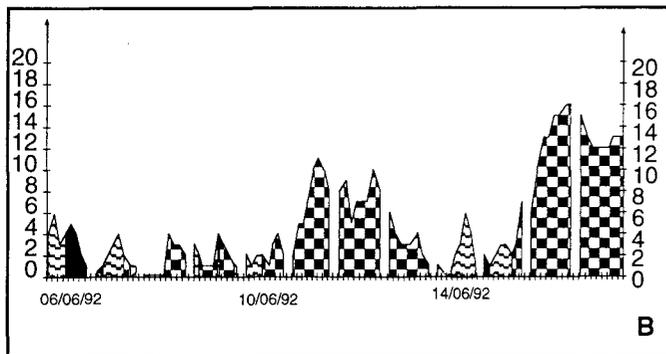
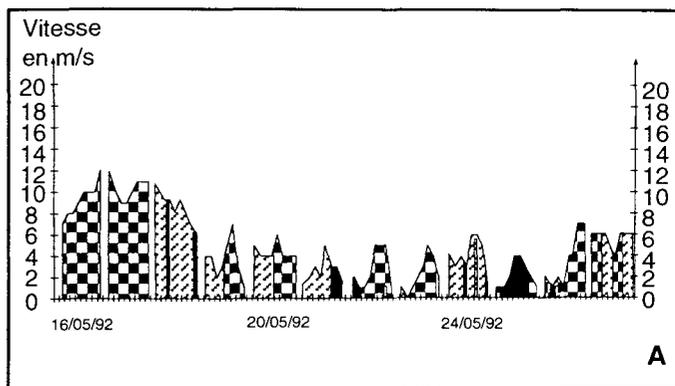
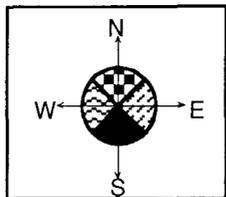
Afin de comprendre et d'interpréter les variations topographiques et granulométriques des plages, une étude des conditions hydrodynamiques et météorologiques qui ont régné pendant la période de 10 jours précédant chaque levé a été réalisée et est résumée dans le tableau IV - 3. Les données de vent recueillies par Météo France sont représentées par les figures IV-10a à IV-10h.

Date	Marée	Coefficient de marée	État de la mer	Vent (V : vitesse)
du 16 au 27 / 05 / 92	Décroissante	26 / 27 : 44 à 49 : morte - eau moyenne	1 à 2	NW à NE - NE à SE V < à 12 m/s
du 06 au 17 / 06 / 92	Décroissante jusqu'au 10 puis croissante	16 / 17 : 77 à 76 : marée moyenne	2 à 4	NW à NE V > à 12 m/s NE à SW V < à 12 m/s
du 20 au 31 / 07 / 92	Décroissante jusqu'au 25 puis croissante	30 / 31 : 98 à 109 : vive - eau moyenne à grande	2	secteur variable V < à 10 m/s
du 22 / 08 / 92 au 02 / 09 / 92	Croissante jusqu'au 29 puis décroissante	01 / 02 : 95 à 78 : vive - eau moyenne à marée moyenne	2	SE à SW - SW à NW V max = 16 m/s
du 11 au 22 / 10 / 92	Décroissante jusqu'au 19 puis croissante	21 / 22 : 52 à 71 : morte - eau moyenne à marée moyenne	2 à 4	11 - 13 : NW à NE de 1 à 11 m/s 14 - 16 SW à NW de 15 m/s max 17 - 22 : SE à NW de 1 à 10 m/s
du 7 au 17 / 11 / 92	Croissante jusqu'au 11 puis 17 puis décroissante	16 / 17 : 63 à 56 : marée moyenne à morte - eau moyenne	3 à 4	SE à NW SW à NE v = 20 m/s V > à 4 m/s
du 1 <sup>er</sup> au 17 / 02 / 93	Croissante jusqu'au 9 puis décroissante.	16 / 17 : 40 à 50 : morte - eau moyenne	1 à 2	secteur variable V < à 8 m/s
du 6 au 18 / 03 / 93	Croissante jusqu'au 10 puis décroissante	17 / 18 : 36 à 45 : morte - eau moyenne	3 à 4	6 - 10 : NW à SE < à 6 m/s 11 - 18 : NW à SE de 10 à 14 m/s
du 16 au 27 / 05 / 93	Croissante jusqu'au 24 puis décroissant	26 / 27 : 74 à 65 : marée moyenne	2 à 3	secteur variable V souvent < à 10 m/s

**Tableau IV-3 :** Récapitulatif des données de vent, de régime de marée et de mer pour une période de 10 jours précédant le levé des profils  
(État de la mer 1 : ridée ; 2 : belle ; 3 : peu agitée ; 4 : agitée)

**Figure IV-7 :** données de vent précédant la réalisation des profils topographiques

- A :** mai 1992
- B :** juin 1992
- C :** juillet 1992
- D :** septembre 1992
- E :** octobre 1992
- F :** novembre 1992
- G :** février 1993
- H :** mars 1993
- I :** mai 1993



Les vents rencontrés sont le plus souvent de secteur variable et de vitesse maximale de 20 m/s. Les vents de secteur NW à NE, perpendiculaires au littoral et susceptibles d'affecter ses sédiments, ont soufflé en mai 1992 (vitesse inférieure à 12 m/s), en juin 1992 (vitesse supérieure à 12 m/s), en octobre 1992 (vitesse de 1 à 11 m/s) et en mars 1993 (vitesse inférieure à 6 m/s). Les vents les plus violents ont été observés aux mois d'août et septembre 1992 (16 m/s de secteur SE à NW), octobre 1992 (15 m/s de secteur SW à NW) et novembre 1992 (20 m/s de secteur SW à NE).

Les conditions de marée avant les levés sont très variables. Au moment du levé les coefficients de marée sont le plus souvent de marée moyenne ou de morte-eau. Seuls les levés de juillet et de septembre 1992 ont été réalisés en période de vive-eau.

De manière générale, les conditions hydrodynamiques et météorologiques qui ont régné avant les levés topographiques peuvent être qualifiées de calmes, d'énergie modérée.

#### IV - 3 - 2 - LES PRINCIPAUX RÉSULTATS DU SUIVI TOPOGRAPHIQUE MENSUEL

Le travail d'interprétation de ces données a consisté à comparer :

1) L'**évolution temporelle** de chaque profil afin d'apprécier les **taux d'érosion et de sédimentation** le long des profils (fig. IV-8 à IV-15). Ces taux, exprimés en  $m^2$ , représentent la différence entre deux profils successifs.

2) La **topographie et la granulométrie** de tous les profils à différentes époques afin de différencier les tendances évolutives locales et les tendances générales propres à l'ensemble du secteur (fig IV-16 à IV-26).

L'évolution de la granulométrie dans le temps n'a pas été discutée en raison du changement d'instrument de mesure (cf. encadré IV-2).

##### IV - 3 - 2 - 1 - Comparaison des topographies de chaque profil à diverses époques

###### *Évolution du profil P0 - Malo-les-Bains, secteur endigué (fig. IV-8)*

Ce profil est dans l'ensemble assez plat et de morphologie comparable d'un mois à l'autre. Les variations topographiques les plus importantes, en érosion ou en sédimentation, sont observées dans la partie haute du profil sur les 150 à 200 premiers mètres. L'érosion du profil s'effectue surtout pendant l'hiver.

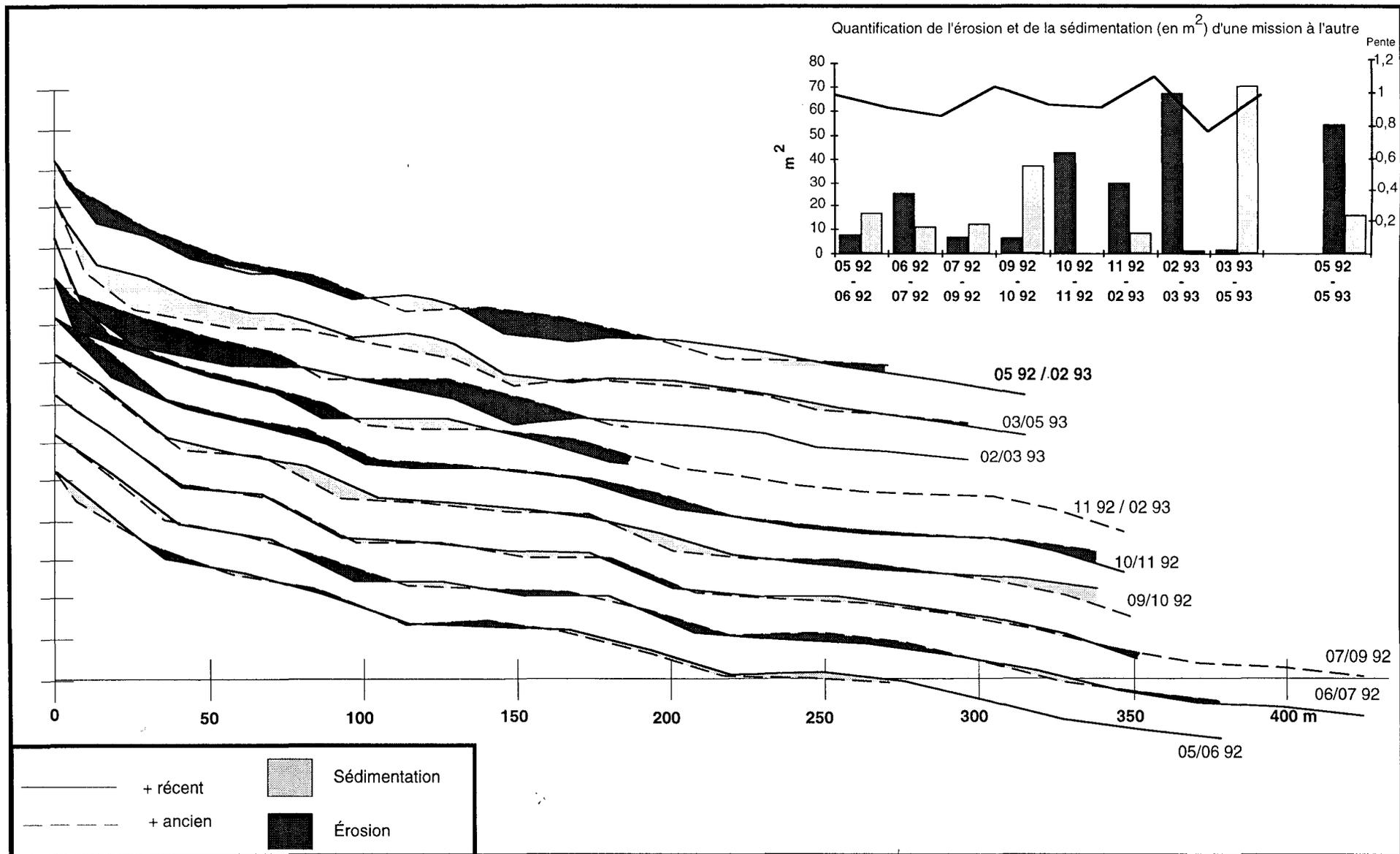


Figure IV-8 : Profil P0 de mai 1992 à mai 1993 - Evolution de la topographie, de la pente et quantification de l'érosion et de la sédimentation.

Dans le détail, le profil P0 présente un ou deux systèmes de barre - bêche dans sa partie supérieure. L'amplitude des barres, faible, est de l'ordre de 20 cm et c'est en juillet et septembre 1992 et février 1993 qu'elles sont les plus développées. La partie basse du profil est généralement dépourvue de barre.

De mai à septembre 1992, le profil reste stable. Les phénomènes sédimentaires sont faibles et alternent d'un levé à un autre (érosion/sédimentation).

De septembre à octobre 1992, le système s'engraisse (avec 37,42 m<sup>2</sup> de sédimentation contre 6,17 m<sup>2</sup> d'érosion).

En novembre 1992, février 1993 et mars 1993 les phénomènes d'érosion dominant (avec 67,33 m<sup>2</sup> d'érosion contre 1,58 m<sup>2</sup> de sédimentation en mars 1993). L'érosion est générale mais semble plus importante en haut de plage.

Enfin un engraissement général se produit en mai 1993, il est plus important dans la partie haute du profil qu'à sa base (70,5 m<sup>2</sup> contre 1,67 m<sup>2</sup>), où une barre est bien développée.

La pente du profil est comprise entre 0,8° et 1,1° (0,9° en moyenne). Globalement il n'apparaît pas de relation directe entre l'évolution de la pente du profil et l'évolution sédimentaire. Cependant l'érosion importante entre février et mars 1993 se traduit par une diminution de la pente, et la sédimentation qui suit par son augmentation.

#### *Évolution du profil P7 - Leffrinckoucke, secteur endigué (fig. IV-9)*

D'un mois à l'autre la morphologie du profil est comparable et présente quatre systèmes caractéristiques de barre - bêche. Les barres montrent le plus souvent un flanc abrupt orienté vers la côte. Leur amplitude est de l'ordre de 40 à 100 cm et diminue en direction de la mer, de même leur longueur d'onde. C'est en juillet, septembre et octobre 1992 que la plage présente sa morphologie la plus prononcée.

De mai à juin 1992 le profil est en équilibre sédimentaire.

De juin à juillet 1992, le profil subit une érosion générale (41,38 m<sup>2</sup>) se traduisant par un abaissement de la plage.

La tendance s'inverse de juillet à septembre 1992, notamment sur la partie basse du profil (62 m<sup>2</sup> de sédimentation au total).

Un équilibre sédimentaire s'installe de septembre à octobre 1992 avec toutefois une migration des barres vers la côte.

Entre octobre et novembre 1992, le profil reste stable et tend à s'aplanir un peu.

De novembre 1992 à février 1993 d'importantes érosions ont lieu en haut de plage et en bas de plage (47 m<sup>2</sup>) traduisant un abaissement général du profil.

Les érosions et les sédimentations s'équilibrent entre février et mars 1993 avec une tendance positive.

Les phénomènes sont également équilibrés de mars à mai 1993 avec cette fois-ci une tendance plutôt négative bien que les barres semblent se reformer.

L'évolution de P7 de mai 1992 à mai 1993 peut être considérée comme stable avec 31,63 m<sup>2</sup> d'érosion et 31,38 m<sup>2</sup> de sédimentation. Toutefois la sédimentation s'opère sur la partie haute du profil, sa partie basse présentant à la fois des phénomènes d'érosion et de sédimentation.

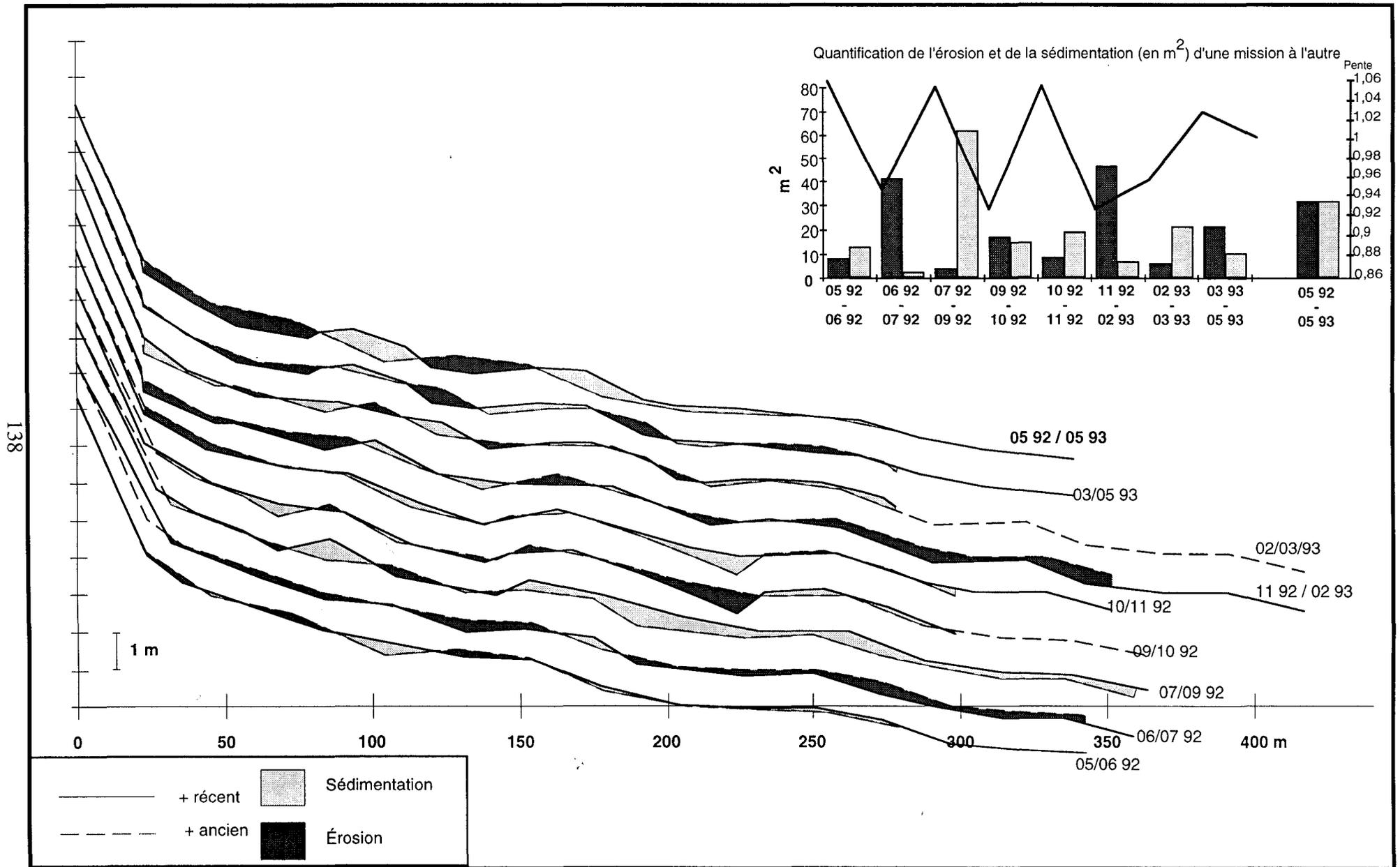


Figure IV-9: Profil P7 de mai 1992 à mai 1993 - Evolution de la topographie, de la pente et quantification de l'érosion et de la sédimentation.

La pente du profil est en moyenne de  $1^\circ$  et son évolution présente des alternances qui semblent coïncider avec l'évolution topographique du profil. De mai 1992 à février 1993, l'engraissement est caractérisé par une pente faible ( $< 1^\circ$ ) alors que l'érosion se traduit par une pente légèrement plus forte ( $> 1^\circ$ ). Ce schéma s'inverse de février 1993 à mai 1993.

#### *Évolution du profil P8 - Est Batterie de Zuydcoote - secteur naturel (fig. IV-10)*

Le profil P8 présente des systèmes de barre - bêche d'amplitude plus ou moins importante selon les époques (de l'ordre de 40 à 100 cm) mais qui tendent à diminuer en direction de la mer. Les amplitudes les plus importantes s'observent en juillet et septembre 1992 et en février 1993. Aux mois de mai et juin 1992 et mars 1993 l'allure générale du profil est plus plate.

D'une manière générale l'évolution topographique du mois de mai 1992 au mois de mai 1993 est à l'engraissement. Les phénomènes d'érosion et de sédimentation répartis le long du profil témoignent de l'alternance des phases de formation et de destruction des barres.

Entre mai et juin 1992 une érosion a lieu sur la partie haute du profil ( $24,75 \text{ m}^2$ ).  
Entre juin et juillet 1992 par contre, le haut de plage s'engraisse ( $35,88 \text{ m}^2$  de sédimentation au total contre  $5,63 \text{ m}^2$  d'érosion).  
De juillet à septembre 1992, la tendance est à l'érosion affectant plutôt les flancs doux des barres.  
De septembre à novembre 1992 les phénomènes d'érosion et de sédimentation s'équilibrent. La morphologie du profil s'aplanit de septembre à octobre.  
De novembre à février 1993, le bilan est toujours à l'équilibre mais la partie haute du profil subit une érosion alors qu'un engraissement a lieu sur la partie basse.  
De février à mars 1993 les phénomènes s'équilibrent et le profil s'aplanit.  
De mars à mai 1993 la tendance sédimentaire est à l'équilibre et les barres se reforment.

La pente du profil est inférieure à  $1^\circ$ , de l'ordre de  $0,9^\circ$ . Son évolution montre une relation avec l'évolution sédimentaire du profil. L'érosion est caractérisée par une pente plus faible pouvant atteindre  $0,6^\circ$  (en septembre 1992) alors que la sédimentation entraîne une légère augmentation de la pente (toujours  $< 1^\circ$ ). Lors des périodes d'équilibre sédimentaire la pente oscille autour de  $0,9^\circ$ .

#### *Évolution du profil P9 - Cordon dunaire Leffrinckoucke, secteur naturel (fig. IV -11)*

Ce profil n'a été relevé qu'au cours des mois de mai 1992, juin 1992 et février 1993.

La morphologie du profil est caractérisée par trois ou quatre systèmes de barre et bêche dont l'amplitude, qui est de l'ordre de 40 à 60 cm ainsi que la longueur d'onde diminuent vers le bas estran.

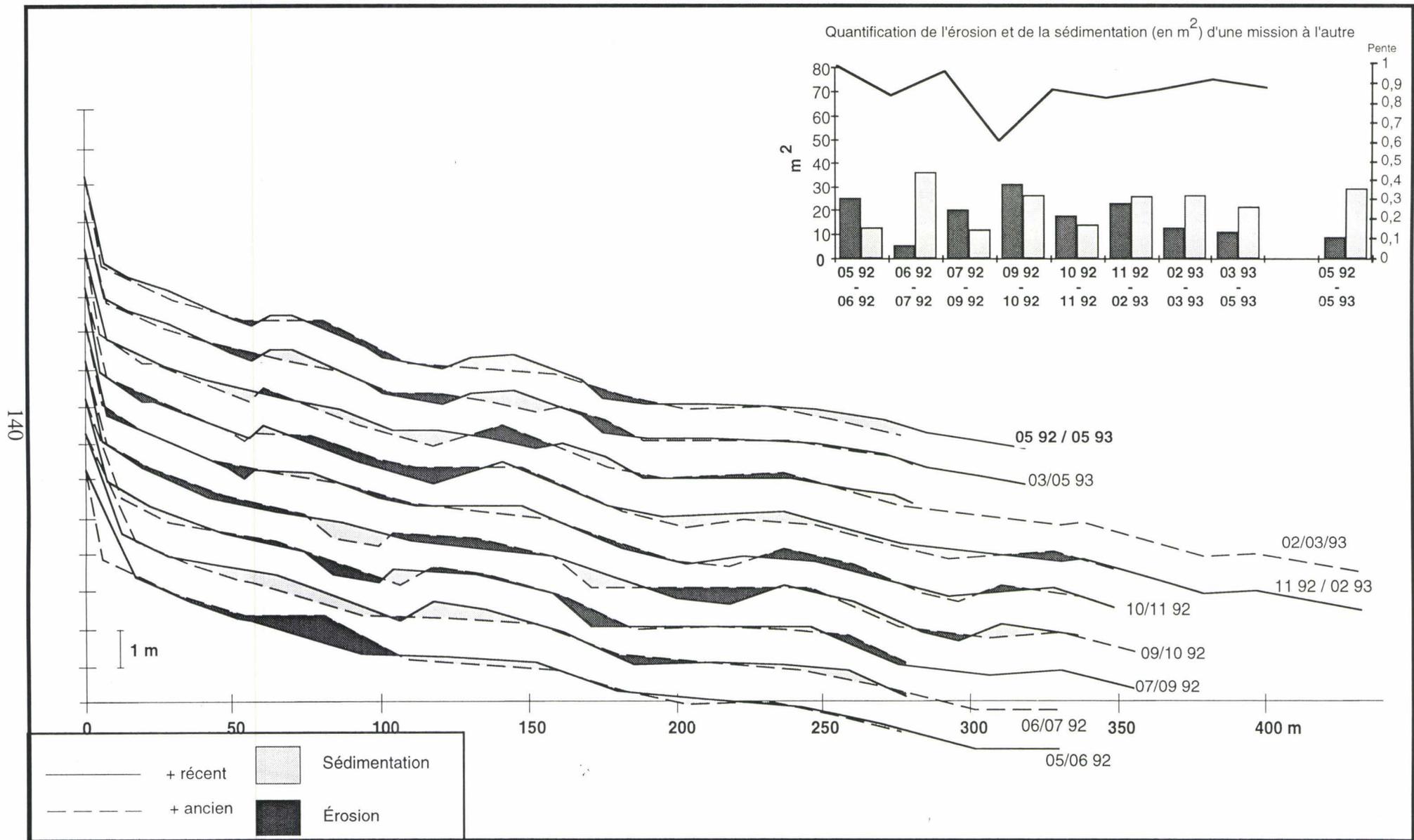


Figure IV-10: Profil P8 de mai 1992 à mai 1993 - Evolution de la topographie, de la pente et quantification de l'érosion et de la sédimentation.

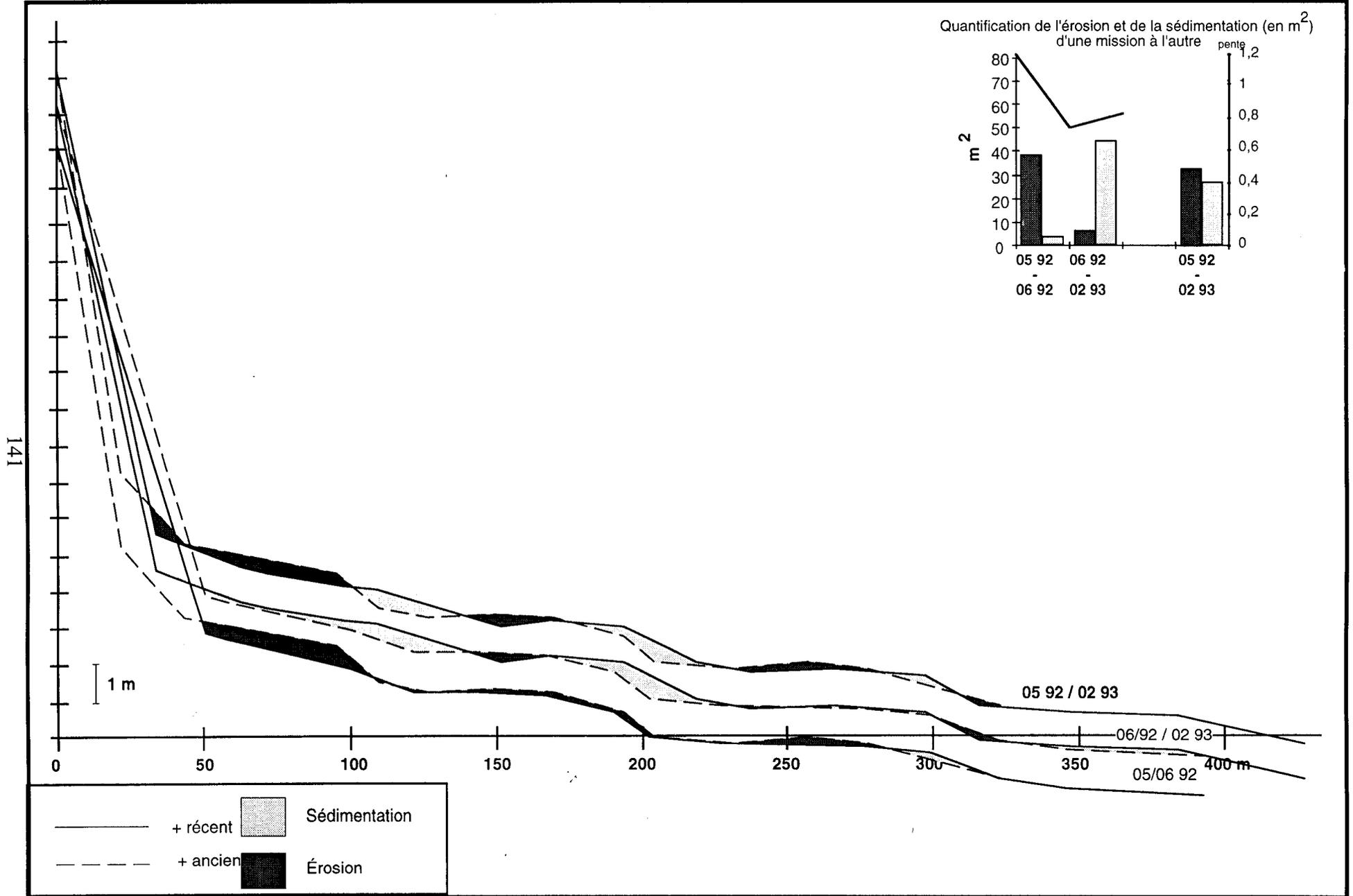


Figure IV-11: Profil P9 de mai 1992 à février 1993 - Evolution de la topographie, de la pente et quantification de l'érosion et de la sédimentation.

Avec trois relevés, la tendance évolutive annuelle du profil est difficile à caractériser. On peut seulement constater que le bilan général à cette échelle de temps est nul, caractérisé par des phénomènes d'érosion et de sédimentation de faible amplitude, de l'ordre de 30 m<sup>2</sup>.

De mai à juin 1992, le profil subit une érosion générale. Cette tendance correspond à un abaissement de la plage, et particulièrement du haut de plage où le phénomène est plus important.

De juin 1992 à février 1993, la tendance sédimentaire est à l'engraissement marquée par la reconstruction des barres.

La pente du profil est comprise entre 0,8° et 1,2°.

#### *Évolution du profil P10 - Zuydcoote - Bray-Dunes, secteur naturel (fig. IV-12).*

La morphologie du profil P10 est caractérisée comme les autres par des systèmes de barre et bêche. Globalement de mai 1992 à mai 1993 les phénomènes sédimentaires sont faibles et les bilans s'équilibrent à peu près (de l'ordre de 20 à 25 m<sup>2</sup>).

De mai à juin 1992, les mouvements sédimentaires sont faibles, mais tendent à l'érosion (14,38 m<sup>2</sup>).

De juin à juillet 1992, la tendance à l'érosion s'accroît et reflète en fait la formation plus prononcée et la migration des barres.

De juillet à septembre 1992, les phénomènes sédimentaires sont très faibles indiquant une stabilité du profil.

De septembre 1992 à mars 1993, les érosions et les engraisements sont globalement plus intenses, de l'ordre de 20 à 30 m<sup>2</sup>. Ils alternent d'une mission à l'autre et témoignent d'un relatif équilibre sédimentaire relatif aux mouvements des barres dans le profil.

De mars à mai 1993 la tendance sédimentaire devient déficitaire dans la partie basse du profil et traduit une diminution de l'amplitude des barres associée à un aplatissement du profil.

La pente du profil est de l'ordre de 0,7° à 1,1°, de 0,9° en moyenne. Son évolution semble peu influencée par l'évolution morphologique : les érosions sont marquées par une pente plus faible.

#### *Évolution du profil P11 - Bray-Dunes, secteur endigué (fig. IV-13)*

Le suivi de P11 a débuté à partir de juillet 1992. Le profil présente une morphologie comparable aux profils précédents, la position des barres et bèches étant très variable au cours du temps. De juillet 1992 à mai 1993, la tendance générale est à l'engraissement.

De juillet à septembre 1992, le profil montre un engraissement traduisant un développement des barres et leur migration vers la côte.

De septembre à octobre 1992 les bèches se creusent et la tendance est à l'érosion.

D'octobre à novembre 1992, les engraisements sont à nouveau dominants.

De novembre 1992 à mai 1993 le bilan sédimentaire est à l'équilibre. Les variations topographiques sont importantes entre novembre 1992 et février 1993 puis diminuent progressivement jusqu'en mai 1993.

La pente du profil est de l'ordre de 0,8° à 1,2°. De juillet 1992 à février 1993, les valeurs de la pente augmentent progressivement et diminuent en mars 1993 pour se stabiliser.

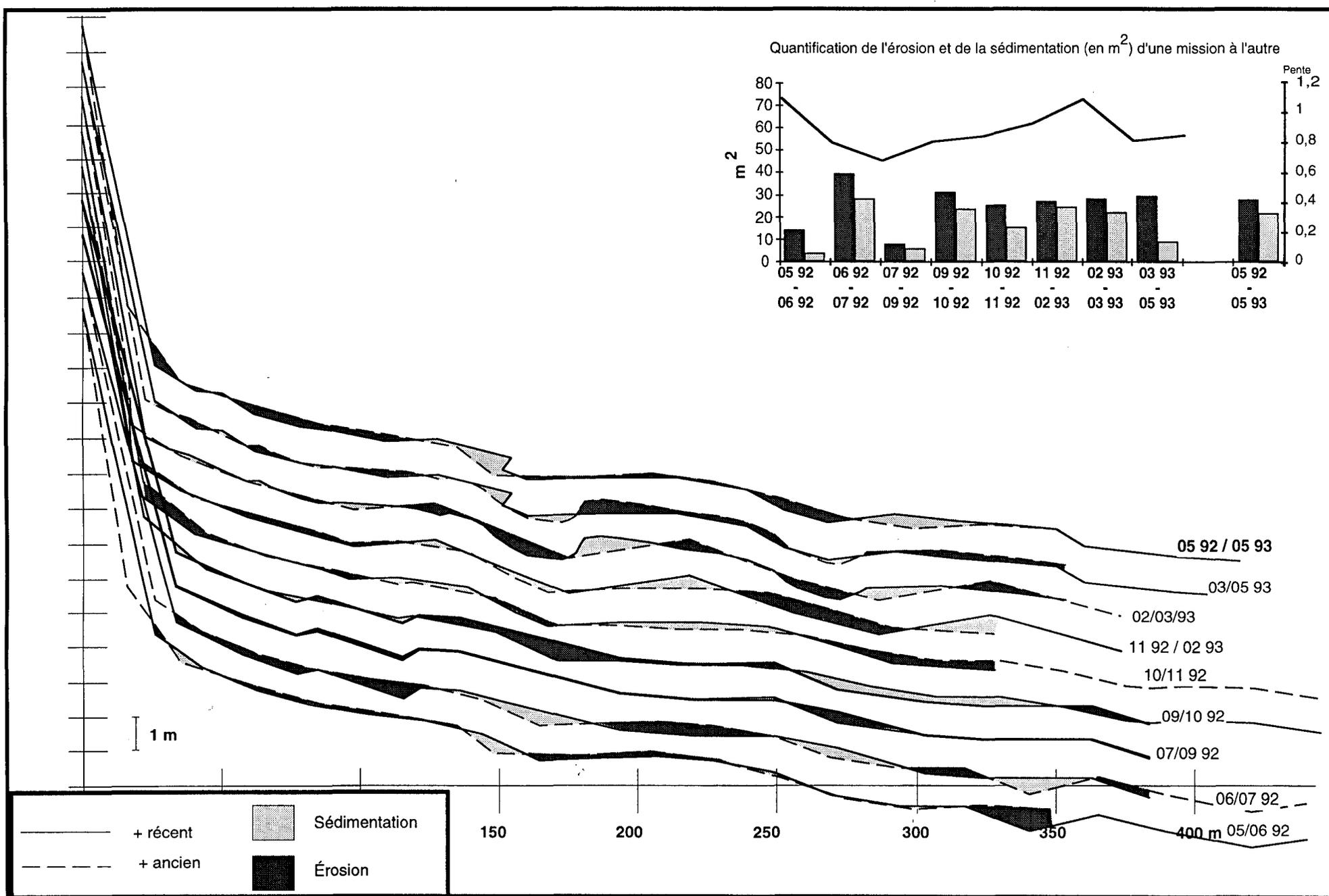


Figure IV-12 : Profil P10 de mai 1992 à mai 1993 - Evolution de la topographie, de la pente et quantification de l'érosion et de la sédimentation.

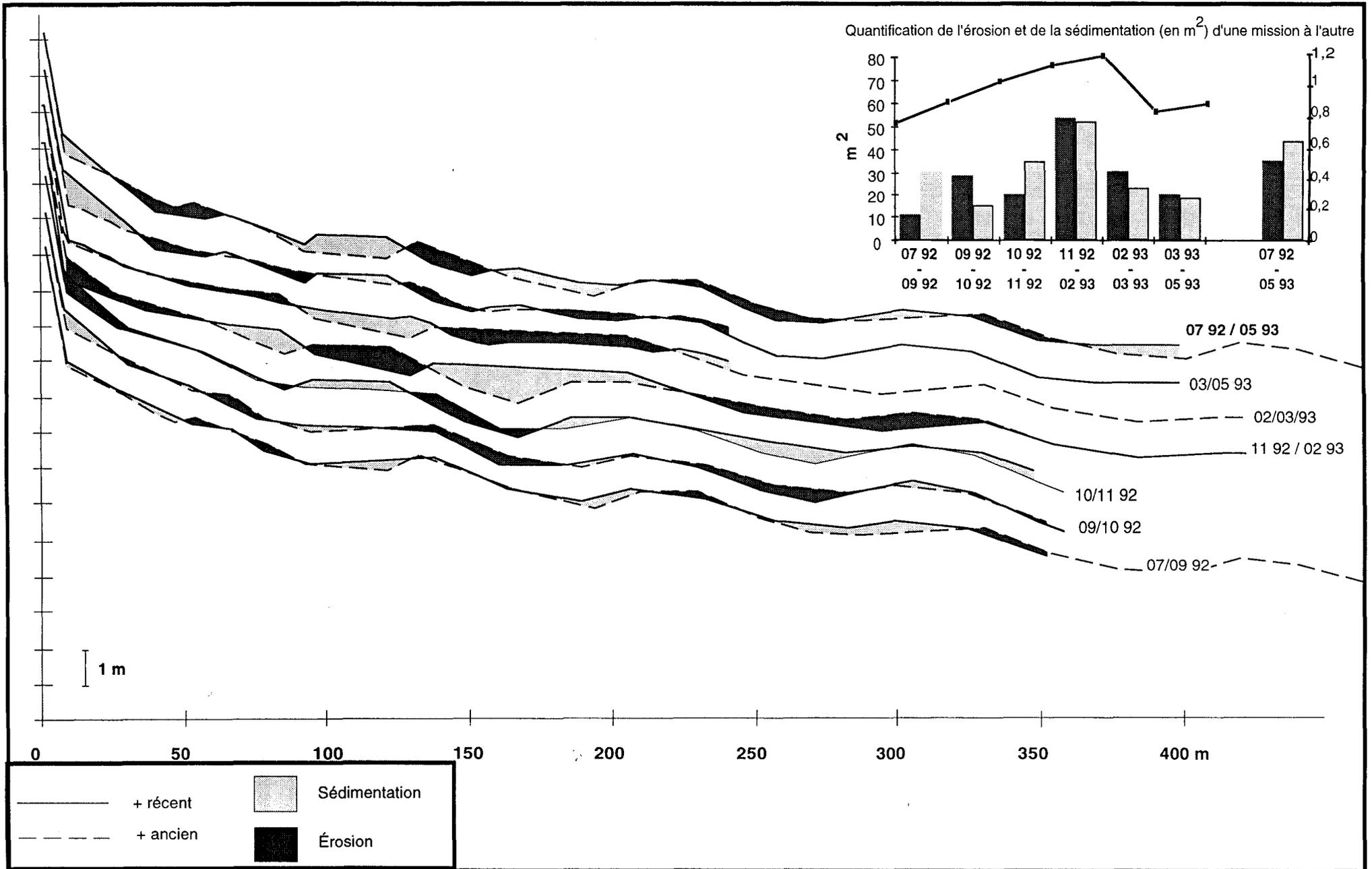


Figure IV-13 : Profil P11 de juillet 1992 à mai 1993 - Evolution de la topographie, de la pente et quantification de l'érosion et de la sédimentation.

### Évolution du profil P12 - Est Bray-Dunes, secteur naturel (fig. IV -14)

La morphologie de P12, plus ou moins comparable aux profils précédents, se caractérise par des systèmes de barre et bêche particulièrement bien développés. Du mois de mai 1992 au mois de mai 1993, le profil traduit une tendance à l'engraissement. Cette sédimentation reflète principalement le développement des barres.

De mai à juillet 1992, le développement des barres et leur migration vers le haut de plage se traduit par des phénomènes érosifs plus importants (35 m<sup>2</sup> environ).

De juillet à septembre 1992, le profil est en engraissement général (67 m<sup>2</sup>).

De septembre à octobre 1992, les phénomènes sédimentaires sont en équilibre et la morphologie du système barre-bêche redevient plus marquée.

D'octobre 1992 à février 1993, la tendance est à l'engraissement et s'accompagne de mouvement important des barres dans le profil.

Le bilan est légèrement négatif entre février et mars 1993 et se traduit par un léger aplanissement du profil.

Entre mars et mai 1993, les barres se reforment et migrent vers le haut de plage, ce qui s'accompagne d'un engraissement dominant.

La pente du profil P12 est plus faible que pour les autres profils. Elle est comprise entre 0,6° et 0,9°. L'érosion se traduit par une petite baisse de la pente alors que la sédimentation se manifeste par une légère augmentation de la pente ou une oscillation autour d'une valeur d'équilibre (0,7°).

#### *synthèse :*

Le bilan de cette étude de comparaison est représenté dans le tableau IV - 4 et sur la figure IV-15 . **Le bilan annuel des variations topographiques de chaque profil est en équilibre sédimentaire ou en légère sédimentation (P8, P11 et P12 en sédimentation, P7 et P9 en équilibre). Seul le profil P0, situé en domaine très urbanisé, présente un bilan très déficitaire, cependant que le profil P10, localisé en domaine naturel, reflète une érosion plus modérée. Il en résulte, que le bilan annuel global, correspond à un système en équilibre pour des conditions hydrodynamiques de faible à moyenne énergie.**

**L'alternance des phénomènes d'érosion et de sédimentation reflète la dynamique des barres au cours du temps : développement, migration et destruction.** Par exemple au niveau de P10 les barres se reforment et migrent vers la côte de juin à juillet 1992 alors que de mars à mai 1993 elles sont atténuées. Globalement les systèmes de barre et de bêche sont mieux développés en juillet et septembre 1992 et plus particulièrement en secteur naturel ou en secteur endigué éloigné des brise-lames.

**La pente des profils est en moyenne de 0,9° à 1°.** Le profil 12, situé à l'extrémité Est de Bray-Dunes, présente une pente légèrement plus faible de l'ordre de 0,7°. Il n'apparaît pas de relation directe entre la pente du profil et l'évolution sédimentaire mais la pente oscille plutôt autour d'une position d'équilibre.

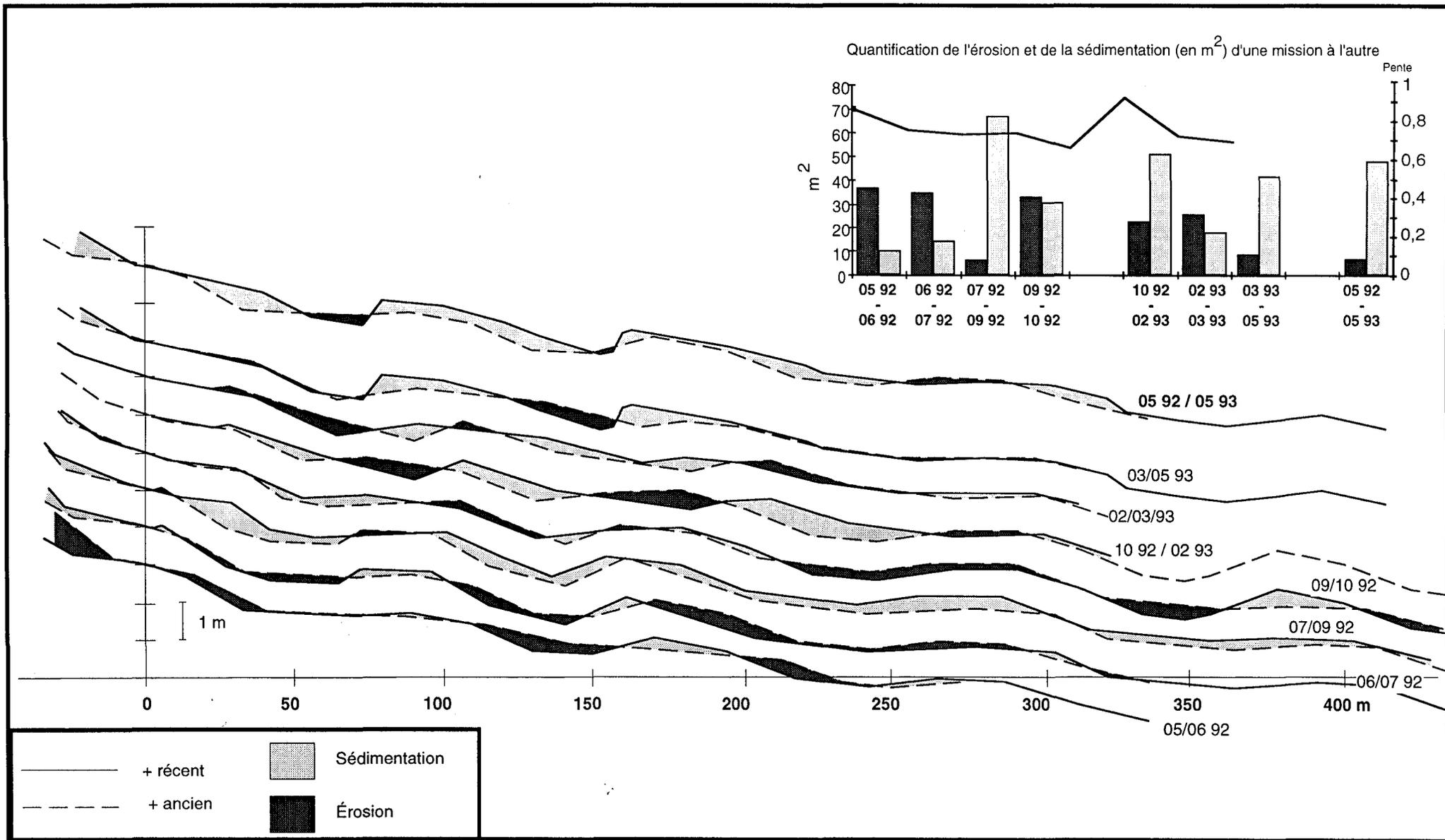


Figure IV-14 : Profil P12 de mai 1992 à mai 1993 - Evolution de la topographie, de la pente et quantification de l'érosion et de la sédimentation.

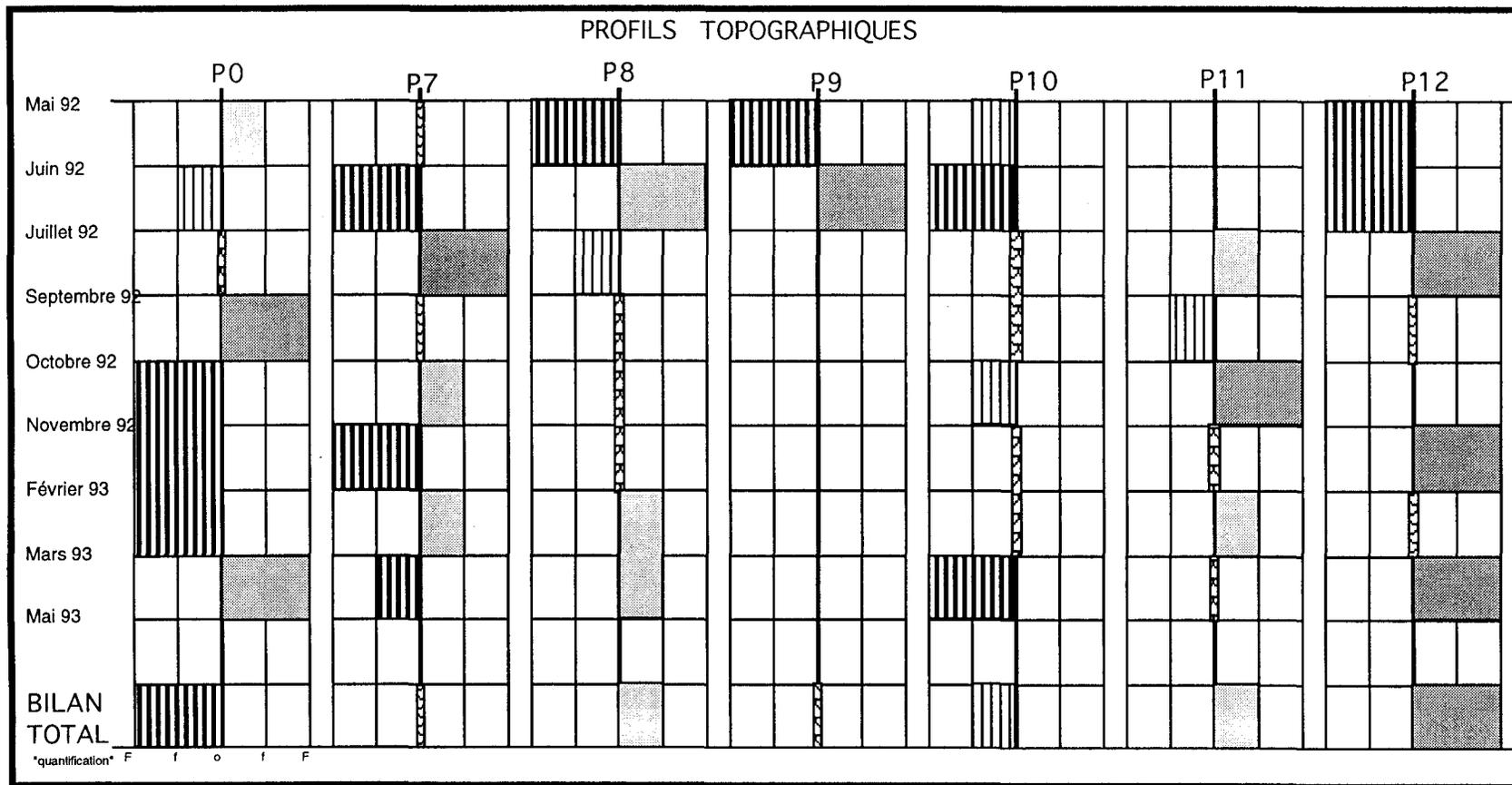
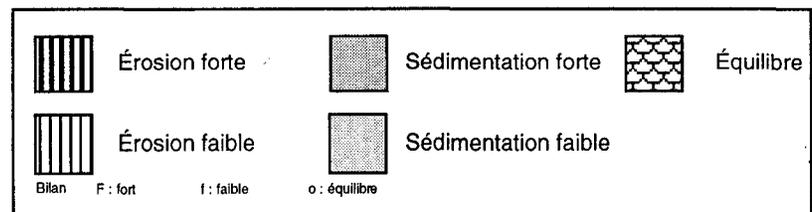


Figure IV-15 : Bilan général de l'évolution de la topographie du mois de mai 1992 au mois de mai 1993



DATES	P0 MIB U	P7 Leff U	P8 Bat Z N	P9 H Z N	P10 W BD N	P11 BD U	P12 E BD N
de Mai à Juin 92	S	0	E	E	E		E
de Juin à Juill 92	E	E	S	S	E		E
de Juill à Sept 92	0	S	E		0	S	S
de Sept à Oct 92	S	0	0		0	E	0
de Oct à Nov 92	E	S	0		E	S	
de Nov 92 à Fév 93	E	E	0		0	0	S
de Fév à Mars 93	E	S	S		0	S	0
de Mars à Mai 93	S	E	S		E	0	S
Bilan Global	E	0	S	0	E	S	S

**Tableau VI - 4 :** Bilan global de l'évolution topographique des différents profils réalisés de mai 1992 à mai 1993. (E : érosion, **E** : érosion importante, 0 : stable, S : sédimentation ; **S** : sédimentation importante, **U** : urbanisé, **N** : naturel, **MIB** : Malo-les-Bains, **Leff** : Leffrinckoucke, **Bat Z** : Batterie de Zuydcoote, **H Z** : Hôpital de Zuydcoote, **W BD** : Ouest de Bray-Dunes, **BD** : Bray-Dunes, **E BD** : Est de Bray-Dunes).

#### IV - 3 - 2 - 2 - Évolution topographique et granulométrique globale à l'échelle du littoral

Les paramètres granulométriques retenus comprennent le grain moyen et l'indice de classement, car ils caractérisent le mieux l'ensemble de la répartition granulométrique. La description morphologique des profils est ici très succincte puisqu'elle est a été détaillée précédemment.

##### *En mai 1992 (fig. IV-16 et IV-17)*

La topographie des profils est dans l'ensemble assez peu marquée, à l'exception de P9 et P10 montrant deux barres en net relief.

Les résultats des analyses granulométriques montrent que :

- Les valeurs du grain moyen sont comprises entre 150 et 220  $\mu\text{m}$ . Les maximums sont dus à la présence de débris coquilliers plus grossiers.
- Il existe au sein de chaque profil un gradient granulométrique général, croissant du bas vers le haut de plage.
- Il semble exister un léger gradient granulométrique décroissant d'Ouest en Est. Les sédiments les plus fins se situent au niveau de Bray-Dunes. Le profil 0, situé à Malo-les-Bains, fait exception et présente des sédiments plus fins témoignant d'un milieu plus calme.

##### *En juin 1992 (fig. IV-18 et IV-17)*

La morphologie en barres bâches est dans l'ensemble plus marquée qu'en mai.

Le grain moyen est à nouveau compris entre 140 à 220  $\mu\text{m}$ . Les pics dus aux sables plus coquilliers sont assez nombreux et reflètent les variations topographiques le long des profils avec barres et bâches. Le gradient granulométrique croissant vers le haut de plage persiste.

##### *En juillet 1992 (fig. IV-19 et IV-17)*

La morphologie des systèmes de barre et de bache est bien marquée, et plus particulièrement au niveau des profils P8 à P12. La morphologie de P0 est plus plate.

Les valeurs du grain moyen varient entre 150 et 200  $\mu\text{m}$ . Elles augmentent progressivement vers le haut de plage. Les maximums sont ici également nombreux et témoignent de la morphologie plus irrégulière de l'estran.

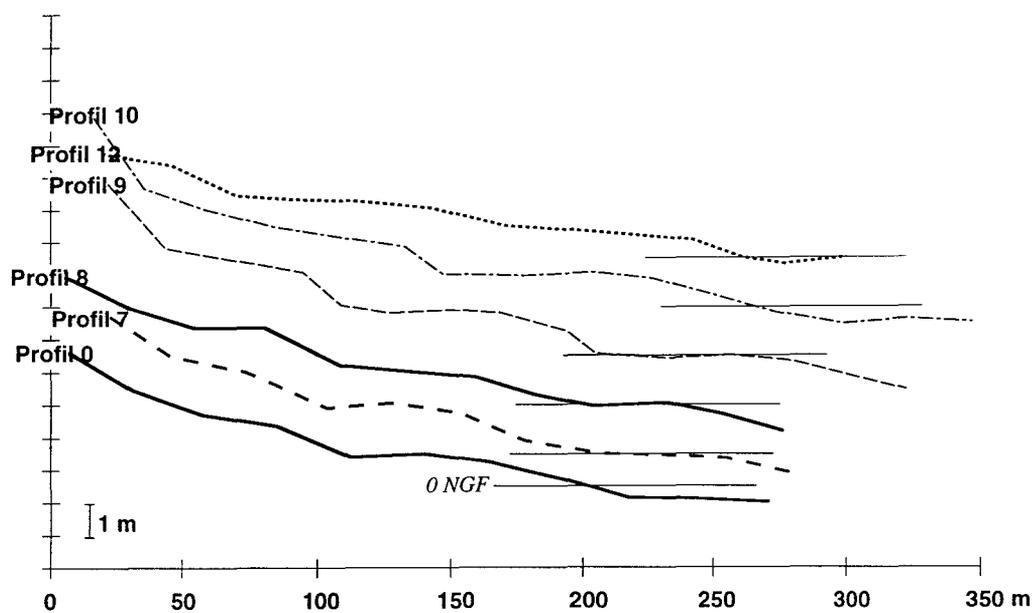


Figure IV-16: Profils topographiques réalisés le 26 et 27 mai 1992

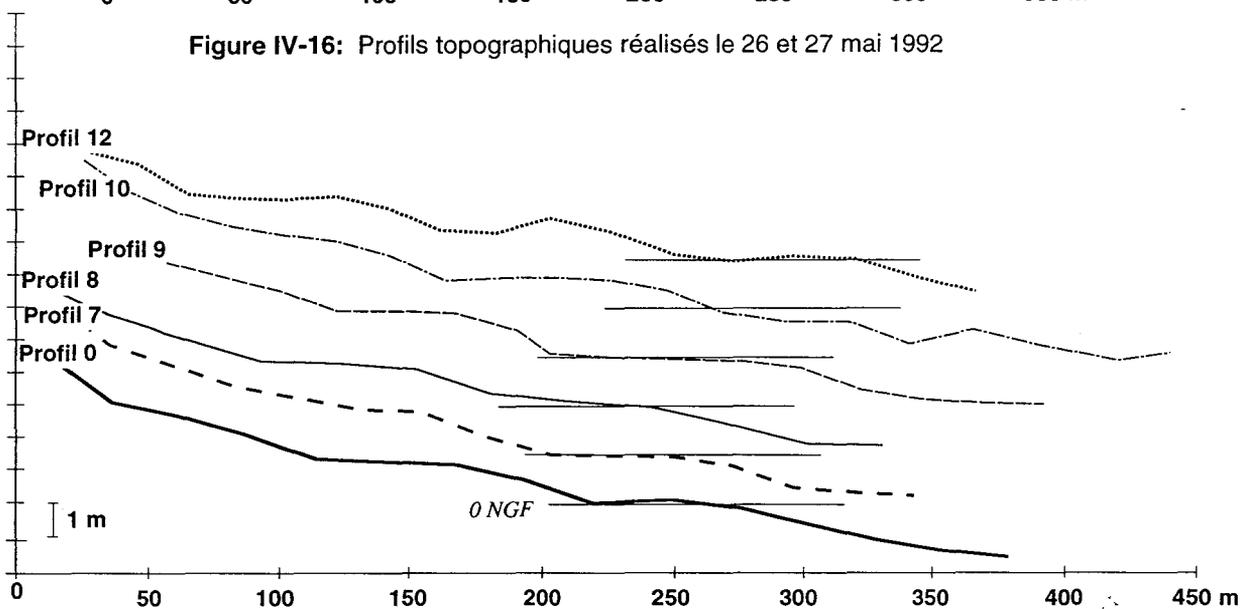


Figure IV-18: Profils topographiques réalisés le 16 et 17 juin 1992

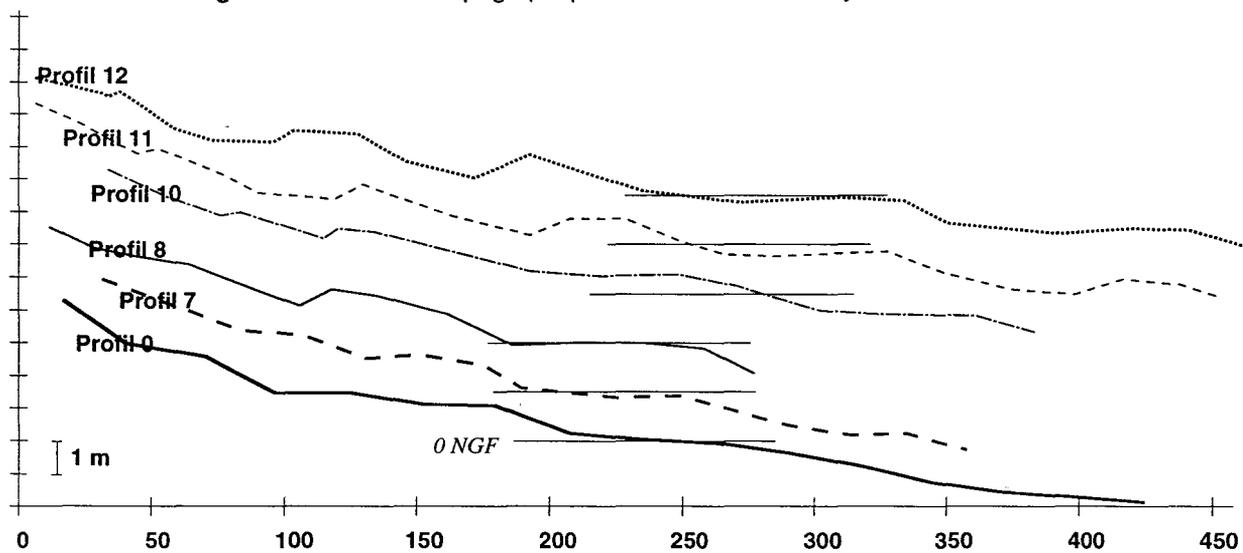


Figure IV-19 : Profils topographiques réalisés le 30 et 31 juillet 1992

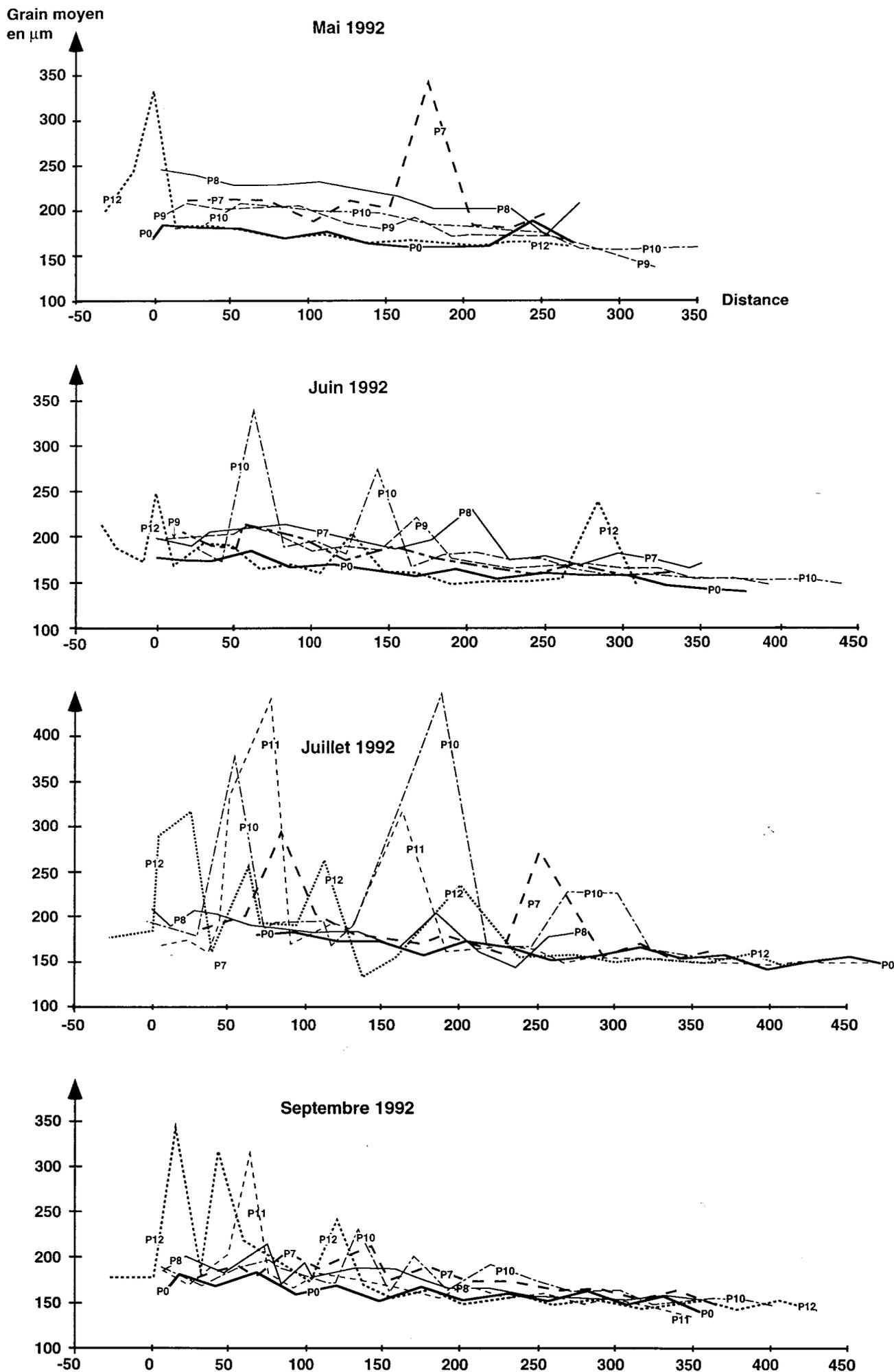


Figure IV-17 : Répartition du grain moyen le long de chaque profil

*En septembre 1992 (fig. IV-20 et IV-17)*

Comme en juillet la topographie de l'estran est contrastée (système barre-bâche bien développé). Le diamètre du grain moyen augmente progressivement vers le haut du profil, les valeurs étant comprises entre 150 et 200  $\mu\text{m}$ . Les maximums sont moins nombreux et localisés essentiellement dans la partie haute du profil.

*En octobre 1992 (fig. IV-21 et IV-17)*

Les profils se sont dans l'ensemble aplanis. La morphologie des systèmes de barre reste néanmoins plus ou moins marquée notamment le long de P12 et P11 et dans la partie inférieure de P7 et P8. Les profils P0 et P12 sont plats.

Les valeurs du grain moyen sont comprises entre 200 et 280  $\mu\text{m}$ . Cette augmentation par rapport aux mois précédents est due au changement d'instrument de mesure (passage d'un tamisage mécanique à une granulométrie laser). Il existe principalement un gradient de granulométrie croissante du bas vers le haut de plage. Globalement on observe un gradient granulométrique décroissant d'Ouest en Est : les sédiments le long du profil P7 et P8 sont un peu plus grossiers que ceux des profils P10 et P12. Les échantillons récoltés sur le profil P0 sont aussi fins que ceux de P12.

*En novembre 1992 (fig. IV-22 et IV-17)*

La morphologie des barres redevient plus ou moins marquée, plus particulièrement le long de P7 et P11. Le profil P0 est beaucoup plus plat.

Les valeurs du grain moyen sont de l'ordre de 180 à 250  $\mu\text{m}$ . Ces valeurs augmentent globalement vers le haut de plage et diminuent sensiblement en direction de la frontière franco-belge, à l'exception des sédiments récoltés le long du profil 0, qui sont aussi fins que ceux de P12.

*En février 1993 (fig. IV-23)*

La morphologie classique en barres et en bâches est à nouveau assez bien marquée. Aucun échantillon n'a été prélevé.

*En mars 1993 (fig. IV- 24 et IV-17)*

Les profils présentent une morphologie plate à l'exception du profil 10 qui montre trois systèmes de barre et de bâche.

Des échantillons n'ayant pas été récoltés sur deux des profils (P10 et P11), les résultats sont limités aux profils P0, P7, P8 et P12. Ils sont dans l'ensemble comparables aux données précédentes. Le grain moyen est de l'ordre de 200 à 250  $\mu\text{m}$ .

*En mai 1993 (fig. IV-25 et IV 17)*

Les barres et les bâches sont à nouveau bien marquées sur tous les profils.

Les valeurs du grain moyen sont de l'ordre de 200 à 250  $\mu\text{m}$ . Le gradient de granularité vers le haut de plage est identifié comme ailleurs.

De manière très générale tous les échantillons récoltés sont caractérisés par un indice de classement de l'ordre de 1 à 1,2 (fig. IV-26). Les sédiments sont propres, homogènes, bien classés. Les sédiments plus grossiers, coquilliers, présentent toutefois des indices plus élevés

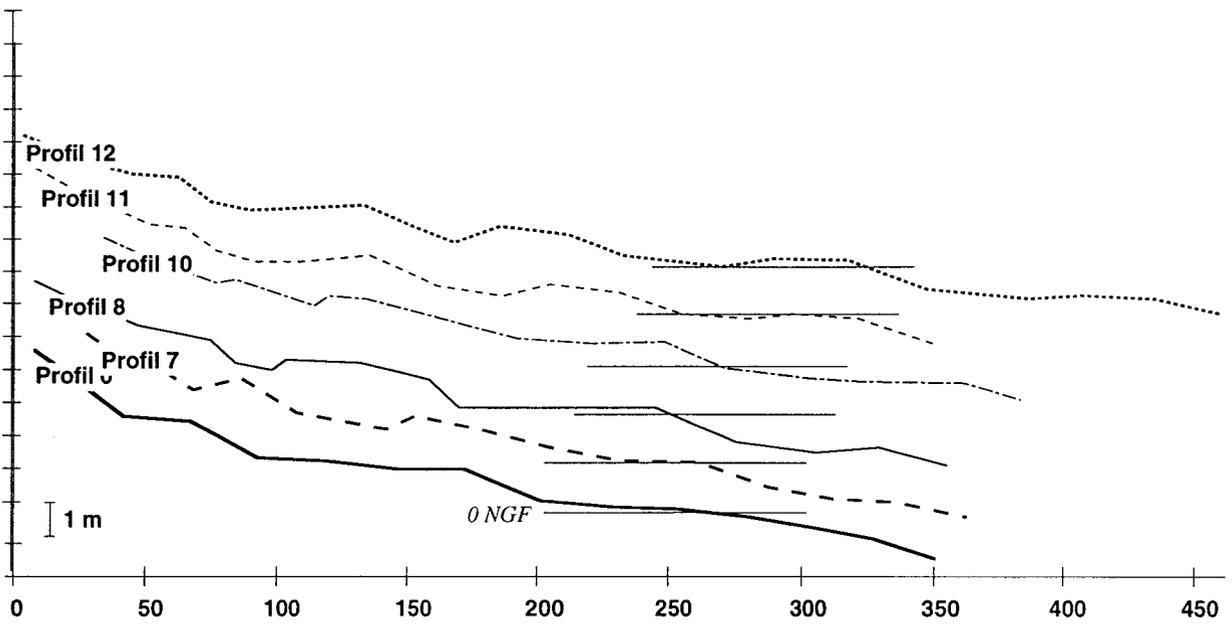


Figure IV-20 : Profils topographiques réalisés le 12 septembre 1992

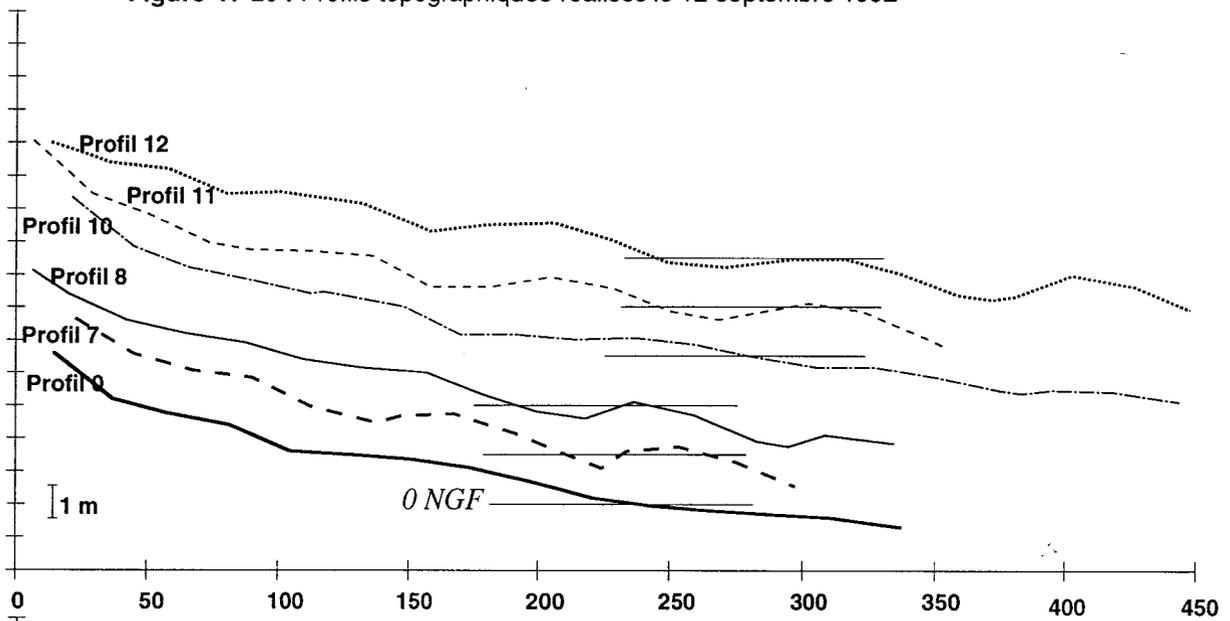


Figure IV-21 : Profils topographiques réalisés le 21 et 22 octobre 1992

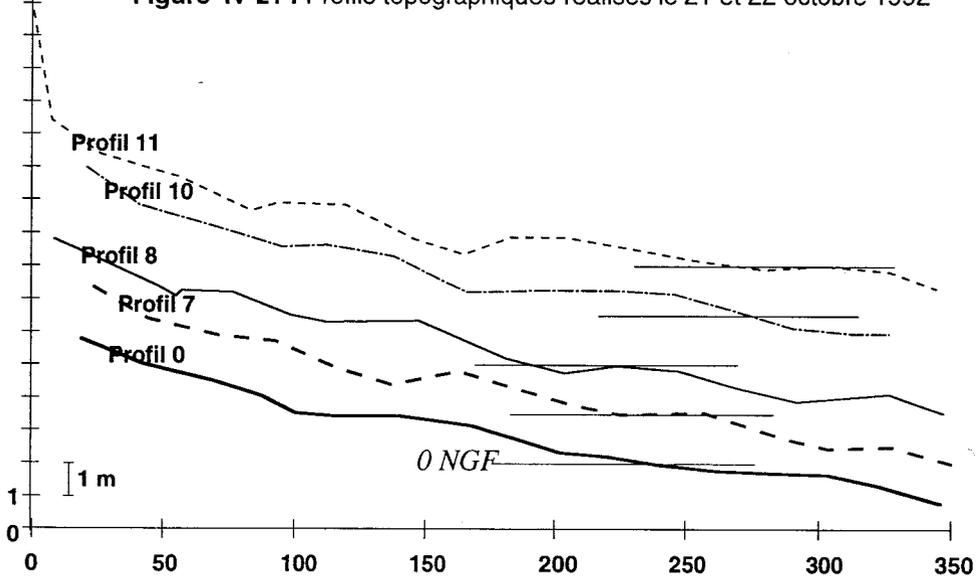


Figure IV-22: Profils topographiques réalisés le 17 et 18 novembre 1992

Grain moyen  
en  $\mu\text{m}$

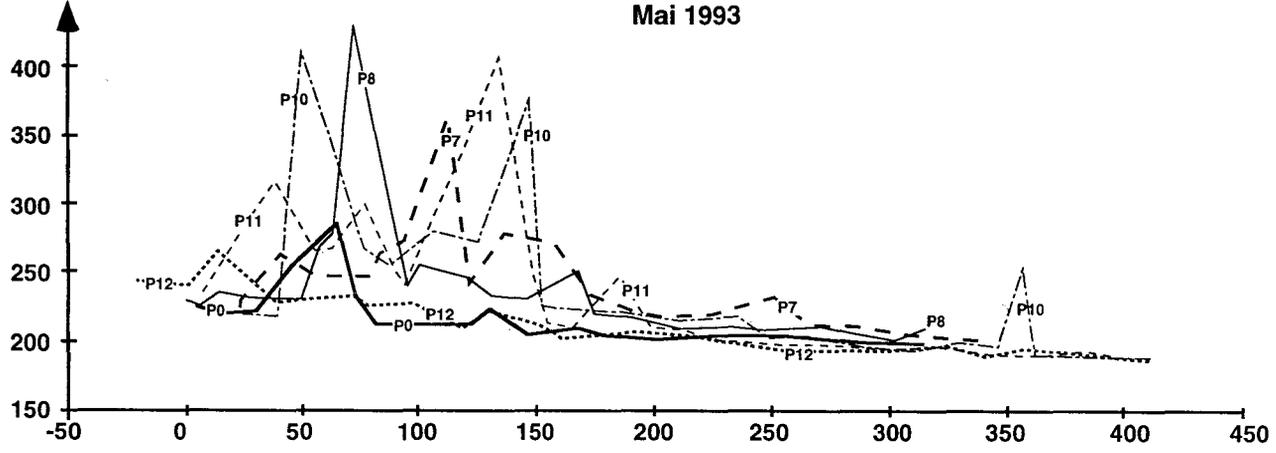
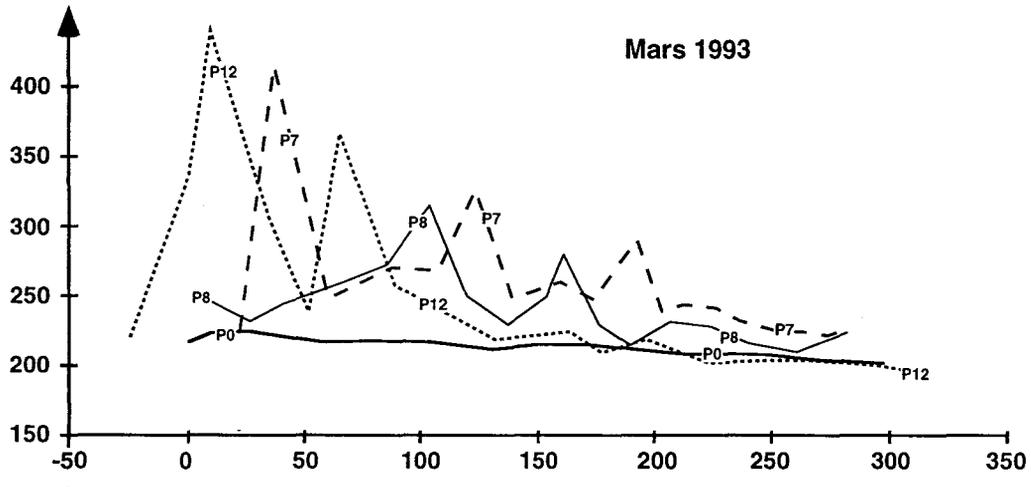
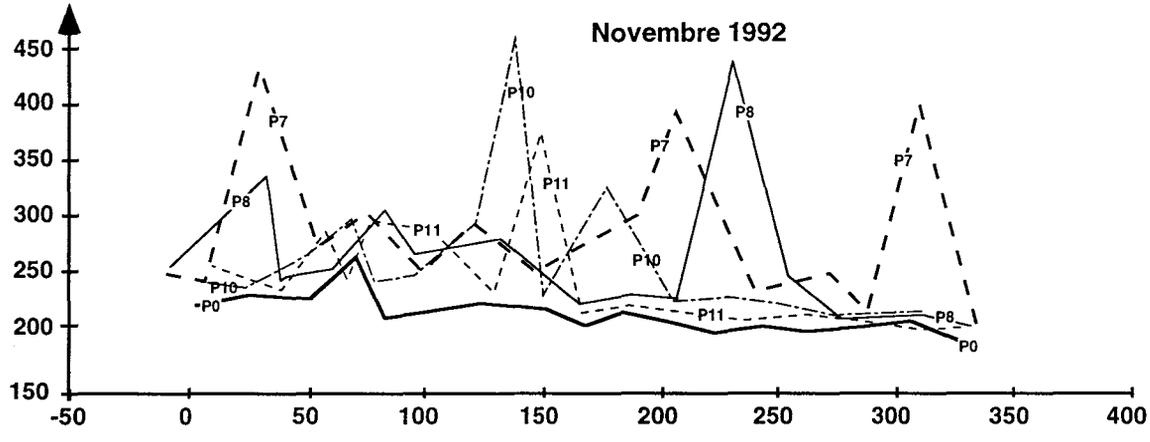
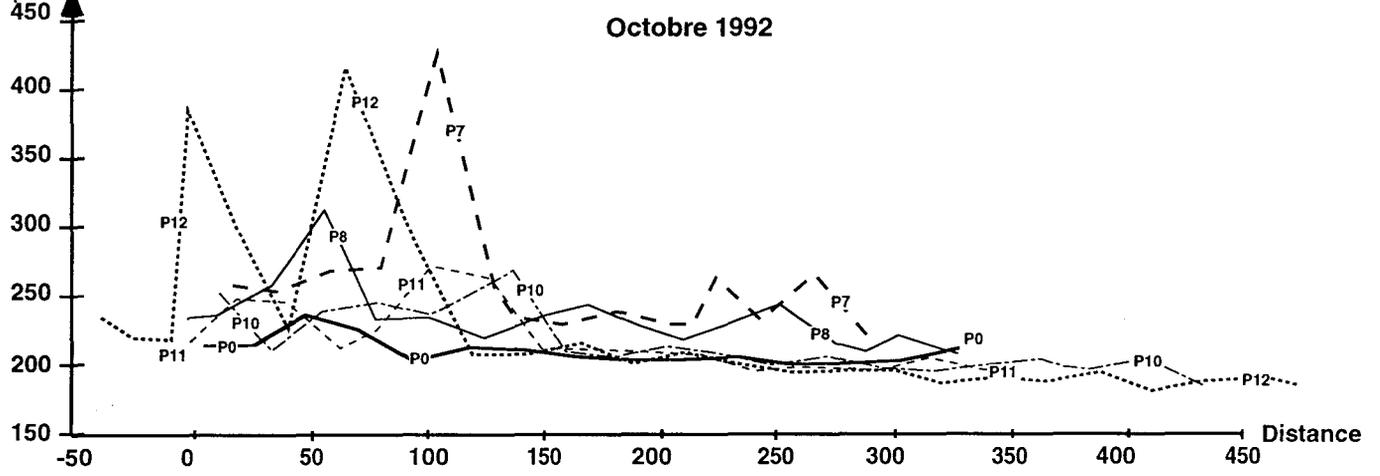


Figure IV-17 suite et fin : Répartition du grain moyen le long de chaque profil.

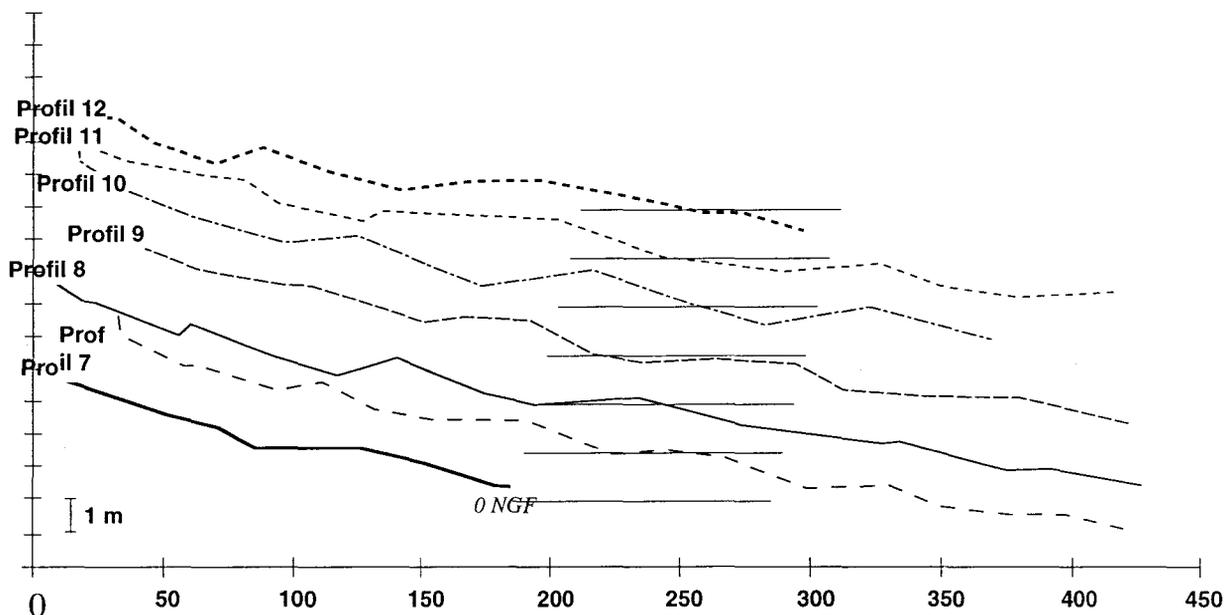


Figure IV-23 : Profils topographiques réalisés au mois de février 1993

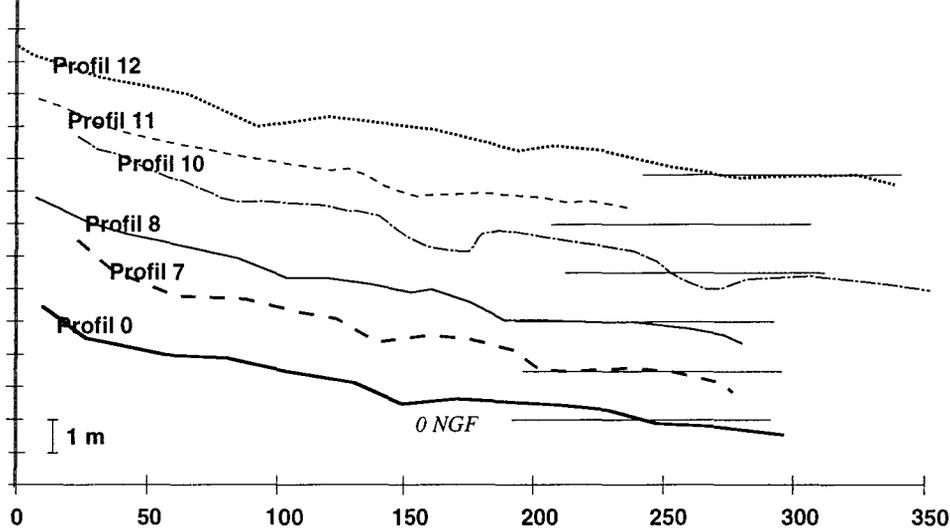


Figure IV-24 : Profils topographiques réalisés au mois de mars 1993

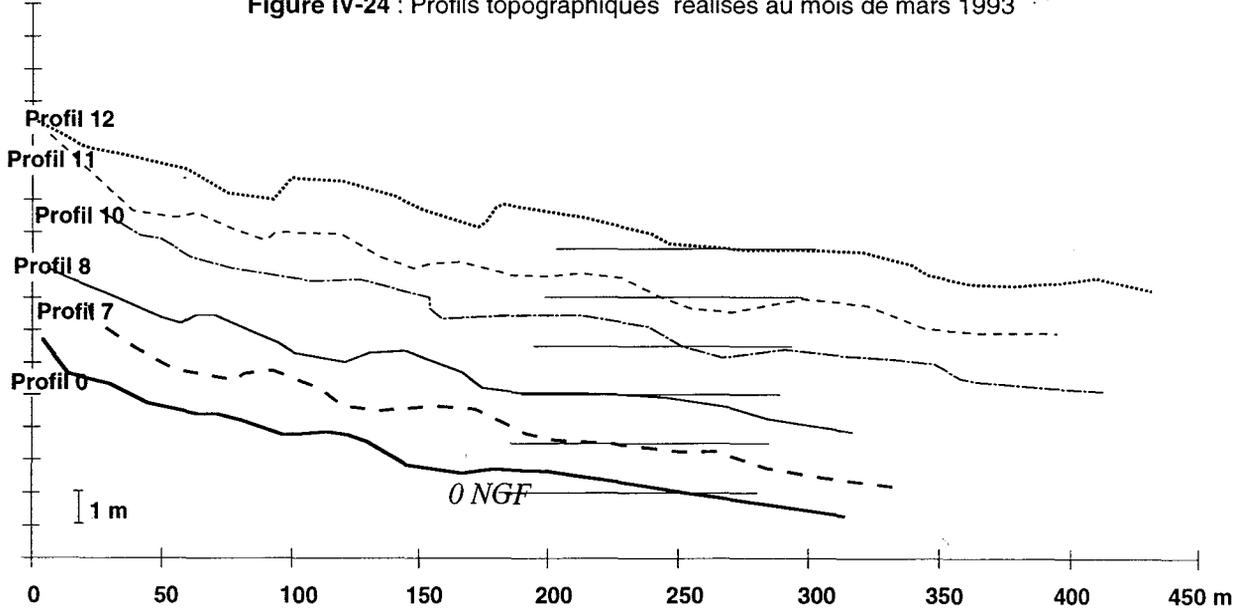


Figure IV-25 : Profils topographiques réalisés le 26 et 27 mai 1993

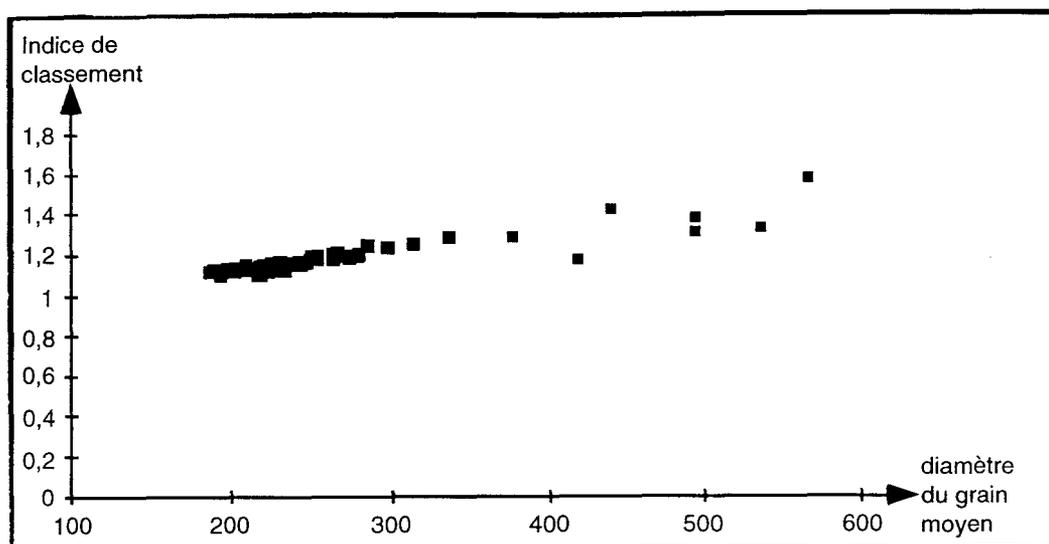


Figure IV-26 : Répartition de l'indice de classement en fonction du grain moyen.

### Synthèse

La plage présente deux types de morphologie selon les conditions hydrodynamiques. **Lors de conditions de faible énergie elle acquiert une morphologie d'été** (ex : juillet à octobre 1992, février et mai 1993) **caractérisée par des systèmes de barre et de bêche alors que lors de conditions plus énergétiques son allure est plus plate** (ex : mai, juin et novembre 1992 et mars 1993).

Les données granulométriques montrent un indice de classement de l'ordre de 1, et des valeurs de grain moyen comprises entre 160 et 240 μm. **Les sédiments sont donc propres, fins et homogènes.** Les valeurs plus élevées du grain moyen caractérisent des sédiments plus riches en débris coquilliers, généralement situés au niveau de la laisse de haute mer et sur le flanc marin des barres à la limite de la bêche.

L'augmentation des valeurs du grain moyen vers le haut de la plage reflète **un gradient granulométrique perpendiculaire au rivage**. Les valeurs du grain moyen diminuent également en direction de l'Est, ce qui traduit un **gradient parallèle au rivage**. Toutefois les échantillons récoltés sur le profil 0 situé à l'Ouest sont aussi fins que les échantillons du profil 12 situés à l'Est, et font donc exception à cette règle.

#### IV - 3 - 2 - 3 - Interprétation des évolutions topographiques

Le domaine d'estran a fait l'objet de nombreuses études pour comprendre l'évolution morphosédimentaire en fonction du vent, des vagues, des courants de marée et des facteurs anthropiques (Davis & Fox 1972 ; Davis, 1985 ; De Moor, 1979 ; Komar, 1983 ; Leatherman 1991 ; Levoy, 1994).

Rappelons que les conditions météorologiques et hydrodynamiques qui ont régné pendant le suivi topographique des plages du littoral Est dunkerquois sont restées globalement calmes. Aucune tempête n'a été enregistrée et les vitesses des vents frontaux susceptibles d'affecter sévèrement le site n'ont pas dépassé 11 m/s.

L'analyse des résultats apporte les **enseignements généraux** suivants :

- **D'un point de vue sédimentaire**, les plages sont constituées de sable fin homogène (160 à 240  $\mu\text{m}$ ). Toutefois on note l'existence de deux gradients ; les valeurs du grain moyen augmentent vers le haut des profils et tendent à diminuer vers l'Est. Ces sédiments fins caractérisent une **dynamique d'énergie faible à moyenne**.

- **D'un point de vue morphologique**, les profils de plage sont généralement concaves et de pente faible de l'ordre de  $0,9^\circ$ . Le haut de plage ne présente presque jamais de berme témoignant d'une tendance à l'érosion. Cependant la plupart des profils se caractérisent par l'existence de barres et de bâches parallèles à la côte et plus ou moins bien développées selon l'époque. C'est la **dynamique de développement, migration et aplanissement de ces systèmes barre-bâche qui détermine les évolutions topographiques saisonnières des différents profils**.

**Dans le détail** cette dynamique s'accorde partiellement à deux modèles classiques, déjà observés sur d'autres littoraux (Weber, 1978 ; Carr *et al.*, 1982 ; Howa, 1987 ; Larson & Kraus, 1994), et qui caractérisent l'un les périodes de beau temps, l'autre les périodes de mauvais temps relatif. Néanmoins ces modèles n'expliquent pas tous les phénomènes observés, l'évolution à une époque donnée étant parfois différente d'un profil à un autre. Ainsi différents secteurs peuvent être définis : **les secteurs en érosion : Malo-les-Bains (P0), le secteur naturel entre Zuydcoote et Bray-Dunes P10 ; les secteurs en équilibre : Leffrinckoucke (P7), le secteur naturel entre la batterie de Zuydcoote et Zuydcoote (P9) et les secteurs en engraissement : le secteur naturel entre Leffrinckoucke et la batterie de Zuydcoote (P8,) Bray-Dunes (P11) et l'Est de Bray-Dunes (P12)**.

#### *Modèle d'évolution morphologique*

D'après les modèles proposés dans la littérature, sous l'action des vagues de beau temps, l'estran s'engraisse et le haut de plage est progressivement rechargé. Cela peut expliquer le bilan général positif ou à l'équilibre des profils P7, P8, P9, P11 et P12 puisque les conditions ont plutôt été de faible énergie. En revanche sous l'action d'une houle frontale le sable est théoriquement remobilisé puis transporté par courant de retour vers le large, engendrant l'érosion de l'estran. Les érosions sont plus fréquentes en période hivernale car c'est pendant cette période que la fréquence et l'intensité des tempêtes sont les plus fortes.

/ La présence de barres reflète l'action de la houle qui dans le cas d'une plage macrotidale, est associée à celle des courants de marée (Short 1991 ; Masselink, 1993). Une étude des figures sédimentaires sur les plages du littoral dunkerquois a montré que par condition de beau temps la bêche est dominée par les courants de marée alors que l'action de la houle est plus importante sur la barre (Corbau *et al.*, 1994a).

/ L'action des courants de marée se manifeste par un surcreusement des bèches lorsqu'ils sont assez forts pour déterminer un bilan négatif. Par exemple au mois de juillet 1992, les conditions climatiques sont relativement calmes et les coefficients de marée sont de grande vive-eau. Les courants canalisés dans les bèches y provoquent une érosion localisée au niveau de tous les profils, à l'exception de P8.

Cependant les profils apparaissent osciller autour d'une position d'équilibre. En effet selon Dean (1991) et Pilkey *et al.* (1993) la morphologie de la plage s'adapte aux conditions hydrodynamiques.

Selon le modèle établi par Dean (1991) il est possible de calculer un profil d'équilibre à partir de l'équation suivante :

$$h = A \cdot y^{2/3}$$

où h correspond à la hauteur d'eau à une distance y vers la mer. A est un paramètre qui tient compte de la vitesse de chute des particules,

$$A = 2,25 \cdot (\omega^2/g)^{1/3}$$

$\omega$  : vitesse de chute des particules et g : accélération de la pesanteur (9,81).

Le profil d'équilibre (fig. IV-27) est représenté par une droite dont la pente est de l'ordre de 0,9° comparable à celle des profils. Cette notion de profil d'équilibre est très importante surtout pour la réalisation d'aménagement côtier. Il permet également de prévoir l'évolution du trait de côte lors d'une montée du niveau de la mer.

#### *Évolution spatio-temporelle des profils de plage*

L'évolution morpho-sédimentaire du domaine d'estran étudié n'est uniforme ni dans le temps ni dans l'espace. Par exemple de juin à juillet 1992 l'érosion est générale, hormis pour les profils 8 et 9 plutôt en sédimentation. Ces différences engendrent une **disparité spatio-temporelle des phénomènes sédimentaires** dont les mécanismes restent à préciser pour chaque profil. Cette variabilité des évolutions morphodynamiques traduit une grande complexité de la circulation sur les plages. Elle a déjà été mise en évidence pour d'autres littoraux où les conditions hydrodynamiques étaient soit comparables soit différentes (Carr *et al.*, 1982, Barousseau *et al.*, 1994, Larson, 1994, Levoy, 1994 ; Ruessink *et al.*, 1994). Par exemple Levoy (1995) a mis en évidence l'existence de plusieurs cellules de circulation le long de la côte Ouest

Cotentin. Dans notre secteur d'étude, l'analyse des profils topographiques ainsi que des cartes de différentiel suggère l'existence de 5 cellules hydrosédimentaires : l'avant-port Est, Malo-les-Bains, Malo-terminus à Zuydcoote, Zuydcoote à Bray-Dunes, à l'Est de Bray-Dunes. Le manque de données hydrodynamiques plus locales nous empêchent de préciser ces phénomènes.

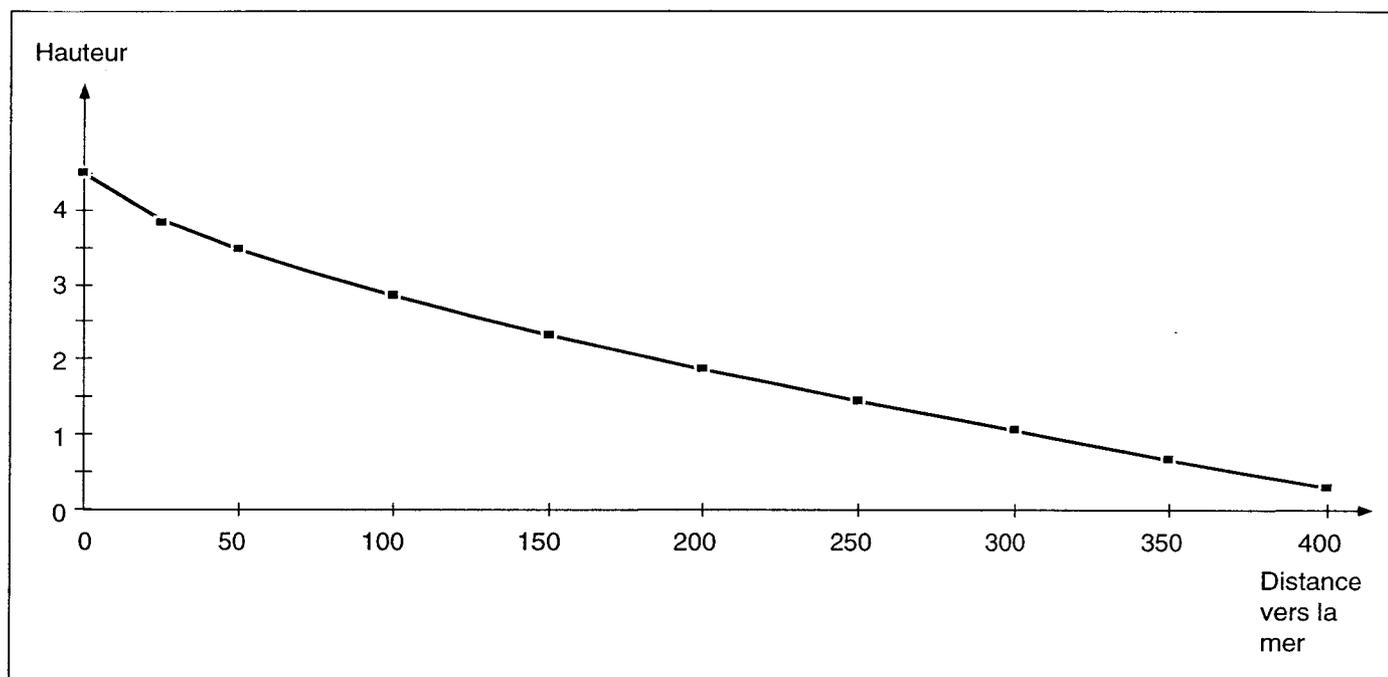


Figure IV-27 : Profil d'équilibre établi pour Dunkerque selon le principe de Dean (1990).

- L'évolution perpendiculaire au rivage témoigne de l'alternance des saisons qui se traduit par des cycles de formation et/ou destruction des systèmes de barre-bâche et par la migration des barres vers la côte en période de faible énergie .

- La figure IV-18 montre que les profils ne subissent pas tous la même évolution à la même époque sous des conditions identiques. **Cette différenciation spatiale le long du rivage est vraisemblablement due à la réfraction des vagues sur le fond en domaine côtier. Elle peut entraîner localement une convergence des orthogonales aux crêtes de vagues provoquant ainsi une concentration d'énergie et donc une érosion plus active. Cette convergence est compensée ailleurs par une divergence des orthogonales favorisant ainsi une dispersion d'énergie pouvant favoriser des phénomènes de d'accumulation** (cf. ch II). En période de houle de secteur N ou NW l'énergie de la houle se concentre à Malo-les-Bains et à Bray-Dunes, où des érosions sont alors possibles (Peltier & Le Saux, 1992).

Les résultats obtenus à Malo-les-Bains (P0), où le bilan annuel est déficitaire, confirment les conclusions de l'étude du L.N.H. (Peltier & Le Saux, 1992). L'érosion se produit en période

de vents de secteur NW à NE (ex : novembre 1992) mais également pendant toute la période hivernale, de novembre 1992 à mars 1993, alors que les autres profils sont soit en engraissement soit à l'équilibre. Pendant cette période, les vents les plus forts sont principalement de secteur W ou WNW et moins fréquemment NW à NE. Cependant l'évolution du profil P0 au cours du mois de juin où des vents frontaux ont soufflé au moment même de la réalisation du levé montre un bilan positif. Ce fait peut témoigner du temps de réponse du système et traduit l'influence de la marée. Les profils topographiques sont en effet réalisés à marée basse, et donc seule l'avant-plage aurait pu montrer l'action des vagues induites par ces vents.

De plus il est probable que les jetées du port Est de Dunkerque amplifient ces phénomènes d'érosion en modifiant la propagation de la houle. En période de vent de secteur W à NW, la houle se diffracte autour des jetées et provoque un mouvement tourbillonnaire propice à l'érosion sédimentaire au niveau du profil P0

A Malo-les-Bains, nos données confirment les modèles de propagation de houle de secteur NE ou NW établis par le L.N.H. (Peltier & Le Saux, 1992) qui prévoit une érosion de ce secteur. Par contre, les résultats obtenus à Bray-Dunes ne les corroborent pas puisque le bilan sédimentaire reste équilibré. Cette évolution confirme sans doute le fait que les dunes jouent un rôle essentiel dans la réalimentation, et par conséquent dans l'équilibre du système côtier. De plus, la majorité des vents, de secteur W à NW, et induit des transits vers l'Est. Par conséquent les chances d'alimentation de la plage de Malo-les-Bains par les dunes voisines, situées à l'Est, sont très limitées.

Bien que protégée par trois brise-lames, la plage de Malo-les-Bains est comme nous venons de le voir en érosion globale. L'impact de ces ouvrages apparaît donc minime. Cependant ils jouent un rôle dans le modelé de la plage qui présente presque toujours une morphologie plate, sans système de barres et bâches marquées, quel que soit le temps. Les brise-lames paraissent donc limiter l'action des houles de beau temps, qui construisent normalement ces barres.

Le bilan général déficitaire observée à l'Ouest de Bray-Dunes au profil P10 ne semble pas être lié à la houle et se rapporte plutôt aux périodes de régime croissant de marée. Par exemple, la comparaison des données de mars 1993 (morte-eau) et de mai 1993 (marée moyenne) met en évidence une érosion du profil P10. Cette variation résulte vraisemblablement de la convergence des courants de marée supposée par la lecture des cartes de répartition sédimentaire des fonds marins (cf. ch. III). L'augmentation des vitesses de courant, associée à celle des coefficients de marée permettrait à ces courants d'avoir une action plus énergétique, localement érosive. Pour confirmer cette influence des courants de marée sur l'évolution sédimentaire de l'estran à ce niveau, il serait intéressant de suivre l'évolution topographique du

profil 10 pendant un cycle de marée de vive-eau/morte-eau.

En résumé, le bilan annuel global de l'évolution morphologique de l'estran correspond à un système en équilibre pour des conditions hydrodynamiques de faible à moyenne énergie. L'étude morphosédimentaire montre une grande disparité spatio-temporelle des processus sédimentaires et nous a permis d'identifier deux secteurs plus fragiles : Malo-les-Bains et le secteur naturel entre Zuydcoote et Bray-Dunes. L'érosion de Malo-les-Bains est attribuée à la concentration de l'énergie de la houle frontale, et à l'influence plus forte des facteurs anthropiques. Celle du secteur naturel s'explique par la convergence des courants de marée vers cette zone.

#### **IV - 4 - EXPÉRIENCES DE TRAÇAGE FLUORESCENT**

Deux opérations de traçage fluorescent ont été mises en oeuvre, en avril 1993 et en janvier 1994, dans le but d'estimer les flux sédimentaires sur l'estran à l'échelle des cycles de marée.

L'expérience du 17 au 28 avril 1993 a eu lieu en deux points du bas de plage : **le point ML93**, en face de l'école de voile immédiatement à l'Est du troisième brise-lames ; **le point DUN93**, en face du système dunaire le plus proche à l'Est du point ML93. Pendant la mission du 10 au 18 janvier 1994, les points expérimentaux, ML 94 et MLE94 étaient situés en face de l'école de voile en domaine urbanisé, également en bas de plage.

##### **IV - 4 - 1 - CONDITIONS HYDRODYNAMIQUES ET MÉTÉOROLOGIQUES**

###### *Au cours de la mission d'avril 1993*

Les coefficients de marées ont varié de 70 à 84 entre le 19 et le 27 avril 1993 (vive-eau). Les courants de marée associés n'ont pas été enregistrés lors de la mission. Cependant le L.N.H./E.D.F. a réalisé en novembre et décembre 1992 des mesures de courant sur la plage de Malo-terminus située à l'Ouest du point ML 93. Pour des coefficients de 70 à 95, les vitesses de flot ont été de l'ordre de 0,5 m/s et supérieures à celles du jusant, de l'ordre de 0,4 m/s. Le flot a porté vers l'ENE et le jusant vers l'WSW (fig. IV-28).

Les conditions de houle au large, à l'Est de la zone, ont par contre été enregistrées par le L.N.H. à l'époque du traçage. Les hauteurs maximales ont été inférieures à 2 m, avec des hauteurs significatives et des périodes respectivement inférieures à 1 m et de l'ordre de 5 s (fig. IV-29). Les données de Météo France ont indiqué une mer belle à peu agitée. Trois secteurs principaux de vents ont été observés : SW et SE avec des vitesses n'excédant pas 10 m/s, et NE avec des vitesses dépassant 10 m/s (fig. IV-30).

**Globalement, les conditions hydrodynamiques et météorologiques durant cette première expérience peuvent être considérées comme de faible énergie.**

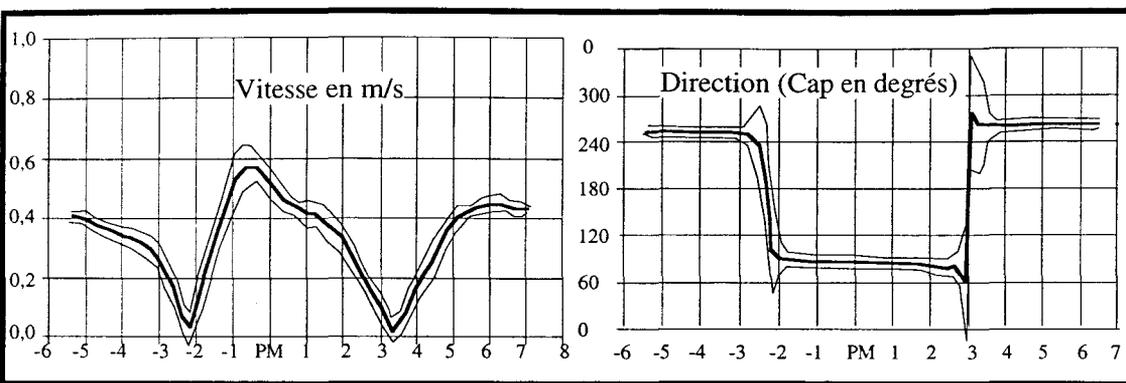


Figure IV-28 : Vitesses et directions des courants de marée (moyennes sur 25 marées de coefficient de 70 à 95)

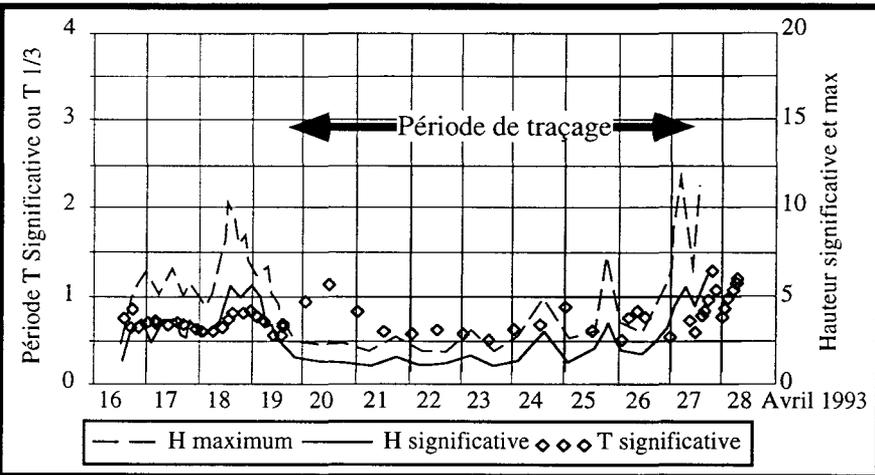


Figure IV-29 : Houles à Dunkerque Est en Avril 1993

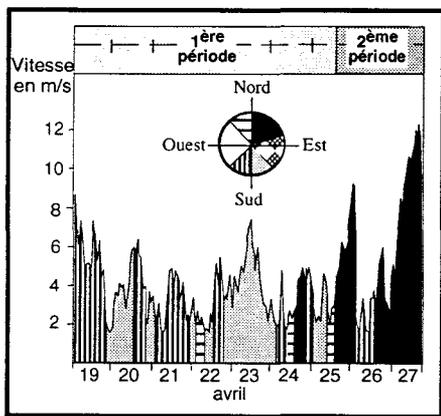


Figure IV-30 : Conditions météorologiques pendant la mission du mois d'avril 1993

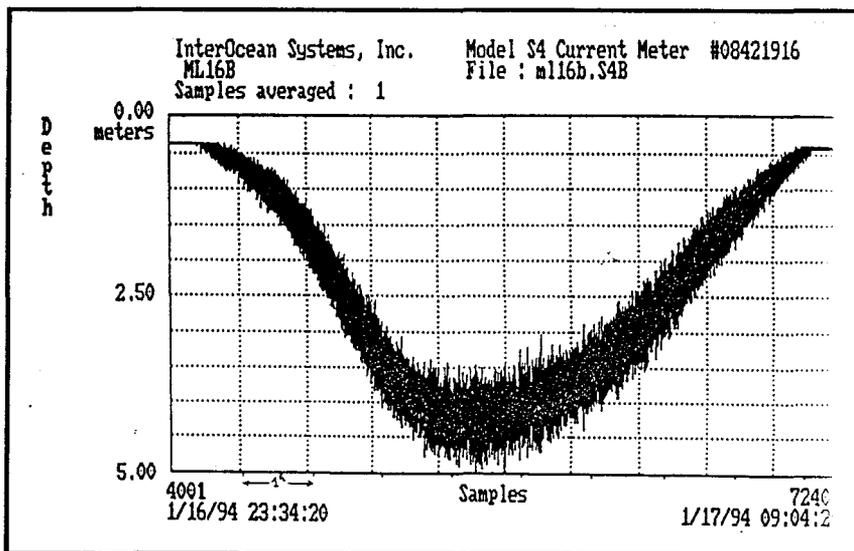


Figure IV-31 : Houle et courant de marée du 16 au 17 janvier 1994 (Chapalain, 1994).

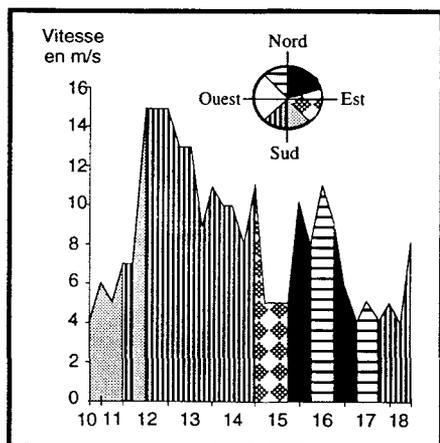


Figure IV-32 : Conditions météorologiques pendant la mission du mois de janvier 1994

### *Au cours de la mission de janvier 1994*

Les coefficients de marée ont varié de 91 à 94 (petite à moyenne vive-eau).

Pendant cette expérience des mesures hydrodynamiques ont pu être obtenues à l'aide d'un courantomètre-houlographe électromagnétique de type S4DW. L'appareil a été placé sur le flanc doux de la barre en bas d'estran à 50 cm au-dessus de la surface. Il a donc découvert à chaque marée basse. Les données, interprétés par Georges Chapalain (1994), sont les suivantes :

- Les caractéristiques des courants de marée sont en accord avec celles de la courbe de marée à Dunkerque (SHOM, 1994). Les courants ont été alternatifs, le jusant porte vers l'Ouest et le flot, dominant, vers l'Est.
- Du 16 au 18 janvier 1994, l'accentuation du courant de flot et son changement de direction (vers l'ESE) sont attribuées au vent de secteur N à NE.
- Le maximum de houle enregistré (fig. IV-31) a été observé dans la nuit du 16 au 17 janvier avec une hauteur de crête dépassant un mètre.
- Le 16 janvier, les vitesses maximales ont dépassé 1 m/s avec une contribution du courant moyen associé de 0,5 m/s.
- Enfin à l'approche du découvrement, la houle est devenu déferlante.

Ainsi pendant la période de l'expérience la houle était la plupart du temps dite de beau temps à l'exception du 16 au 18 janvier 1994.

Les données fournies par Météo France (fig IV-32) reflètent des conditions de vent calmes. Les vents étaient principalement de secteur SW à W. Des vents plus violents de secteur W ont été enregistrés du 12 au 13 janvier 1994. Les seuls vents susceptibles d'affecter le littoral de secteur NW à NE ont soufflé du 15 au 17 janvier 1994.

**Les conditions météorologiques et hydrodynamiques qui caractérisent cette deuxième expérience sont, comme celle de la première caractéristiques de temps calmes.**

#### IV - 4 - 2 - PRINCIPAUX RÉSULTATS

##### IV - 4 - 2 - 1 - Résultats de l'expérience d'avril 1993

Résultats au point ML 93 (secteur urbanisé)

#### *Approche qualitative*

Du 20 au 21 avril 1993, les courbes des isograins sont de forme quelconque (fig. IV-33), plus ou moins arrondie. Elles deviennent ovales selon un axe principal orienté EW, c'est-à-dire parallèle à la côte, du 22 au 24 avril 1993. Le 26, les courbes sont toujours de forme ovale mais la répartition des grains fluorescents indique deux points de concentration. La dispersion des grains fluorescents dans l'espace est modérée, et égale à 160 m<sup>2</sup> au maximum. Cette dispersion s'effectue vers le Sud et se caractérise par un mouvement de va-et-vient d'Est en Ouest.

Les déplacements du centre de gravité (fig. IV-34) sont complexes, sont de l'ordre de 2 à 5 m. Ils sont orientés vers le Sud, c'est-à-dire vers le haut de plage, ce qui indique un transport perpendiculaire à la côte ainsi qu'un léger va-et-vient selon un axe W - E parallèle à la côte. Du 26 au 27 avril 1992 le centre de gravité de la tâche s'est déplacé de 6,5 m vers le SW.

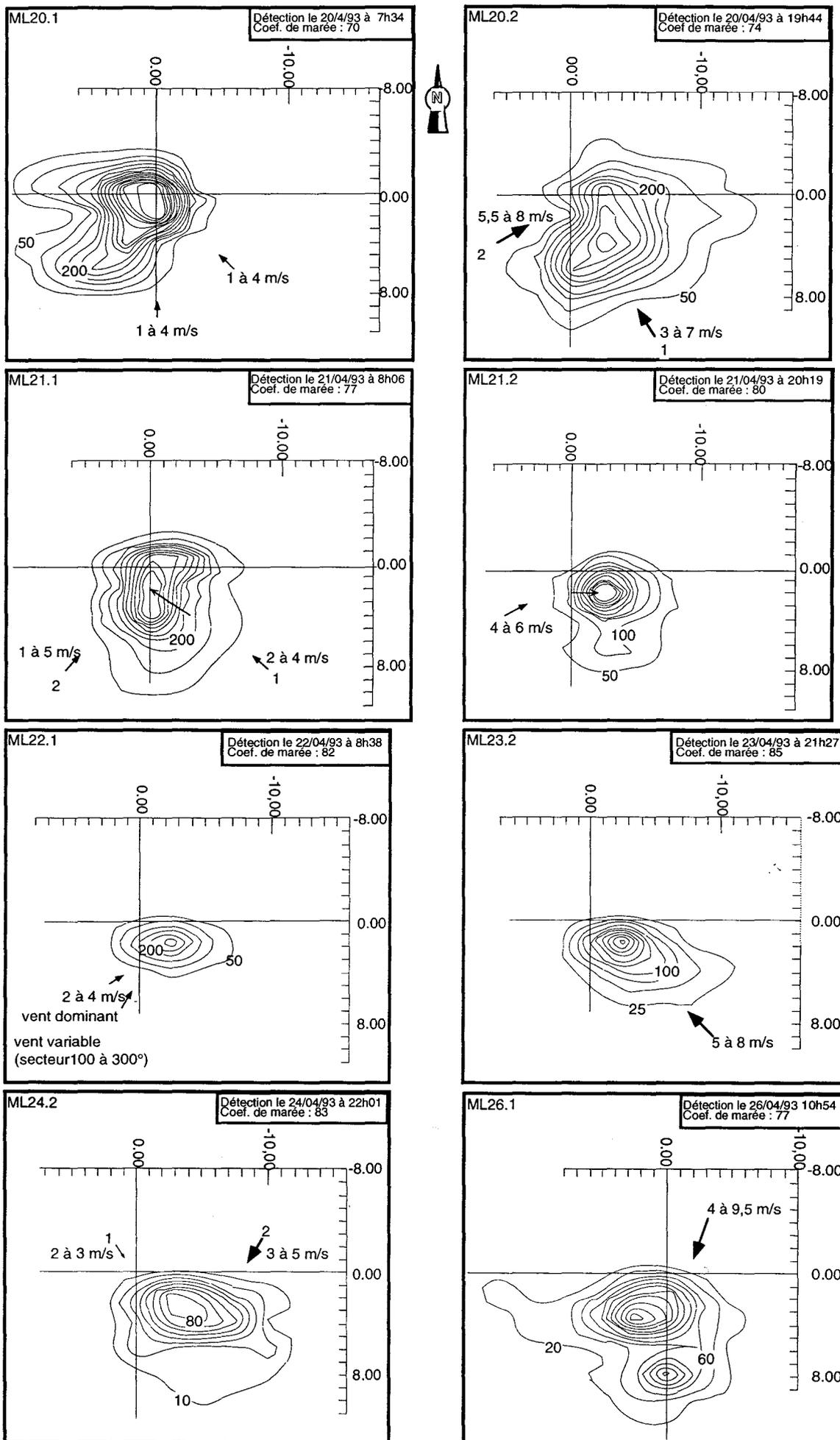


Figure IV-33: Principaux résultats au point ML93 (secteur aménagé)

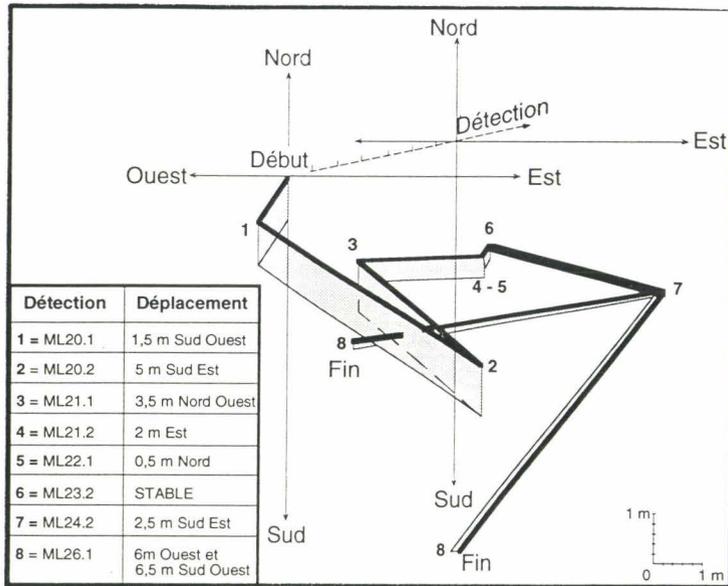


Figure IV-34: Evolution du centre de gravité au point ML93

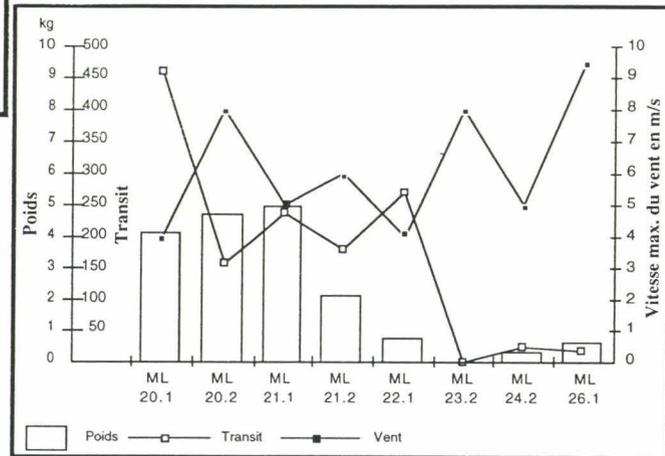


Figure IV -36 : quantification des transits sédimentaires au point ML 93

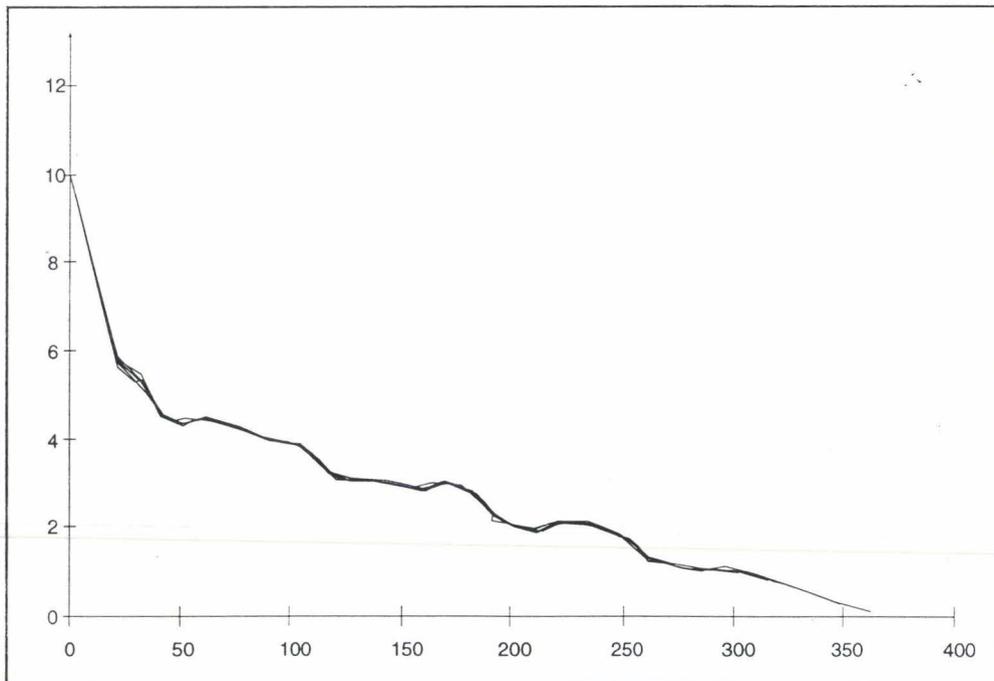


Figure IV-35 : Évolution de la topographie au point ML93 parallèlement au traçage fluorescent en avril 1993

Les déplacements du centre de gravité et la dispersion du traceur sont donc de faible importance et suggèrent une stabilité sédimentaire.

Les profils topographiques réalisés pendant cette période (fig. IV-35) indiquent que la morphologie de la plage est caractérisée par quatre systèmes de barre - bêche parallèles à la côte. L'amplitude des barres est de l'ordre de 50 cm. Le flanc plus abrupt est orienté vers le haut de plage. Les variations topographiques sont faibles, d'ordre centimétrique. Le bilan sédimentaire est donc stable et corrobore les faibles déplacements mis en évidence par le traçage fluorescent.

### Approche quantitative

A la première marée une faible quantité de sable fluorescent (8 kg) a été remobilisée au point d'immersion et mise en circulation (tab. IV-5). Au cours des marées suivantes, le sable fluorescent érodé au point d'immersion s'est déplacé et dispersé en fonction des conditions hydrodynamiques, sans nouvelle érosion à la source. Les données de terrain comme l'épaisseur de sable naturel recouvrant le sable fluorescent au point source, indiquent un engraissement continu au lieu d'immersion. Par conséquent le poids de sable fluorescent retrouvé à chaque détection diminue de jour en jour, ce qui implique une diminution du taux de transit (fig. IV-36).

Ainsi lors des premières, détections 5 kg de sable fluorescent ont été retrouvés en surface contre 0,5 kg en fin d'expérience. L'épaisseur de remaniement est de 2 cm. Le mouvement résultant est d'environ 6 m vers le SE en sept marées, ce qui équivaut à une vitesse moyenne de 1,2 m par jour (fig. IV-37).

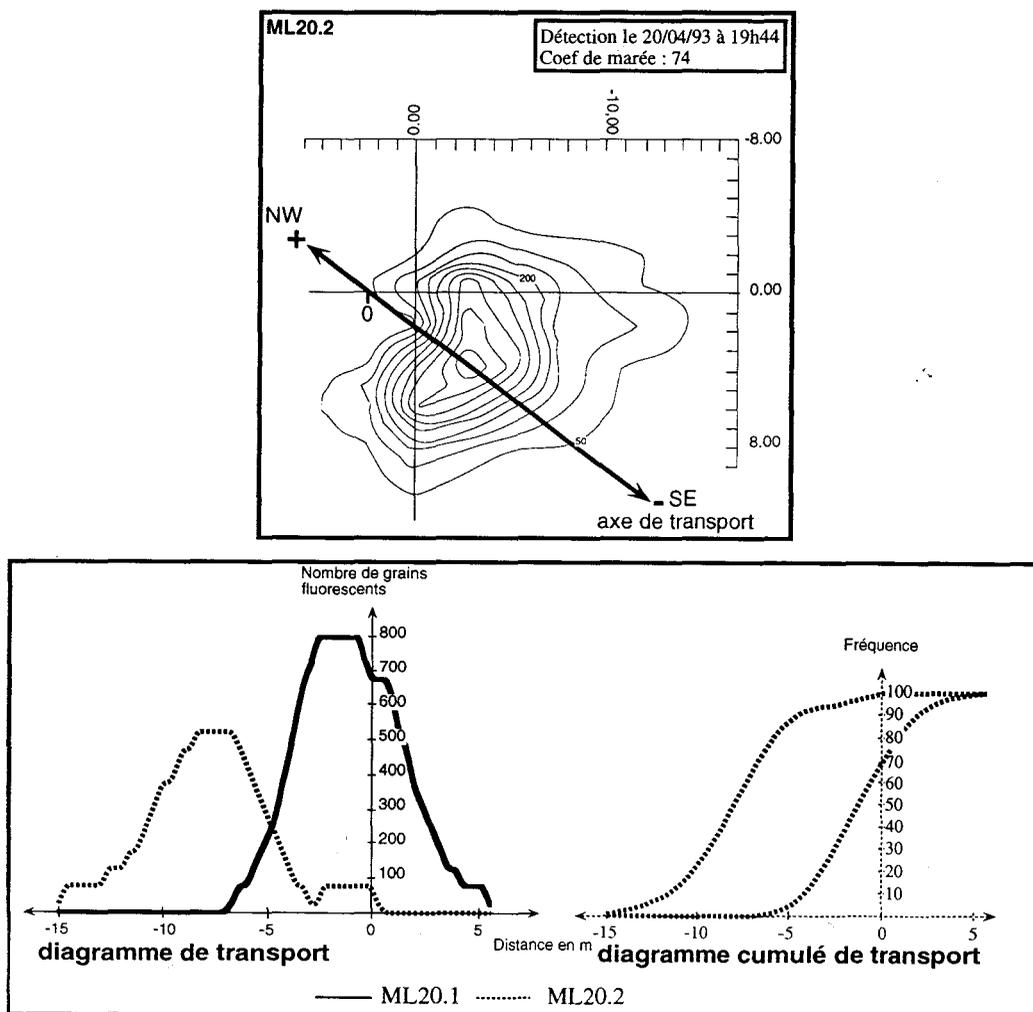


Figure IV-37 : Détermination du sens de transport à partir du diagramme de transport et du diagramme cumulé au point ML93.

Jour	H marée basse	Point	Déplacement et direction du centre de gravité	Poids de sable	Transit en g/h/m
19/04/93	19:15		immersion		
20/04/93	07:34	ML 20.1	1,5 m SW	4,15 kg	461,11
20/04/93	19:47	ML 20.2	5 m SE	4,76 kg	158,66
21/04/93	08:06	ML 21.1	3,5 m NW	5,01 kg	238,14
21/04/93	20:19	ML 21.2	2 m E	2,16 kg	180
22/04/93	08:38	ML 22.2	0,5 m N	0,81 kg	270
23/04/93	21:27	ML 23.2	0	0,65 kg	STABLE
24/04/93	22/01	ML 24.2	2,5 m SE	0,37 kg	24,66
26/04/93	10/54	ML 26.1	6 m W et 6,5 m SW	0,66 kg	18,33

Tableau IV-5 : Observations faites au point ML93

Résultats au point DUN 93 (secteur naturel)

#### *Approche qualitative*

Au cours de la période de temps calme du 19 au 25 avril le nuage de grains fluorescents s'est étalé à l'Est du point d'immersion. La forme des courbes d'isograin est ovale selon un axe principal orienté EW, c'est-à-dire parallèle à la côte (fig. IV-38). Le 26 avril la forme des isocourbes est quelconque, et le 27 avril le traceur est totalement dispersé. De même, pendant la période de l'expérience l'étalement du traceur est peu important, de l'ordre de 180 m<sup>2</sup> au maximum.

L'évolution des isocourbes de dilution indique un déplacement général de la masse vers le haut de plage.

**Les déplacements du centre de gravité se sont essentiellement effectués selon un axe W - E avec une résultante vers l'Ouest dans le sens du jusant** (fig. IV-39). Ils sont de faible importance, de l'ordre de 1 m. Les érosions au point d'immersion masquent le mouvement réel du centre de gravité. Ce dernier s'est déplacé d'environ 7,5 m vers le Sud c'est-à-dire vers le haut de plage le 26 Avril 1993 en période de vents de secteur NW à NE et de vitesses atteignant 9 m/s. Le 27 Avril 1993, des vents de secteur NE, de vitesses atteignant 12 m/s ont provoqué la dispersion quasiment totale du traceur. Néanmoins, les carottages aux points sources ont révélé que le traceur restant, alors enfoui sous 4 cm de sable naturel, n'avait subi aucune érosion.

Les profils topographiques réalisés à ce point sont d'un point de vue morphologique semblables à ceux du point précédent ML93 (fig. IV-40). Les variations topographiques sont légèrement plus importantes de l'ordre d'une trentaine de centimètres au maximum. Le bilan général est à l'engraissement.

#### *Approche quantitative*

A la première marée, environ 3,3 kg de sable fluorescent ont été mobilisés à partir du point source. Les 23, 24, 25 et 26 Avril 1993 de nouvelles érosions de sable fluorescent sont intervenues à la source entraînant d'autres apports sur le site. De ce fait le poids de sable fluorescent détecté et le taux du transit sont variables (Tab. IV-6 et fig. IV-41). Le poids total de traceur mis en mouvement pendant cette période et déterminé à partir des carottes prélevées au point source, est estimé à 25 kg. L'épaisseur de sable remanié est identique à celle du point ML93, de l'ordre de 2 cm.

Le mouvement résultant du centre de gravité du nuage est de l'ordre de 1 m vers le NE en huit marées. Le taux du transit est calculé à partir des données des trois premières marées seulement. Le calcul ne tient ainsi pas compte des réalimentations en traceur engendrées par de nouvelles érosions qui masquent le mouvement réel de la tache fluorescente initiale. Ainsi en 36 heures le stock de 3,3 kg de sable fluorescent érodé à la source s'est déplacé de 2 m vers l'Est. La vitesse du transit sédimentaire est donc estimée à 1,3 m/j.

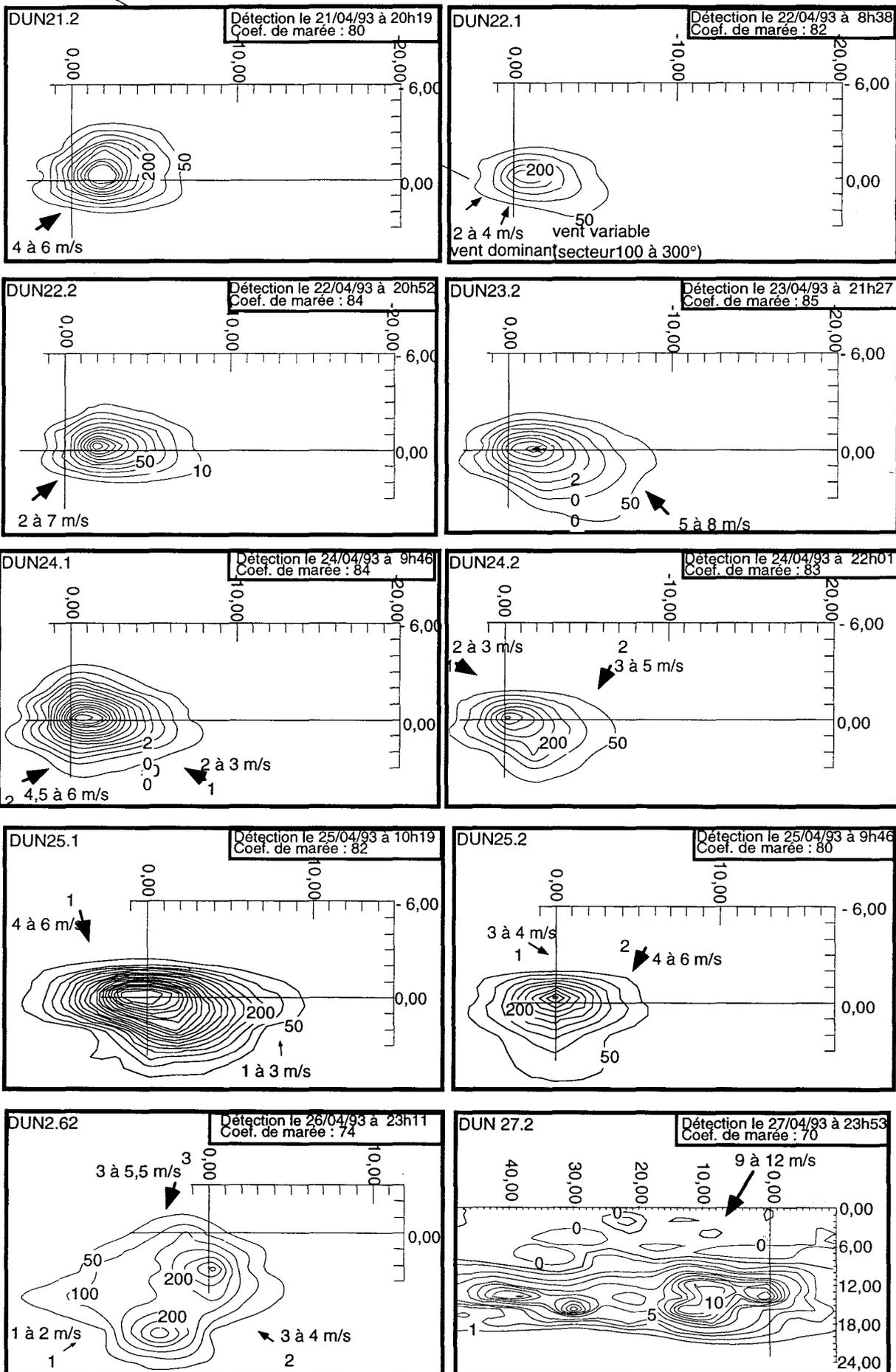


Figure IV-38: Principaux résultats au point DUN 93 (secteur naturel).

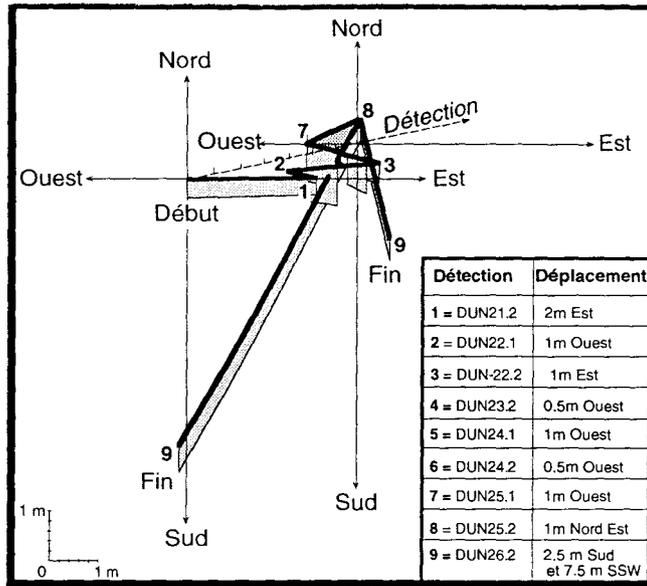


Figure IV-39 : Evolution du centre de gravité au point DUN93

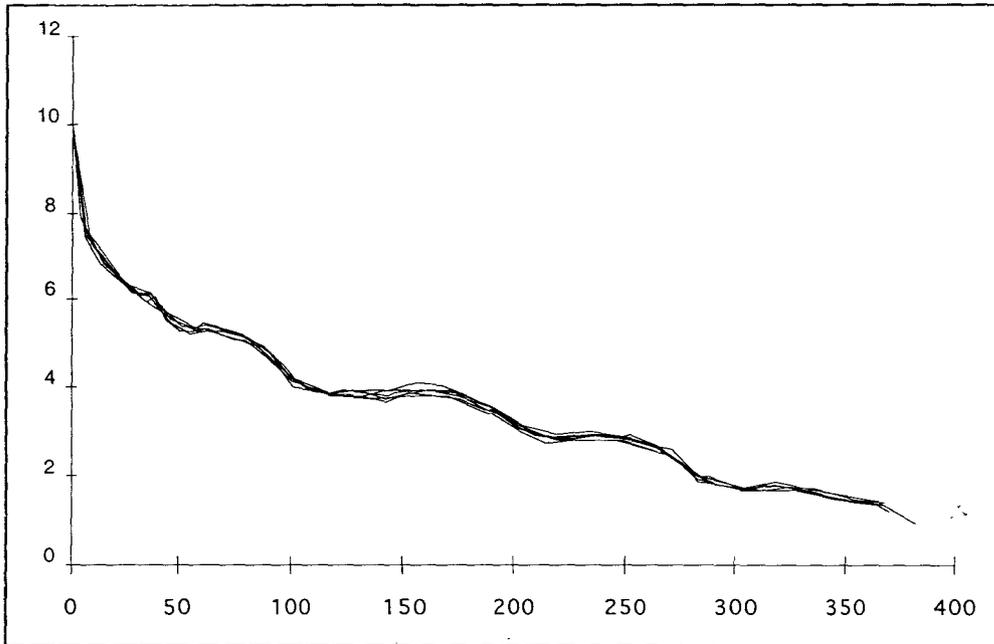


Figure IV-40 : Évolution de la topographie au point DUN93 parallèlement au traçage fluorescent en avril 1993

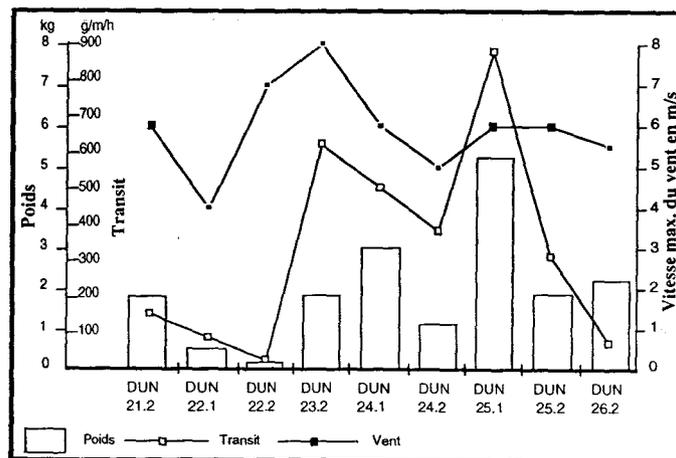


Figure IV-41 : quantification des transits sédimentaires au point DUN 93

Jour	H marée basse	Point	Déplacement et direction du centre de gravité	Poids de sable	Transit en g/h/m
21/04/93	08:06		immersion		
21/04/93	20:19	DUN 21.2	2 m E	1,83 kg	152,5
22/04/93	08:38	DUN 22.2	1 m W	0,53 kg	88,33
22/04/93	20:52	DUN 23.1	1 m E	0,14 kg	23,33
23/04/93	21:27	DUN 23.2	0,5 m W	1,868 kg	623,33
24/04/93	09:46	DUN 24.1	1 m W	3,04 kg	506,66
24/04/93	22:01	DUN 24.2	0,5 m W	1,16 kg	386,66
25/04/93	10:19	DUN 25.1	1 m W	5,28 kg	880
25/04/93	22:35	DUN 25.2	1 m NE	1,899 kg	316,66
26/04/93	23:11	DUN 26.2	2,5 m S et 7,5 m SSW	2,24 kg	74,66
27/04/93	23:53	DUN 27.2	dispersion	dispersion	

Tableau IV-6 : Observations faites au point DUN93

IV - 4 - 2 - 2 - Résultats de l'expérience de janvier 1994

Résultats au point ML94 (sommet de barre)

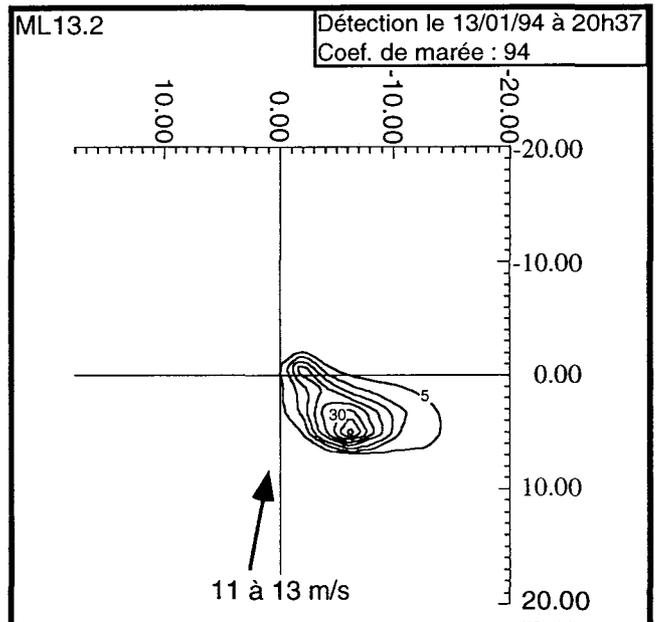
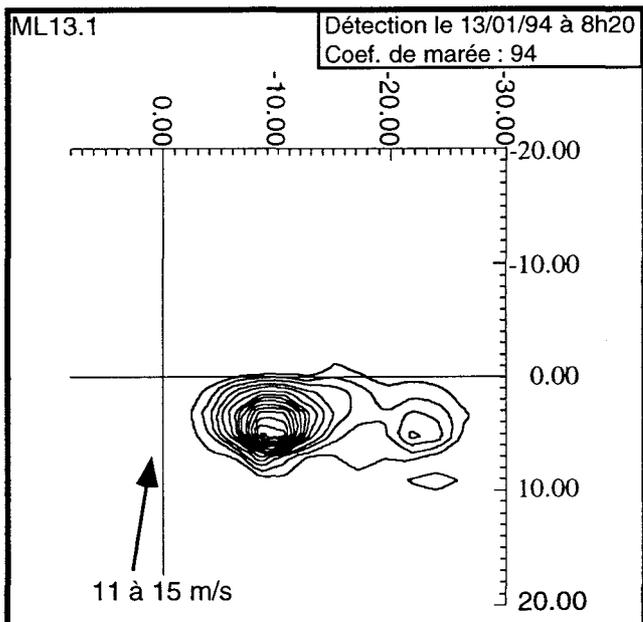
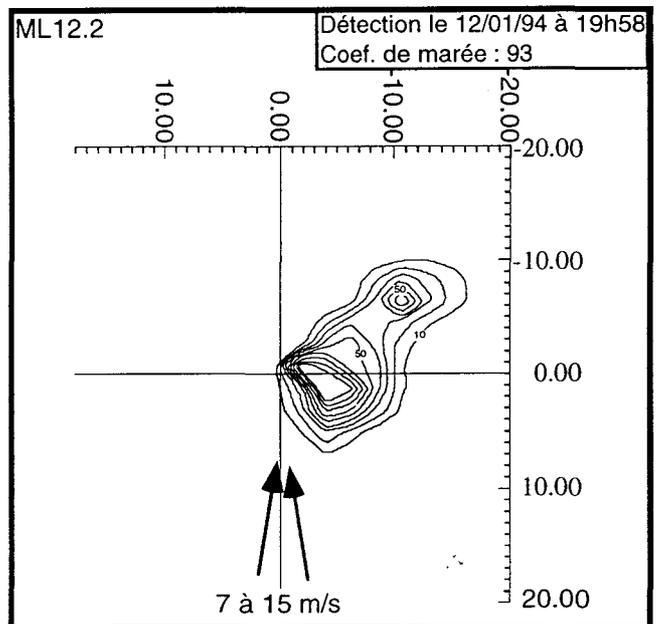
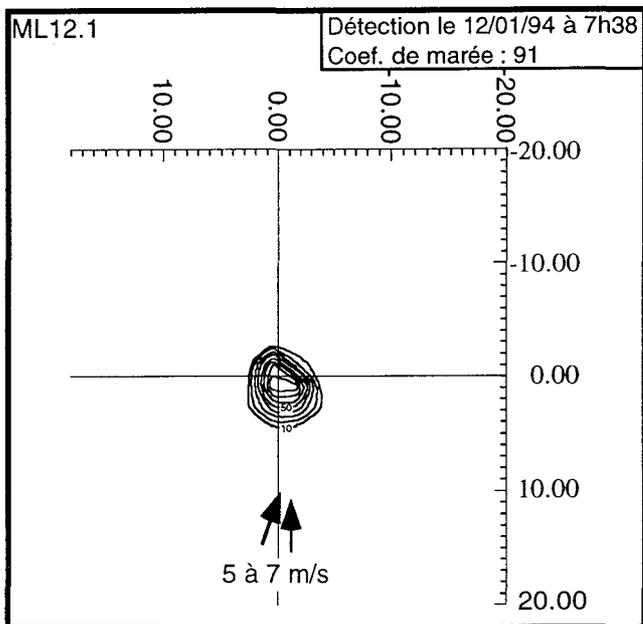
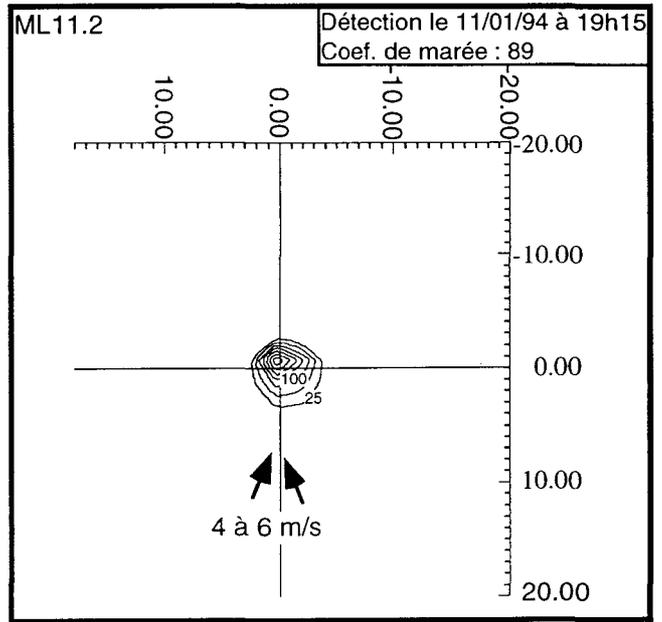
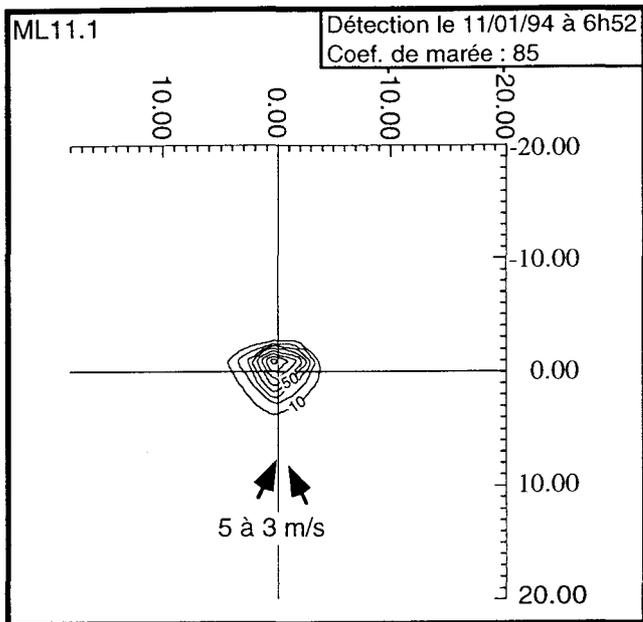
*Approche qualitative*

Du 11 au 12 janvier 1994 la forme des isocourbes est sphérique et centrée sur la zone d'immersion (fig. IV-42). Le 12, l'allure des courbes devient ovale et s'allonge vers le NE. Un deuxième point de concentration des grains fluorescents s'observe. Le 13, les isocourbes sont ovales selon un axe principal EW parallèle à la côte. Du 14 au 16 janvier les grains fluorescents se répartissent selon des bandes qui s'étendent vers le SE avec deux zones de concentration, l'une centrée sur la zone d'immersion et l'autre située au SE. Du 17 au 18 l'allure des isocourbes est ovale et centrée sur le point d'immersion. La dispersion du sable est peu importante (160 à 200 m<sup>2</sup>), et s'effectue principalement vers l'Est et le SE.

Les déplacements du centre de gravité (fig. IV-43 et tab. IV-7) sont complexes car ils sont masqués par les érosions à la source qui réalimentent régulièrement le système en sable fluorescent. Toutefois on distingue trois mouvements. Du 11 au 14 janvier 1994 le centre de gravité se déplace de 8,2 m vers le SE, du 15 au 16 il se déplace de 5,6 m vers le SW ; du 17 au 18 janvier 1994 un déplacement de 1 m est observé vers le SW.

Jour	H marée basse	Point	Déplacement apparent du max fluo	Déplacement résultant du max fluo	Poids de sable en kg	Transit en g/h/m
10/01/94	18:27		immersion	immersion		
11/01/94	06:52	ML 11.1	1,1 m NW		0,43	0,065
11/01/94	19:15	ML 11.2	0,4 SE		0,65	0,27
12/01/94	07:38	ML 12.1	1,9 SSE		1,5	0,13
12/01/94	19:58	ML 12.2	3,6 ESE		5,2	0,24
13/01/94	08:20	ML 13.1	7,5 m SE		0,6	0,013
13/01/94	20:37	ML 13.2	2,7 m WNW		0,2	0,12
14/01/94	21:15	ML 14.2	0,5 m E	du 11 au 14 8,2 m SE	0,7	0,23
15/01/94	21:50	ML 15.2	7,8 NW		0,5	
16/01/94	22:24	ML 16.2	4,1 m SW	du 15 au 16 5,6 m SW	0	
17/01/94	10:47	ML 17.1	6 m N		2,8	0,04
18/01/94	11:58	ML 18.1	2,5 m SE	du 17 au 18 1 m SW	1,3	0,1

Tableau IV-7 : principaux résultats observés au point ML94



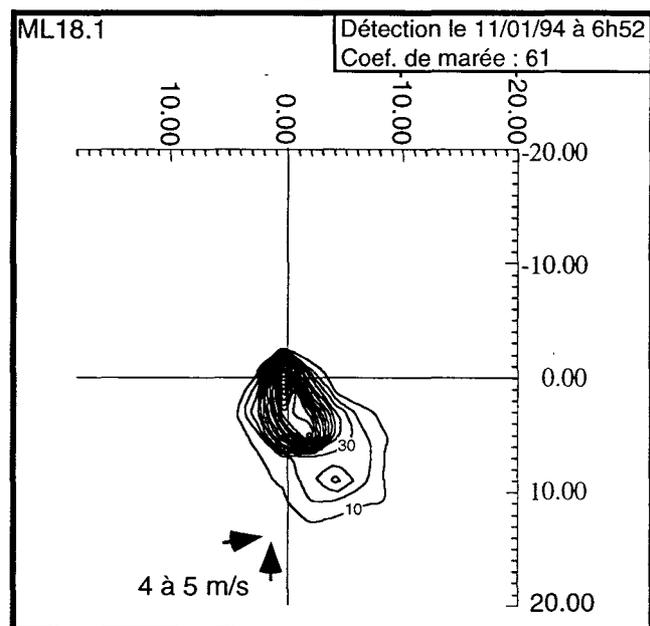
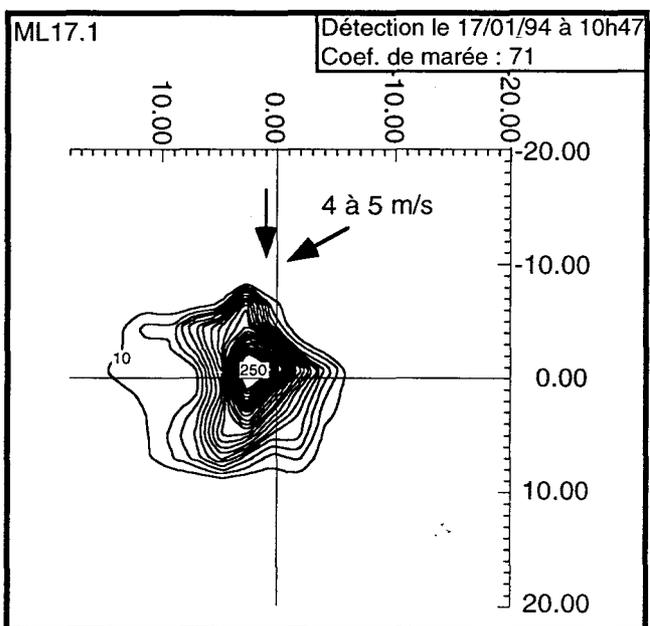
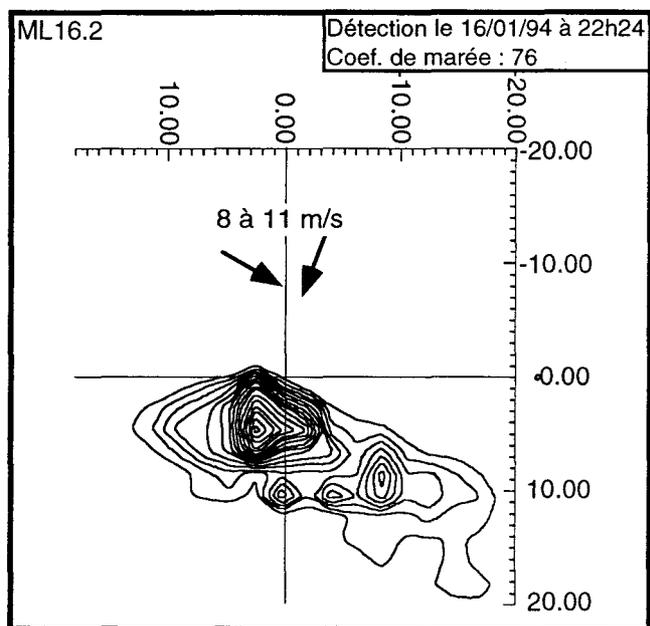
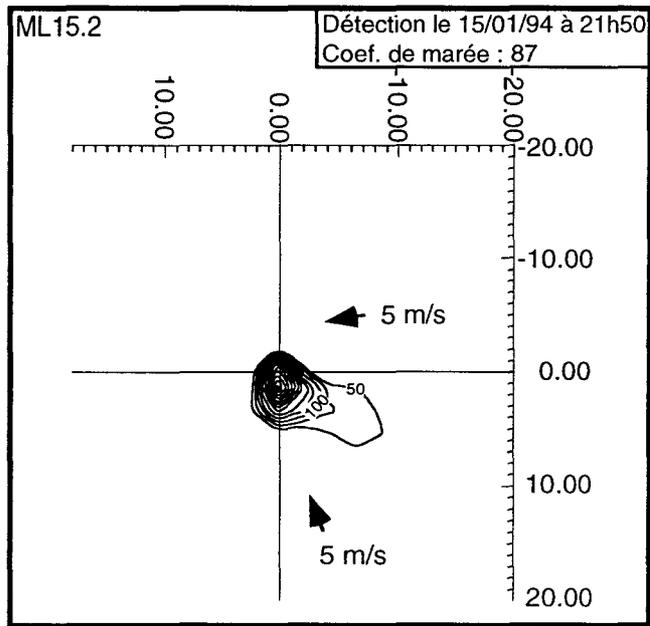
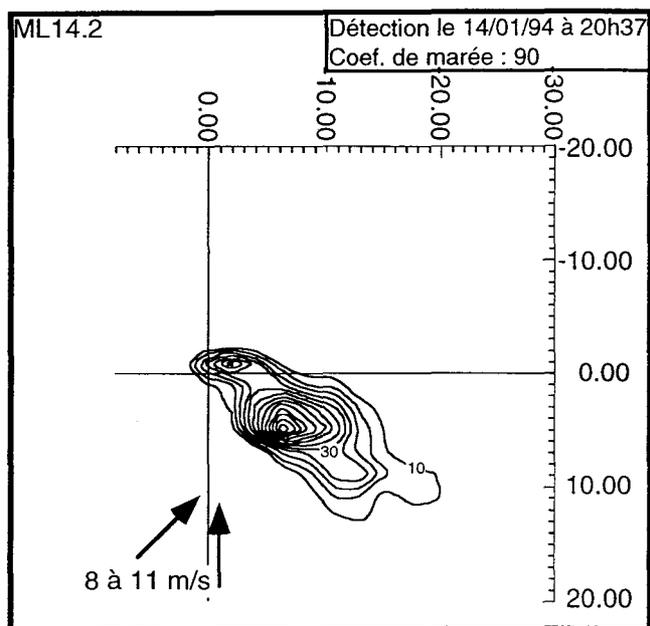


Figure IV-42 : Principaux résultats au point ML94

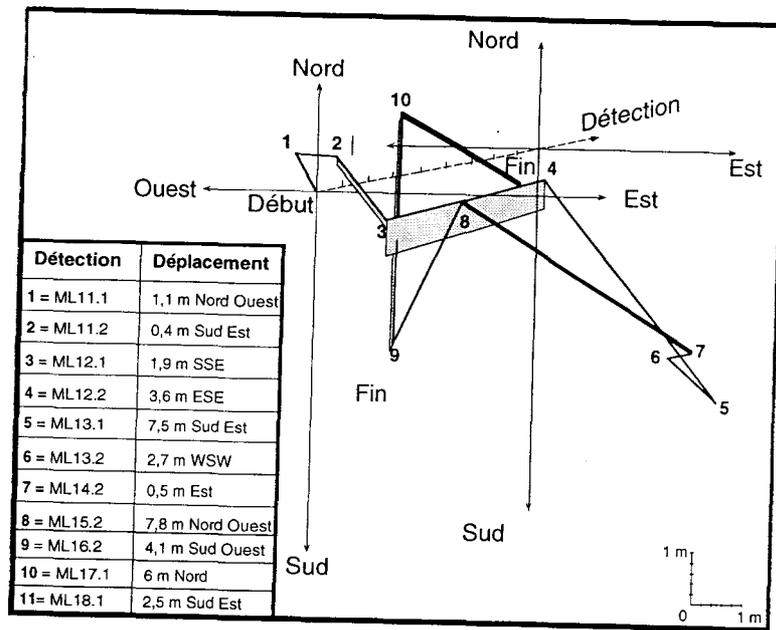


Figure IV-43 : Evolution du centre de gravité au point ML94

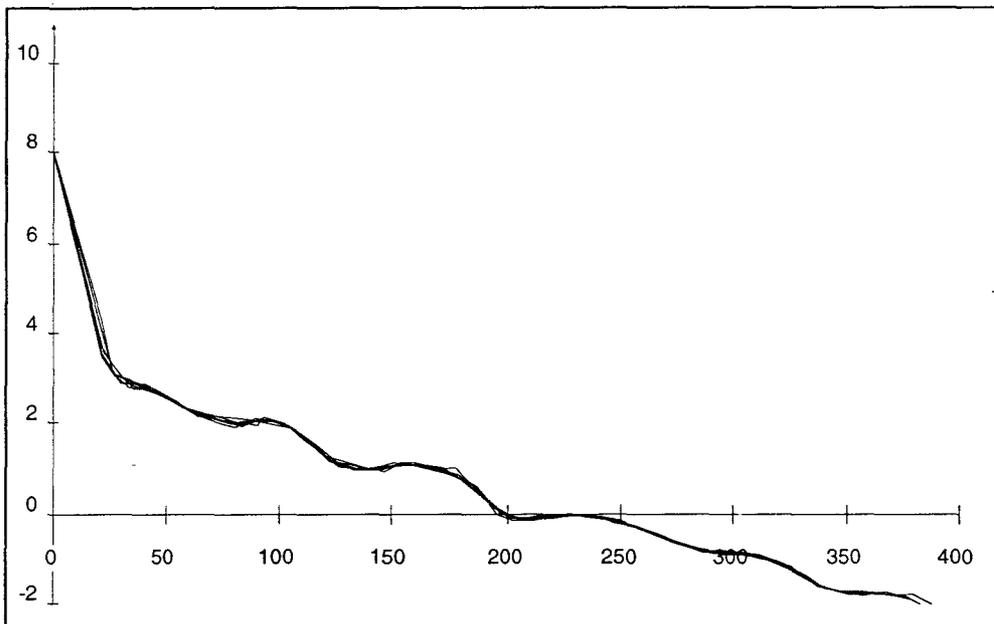


Figure IV-44 : Évolution de la topographie au point ML 94 parallèlement au traçage fluorescent en janvier 1994

Les profils topographiques réalisés à ce point sont caractérisés par des systèmes de barre et bêche et les variations topographiques observées pendant la durée de l'étude sont faibles (fig. IV-44)

#### *Approche quantitative*

Le poids de sable fluorescent retrouvé à chaque détection est à considérer avec beaucoup de prudence car les carottes effectuées au point d'immersion ne nous ont pas permis de valider les résultats. En effet, l'hypothèse de départ autorisant les quantifications :  $Y \geq 50\%$  de X n'est pas vérifiée. Toutefois les valeurs du poids retrouvé en surface indiquent les érosions probables ayant eu lieu à la source et la faiblesse des transits sédimentaires.

**De manière très générale le transit s'est effectué vers le SE ou vers le SW à une vitesse probable de 1 à 3 m/j.**

Résultat au point MLE94 (flanc marin de la barre)

#### *Approche qualitative*

Le nuage de grains fluorescents s'est principalement étalé à l'Est du point d'immersion. La forme des courbes d'isograin est ovale selon un axe principal orienté EW (fig. IV-45).

Les déplacements du traceur sont complexes en raison des contaminations en cours d'expérience par les érosions au point d'immersion (fig. IV-46 et tab. IV-8). Le centre de gravité s'est principalement déplacé vers l'Est (SE ou NE).

Jour	H marée basse	Point	Déplacement apparent max fluo	Déplacement résultant du max fluo	Poids de sable en kg
13/01/94	08:20		immersion		
13/01/94	20:37	MLE 13.2	3,5 m SE	1) 3,5 m NE	0,2
14/01/94	09:00	MLE 14.1	1,9 m SW (1) 2,5 m NE (2)	1) 2,5 m NE 2) 2,4 m SE	0,7
15/01/94	09:38	MLE 15.1	0,5 m N (1) 4,2 m SW (2)	2) 0,5 m N	0,7
16/01/94	10:13	MLE 16.1	5,9 m SW	DISPERSION	

**Tableau IV-8 : Observations faites au point MLE 94**

Les profils topographiques réalisés au cours de cette période indiquent que le bilan sédimentaire est légèrement positif (fig. IV-47).

*Les résultats quantitatifs sont donnés à titre indicatif car l'hypothèse de départ n'est pas vérifiée.*

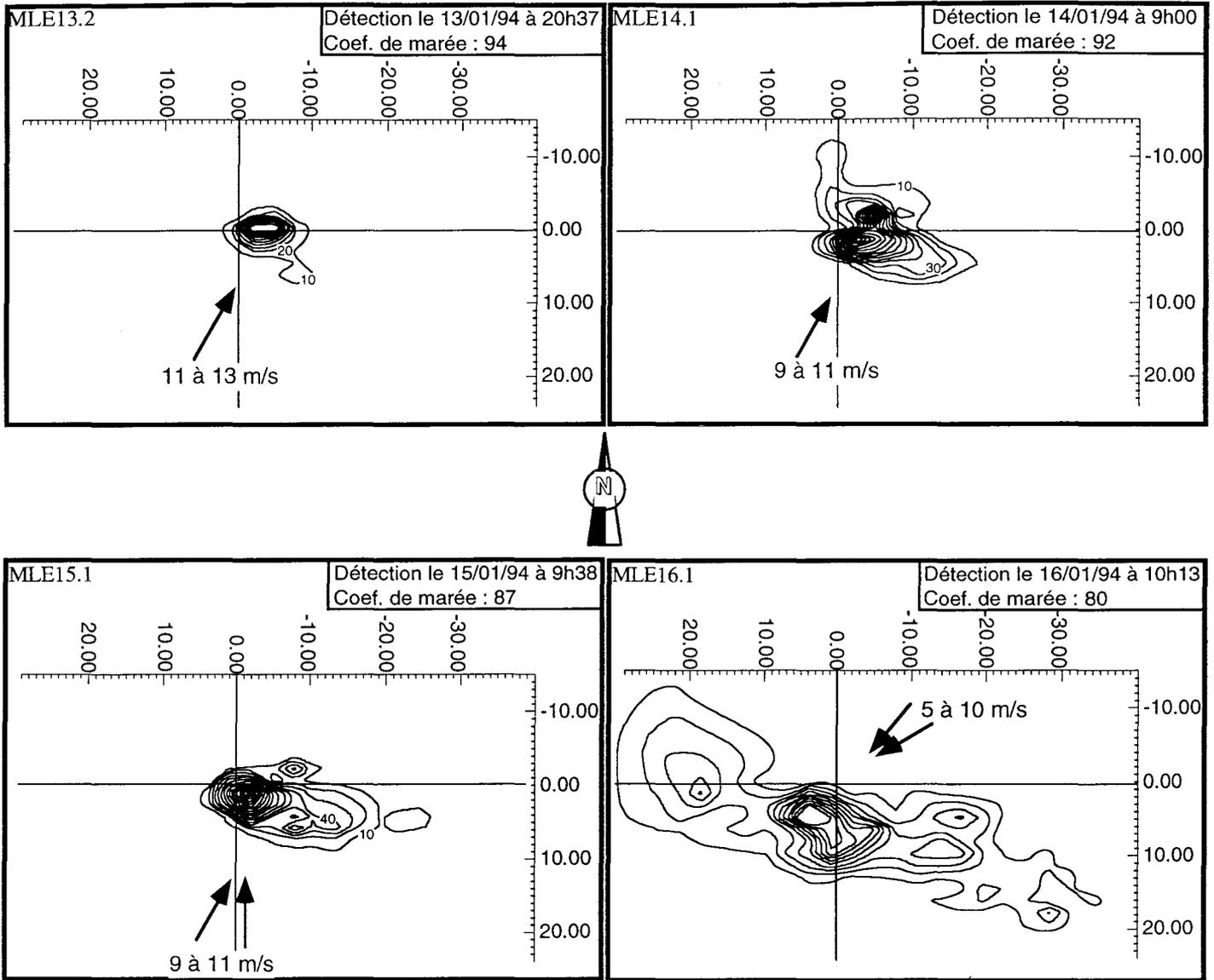


Figure IV-45 : Principaux résultats obtenus au point MLE 94

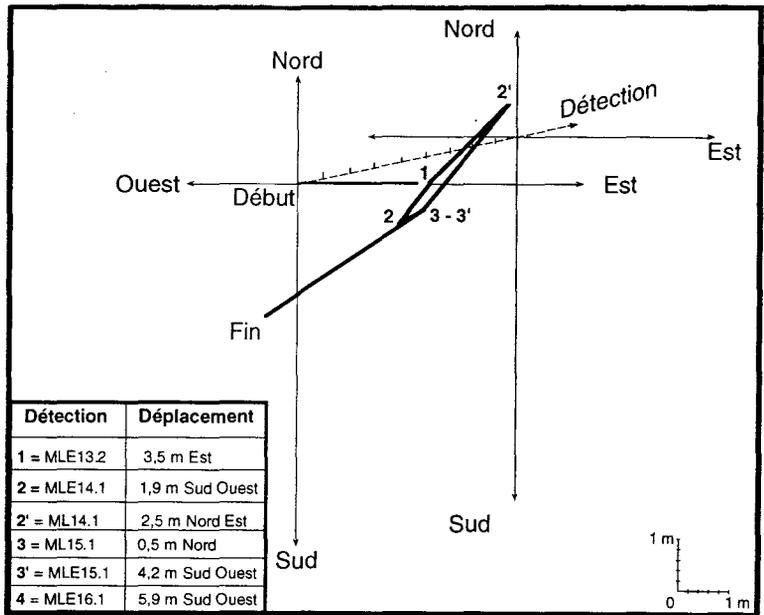


Figure IV-46 : Evolution du centre de gravité au point MLE94

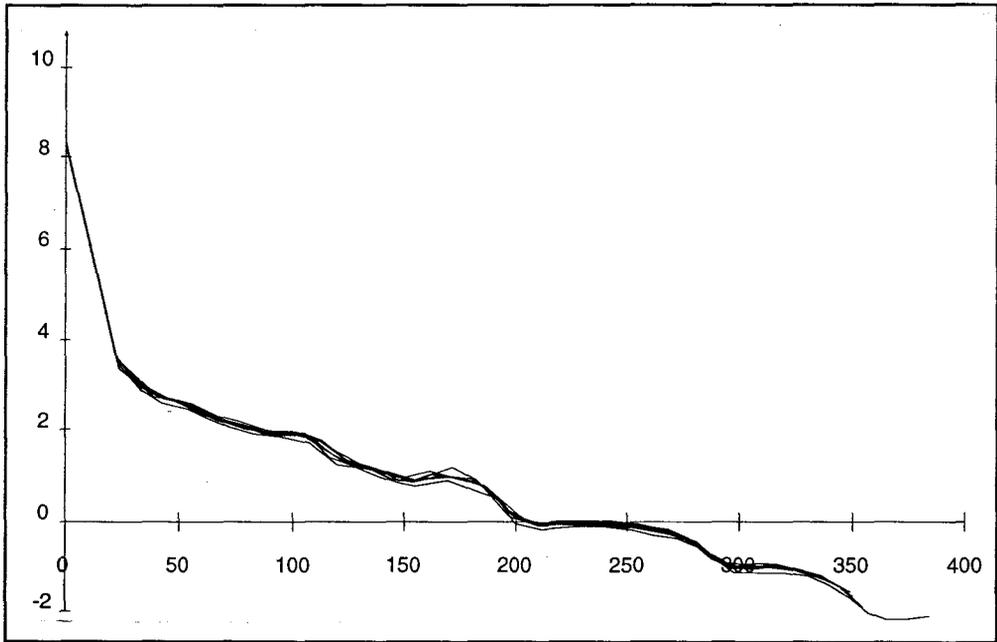


Figure IV-47: Évolution de la topographie au point MLE 94 parallèlement au traçage fluorescent en janvier 1994

#### IV - 4 - 3 - INTERPRÉTATION

Les résultats obtenus à partir des deux expériences de traçage fluorescent sur le littoral dunkerquois montrent **une stabilité d'ensemble des mouvements sableux avec une légère tendance vers un engraissement**. Cette évolution est conforme aux conditions hydrodynamiques et dynamiques de faible énergie qui ont prédominé durant les deux périodes d'étude. Parallèlement l'évolution de la topographie est très faible mais montre un léger engraissement. De telles conditions hydrodynamiques et météorologiques semblent donc particulièrement propices à une bonne stabilité des plages.

Dans le détail plusieurs points doivent être soulignés:

- Les **déplacements sédimentaires parallèle à la côte orientés vers l'Est mettent en évidence l'influence des courants de marée, et notamment du courant de flot sur les mécanismes de transport en bas de plage**. Cela confirme les résultats de Bonnefille *et al.* (1971). Néanmoins sur le sommet de barre, ces mouvements sont de faible amplitude, indiquant une influence localement limitée des courants de marée sur la dynamique sédimentaire. Par contre, ces déplacements d'origine tidale sont plus grands sur le flanc marin.

- Pendant la première expérience, **en période de vents de terre très faibles, le courant de flot engendre au niveau du secteur naturel (point DUN 93) des transports sédimentaires réguliers de faible amplitude dirigés vers l'Est. En secteur urbanisé (point ML 93), à la même période, une composante dirigée vers le haut de plage se surimpose clairement à la composante attribuée à l'action du flot**. Cette composante perpendiculaire à la côte contribue à la stabilité voire à l'engraissement de ce système littoral, et résulte vraisemblablement de la **proximité des brise-lames**.

Les résultats obtenus lors de la deuxième expérience confirment ce dernier résultat d'une stabilité du littoral, et même d'un engraissement, en période de temps calme.

- **En période de vents frontaux modérés de secteur NW à NE, les transports vers le haut de plage sont dominants. Ces vents frontaux occultent presque totalement la composante tidale**. Les résultats hydrodynamiques enregistrés lors de la deuxième expérience confirment cette interprétation (Chapalain, 1994).

- Pendant l'expérience de janvier 1994, l'établissement d'un vent modéré de secteur Ouest a renforcé l'action du flot qui a favorisé un déplacement vers le SE.

- Durant la première expérience **l'action de vents frontaux, de vitesse supérieure à 12 m/s, a provoqué la dispersion totale du nuage fluorescent** aux deux sites ML 93 et DUN 93. Ce résultat laisse penser que les conditions limites de stabilité du site ont été atteintes.

Néanmoins, l'énergie développée par ces vents n'a pas été suffisante pour remobiliser les 4 cm de sable naturel qui recouvraient le sable fluorescent à ce moment de l'expérience. Ce dernier résultat est à nuancer en raison des résultats obtenus lors de la deuxième expérience puisque les vents frontaux de vitesse supérieure à 12 m/s n'ont pas eu les mêmes effets. En effet, ils ont été suffisants pour remobiliser une faible quantité de sable fluorescent qui s'est étalée au SE de la zone d'immersion. Cette différence s'explique par l'épaisseur de sable naturel recouvrant le sable fluorescent au point d'immersion, plus petite lors de l'expérience du mois de janvier 1994.

**Ce dernier résultat montre que la mise en place de l'opération et l'interprétation des différents résultats sont parfois délicats.** Les interprétations nécessitent d'être confirmées par des observations de terrain (topographie, épaisseur d'engraissement au point d'immersion et enregistrement en continu des données hydrodynamiques) et d'être comparées à des conditions similaires.

**Les expériences de traçage fluorescent caractérisent les déplacements sédimentaires en bas d'estran en période hydrodynamique d'énergie faible à moyenne. Ces conditions sont favorables à la stabilité voire à l'engraissement du système sous l'influence des vagues permanentes qui provoquent la migration des barres vers la côte. Les courants de marée opèrent essentiellement dans les bâches.**

#### **IV- 5 - CONCLUSION À L'ÉTUDE DU DOMAINE D'ESTRAN**

**L'analyse de profils topographiques du domaine d'estran pendant un an conduit à préciser l'évolution du littoral et de comprendre la dynamique sédimentaire actuelle. L'analyse des expériences de traçage fluorescent, bien que délicate, permet d'appréhender l'intensité des processus sédimentaires.** L'analyse de l'évolution spatio-temporelle de la topographie montre en effet que :

**L'évolution générale** du domaine d'estran est conforme au schéma classique de variation saisonnière d'un profil de plage, et est en relation étroite avec les conditions météorologiques locales:

*En période "hivernale"* l'estran, attaqué par des vagues d'énergie modérée, s'amaigrit, le matériel sableux étant transporté vers le large par des courants de retour. La dune peut servir de réservoir pour rééquilibrer le système.

*En période de beau temps* les vagues, de faible énergie, remobilisent des sédiments qui sont transportés vers le haut de plage, ce qui permet l'engraissement de l'estran.

Les systèmes de barre et de bêche se construisent. L'action des courants de marée devient plus forte dans les bèches alors que les barres sont dominées par l'action de la houle qui favorise leur déplacement.

**Par conséquent, les plages connaissent un cycle annuel typique, où se succèdent période hivernale d'érosion et période estivale d'engraissement. Le bilan sédimentaire annuel tend à s'équilibrer.**

De plus, l'état d'une plage à un moment donné dépend des conditions météorologiques ayant régné durant les quelques jours précédents. Les profils topographiques représentent une vue "instantanée" de la plage qui peuvent être rapidement modifiés par l'établissement brutal de nouvelles conditions météorologiques.

**L'impact des interventions humaines** se ressent dans l'évolution morphologique de certains profils. En particulier *l'action des brise-lames* se manifeste clairement par une morphologie plus plate de l'estran au niveau de Malo-les-Bains.

**Deux secteurs en érosion** ont pu être repérés

**Le secteur proche de Malo-les-Bains** présente un bilan sédimentaire globalement négatif. L'érosion marquée de ce secteur pourrait s'expliquer par l'interférence de plusieurs paramètres naturels et anthropiques. La dynamique sédimentaire locale est apparemment complexe et liée à divers facteurs : convergence de la houle, absence de cordon dunaire, influence des jetées du port Est et des brise-lames, construction de la digue en avant de la laisse de haute mer.

**Le secteur proche de Bray-Dunes** se caractérise par un bilan légèrement négatif. La convergence des courants de marée vers ce secteur pourrait vraisemblablement expliquer ce phénomène.

Les autres secteurs montrent un bilan sédimentaire à l'équilibre ou en sédimentation et semblent résister à l'érosion marine, notamment grâce à la présence de la dune qui joue un rôle important de réservoir de sable.

*L'évolution à court terme en engraissement ou en équilibre s'opposent au modèle de Wright (1979) adapté aux plages macrotidales par Masselink et al. (1993) qui prévoit plutôt une tendance à l'érosion. Ce fait montre la difficulté de classer les différents types de plage pouvant exister en raison des nombreux facteurs qui contrôlent leurs évolutions. Toutefois l'évolution à long terme du littoral Est dunkerquois est effectivement à l'érosion (depuis 1757). Par conséquent ce modèle peut indiquer la tendance à long terme sans tenir compte des évolutions à court terme.*

## CONCLUSION GÉNÉRALE

Le domaine côtier étudié, orienté WSW-ENE, s'étend sur environ 30 km de longueur, depuis l'avant-port Ouest de Dunkerque jusqu'à la frontière franco-belge. A l'Ouest de Dunkerque se trouve le vaste complexe industriel et portuaire de Dunkerque. A l'Est, il se caractérise par des secteurs le plus souvent urbanisés alternant avec des secteurs naturels. Les systèmes dunaires, composés de sable fin et larges d'environ 1 000 m, sont bordés d'un vaste estran, d'environ 400 m de largeur, de faible pente, et constitué de sable fin de grain moyen de 200  $\mu$ m. Des alignements de bancs sableux sub-parallèles à la côte et sub-émergeants caractérisent les fonds marins. Le chenal de navigation constitue la première zone déprimée entre l'estran et l'alignement de bancs le plus côtier. La nature de la couverture sédimentaire des fonds marins est contrôlée par la profondeur : les sédiments fins et homogènes se trouvent à des fonds inférieurs à 10 m (bancs et talus littoral), les plus grossiers à des fonds supérieurs à 10 m (chenal).

Le littoral Est dunkerquois constitue en raison de son contexte hydrodynamique un domaine original. Il est exposé aux agents hydrodynamiques suivants :

- La marée de régime macrotidal (marnage de l'ordre de 5 m) ;
- Les courants de marée avec le flot qui porte vers le NE et le jusant vers le SW. Les vitesses peuvent atteindre et dépasser 1 m/s ;
- La houle dont les deux directions principales sont SW à WSW et N à NNE ;
- Les vents de directions dominantes SW et NE.

Il constitue donc un **exemple d'environnement macrotidal soumis à une dynamique mixte**, marquée par l'interaction des courants de marée et des houles.

Pour mieux comprendre les processus sédimentaires et les différents paramètres qui interagissent sur le littoral dunkerquois il s'est avéré nécessaire d'établir un état des lieux du site, depuis l'Holocène (environ 10 000 B.P.) jusqu'à l'actuel en se fondant sur une étude bibliographique et sur une analyse de cartes et documents anciens. L'étude de l'évolution actuelle a nécessité l'acquisition de données morphologiques (levés bathymétriques généraux et à haute résolution, topographiques, photographiques), sédimentologiques (prélèvements de sédiments, sismique très haute résolution et traçage fluorescent) et hydrologiques (mesures de courant de marée, houle et vent). Les limites de la zone d'étude s'étendent du cordon dunaire au premier alignement de bancs sableux depuis l'avant-port Ouest jusqu'à la frontière franco-belge.

Les travaux effectués concernent l'évolution pluriannuelle de ce domaine côtier et s'inscrivent dans le cadre de la deuxième phase d'un programme d'étude pluridisciplinaire financé par le Syndicat Intercommunal du Littoral Est (S.I.L.E.), dont le but final est de proposer des solutions pour maintenir la stabilité du trait de côte. L'étude bénéficie de la collaboration de trois organismes dont les moyens sont complémentaires : le Laboratoire National d'Hydraulique (E.D.F./L.N.H., Chatou), L'université de Lille I et le bureau d'étude Clabaut (Lille). Les aspects hydrodynamiques et les modélisations numériques sont pris en charge par le L.N.H., les aspects morphosédimentaires sont développés par les deux autres intervenants.

### **Principaux caractères de l'évolution géologique et historique**

Les résultats obtenus au cours de la présente étude concernent particulièrement **l'évolution morphosédimentaire du domaine marin et d'estran** (celle du système dunaire ayant été confiée à P. Clabaut) **considérée à trois échelles de temps : fin-pléistocène et holocène, historique et récente.**

- **L'évolution à long terme**, à l'échelle du quaternaire terminal, est dominée par l'influence de la remontée du niveau de la mer. A 18.000 B.P., le niveau de base se trouvait à -120 m (Jelgersma, 1978). Depuis, la tendance climatique est au réchauffement, avec une remontée progressive "rapide" du niveau marin. Ce constat actuel soulève la question des conséquences des variations très récentes et à venir du niveau de la mer, puisque depuis la fin du siècle dernier, la tendance générale est à une reprise de l'élévation (nouvelle phase de réchauffement ; French et al., 1985 ; Pirazzoli, 1986).

L'évolution du littoral **au cours de l'Holocène**, et plus particulièrement pendant les transgressions calaisiennes et dunkerquiennes, est marquée par des **inondations successives** de la plaine maritime flamande, à la faveur de dépressions constituées par les estuaires ainsi que par les brèches entaillées dans le cordon dunaire.

- **L'évolution à moyen terme, d'échelle historique**, montre le passage d'un état de **stabilité** à l'Ouest et à l'Est de Dunkerque avant 1740, à un état **d'instabilité** marqué par l'érosion active du secteur Est. La vitesse du recul de la côte est estimée à **1 m/an**. Ce recul moyen définit l'érosion côtière mais n'apporte pas d'information sur l'évolution spécifique du profil des plages et les bilans sédimentaires correspondants. On note que l'analyse des profils topographiques de Malo-les-Bains de 1884 à 1993 indique que l'érosion de l'estran, observée pendant les périodes de tempête, est généralement suivie et compensée par un engraissement. En outre, un déplacement de la première ligne de bancs sableux en direction la côte a été également observé.

- **L'évolution récente**, particulièrement étudiée pour les années 1991 à 1994 se caractérise par une **stabilité** d'ensemble du domaine marin et d'estran. Pour les conditions

météorologiques et hydrodynamiques rencontrées au cours de l'étude, en moyenne peu énergétiques du point de vue hydrodynamique, le bilan sédimentaire du système sub- et intertidal est en équilibre. En période hivernale, l'érosion de l'estran est compensée en grande partie par l'érosion du front de dune, permettant le rééquilibrage du profil d'estran ; le réservoir sédimentaire constitué par les dunes est alors sollicité. En période de beau temps, la plage s'engraisse. Ce constat ne peut pas être généralisé sur une plus grande période de temps, car les conditions météorologiques ayant régné pendant l'étude ont été moyennes, sans succession rapide de tempêtes associées à de forts coefficients de marée.

Une **variabilité spatio-temporelle des processus d'érosion et de sédimentation** est mise en évidence . **Des secteurs plus exposés à l'érosion** sont identifiés même pour la période de beau temps relatif qui a régné durant l'étude:

- *A Malo-les-Bains, le bilan sédimentaire de l'estran tend à être déficitaire,*
- *Au niveau de Bray-Dunes, depuis le domaine marin jusqu'à la dune bordière, la*

*tendance générale est dominée par des mécanismes d'érosion.*

*L'étude du système dunaire réalisée par P. Clabaut s'accorde avec cette conclusion, et elle indique une dégradation du système dunaire près de la batterie de Zuydcoote.*

Les relations morphosédimentaires entre les bancs sous-marins et l'évolution du trait de côte apparaissent étroites. En effet le banc du Hills paraît protéger la zone littorale sableuse située à son abri, qui est de ce fait exposée à une action relativement plus forte des courants de marée.

### **Influence récente des facteurs naturels**

Le bilan sédimentaire constaté résulte de la nature et de l'intensité des échanges/transferts de sédiments survenus entre l'estran et les domaines dunaire et du plateau continental, sous l'action des facteurs naturels.

1- La **marée** et les **courants tidaux** constituent l'agent principal responsable de l'évolution sédimentaire récente du domaine d'étude. Les courants tidaux sont subparallèles à la côte et à l'axe des bancs. Le transit sédimentaire résultant tidal est orienté globalement vers l'Est et diminue dans cette direction. Ces courants favorisent essentiellement les transports le long de la côte.

En **domaine marin**, les courants tidaux contrôlent la **distribution sédimentaire**. Ils sont canalisés dans les **chenaux**, à des profondeurs de plus de 10 mètres. Dans le chenal d'accès aux ports, les courants paraissent converger vers la côte entre Zuydcoote et Bray-Dunes. Ils permettent le dépôt de sable moyen plus ou moins hétérogène. Vers l'Est, la diminution de l'intensité des courants se traduit sur le transit sédimentaire et permet le dépôt de

sédiments sableux plus fins. Au-dessus des **bancs**, à des profondeurs d'eau inférieures à 10 mètres, les courants de marée affaiblis autorisent également le dépôt de sédiments à granularité plus faible.

En **domaine d'estran**, l'influence des **courants de marée** s'observe essentiellement dans les dépressions ou bâches. En période de vive-eau et par temps calme par exemple les courants de marée entraînent le creusement des bâches et favorisent l'érosion. Par ailleurs l'érosion du secteur de Zuydcoote - Bray-Dunes est rattachée à la convergence des courants de marée vers la côte renforcée par l'action des vents de secteur W.

2 - L'action de la **houle** augmente progressivement à proximité de la côte et constitue un agent d'importance croissante dans la dynamique sédimentaire.

En **domaine marin**, par temps calme, caractérisé par une houle dont la période est de 4 à 5 secondes, les vagues dites de beau temps agissent essentiellement sur les fonds inférieurs à 10 m en favorisant le tri des sédiments. L'action de la houle augmente lorsque les crêtes sont d'orientation frontale et d'énergie plus forte. Elle favorise alors le dépôt de sédiment plus grossier qui selon les modèles du L.N.H. se répartissent en bandes sub-parallèles à la côte qui reflètent ainsi les zones successives de concentration d'énergie de la houle. Elle permet également l'érosion des flancs marins des bancs sableux. Par contre, l'action des houles de secteur Ouest est plus modérée, son rôle consiste principalement à amplifier l'action du courant de flot.

En **domaine d'estran** les vagues se combinent à l'action des courants de marée pour déterminer un engraissement sédimentaire et favoriser les **transports perpendiculaires au rivage**. Les systèmes de barre et de bêche observés sur l'estran sont construits par le déferlement des vagues. Les modèles de propagation de la houle effectués par le L.N.H. montrent que la houle frontale de secteur NE ou NW se concentre à Malo-les-Bains et à Bray-Dunes. Ce fait semble vérifier par les résultats obtenus à Malo-les-Bains, ce qui explique l'érosion préférentielle de ce secteur. Par contre, l'érosion du secteur de Bray-Dunes n'a pas été observée, ce qui paraît résulter d'échanges sédimentaires privilégiés entre la plage et les dunes. A Bray-Dunes l'érosion a pu être compensée par un apport de sable des dunes environnantes. Cette compensation n'a pas eu lieu à Malo-les-Bains en raison de l'éloignement du massif dunaire, et des vents dominants de secteur SW responsables d'un transit éolien vers l'Est.

3 - L'action combinée de la houle et des courants de marée s'observe sur les bancs sous-marins au large de la côte : la houle permet un déplacement des bancs vers la côte tandis que les courants de marée assurent leur alimentation en sable et donc leur maintien morphologique.

## Influence des facteurs anthropiques

Les facteurs anthropiques doivent être considérés dans l'évolution passée et future du littoral Est dunkerquois. Ils peuvent avoir des **effets positifs** mais également **négatifs et accélérer les phénomènes d'érosion**. A long terme ses effets sont bien observables alors que les impacts récents sur la période de mon étude sont faibles.

Par exemple les premières **digues** construites entre la phase transgressive Dunkerque II et Dunkerque III de la transgression holocène (IX<sup>ème</sup> siècle), ont permis de limiter les effets de la transgression Dunkerque III. De même de 1100 à 1861 la construction des digues successives à l'Ouest de Dunkerque a pu également contribué à la stabilité de cette zone.

Les **jetées** du port Est de Dunkerque sont responsables du **déséquilibre** entre le secteur Est et Ouest de Dunkerque. Elles sont orientées perpendiculairement à la côte et ont de ce fait constitué un obstacle identique à celui d'un **épi**, en bloquant la dérive sédimentaire résultante orientée vers l'Est. Ainsi un engraissement s'est produit en amont courant (à l'Ouest) tandis qu'une érosion est apparue en aval courant (à l'Est).

En ce qui concerne l'évolution récente, l'influence des jetées paraît très contrastée et complexe. Les jetées créent en effet une zone "d'ombre" à l'aval courant (Malo-les-Bains) propice au dépôt des sédiments fins. Cependant, compte tenu de leur disposition elles favorisent la réfraction des courants de marée et de la houle, provoquant ainsi un mouvement tourbillonnaire érosif. L'action des brise-lames, sur la dynamique actuelle semble peu efficace. En période de faible énergie, l'engraissement est moins important qu'ailleurs et en période énergétique l'érosion se concentre à Malo-les-Bains. De plus, le déferlement des vagues sur les brise-lames empêche la formation des barres et des bâches sur l'estran. Par contre les réengraissements hydrauliques consécutifs à la construction des brise-lames ont eu des effets localement bénéfiques.

## Perspectives

Ce mémoire a mis en évidence la nécessité d'utiliser des outils et des méthodes variés pour étudier les évolutions morphosédimentaires à court terme notamment en vue d'aménagements. Les résultats obtenus ont permis d'élaborer des schémas généraux hydrosédimentaires qui demandent à être vérifiés et complétés. Par exemple il serait nécessaire d'effectuer des mesures ponctuelles de courant et de houle pour vérifier les

diverses hypothèses émises à propos des agents hydrodynamiques, comme par exemple la convergence des courants de marée vers la côte ou pour établir les schémas de circulation des différentes cellules hydrosédimentaires.

Les variations morphologiques significatives du système littoral observées à l'échelle saisonnière, annuelle et pluriannuelle, traduisent une stabilité dynamique d'ensemble du système littoral durant la période de l'étude. Il serait utile de suivre l'évolution du littoral lors d'un événement météorologiques de plus forte intensité et d'évaluer les risques de recul et de submersion de la côte en quantifiant le risque d'amaigrissement de la plage et de recul de la dune. De même il serait judicieux de comparer l'évolution du littoral Est Dunkerquois à celle d'autres littoraux (Belgique, Hollande par exemple) afin d'établir un schéma plus général.

- A.G.U.R**, 1983.- Note sur les problèmes d'érosion marine des Dunes Marchand. Rapp. Int. 12p.
- Amos, C.L. & King, E.L.**, 1984.- Bedforms of the canadian eastern seabord : a comparison with global occurences. Mar. Geol., 57 : 167-208.
- Amos, C.L. & Nadeau, O.C.**, 1988.- Surficial sediments of the Outer Banks, Scotian Shelf, Canada. Canad. J. Earth Sci., 25 (12) : 1923-1944.
- Antia, E.E.**, 1993.- Surficial grain-size statistical parameters of a North Sea shoreface-connected ridge: patterns and process implication. Geo-Mar. Lett., 13 : 172-181.
- Ashley, G.M.**, 1990.- Classification of large-scale subaqueous bedforms: a new look at an old problem. J. Sediment. Petrol.,60 (1) : 160-172.
- Augris, C., Clabaut, P. & Vicaire, O.**, 1990.- Le domaine marin du Nord - Pas de Calais. Nature, morphologie et mobilité des fonds : 96 p.
- Avoine, J., Larsonneur, C., Caillot, A., Hoslin, R., Massias, J. et Quesney, M.**, 1984.- Mise en évidence des mouvements sédimentaires en baie de Seine à l'aide de traceurs radioactifs. Contribution à l'étude du comblement de l'estuaire de la Seine. Rapport Société hydrotechnique de France.
- Barusseau, J.P., Radulescu, M., Descamps, C., Akouango, E. & Gerbe, A.**, 1993.- Morphosedimentary multiyear on a barred coast (Gulf of Lions, Mediterranean Sea, France). Mar. Geol.,122 : 47 - 62.
- Bauer, B.O. & Allen, J.R.**, 1995.- Beach steps : an evolutionary perspective. Mar. Geol., 123 : 143-166.
- Beautemps-Beaupré**, 1802.- Carte de reconnaissances hydrographiques de M. Beautemps-Beaupré. J. Cordier édit., In Tilly 1979.
- Beck, C., Clabaut, P., Dewez, S., Vicaire, O., Chamley, H., Augris, C., Hoslin, R. & Caillot, A.**, 1991.- Sand bodies and sand transport paths at the English Channel-North Sea border: morphology, hydrodynamics and radioactive tracing. Oceanol. Acta,11 (Proceedings of the International Colloquium on the environment of epicontinental seas, Lille, 20-22 March 1990) : 111-121.
- Belderson, R.H. & Kenyon, N.H.**, 1982.- Bedforms. In (A.H. Stride), Offshore tidal sands, Processes and deposits, London : 27-57.
- Berné, S.**, 1991.- Architecture et dynamique des dunes tidales. Exemples de la marge

atlantique française. thèse d'université, Lille : 292 p.

**Berthois, L.** 1954.- Construction d'un plan de vague. Rev. Géomorphologique Dyn., 2 : 69-76.

**Berthois, L.**, 1975.- Les roches sédimentaires - 1. Etude sédimentologique des roches meubles (techniques et méthodes). Berthois, L., Paris : 278 p.

**Blanchard, R.**, 1906.- LA Flandre - Etude géographique de la plaine flamande en France, Belgique et Hollande. Publication de la société dunkerquoise pour l'avancement des lettres, des sciences et des arts., Université de Lille : 530 p.

**Bonnefille, R., Lepetit, J.P., Graff, M. & Leroy, J.**, 1971.- Nouvel avant port de Dunkerque Mesures en nature. Rapport L.N.H... HC042/05.

**Bonnefille, R.** 1992.- Cours d'hydraulique maritime. Masson, Paris : 209 p.

**Boon, D.**, 1969.- III Quantitative analysis of beach sand movement, Virginia beach, Virginia. Sedimentology, 13 : 85 - 103.

**Briquet, A.**, 1930.- Le littoral du Nord de la France et son évolution morphologique. thèse Sci. Nat, Université d'Orléans : 439 p.

**Brown, J., Colling, A., Park, D., Philips, J., Rothery, D. & Wright, J.**, 1989.- Waves, tides and shallow-water processes. The Open University/Pergamon Press, Oxford : 187 p.

**Bryche, A.**, 1995.- Evolution du littoral Est et de la position des jetées du port. Rapport Mairie de Dunkerque, Rapport bibliographique : 12 p

**Burkinshaw, G.F.S.**, 1993.- Desert dune dynamics and the evaluation of shear velocity : a integrated approach. In (K. Pye), The dynamics and environmental context of aeolian sedimentary systems, The Geological Society, London : 25 - 36.

**Caillot, A.**, 1985.- Les techniques nucléaires utilisées en sédimentologie marine. In Connaissance et gestion de la frange littorale et du proche plateau continental, Bordeaux. : 67 - 80.

**Carr, A.P., Blackley, M.W.L. & King, H.L.**, 1982.- Spatial and seasonal aspects of beach stability. Earth Surface Processes and Landforms, 7 : 267-282.

**Carré, F.**, 1983.- Les Océans. Presses Universitaires de France, Paris : 127 p.

**Carter, R.W.G., Hesp, P.A. & Nordstrom, K.F.**, 1990.- Erosional landforms in coastal dunes. In (N.P.a.B.C. K. Nordstrom), Coastal Dunes - Form and Process, John Willey & Sons Ltd, New

york, Brisbane, Toronto, Singapour : 217 - 249.

**Carter, R.W.G. & Wilson, P.**, 1993.- Aeolian processes and deposits in northwest Ireland. In (K. Pye), *The dynamics and environmental context of aeolian sedimentary systems*, The Geological Society, London : 173 - 190.

**Cassini**, 1760.- Carte de Cassini. In Tilly édit., 1979.

**Castaing, P., Collins, M., de Resseguier, A., Tastet, J.P., Vincent, C., Voulgaris, G. & Weber, O.**, 1991.- Stratégie d'étude du transport global des sables (suspension et charriage) dans la zone littorale. In 3ème congrès Français de Sédimentologie, Brest. 1 : 67 - 68.

**Caston, V.N.D.**, 1972.- Linear sand banks in the southern North Sea. Sedimentology, 18 : 63-78.

**Catalyud, P.**, 1981.- Alluvionnement argileux dans deux bassins versants du Nord de la France. D.E.A., Lille : 51 p.

**Chapalain, G.**, 1994.- Mesures hydrodynamiques sur le littoral dunkerquois (Malo-les-Bains). Rapport Programme de Recherche Dyscop, Rapport scientifique.

**Cherbonnier, J., Dedieu, P., Froidefond, J. & Niviere, E.**, 1985.- Construction d'un piège à sable et mesure du transit éolien sur le littoral. In Actes du 1<sup>er</sup> colloque d'Océanologie côtière, Bordeaux : 147159.

**Clabaut, P.**, 1988.- Dynamique sédimentaire dans le détroit du Pas-de-Calais. (Large des côtes françaises). thèse 3ème cycle, Lille I : 251 p.

**Clabaut, P.**, 1991.- Analyse des observations de houle au large de Dunkerque. Rapport Cabinet de Géologie Littorale et Marine, 8 p.

**Clabaut, P. & Laboratoire de Dynamique Structurale et Sédimentaire**, 1992.- Erosion du littoral Est-Dunkerquois - Etude bibliographique. Rapport bibliographique, 70 p.

**Clique, P.M.**, 1986.- Catalogue sédimentologique des côtes françaises. Côtes de la Mer du Nord et de la Manche. Coll. Dir. Etudes et Recherches d'Electricité de France L.N.H.-L.C.H.F., Paris : 133 p.

**Collins, M.B., Shimwell, S.J., Gao, S., Powell, H., Hewitson, C. & Taylor, J.A.**, 1995.- Water and sediment movement in the vicinity of linear sandbanks : the Norfolk Bancks, Southern North Sea. Mar. Geol., 123 : 125-142.

**Corbau, C.**, 1991.- Bilan sédimentaire pluri-décennal du littoral dunkerquois. D.E.A., Université

de Lille I : 54 p.

**Corbau, C., Clabaut, P., Tessier, B. & Chamley, H., 1993.-** Modifications morphosédimentaires historiques et récentes du domaine côtier dunkerquois (France). Comptes Rendus de l'Académie des Sciences de Paris série II, 316 (N° 11) : 1573 - 1580.

**Corbau, C., Tessier, B. & Chamley, H., 1993.-** Expérience de traçage fluorescent à l'Est de Dunkerque pour deux points : secteur urbanisé et secteur dunaire. Rapport Projet S.I.L.E.-L.N.H.,

**Corbau, C., Tessier, B., Chamley, H. & Clabaut, P., 1994.-** Etude de l'érosion du littoral Est-Dunkerquois. Rapport Projet S.I.L.E.-L.N.H..

**Corbau, C., Howa, H., Tessier, B., de Resseguier, A. & Chamley, H., 1994.-** Evaluation du transport sédimentaire sur une plage macrotidale par traçage fluorescent, Dunkerque Est, France. Comptes Rendus de l'Académie des Sciences de Paris série II t. 319 : 1503 - 1509.

**Corbau, C., Tessier, B., Chamley, H. & Clabaut, P., 1995.-** Etude de l'érosion du littoral Est-Dunkerquois - Rapport final. - Rapport Projet SILE-LNH,

**Cornelius, S.C., Sear, D.A., Carver, S.J. & Heywood, D.I., 1994.-** GPS GIS and geomorphological field work Earth and Planetary Science Letters. Earth Surface Processes and Landforms, 19 : 777-787.

**Courtois, G. & Monaco, A., 1969.-** Radioactive methods for the quantitative determination of coastal drift rate. Mar. Geol., (7) : 183 - 206.

**Crickmore, M.J., 1967.-** Measurement of sand in rivers with special reference to tracer methods. Sedimentology, 8 :

**Dalrymple, R.W., Knight, R.J. & Lambiase, J.J., 1978.-** Bedforms and their hydraulic stability relationships in a tidal environment, Bay of Fundy, Canada. Nature, 275 : 100-104.

**Dalrymple, R.W., Knight, R.J., Zaitlin, B.A. & Middleton, G.V., 1990.-** Dynamics and facies model of a macrotidal sand-bar complex, Cobequid Bay-Salmon River Estuary (Bay of Fundy). Sedimentology, 37 : 577-612.

**Dalrymple, R.W., 1992.-** Tidal depositional systems. In (Walker R.G. Ed. and James .N.P.), Facies models. response to sea level change, Geosciences Canada, : 195 - 218.

**Davis, R.A. and Fox, W.T., 1972.-** Coastal processes and nearshore sand bars. J. Sediment. Petrol., 42 (2) : 401-412.

**Davis, R.A.**, 1985.- Beach and Nearshore Zone. In (R.A. Davis), Coastal Sedimentary Environments Second Revised expanded edition, Springer Verlag, New York : 379 - 444.

**De Ceunynck, R.**, 1993.- The Western Belgian Coastal Dunes. In Quaternary shorelines in Belgium and the Netherlands, Belgium and Netherlands. : 74 - 80.

**De Lesdain, B.**, 1912.- Sur l'âge des dunes de Ghyvelde. Ann. Soc. géol. Nord, XLI : 101-109.

**De Maeyer, P.H. & Wartel, S.**, 1988.- Relation between superficial sediment grainsize and morphological features of the Coastal Ridges off the Belgian coast. In (P.L. De Boer), Tide-influenced Sedimentary Environment and Facies, D. Reidel Publishing Company, : 91-100.

**De Moor, G.**, 1979.- Recent beach evolution along the Belgian North Sea Coast. Bull. Soc. belge Géol., 88 (2) : 143 - 157.

**De Moor, G.**, 1989.- Maintenance on the Flemish banks. In (J.P. Henriot & G. De Moor), The Quaternary and Tertiary Geology of the Southern Bight, North Sea, : 185-216.

**De Resseguier, A.**, 1987.- Un nouveau Détecteur Compteur Automatique (D.C.A.) de grains fluorescents - Application à l'étude du déplacement d'un sédiment. In 1er congrès de Sédimentologie, 1 : 147 - 148.

**De Rouville, M.A.**, 1946.- Le régime des côtes, éléments hydrographiques des accès des ports. St Ouen : 644 p.

**De Ruig, J.H.M. & Louisse, C.J.**, 1991.- Sand budget trends and changes along the Holland Coast. Journal of Coastal Research, 7 (4) : 1013 - 1026.

**Dean, R.G.**, 1983.- Principles of beach nourishment. In (P.D. Komar), Hand-book of coastal processes and erosion., CRC Press, Florida : 217 - 231.

**Dean, R.G.**, 1991.- Equilibrium Beach Profiles : Characteristics and Applications. Journal of Coastal Research, 7 (1) : 53-84.

**Despeyroux, Y.**, 1989.- Hydrodynamique sédimentaire dans la baie de la Canche: Aspects fondamentaux et appliqués. thèse de 3<sup>ème</sup> cycle, Lille 1 : 93 p.

**Dewez, S.**, 1988.- Sédimentation et dynamique en Manche Orientale (De la baie d'Authie au Cap d'Alprech). thèse 3<sup>ème</sup> cycle, Université de Lille 1 : 276 p.

**Dhellemmes, F.**, 1989.- Modèle de réfraction-diffraction de la houle - Description du code RECIF. Rapport L.N.H., HE-42/82.25.

**Dubois, G.**, 1924.- Recherche sur les terrains quaternaires du Nord de la France. Mém. Soc. géol. Nord, VIII : 357 p.

**Dubois, G.**, 1939.- Carte géologique à 1/80 000, feuille de Dunkerque. édit., carte géologique.

**Durand, J., Champanhet, J.M., Long, B. & Ross, N.**, 1990.- Géométrie et diagnose de barres d'avant - côte : application en sédimentologie pétrolière. Bull. Cent. Rech. Expl. Prod. Elf Aquit., 14 : 197-212.

**E.D.F./L.N.H.**, 1971.- Nouvel Avant port de Dunkerque. Rapport L.N.H., 3HC 042 105.

**EUROSENSE**, 1992 : Levé bathymétrique de Dunkerque à la frontière franco-belge. Avril 1992.

**Eisma, D., Jansen, J.H.F. & Vanweering, T.G.E.**, 1979.- Sea-Floor morphology and recent sediment movement in the North Sea. In (E.Oele, R.T.E. Schüttenhelm & A.J. Wiggers), The Quaternary History of the North Sea, Acta Univ. Ups., Uppsala : 217-231.

**Everts, C.H., Asce, M.**, 1985 - Sea level rise effects on shoreline Position. Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering, 111, 985-999.

**Flatres-Mury, H.**, 1966.- La plaine maritime. Hommes et Terres du Nord, 2 : 4.

**Folk, R.L. & Ward, W.C.**, 1957.- Brazos River bar: a study in the significance of grain-size parameters. J. Sediment. Petrol., 27 : 3-26.

**French, J.R., Spencer, T. & Reed, D.J.**, 1995 - Editorial - Geomorphic response to sea-level rise : existing evidence and future impacts. Earth Surface Processes and Landforms, 20 (1), 1-6.

**Frihy, O.E., Moussa, A.A. & Stanley, D.J.**, 1994.- Abu Quir Bay, a sediment sink off the northwestern Nile delta, Egypt. Marine Geology, 121 : 199-211.

**Froidefond, J.M.**, 1985.- Méthode de géomorphologie côtière. Application à l'étude de l'évolution du littoral Aquitain. Mémoire de l'Institut de Géologie du Bassin d'Aquitaine, Bordeaux : 273 p.

**Froidefond, J. & Prud'homme, R.**, 1991.- Coastal erosion and aeolian sand transport on the Aquitaine coast, France. Acta Mechanica, 2 : 147-159.

**Gao, S. & Collins, M.**, 1991.- A critique of the "McLaren Method" for defining sediment transport paths - Discussion. J. Sediment. Petrol., 61 (1) : 143-146.

**Gao, S. & Collins, M.**, 1992.- Net sediment transport patterns inferred from grain size trends

based upon definition of "transport vectors". Sediment. Geol., 80 : 47-60.

**Gao, S., Collins, M., Lanckneus, J., De Moor, G. & Van Lacker, S**, 1994.- Grain size trends associated with net sediment transport patterns : An exemple from the Belgian continental shelf. Mar. Geol., 121 : 171-185.

**Gassiat, L.**, 1989.- Hydrodynamique et évolution sédimentaire d'un systeme lagune-flèche littorale. Le Bassin d'Arcachon et la flèche du Cap Ferret. thèse de 3<sup>ème</sup> cycle, Université de Bordeaux I : 228 p.

**Gourlez, P., Caillot, A. & Quesney, M.**, 1978.- Contribution à l'étude des mouvements sédimentaires situés à l'est de Zeebrugge. Rapport C.E.A., DCA/SARR/SAPRA/7812/C255 : 20.

**Greenwood, B. & Osborne, O.D.**, 1991.- Equilibrium slopes and croos-shore velocity asymmetries in a storm-dominated, barred nearshore system. Mar. Geol., 96 : 211-235.

**Greenwood, B. & Davidson-Arnott, R.G.D.**, 1979 - Sedimentation ant equilibrium in wave formed bars: a review and case Study, Canad. J. Earth Sci., 16, 312-332.

**Grochowski, N.T.L., Collins, M.B., Boxall, S.R. & Salomon, J.C.**, 1993.- Sediment transport predictions for the English Channel, using numerical models. Journal of the Geological Society, London,150 : 683-695.

**Guilcher, A.**, 1979.- Précis d'hydrologie marine et continentale. Masson Ed, Paris : 344 p.

**Hageman, B.P.**, 1969.- Development of western part of the Netherlands during the Holocene. Geol. en Mijnb.,48 : 373-388.

**Hayes, M.O.**, 1979.- Barrier Island Morphology as a Function of Tidal and Wave Regime. In (L. S.P.), Barrier Island from the gulf of St Lawrence to the gulf of Mexico, Academic Press, New York, San Francisco, London : 1 - 27.

**Horikawa, K.**, 1988.- Nearshore dynamics and coastal processes - theory, measurement, and predictive models. University of Tokyo Press, Tokyo : 522 p.

**Horn, D.P.**, 1993.- Sediment dynamics on a macrotidal beach: Isle of Man, U.K. Journal of Coastal Research, 9 : 189 - 208.

**Hoslin, R.**, 1989.- Etude au moyen de traceurs radioactifs du transit sédimentaire au large de Dunkerque. Rapport C.E.A.,

**Houbolt, J.J.H.C.**, 1968.- Recent sediments in the southern bight of the North sea. Geol. en Mijnb., 47 (4) : 245-273.

**Houston, J.R.**, 1991.- Beachfill Performance. *Shore and Beach*, July : 15-24.

**Houthuys, R., De Moor, G. & Sommé, J.**, 1993.- The shaping of the French-Belgian Sea Coast throughout recent geology and history. In *Coastal Zone'93*, American Society of Civil Engineers, New-York : 27 - 40.

**Houthuys, R., Trentesaux, A. & De Wolf, P.**, 1994.- Storm influences on a tidal sand bank's surface (Middelkerke Bank, Southern North Sea). *Mar. Geol.*, 121 : 23-41.

**Howa, H.**, 1987.- Le littoral du Nord Medoc (Gironde). Evolution d'une côte basse sableuse en érosion. thèse de 3<sup>ème</sup> cycle, Bordeaux I : 258 p.

**Howa, H. & de Resequier, A.**, 1994.- Application of a fluorescent grain detector/counter for sand transport evaluation in the littoral zone. In *OCEANS'94OSATES*, 2/033/10/20 :

**Huthnance, J.M.**, 1982.- On One Mechanism Forming Linear Sand Banks. *Estuarine, Coastal Shelf Sciences*, 14 : 79-99.

**I.G.N.**, 1832.- carte topographique de 1832 à 1/80000. édit.,

**I.G.N.**, 1939.- Carte topographique de 1939 à 1/20000. édit.,

**I.G.N.**, 1987.- Cartes topographiques n° 2202, 2302, 2402 à 1/50000, n°22020, 23020 et 24020 à 1/25000. édit.,

**Ingle, J.C.**, 1966.- The mouvement of beach sand. An analysis using fluorescent grain. *Developments in Sedimentology*, 5.

**Jago, C.F. & Barusseau, J.P.**, 1981.- Sediment entrainment on a wave-graded shelf, Roussillon, France. *Mar. Geol.*,42 : 279-299.

**Jansen, J.H.F., Van Weering, T.C.E. & Eisma, D.**, 1979.- Late Quaternary sedimentation in the North Sea. In (E. Oele, R.T.E. Schüttenhelm & A.J. Wiggers), *The Quaternary History of the North Sea*, *Acta Univ. Ups.*, Uppsala : 157-187.

**Jelgersma, S.**, 1979.- Sea-level changes in the North Sea basin. In (E. Oele, R.T.E. Schüttenhelm & A.J. Wiggers), *The Quaternary history of the North Sea*, *Acta Univ. Ups.*, Uppsala : 233-248.

**Johnson, M.A., Kenyon, N.H., Belderson, R.H. & Stride, A.H.**, 1982.- Sand transport. In (A.H. Stride), *Offshore tidal sand, processes and deposits*, Chapman & Hall, London : 58-94.

**Jones, J.R. & Willets, B.B.**, 1979.- Errors in measuring uniform aeolian sand flow by means on

an adjustable traps. *Sedimentology*, 26 : 463 - 468.

**Kenyon, N.H., Belderson, R.H., Stride, A.H. & Johnson, M.A.**, 1981.- Offshore tidal sand-banks as indicators of net sand transport and as potential deposits. Special Publications of the international Association of Sedimentologists, 5 : 257-268.

**King, A.M.**, 1972.- Chapter 4 : Dynamics of beach accretion in South Lincolnshire - England. In (E. Donald & R. Coates), New York : 73-98.

**Kirby, R. & Oele, E.**, 1975.- The geological history of the Sandettie-Fairy Bank area, southern North Sea. *Phil. Trans. r. Soc. Lond. A*, 279 : 257-267.

**Klingebiel, A.**, 1987.- Les plages : un patrimoine à gérer. In Mer et Littoral - Couple à risque, Biarritz : 51 - 60.

**Komar, P.D.**, 1976.- Beach processes and sedimentation. Prentice- Hall, Englewood & Cliffs.

**Komar, P.D.**, 1983.- Coastal erosion in response to the the construction of jetties and breakwaters. In (P.D. Komar), *Hand-book of coastal processes and erosion*. CRC Press, Florida : 191 - 204.

**Komar, P.D.**, 1983.- Beach Processes and Erosion - An Introduction. In (P.D. Komar), *Hand-book of coastal processes and erosion*. CRC Press, Florida : 1 - 20.

**L.C.H.F.**, 1984.- Etude de l'exhaussement des fonds marins de l'avant port ouvert de Dunkerque. Rapport L.C.H.F., Rapp int.

**Laban, C. & Schuttenhelm, R.T.E.**, 1981.- Some new evidence on the origin of the Zealand ridges. In Spec. Publs int. Ass. Sediment., : 239-245.

**Lacombe, H.**, 1971.- Les mouvements de la mer, courants, vagues, houles, marées. Doin Ed, Paris : 98 p.

**Lalaut, Y.**, 1991.- Fonctionnement et efficacité des ouvrages statiques de protection du littoral. Rapport Service Technique Central des Ports Maritimes et Voies Navigables, technique. 67 p.

**Lalaut, Y.**, 1992.- Fonctionnement et Efficacité des Ouvrages Statiques de Protection des Littoraux Sableux. thèse de 3<sup>ème</sup> cycle, Paris Sud Orsay : 250 p.

**Lanckneus, J.**, 1993.- Morphodynamics and Sediments Dynamics in the Southern Bight, Belgium.

**Larson, M. & Kraus, N.C.**, 1994.- Temporal and spatial scales of beach profile change, Duke,

North Carolina. Mar. Geol., 117 : 75 - 94.

**Larsonneur, C.**, 1977.- La cartographie des dépôts meubles sur le plateau continental français : méthode mise au point et utilisée en Manche. J. Rech. Océanogr., II : 33-39.

**Latteux, B.**, 1979.- Projet d'extension du port de Calais - étude numérique de l'impact sédimentologique de l'avant-port. Rapport LNH, techn. HE.042/79.19.

**Le Fevre - Lehoerff, G., Grosseil, H., Woehrling, D., Dewarumez, J.M. & Delesmont, R.**, 1991.- La centrale nucléaire littorale de Gravelines écologie - environnement et impact. In Actes du Colloque : Le littoral, ses contraintes environnementales et ses conflits d'utilisation., Nantes : 336.

**Le Roux, J.P.**, 1994.- An alternative approach to the identification of net sediment transport paths based on grain-size trends. Sediment. Geol., 94 : 97-107.

**Leatherman, S.P.**, 1991.- Coasts and beaches. Geological Society of America, 3 (Centennial Special) : 183 - 200.

**Lemaire, M.**, 1927.- Histoire de Dunkerque des origines à 1900. Dunkerque : 200 p.

**Lepetit, J.P.**, 1977.- Action des éléments marins sur les sédiments côtiers. Rapport L.N.H., cours. HE042/77.03.

**Lepetit, J. & Leroy, J.**, 1977.- Avant port Ouest de Dunkerque - Etalonnage sédimentologique d'un modèle réduit d'ensemble. Rapport LNH, techn. HE 042/77.32.

**Levoy, F.**, 1994.- Evolution et fonctionnement hydrosédimentaire des plages macrotidales. L'exemple de la côte ouest du Cotentin. thèse de 3<sup>ème</sup> cycle, Caen : 384 p.

**Long, B. & Ross, N.**, 1989.- Revue et classification des barres d'avant-côte. Bull. Centres Rech. Explor-Prod. Elf-Aquitaine, 13 : 175-187.

**Mancel, Y.**, 1992.- Mesures des courants de marée sur le littoral à l'Est de Dunkerque. Rapport L.N.H., technique. HE-45/92.35.

**Mancel, Y.**, 1993.- Mesures de la houle sur le littoral à l'Est de Dunkerque. Rapport L.N.H., technique. HE-45/92.35.

**Masselink, G.**, 1992.- Longshore variation of grain size distribution along the coast of the Rhône delta, Southern France: A test of the "MacLaren Model". J. Coastal Research, 8 (2) : 286-291.

**Masselink, G. , Short, A. D.**, 1993.- The effect of tide range on beach morphodynamics and morphology : a conceptual beach model. Journal of Coastal Research, 9 (3) : 785-800.

**Mc Cave, I.N.**, 1971.- Sand waves in the North sea off the coast off Holland. Mar. Geol., 10 : 199-225.

**Mc Cave, I.N.**, 1985.- Recent shelf clastic sediments, Sedimentology : 49-65.

**Mc Laren, P.**, 1981.- An interpretation of trends in grain size measures. J. Sedim. Petrol., 51 : 611-624.

**Mc Laren, P. & Bowles, D.**, 1984.- The effect of sediment transport on grain-size distribution. J. Sediment. Petrol., 55 (4) : 457-470.

**McLaren, P., Collins, M.B., Gao, S. & Powys, R.I.L.**, 1993.- Sediment Dynamics of the Severn Estuary and inner Bristol Channel. J. Geol. Soc. London, 150 : 589-603.

**Michel, F.**, 1991.- Les côtes de France, paysages et géologie. In (E.d. BRGM), Orléans : 1-31.

**Michel, D.**, 1993.- Dynamique sédimentaire en milieu littoral, évolution morphodynamique de la plage de la Salie. DEA, Université de Bordeaux I : 25 p.

**Michel, D., Howa, H. & Tastet, J.P.**, 1995.- Essai de modélisation de l'évolution morphologique d'un banc sableux intertidal (Sud du Bassin d'Arcachon, France). C.R. Acad. Sci. Paris, 321 (série IIa) : 497-504.

**Migniot, C.**, 1989.- Manuel sur l'hydrodynamique sédimentaire et l'érosion et sédimentation du littoral. Rapport SOGREAH - L.C.H.F., Cours. 51078 R.1.

**Migniot, C.**, 1989.- Manuel sur l'hydrodynamique sédimentaire et l'érosion et sédimentation du littoral. Rapport SOGREAH - L.C.H.F., Cours. 51078 R.2.

**Mostaert, F., Auffret, J.P., De Batist, M., Henriët, J.P., Moons, A., Sevens, E., Van den Broeke, I. & Verschuren, M.**, 1989.- Quaternary shelf deposits and drainage patterns off the French and Belgian coast. In (J.P. Henriët & G. De Moor), The Quaternary and Tertiary geology of the Southern bight, North Sea, Bruxelles : 111-118.

**Off, T.**, 1963.- Rhythmic linear sand bodies caused by tidal currents. Bulletin of the American Association of petroleum Geology, 47 : 324-341.

**Ottmann, F.**, 1965.- Introduction à la géologie marine et littoral. Ottmann, Paris : 259 p.

**Paepe, R.**, 1960.- La plaine maritime entre Dunkerque et la frontière belge. Bull. Soc. belge de

Géologie, XXIX : 47-66.

**Paepe, R. & Baeteman, C.**, 1979.- The Belgian coastal plain during the Quaternary. In (E. Oele, R.T.E. Schüttenhelm & A.J. Wiggers), The Quaternary History of the North Sea, Acta Univ. Ups., Uppsala : 143-146.

**Paskoff, R.**, 1984.- Erosion et protection des plages : une nouvelle approche. In XVIII<sup>ème</sup> Journées de l'hydraulique, Marseille. vol III n° 7 : 1-7.

**Paskoff, R.**, 1993.- Les littoraux - Impact des aménagements sur leur évolution - 2nd édition. Mason, Paris : 227 p.

**Peltier, E. & Le Saux, J.-M.**, 1992.- Etude de l'érosion du littoral est dunkerquois calcul de propagation de houle. Rapport L.N.H., HE-42/92.13.

**Pilkey, O.H. & Wright, H.L.**, 1988.- Seawalls Versus Beaches. Journal of Coastal Research, SI (4) : 41 -64.

**Pilkley, O.H., Young, R.S., Riggs, S.R., Sam Smith, A.W., Wu, H. & Pilkey, W.D.**, 1993.- The concept of shoreface profile of equilibrium : A critical review. Journal of Coastal Research, 9 (1) : 255-278.

**Pirazzoti, P.A.**, 1986 -Secular trends of relative sea level changes indicated by tide gauge records. Journal of Coastal Research, SI : 1-26.

**Pizzuto, J.E.**, 1987.- Dispersion of dyed sand tracers in an oscillatory flow fields. J. Geophys. Res., 92 (C2) : 1923- 1933.

**Pujo, H.** : 1992 - Bathymétrie et topographie du littoral entre Dunkerque et la frontière belge en Octobre 1992.

**Pujo, H.** : 1993 - Bathymétrie et topographie du littoral entre Dunkerque et la frontière belge en juin 1993.

**Pujo, H.** : 1993 - Bathymétrie et topographie du littoral entre Dunkerque et la frontière belge en Septembre 1993.

**Pujo, H.** : 1994 - Bathymétrie et topographie du littoral entre Dunkerque et la frontière belge en juin 1994.

**Pujo, H.** : 1994 - Bathymétrie et topographie du littoral entre Dunkerque et la frontière belge en Décembre 1994.

**Psuty, N.P.**, 1990.- Fore-dune mobility and stability, Fire Island, New York. In (K. Nordstrom, N.P. Psuty & B. Carter), Coastal Dunes - Form and Process, John Wiley & Sons Ltd, New York, Brisbane, Toronto, Singapore : 159 - 176.

**Reineck, H.E. & Singh, I.B.**, 1980.- Depositional sedimentary environment -2nd revised and updated edition. Springer - Verlag, Berlin : 439 p.

**Ritchie, W. & Penland, S.**, 1990.- Aeolian sand bodies of the South Louisiana coast. In (K. Nordstrom, N.P. Psuty & B. Carter), Coastal Dunes - Form and Process, John Wiley & Sons Ltd, New York, Brisbane, Toronto, Singapore : 105 - 128.

**Ruessink, B.G., Kroon, A.**, 1994.- The behaviour of a multiple bar system in the nearshore zone of Terschelling, the Netherlands : 1965-1993. Mar. Geol., 121 : 187-197.

**S.H.O.M.**, 1968.- Courants de marée dans la Manche et sur les côtes françaises de l'Atlantique. Imprimerie Nationale, Paris : 287 p.

**S.H.O.M.**, 1985.- Côte du Nord - de Calais à Dunkerque au 1/43 140. S.H.O.M. édit., 6651D.

**S.H.O.M.**, 1985.- Côte du Nord - de Dunkerque à Ostende au 1/43 100. S.H.O.M. édit., 6652D.

**S.H.O.M.**, 1988.- Courants de marée dans le Pas de Calais. Service Hydrographique et Océanographique de la Marine, Paris : 28 p.

**S.H.O.M.**, 1994.- Annuaire des marées, tome 1 Ports de France. Service Hydrographique et Océanographique de la Marine, Paris : 199 p.

**S.M.N.**, 1987.- Dossier Littoral. Rapport Service Maritime du Nord,

**Sherman, D.J., Bauer, B.O., Nordstrom, K.F. & Allen, J.R.**, 1990.- A tracer study of sediment transport in the vicinity of a groin : New York, U.S.A. Journal of Coastal Research, 6 (2) : 427 - 438.

**Short, A.D.**, 1984.- Beach and nearshore facies : Southeastern Australia. Mar. Geol., 60 : 261-282.

**Short, A.D.**, 1991.- Macro-Meso Tidal beach Morphodynamics - An overview. Journal of Coastal Research, 7 (2) : 417 - 436.

**Smith, J.D.**, 1969.- Geomorphology of a sand ridge. J. Geol., 77 : 39-55.

**SOGREAH**, 1974.- Plage de Dunkerque. Rapport SOGREAH, R12032.

**SOGREAH**, 1986.- Etude de la stabilisation de la plage de Malo-les-Bains. Rapport SOGREAH, 45 0077 R1.

**Sommé, J.**, 1975.- Les plaines du Nord de la France et leur bordure. Etude géomorphologique. Thèse de troisième cycle de Sci. Nat., Paris I : 801 p.

**Sommé, J.**, 1979.- Quaternary coastlines in northern France. In (E. Oele, R.T.E. Schüttenhelm & A.J. Wiggers), The Quaternary History of the North Sea, Acta Univ. Ups., Uppsala : 147-158.

**Stride, H.**, 1982.- Offshore tidal sands processes and deposits. Chapman and Hall Eds, London : 222 p.

**Stride, A.H.**, 1988.- Preservation of marine sand wave structures. In Tide-influenced sedimentary environments and facies , S.P.G., Reidel Publishing Company , Dordrecht : 13-22.

**Stubblefield, W.L. & Swift, D.J.P.**, 1976.- Ridge development as revealed by sub-bottom profiles on the central New Jersey shelf. Mar. Geol., 20 : 315-334.

**Swift, D.J.P., Holliday, B., Avignone, N. & Shideler, G.**, 1972.- Anatomy of a shoreface ridge system, False Cape, Virginia. Mar. Geol., 12 : 59-84.

**Swift, D.J.P., Duane, D.B. & McKinney, T.F.**, 1973.- Ridge and swale topography of the middle Atlantic bight, North America : secular response to the Holocene hydraulic regime. Mar. Geol., 15 : 227-247.

**Swift, D.J.P.** - 1975 - Tidal sand ridges and shoal-retreat massifs. Mar. Geol. 18 : 105-134.

**Tavernier, R. & De Moor, G.**, 1974.- L'évolution du bassin de l'Escaut. Centenaire de la Société Géologique de Belgique, vol. sp. : 159-231.

**Ters, M.**, 1973.- Les variations du niveau marin depuis 10 000 ans le long du littoral Atlantique français. In 9<sup>ème</sup> congrès international I.N.Q.U.A., 36 : 114 - 136.

**Tessier, B.**, 1993.- Mesure du temps dans les séries géologiques : L'exemple des cycles de marée. Ann. Soc. géol. Nord, T 2 (2<sup>ème</sup> Série) : 165-177.

**Tessier, B., Corbau, C. & Auffret, J.P.**, 1995 - Internal structures as dynamics pattern indicators of shoreface bank moving in a macrotidal coastal environment (Dunkerque area, North of France) - In IAS - 16<sup>th</sup> Regional Meeting of Sedimentology - 5<sup>ème</sup> Congrès Français de Sédimentologie-ASF, n° 22, p 141.

**Tilly, J.**, 1979.- Dunkerque en Flandres..

**Tola, F.**, 1982.- The use of radioactive tracers in dynamic sedimentology. Rapport C.E.A., Technique. R 2261.

**Trentesaux, A.**, 1993.- Structure et dynamique sédimentaire du Middelkerke Bank, Mer du Nord Méridionale. Thèse d'Université, Lille : p 229.

**Van Rijn, L.C.**, 1989.- Handbook Sediment Transport by Currents and waves. Delft Hydraulic : 307 p.

**Vaslet, D., Larsonneur, C. & Auffret, J.P.**, 1978.- Carte des dépôts superficiels de la Manche (1/500 000). B.R.G.M. édit.

**Vatan, A.**, 1967.- Manuel de sédimentologie. Ed. Technip., Paris : 397 p.

**Vicaire, O.**, 1991.- Dynamique hydrosédimentaire en Mer du Nord méridionale (Du cap Blanc-Nez à la frontière belge). Thèse d'université, Université de Lille I : 250 p.

**Weber, O.**, 1978.- Transits sédimentaires et évolution saisonnière de la zone littorale à la Salie (Gironde). thèse 3<sup>ème</sup> cycle, Bordeaux I : p.

**Weber, O.**, 1989.- Les agents dynamiques et le transport sédimentaire dans la zone côtière. Bull. Inst. Géol. Bassin Aquitaine, 45 : 23-36.

**Westerhoff, W., Kiden, P. & Vos, P.**, 1993.- INQUA subcommission on NW-European Shorelines - Zealand. In Quaternary shorelines in Belgium and the Netherlands, Belgium and Netherlands : 109 - 145.

**White, T.E. & Inman, D.L.**, 1989.- Transport determination by tracers - B : Application of tracer theory to N.S.T.S. experiments. In Nearshore sediment transport, Seymour Ed., : 115 - 128.

**White, T.E. & Inman, D.L.**, 1989.- Mesuring longshore transport with tracer. In Nearshore sediment transport, Seymour Ed. : 287 - 312.

**Wright, L.D., Chappell, J., Thom, B.G., Bradshaw, M.P and Cowell, P.**, 1979.- Morphodynamics of reflective and dissipative beach and inshore systems : Southeastern Australia. Mar. Geol., 32 : 105-140.

**Wright, L.D., Guza, R.T and Short, A.D**, 1982.- Dynamics of a high-energy dissipative surf zone. Mar. Geol., 45 : 41-62.

**Wright, L.D., Nielsen, P., Short, A.D. & Green, M.O.**, 1982.- Morphodynamics of a macrotidal beach. Mar. Geol., 50 : 97 - 128.

**Wright, L.D., S.hort, A.D.**, 1984.- Morphodynamic variability of surf zones on beaches : a synthesis. Mar. Geol., 56 : 93-118.

**Wunderlich, F.**, 1972.- Georgia coastal region, Sapelo Island USA : Sedimentology and Biology III Beach dynamics and beach development.

**Zagwijn, W.H.**, 1989.- The Netherlands during the Tertiary and the Quaternary: A case history of coastal lowland evolution. Geol. en Mijnb., 68 : 107-120.

**Zhang, D.P., Sunamura, T., tanaka, S. & Yamamoto, K.**, 1994.- Laboratory experiments of longshore bars produced by breaker-induced vortex action. In Coastal Dynamics'94. An international conference on the role of large scale experiments. Universitat Politècnica de Catalunya Barcelona, Spain. : 9 - 11.

## **INTRODUCTION GÉNÉRALE**

p 1

## **CHAPITRE I : ÉVOLUTION HOLOCÈNE ET HISTORIQUE DU LITTORAL DUNKERQUOIS**

p 5

### **I - 1 - INTRODUCTION**

p 5

### **I - 2 - ÉVOLUTION HOLOCÈNE**

p 5

#### **I - 2 - 1 - LES GRANDES ÉTAPES DE LA TRANSGRESSION FLANDRIENNE**

p 5

#### **I - 2 - 2 - SÉDIMENTATION HOLOCÈNE DANS LA PLAINE MARITIME FLAMANDE**

p 7

*L'assise de Calais*

p 8

*La tourbe supérieure (ou tourbe de surface)*

p 8

*L'assise de Dunkerque*

p 8

### **I - 3 - ÉVOLUTION GÉNÉRALE DEPUIS LES PREMIÈRES**

#### **INTERVENTIONS HUMAINES SUR LE LITTORAL DUNKERQUOIS**

p 10

#### **I - 3 - 1 - DU X<sup>ème</sup> SIÈCLE AU X<sup>ème</sup> SIÈCLE**

p 11

#### **I - 3 - 2 - DU X<sup>ème</sup> AU XIX<sup>ème</sup> SIÈCLE**

p

11

*Édification du port de Dunkerque*

p 11

*Évolution des petits fonds marins*

p 15

#### **I - 3 - 3 - AU VINGTIÈME SIÈCLE ET TENDANCES ACTUELLES**

p 18

##### **I - 3 - 3 - 1 - Évolution des petits fonds marins dunkerquois**

p 18

##### **I - 3 - 3 - 2 - Évolution de l'estran et aménagement du complexe portuaire et industriel de Dunkerque**

p 23

##### **I - 3 - 3 - 3 - Évolution du système dunaire**

p 41

### **I - 4 - CONCLUSION**

p 41

## **CHAPITRE II : CADRE DYNAMIQUE DU LITTORAL DUNKERQUOIS**

p 43

### **II - 1 - INTRODUCTION**

p 43

### **II - 2 - LA MARÉE ET LES COURANTS DE MARÉE**

p 44

*la marée*

p 46

<i>les courants de marée</i>	p 47
<b>II - 3 - LE VENT</b>	p 53
<i>Le régime des vents à Dunkerque</i>	P 54
<b>II - 3 - LA HOULE</b>	p 58
<i>La houle à Dunkerque</i>	p 61
<b>II - 4 - CONCLUSION</b>	p 67
<b>CHAPITRE III : DOMAINE MARIN</b>	p 68
<b>III - 1 - INTRODUCTION</b>	p 68
<b>III - 2 - DÉFINITION DU SECTEUR D'ÉTUDE</b>	p 68
<b>III - 3 - MÉTHODES UTILISÉES</b>	p 71
III - 3 - 1 - PRÉLÈVEMENTS D'ÉCHANTILLONS MARINS	p 71
III - 3 - 2 - RELEVÉS BATHYMÉTRIQUES	p 75
III - 3 - 3 - PROSPECTION SISMIQUE TRÈS HAUTE RÉOLUTION DES BANCS SABLEUX	p 79
<b>III - 4 - RÉSULTATS OBTENUS À PARTIR DES LEVÉS BATHYMÉTRIQUES</b>	p 80
III - 4 - 1 - PRINCIPAUX RÉSULTATS	p 80
III - 4 - 2 - INTERPRÉTATION	p 83
<b>III - 5 - RÉSULTATS OBTENUS À L'AIDE DE L'ÉTUDE DES ÉCHANTILLONS MARINS</b>	p 85
III - 5 - 1 - CONDITIONS HYDRODYNAMIQUES ET MÉTÉOROLOGIQUES PRÉCÉDANT CHAQUE CAMPAGNE DE PRÉLÈVEMENTS	p 85
III - 5 - 2 - CARTES DE RÉPARTITION SÉDIMENTAIRE	p 88
III - 5 - 3 - INTERPRÉTATION	p 96

**III - 6 - ÉTUDE DE LA STRUCTURE INTERNE DES BANCS DU SNOUW ET DU BRAEK PAR SISMIQUE TRÈS HAUTE RÉOLUTION** p 101

III - 6 - 1 - PRÉSENTATION DE L'ÉTUDE p 101

III - 6 - 2 - ORGANISATION INTERNE DES BANCS DU SNOUW ET DU BRAEK p 101

III - 6 - 3 - INTERPRÉTATION DE L'ORGANISATION INTERNE DES BANCS DU SNOUW ET DU BRAEK p 103

**III - 7 - ÉTUDE DES CARTES DE DIFFÉRENTIEL OBTENUS À PARTIR DE LEVÉS TOPO-BATHYMÉTRIQUES** p105

III - 7 - 1 - CONDITIONS MÉTÉOROLOGIQUES ET HYDRODYNAMIQUES p 105

III - 7 - 2 - DIFFÉRENTIEL ÉTABLI ENTRE AVRIL 1992 ET OCTOBRE 1992 p 106

III - 7 - 3 - DIFFÉRENTIEL ÉTABLI ENTRE OCTOBRE 1992 ET JUIN 1993 p 108

III - 7 - 4 - DIFFÉRENTIEL ÉTABLI ENTRE JUIN 1993 ET SEPTEMBRE 1993 p 108

III - 7 - 5 - DIFFÉRENTIEL ÉTABLI ENTRE SEPTEMBRE 1993 ET JUIN 1994 p 111

III - 7 - 6 - DIFFÉRENTIEL ÉTABLI ENTRE JUIN 1994 ET DÉCEMBRE 1994 p 113

III - 7 - 7 - COMPARAISON ET INTERPRÉTATION p 113

III - 7 - 8 - CONCLUSION p 119

**III - 8 - CONCLUSION GÉNÉRALE À L'ÉTUDE DU DOMAINE MARIN** p 119

**CHAPITRE IV : LE DOMAINE D'ESTRAN**

p 123

**IV - 1 - INTRODUCTION** p 123

**IV - 2 - PRÉSENTATION DU SITE ET DÉMARCHE ADOPTÉE** p 123

IV - 2 - 1 - PRÉSENTATION GÉNÉRALE DU DOMAINE D'ESTRAN EST DUNKERQUOIS p 123

IV - 2 - 2 - CARACTÉRISTIQUES MORPHOLOGIQUES GÉNÉRALES DES PLAGES DU LITTORAL EST DUNKERQUOIS p 125

IV - 2 - 3 - CLASSIFICATION DES PLAGES ET CARACTÉRISTIQUES MORPHODYNAMIQUES p 126

IV - 2 - 4 - DÉMARCHE ADOPTÉE p128

**IV - 3 - ÉVOLUTION MORPHOSÉDIMENTAIRE DES PLAGES DE MAI 1992 À MAI 1993** p 133

IV - 3 - 1 - CONDITIONS HYDRODYNAMIQUES ET MÉTÉOROLOGIQUES	p 133
IV - 3 - 2 - LES PRINCIPAUX RÉSULTATS DU SUIVI TOPOGRAPHIQUE MENSUEL	p 135
IV - 3 - 2 - 1 - Comparaison des topographies de chaque profil à diverses époques	p 135
IV - 3 - 2 - 2 - Évolution topographique et granulométrique globale à l'échelle du littoral	p 148
IV - 3 - 2 - 3 - Interprétation des évolutions topographiques	p 155
<b>IV - 4 - EXPÉRIENCES DE TRAÇAGE FLUORESCENT</b>	p 160
IV - 4 - 1 - CONDITIONS HYDRODYNAMIQUES ET MÉTÉOROLOGIQUES	p 160
IV - 4 - 2 - PRINCIPAUX RÉSULTATS	p 162
IV - 4 - 2 - 1 - Résultats de l'expérience d'avril 1993	p 162
IV - 4 - 2 - 2 - Résultats de l'expérience de janvier 1994	p 169
IV - 4 - 3 - INTERPRÉTATION	p 176
<b>V - 5 - CONCLUSION GÉNÉRALE À L'ÉTUDE DU DOMAINE D'ESTRAN</b>	p 177

## **CONCLUSIONS GÉNÉRALES**

p 179

### **RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES**

P 185

ANNEXE 1

ANNEXE 2

ANNEXE 3

ANNEXE 4

## Liste des figures

**Figure 0-1** : Secteur d'étude.

**Figure 0-2** : L'étude du littoral Est dunkerquois.

**Figure I-1** : Les étapes de la transgression flandrienne en Mer du Nord (d'après Jelgersma, 1979).

**Figure I-2** : Courbes de remontée du niveau marin au cours de l'Holocène. In Vicaire (1991) d'après Ters (1973) et Jelgersma (1979).

**Figure I-3** : Évolution de la plaine maritime flamande au cours de la transgression flandrienne (Sommé, 1975).

**Figure I-4** : Premier plan de la ville de Dunkerque (archives L.N.H.).

**Figure I-5** : Évolution du banc du Schürcken (d'après Dubois, 1939).

**Figure I-6** : Percement du banc du Schürcken et prolongement des jetées du port (archives L.N.H.).

**Figure I-7** : Carte de reconnaissances hydrographiques de M. Beutemps-Beauprè en 1802 (J. Cordier, 1828). << Les chiffres de sonde expriment en pied de France (environ 33 cm) les profondeurs de l'eau réduites aux plus basses mers d'équinoxes. On a considéré et indiqué comme banc toutes les parties du fond de la mer où, réductions faites, il reste moins de 25 pieds d'eau aux basses mers d'équinoxes.>>

**Figure I-8** : Évolution du littoral de 1100 à 1910 (Briquet, 1930).

**Figure I-9** : Carte de Mardyck à Furnes entre 1648 et 1713 (Clabaut et Laboratoire de Dynamique Sédimentaire et Structurale, 1992).

**Figure I-10** : Extrait de la carte des côtes de Flandres, Coudre de la Bretonnière (1776) d'après le Service Photographique des archives nationales.

**Figure I-11** : Les fonds marins actuels au large de Dunkerque d'après les cartes 6651D et 6652D du S.H.O.M. (1985).

**Figure I-12** : Évolution schématique du littoral de Dunkerque depuis le début du XX<sup>ème</sup> siècle. (A) Extrait de la carte marine du S.H.O.M. de 1902. (B) Situation actuelle du littoral. (In Vicaire, 1991).

**Figure I-13** : Évolution des bancs et des chenaux de 1879 à 1962 (Clique, 1986).

**Figure I-14** : Situation et modifications sédimentaires récentes du domaine côtier dunkerquois.

**Figure I-15** : Historique des aménagements.

**Figure I-16** : Position des profils anciens de P1 à P6 réalisés en face de Malo-les-Bains de 1884 à 1993 et "emplacement" des brise-lames et des rechargements hydrauliques.

**Figure I-17** : Position du littoral de 1872 à 1987 d'après I.G.N. (1832, 1939 et 1987).

**Figure I-18** : Profils réalisés à Malo-les-Bains de 1884 à 1993.

**Figure I-19a** : Évolution du profil 1 de 1884 à 1993. Les principales tempêtes de vitesse

supérieure à 100 km/h sont données en italique et les aménagements sont encadrés.

**Figure I-19b** : Évolution du profil 2 de 1884 à 1993. Les principales tempêtes de vitesse supérieure à 100 km/h sont données en italique et les aménagements sont encadrés.

**Figure I-19c** : Évolution du profil 3 de 1884 à 1993. Les principales tempêtes de vitesse supérieure à 100 km/h sont données en italique et les aménagements sont encadrés.

**Figure I-19d** : Évolution du profil 4 de 1884 à 1993. Les principales tempêtes de vitesse supérieure à 100 km/h sont données en italique et les aménagements sont encadrés.

**Figure I-19e** : Évolution du profil 5 de 1884 à 1993. Les principales tempêtes de vitesse supérieure à 100 km/h sont données en italique et les aménagements sont encadrés.

**Figure I-19f** : Évolution du profil 6 de 1884 à 1993. Les principales tempêtes de vitesse supérieure à 100 km/h sont données en italique et les aménagements sont encadrés.

**Figure I-20a** : Quantification de l'érosion et de la sédimentation au niveau du profil P1 entre 1884 et 1993.

**Figure I-20b** : Quantification de l'érosion et de la sédimentation au niveau du profil P2 entre 1884 et 1993.

**Figure I-20c** : Quantification de l'érosion et de la sédimentation au niveau du profil P3 entre 1884 et 1993.

**Figure I-20d** : Quantification de l'érosion et de la sédimentation au niveau du profil P4 entre 1884 et 1993.

**Figure I-20e** : Quantification de l'érosion et de la sédimentation au niveau du profil P5 entre 1884 et 1993.

**Figure I-20f** : Quantification de l'érosion et de la sédimentation au niveau du profil P6 entre 1884 et 1993.

**Figure I-21** : Bilan générale de l'évolution topographique des profils 1 à 6 de 1884 à 1993 (Malo-les-Bains).

**Figure II-1** : les différents cycles tidaux (Tessier, 1993). (PM: pleine mer, BM : basse mer, pPM : petite basse mer, gPM: grande pleine mer, E : vive-eau, ME : morte-eau, NL : nouvelle lune, PL : pleine lune, S : soleil, T : terre, L : lune).

**Figure II-2** : La marée en mer du Nord (Brown *et al.*, 1989). (en trait plein : ligne d'égal marnage et en pointillé : ligne cotidale).

**Figure II-3** : Courbe de marée à Dunkerque pour des coefficients de 45, 70 et 95 (Bonnefille *et al.*, 1971).

**Figure II-4** : Les courants de marée aux abords de Dunkerque (d'après S.H.O.M., 1988).

**Figure II-5** : Résultantes des courants de marée aux différents points de mesure et zones d'action dominante du flot et du jusant à l'échelle régionale (Vicaire, 1991).

**Figure II-6** : Position de la station de mesure en mer et des courantomètres installés sur l'estran (Mancel, 1992). A chaque site les courantomètres ont été mis successivement en haut,

milieu et bas de plage.

**Figure II-7** : Courant de marée (vitesse et direction) au large de Bray-Dunes (Mancel, 1992)

**Figure II-8** : Courant de marée (vitesse et direction) sur l'estran de Malo-terminus (Mancel, 1992).

**Figure II-9** : Effet du vent sur le système dunaire en période de tempête (d'après Carter & Wilson, 1993).

**Figure II-10** : Rose des vents de 1951 - 1960 (d'après Bonnefille *et al.*, 1971).

**Figure II-11** : Secteurs des différentes tempêtes depuis 1961 ( d'après les données de Météo France).

**Figure II-12** : Roses des vents de 1990 à 1994 à Dunkerque (données fournies par Météo France).

**Figure II-13** : Courbes de variation du débit éolien sédimentaire (Corbau *et al.*, 1995)

**Figure II-14** : Définition des paramètres de la houle (d'après Brown *et al.*, 1988).

**Figure II-15** : Propagation de la houle (a : en eau profonde, b : e, eau peu profonde d'après Lepetit, 1977).

**Figure II-16** : Les principaux types de déferlement (d'après Brown *et al.*, 1988).

**Figure II-17** : Les principaux courants engendrés par la houle (Weber, 1989).

**Figure II-18** : Rose des houles sur la plage de Dunkerque (Bonnefille *et al.*, 1971).

**Figure II-19** : Statistiques de la houle mesurée à Dunkerque (Mancel, 1992).

**Figure II-20** : Statistiques de la houle à l'Ouest de Dunkerque (Bonnefille *et al.*, 1971).

**Figure II-21** : Modèles de propagation de la houle pour trois directions (Peltier & Le Saux, 1992).

**Figure III-1** : Situation générale d'après les cartes du S.H.O.M. n° 6651D et 6652D (1985).

**Figure III-2** : Localisation des différents groupes de bancs de sable dans partie SW de la mer du Nord (d'après Kenyon *et al.*, 1981, modifié par Vicaire, 1991, BF: Bancs de Flandres, BT : Bancs de la Tamise, BZ : Bancs de Zélande, HD : Hinder Banks).

**Figure III-3** : Carte de positionnement des prélèvements en 1988 et en septembre 1992.

**Figure III-4** : Carte de positionnement des prélèvements en juin et septembre 1993.

**Figure III-5** : Histogramme et courbe de fréquence de la répartition granulométrique d'un échantillon (A: histogramme de fréquence, GM : grain moyen, MD : médiane, SO : indice de classement).

**Figure III-6** : Localisation des profils bathymétriques.

**Figure III-7** : Localisation de la topo-bathymétrie du L.N.H..

**Figure III-8** : Méthode de mesure de la topographie et de la bathymétrie utilisée par le L.N.H. (Pujo, 1992).

**Figure III-9** : Plan de positionnement des profils sismiques.

**Figure III-10** : Profils bathymétriques réalisés en septembre 1992 (A) et en juin 1993 (B).

- Figure III-11** : Exemples de profils bathymétriques montrant des dunes hydrauliques.
- Figure III-12** : Diagramme de la vitesse moyenne du flux en fonction de la taille des particules qui indique le domaine de stabilité des différentes structures transverses. Les vitesses et la taille des sédiments ont été normalisées pour une température d'eau de 10°C (Ashley, 1990).
- Figure III-13** : Conditions météorologiques au cours des missions de septembre 1992, juin 1993 et septembre 1993 (données fournies par Météo France).
- Figure III-14** : Carte de répartition des types sédimentaires établie par Vicaire (1991).
- Figure III-15** : Carte de répartition des types sédimentaires en septembre 1992.
- Figure III-16** : Carte de répartition des types sédimentaires en juin 1993.
- Figure III-17** : Carte de répartition des types sédimentaires en septembre 1993.
- Figure III-18** : Répartition du grain moyen en 1988 (en  $\mu\text{m}$ ).
- Figure III-19** : Répartition du grain moyen en septembre 1992 (en  $\mu\text{m}$ ).
- Figure III-20** : Répartition du grain moyen en juin 1993 (en  $\mu\text{m}$ ).
- Figure III-21** : Répartition du grain moyen en septembre 1993 (en  $\mu\text{m}$ ).
- Figure III-22** : Répartition de l'indice de classement en 1988.
- Figure III-23** : Répartition de l'indice de classement en septembre 1992.
- Figure III-24** : Répartition de l'indice de classement en juin 1993.
- Figure III-25** : Répartition de l'indice de classement en septembre 1993.
- Figure III-26** : Les stades évolutifs d'un banc (Caston, 1972).
- Figure III-27** : Schéma de transport par les courants de marée au niveau des jetées d'un port (L.N.H., 1978).
- Figure III-28** : Reconstruction de la structure interne des bancs du Snouw et du Braek (d'après Tessier *et al.*, 1995).
- Figure III-29** : Schéma général de l'organisation interne des bancs (d'après Tessier *et al.*, 1995).
- Figure III-30** : Carte de différentiel établie entre avril 1992 et octobre 1992.
- Figure III-31** : Carte de différentiel établie entre octobre 1992 et juin 1993.
- Figure III-32** : Carte de différentiel établie entre juin 1993 et septembre 1993.
- Figure III-33** : Carte de différentiel établie entre septembre 1993 et juin 1994.
- Figure III-34** : Carte de différentiel établie entre juin 1994 et décembre 1994.
- Figure III-35** : Modèle de circulation dominante en période de beau temps établi à partir de l'analyse des variations sédimentaires et de bathymétrie de 1988 à 1994.
- Figure III-36** : Modèle de circulation dominante en période de "tempêtes" établi à partir de l'analyse des variations sédimentaires et de bathymétrie de 1988 à 1994.
- Figure IV-1** : Présentation générale du site.
- Figure IV-2** : Coupe morphologique, A : général, B : à Dunkerque.
- Figure IV-3** : Formation des barres (d'après I : Long & Ross, 1989 et II : Zhang *et al.*, 1994).

**Figure IV-4** : Abaque établie par le L.C.H.F. donnant la vitesse de chute des particules.

**Figure IV-5** : Position des profils topographiques suivis de mai 1992 à mai 1993.

**Figure IV-6** : Position des points d'immersion des deux expériences de traçage fluorescent.

**Figure IV-7** : Données de vent précédant la réalisation des profils topographiques, **A** : mai 1992, **B** : juin 1992, **C** : juillet 1992, **D** : septembre 1992, **E** : Octobre 1992, **F** : novembre 1992, **G** : février 1993, **H** : mars 1993, **I** : mai 1993.

**Figure IV-8** : Profil P0 de mai 1992 à mai 1993 - Évolution de la topographie, de la pente et quantification de l'érosion et de la sédimentation.

**Figure IV-9** : Profil P7 de mai 1992 à mai 1993 - Évolution de la topographie, de la pente et quantification de l'érosion et de la sédimentation.

**Figure IV-10** : Profil P8 de mai 1992 à mai 1993 - Évolution de la topographie, de la pente et quantification de l'érosion et de la sédimentation.

**Figure IV-11** : Profil P9 de mai 1992 à février 1993 - Évolution de la topographie, de la pente et quantification de l'érosion et de la sédimentation.

**Figure IV-12** : Profil P10 de mai 1992 à mai 1993 - Évolution de la topographie, de la pente et quantification de l'érosion et de la sédimentation.

**Figure IV-13** : Profil P11 de mai 1992 à mai 1993 - Évolution de la topographie, de la pente et quantification de l'érosion et de la sédimentation.

**Figure IV-14** : Profil P12 de mai 1992 à mai 1993 - Évolution de la topographie, de la pente et quantification de l'érosion et de la sédimentation.

**Figure IV-15** : Bilan général de l'évolution de la topographie du mois de mai 1992 à mai 1993.

**Figure IV-16** : Profils topographiques réalisés le 26 et 27 mai 1992.

**Figure IV-17** : Répartition du grain moyen le long de chaque profil.

**Figure IV-18** : Profils topographiques réalisés le 16 et 17 juin 1992.

**Figure IV-19** : Profils topographiques réalisés le 30 et 31 juillet 1992.

**Figure IV-20** : Profils topographiques réalisés le 12 septembre 1992.

**Figure IV-21** : Profils topographiques réalisés le 21 et 22 octobre 1992.

**Figure IV-22** : Profils topographiques réalisés le 17 et 18 novembre 1992.

**Figure IV-23** : Profils topographiques réalisés au mois de février 1993.

**Figure IV-24** : Profils topographiques réalisés au mois de mars 1993.

**Figure IV-25** : Profils topographiques réalisés le 26 et 27 mai 1993.

**Figure IV-26** : Répartition de l'indice de classement en fonction du grain moyen.

**Figure IV-27** : Profil d'équilibre établi pour Dunkerque selon le principe de Dean (1990).

**Figure IV-28** : Vitesses et directions des courants de marée (moyennes sur 25 marées de coefficients de 70 à 95).

**Figure IV-29** : Houles à Dunkerque Est en Avril 1993.

**Figure IV-30** : Conditions météorologiques pendant la mission du mois d'avril 1994.

**Figure IV-31** : Houle et courant de marée du 16 au 17 janvier 1994 (Chapalain, 1994).

**Figure IV-32** : Conditions météorologiques pendant la mission du mois de janvier 1994.

**Figure IV-33** : Principaux résultats au point ML93 (secteur aménagé).

**Figure IV-34** : Évolution du centre de gravité au point ML93.

**Figure IV-35** : Évolution de la topographie au point ML93 parallèlement au traçage fluorescent en avril 1993.

**Figure IV-36** : Quantification des transits sédimentaires au point ML93.

**Figure IV-37** : Détermination du sens du transport à partir du diagramme de transport et du diagramme cumulé au point ML93.

**Figure IV-38** : Principaux résultats au point DUN93 (secteur naturel).

**Figure IV-39** : Évolution du centre de gravité au point DUN93.

**Figure IV-40** : Évolution de la topographie au point DUN93 parallèlement au traçage fluorescent en avril 1993.

**Figure IV-41** : Quantification des transits sédimentaires au point DUN93.

**Figure IV-42** : Principaux résultats au point ML94.

**Figure IV-43** : Évolution du centre de gravité au point ML94.

**Figure IV-44** : Évolution de la topographie au point ML94 parallèlement au traçage fluorescent en janvier 1994.

**Figure IV-45** : Principaux résultats au point MLE94.

**Figure IV-46** : Évolution du centre de gravité au point MLE94.

**Figure IV-47** : Évolution de la topographie au point MLE94 parallèlement au traçage fluorescent en janvier 1994.

## Liste des tableaux

**Tableau I-1** : Les transgressions Calaisiennes et Dunkerquiennes (d'après Hageman, 1969 ; Jelgersma, 1979 ; Houthuys *et al.*, 1993).

**Tableau I-2** : Ages et caractéristiques des transgressions Dunkerquiennes (d'après Dubois, 1939 ; Paepe, 1960 ; Flatres-Mury, 1966).

**Tableau II-1** : Les principaux coefficients de marée (d'après S.H.O.M., 1968).

**Tableau II-2** : Caractéristiques de la houle au large dans le secteur Ouest du site.

**Tableau II-3** : Principaux résultats obtenus par le calcul RECIF (Peltier & Le Saux, 1992).

**Tableau III-1** : Principales caractéristiques des bancs sableux appartenant au secteur d'étude (les valeurs positives indiquent que le banc émerge lors des plus grandes basses mers).

**Tableau III-2** : Récapitulatif des opérations effectuées en mer de 1988 à 1994.

**Tableau III-3** : Les principales caractéristiques des quatre types sédimentaires (d'après Vicaire, 1991).

**Tableau III-4** : Classement des échantillons selon leur paramètre de taille (d'après Folk & Ward, 1957).

**Tableau III-5** : Principales caractéristiques des bancs sableux côtiers au large de Dunkerque obtenus à partir de l'analyse des profils bathymétriques (les hauteurs des bancs sont mesurées à partir du fond des chenaux latéraux).

**Tableau III-6** : Conditions hydrodynamiques et météorologiques précédant les campagnes des mois de septembre 1992, juin 1993 et septembre 1993.

**Tableau III-7** : Caractéristiques générales et répartitions des différents types sédimentaires.

**Tableau III-8** : Les conditions météorologiques précédant les levés topo-bathymétriques (ve : vive-eau, me : morte-eau, pve : petite vive-eau, gve : grande vive-eau).

**Tableau III-9** : Principaux résultats obtenus à partir des cartes de différentiel. (VE : vive-eau, ME : morte-eau, p VE : petite vive-eau, g VE : grande vive-eau, **E** : **érosion dominante**, e : érosion, **S** : **sédimentation dominante**, s : sédimentation).

**Tableau III-10** : Conditions météorologiques et hydrodynamiques et tendances saisonnières. (MT : mauvais temps, BT : beau temps, GVE : grande vive-eau, VE : vive-eau).

**Tableau IV-1** : Définition du type des plages du littoral dunkerquois d'après le concept morphodynamique de Whright *et al.* (1979) et Masselink (1993). Voir encadré IV-1 pour le détail des calculs. Les données de viscosité proviennent de Le fevre-Lehoerff *et al.* (1991) et les données de houle de Mancel (1993). ( $\omega$  : vitesse de chute des particules calculée selon l'équation de Van Rijn ou selon l'abaque établie par le L.C.H.F.).

**Tableau IV-2** : Récapitulatif des opérations réalisées sur l'estran.

**Tableau IV-3** : Récapitulatif des données de vent, de régime de marée et de mer pour une période de 10 jours précédant chaque levé des profils (Etat de la mer 1 : ridée ; 2 : belle ; 3 : peu agitée ; 4 : agitée).

**Tableau IV-4** : Bilan global de l'évolution topographique des différents profils réalisés de mai 1992 à mai 1993 (E : érosion, E : érosion importante, O : stable; S : sédimentation, S : sédimentation importante, U : urbanisé, N : naturel, MIB : Malo-les-Bains, Leff : Leffrinckoucke, Bat Z : Batterie de Zuydcoote, H Z : Hôpital de Zuydcoote, W BD : Ouest de Bray-Dunes, BD : Bray-Dunes, E BD : Est Bray-Dunes).

**Tableau IV-5** : Observations faites au point ML93.

**Tableau IV-6** : Observations faites au point DUN93.

**Tableau IV-7** : Observations faites au point ML94.

**Tableau IV-8** : Observations faites au point MLE94.

## Annexes

### Annexe 1

- Figure 1** : Plan de la ville de Dunkerque en 1660 (Bryche, 1995). p 214
- Figure 2** : Carte de Dunkerque établie par Jefferys en 1757 qui montre le canal de Mardyck (In Tilly, 1979). p 215
- Figure 3** : Plan de Dunkerque de 1836 (Bryche, 1995). p 216
- Figure 4** : Plan de Dunkerque de 1896 (Bryche, 1995). p 217

### Annexe 2

- Figure 1** : Disposition et fonctionnement des épis (d'après Lalaut, 1992). p 218
- Figure 2** : Classification des changements morphologiques dus à la présence d'ouvrages. Les flèches indiquent la direction du transport sédimentaire résultant (In Horikawa, 1988). p 219
- Figure 3** : Fonctionnement d'un brise-lames (d'après Lalaut, 1992). p 218

### Annexe 3

- Figure 1** : Carte de répartition de la médiane en 1988 (en  $\mu\text{m}$ ). p 220
- Figure 2** : Carte de répartition de la médiane en septembre 1992 (en  $\mu\text{m}$ ). p 220
- Figure 3** : Carte de répartition de la médiane en juin 1993 (en  $\mu\text{m}$ ). p 221
- Figure 4** : Carte de répartition de la médiane en septembre 1993 (en  $\mu\text{m}$ ). p 221

### Annexe 4

- Figure 1** : Concept morphodynamique. p 222
- Figure 2** : Concept morphodynamique appliquée aux plages macrotidales (Masselink, 1993). p 223

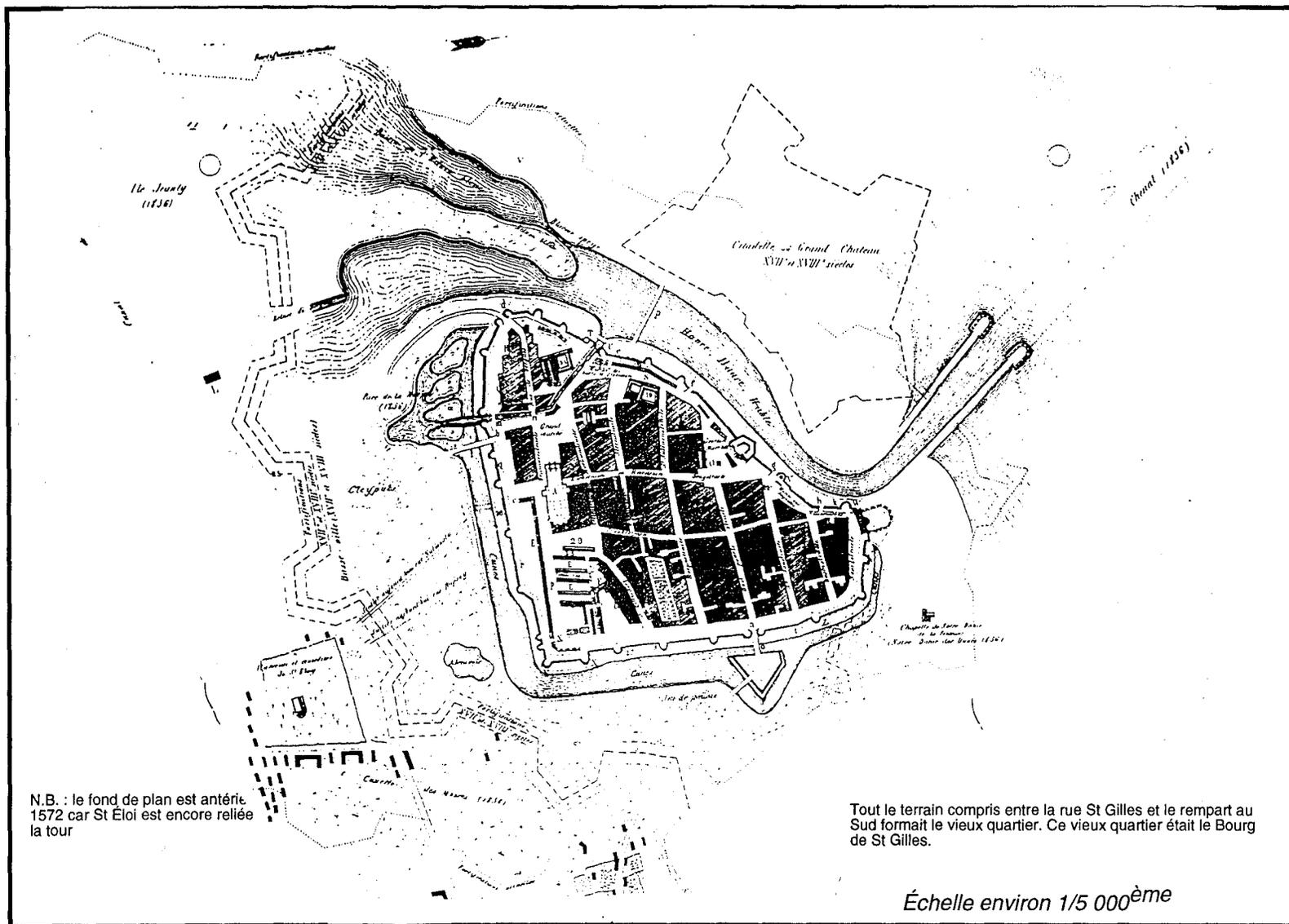


Figure 1 : Plan de la ville de Dunkerque en 1660 (Bryche, 1995).

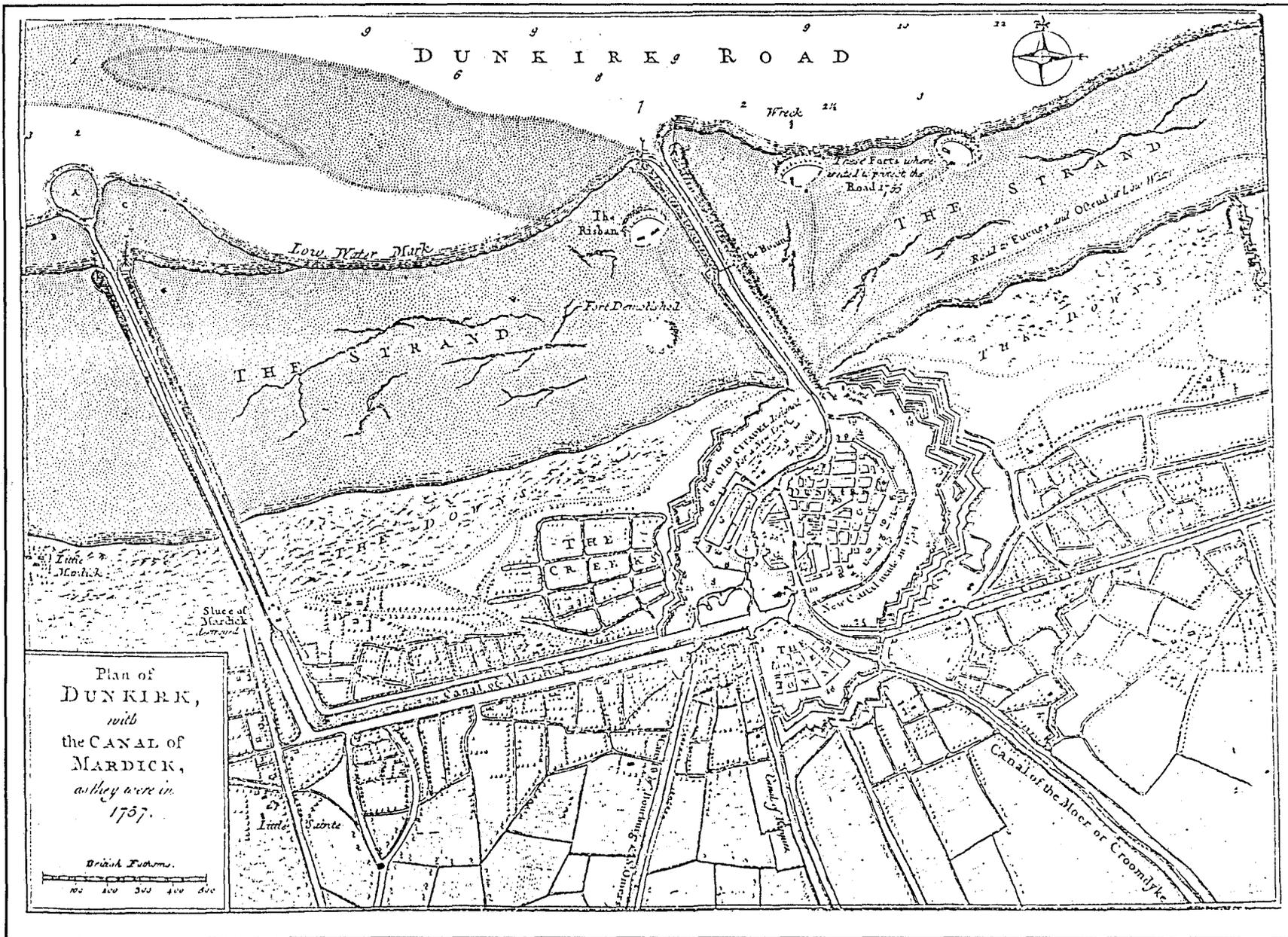
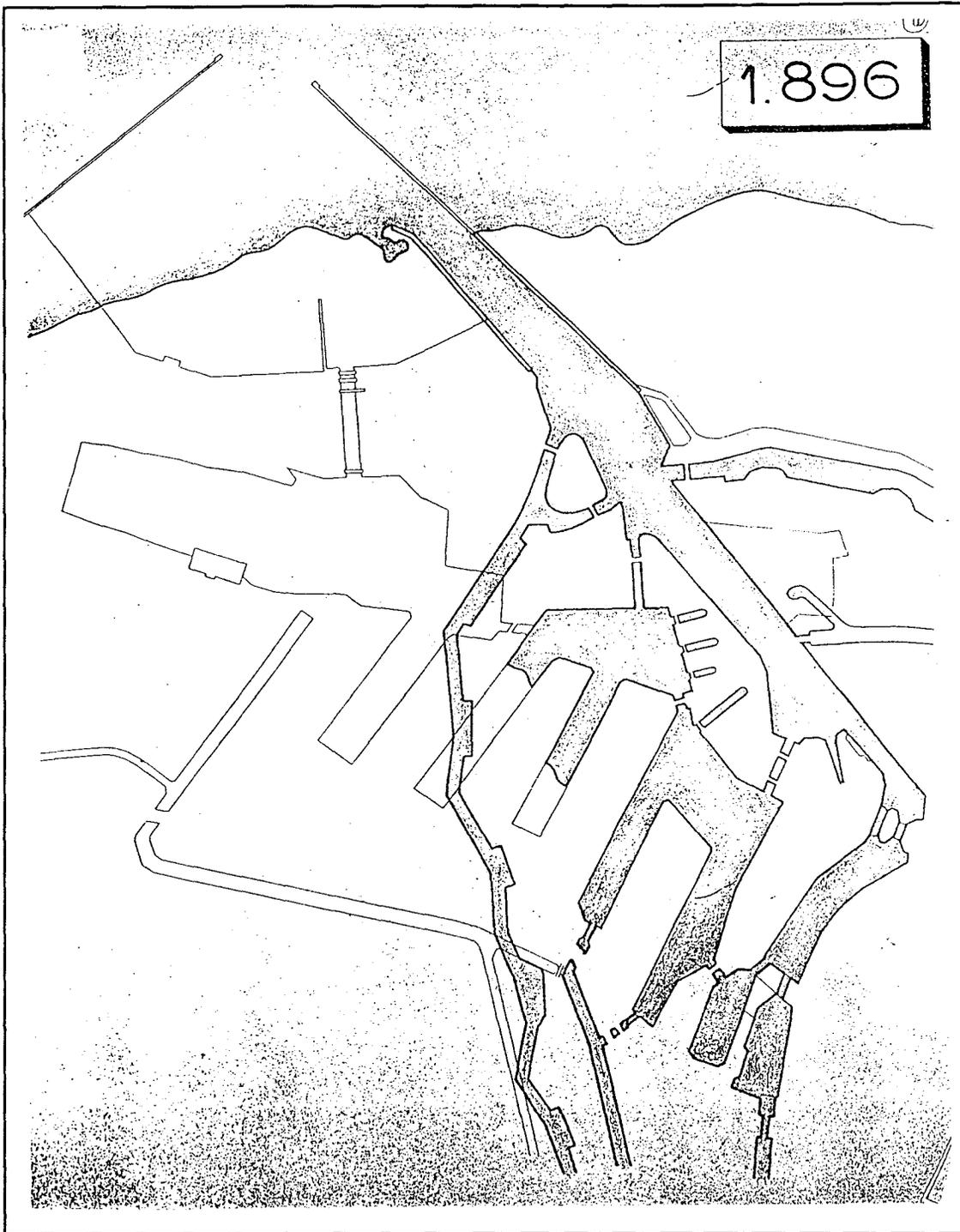


Figure 2 : Carte de Dunkerque établi par Jefferys en 1757 qui montre le canal de Mardyck (in Tilly, 1979)



Figure 3 : Plan de Dunkerque de 1836 (Bryche, 1995)



**Figure 4** : Plan de Dunkerque de 1896 (Bryche, 1995)

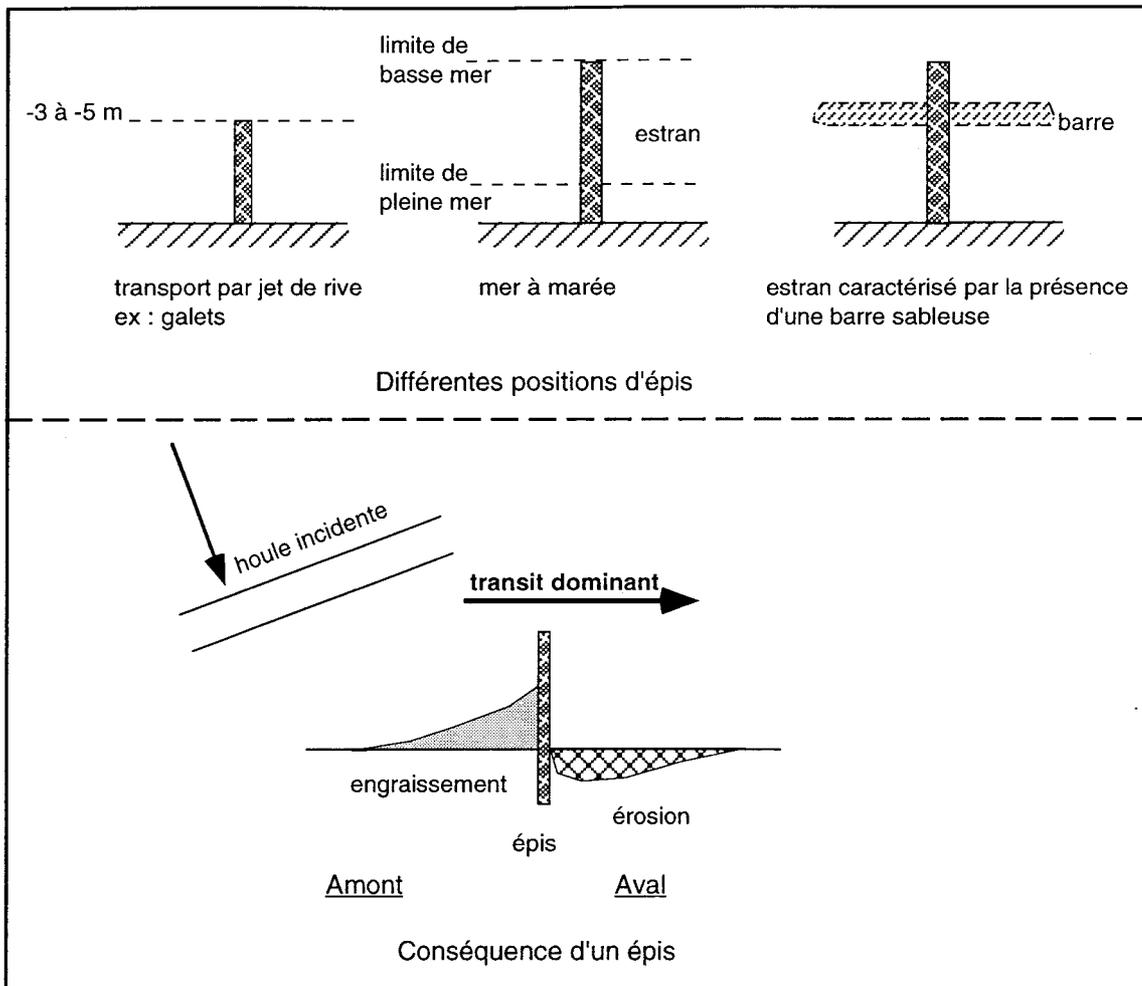


Figure 1 : Disposition et fonctionnement des épis (d'après Lalaut, 1992)

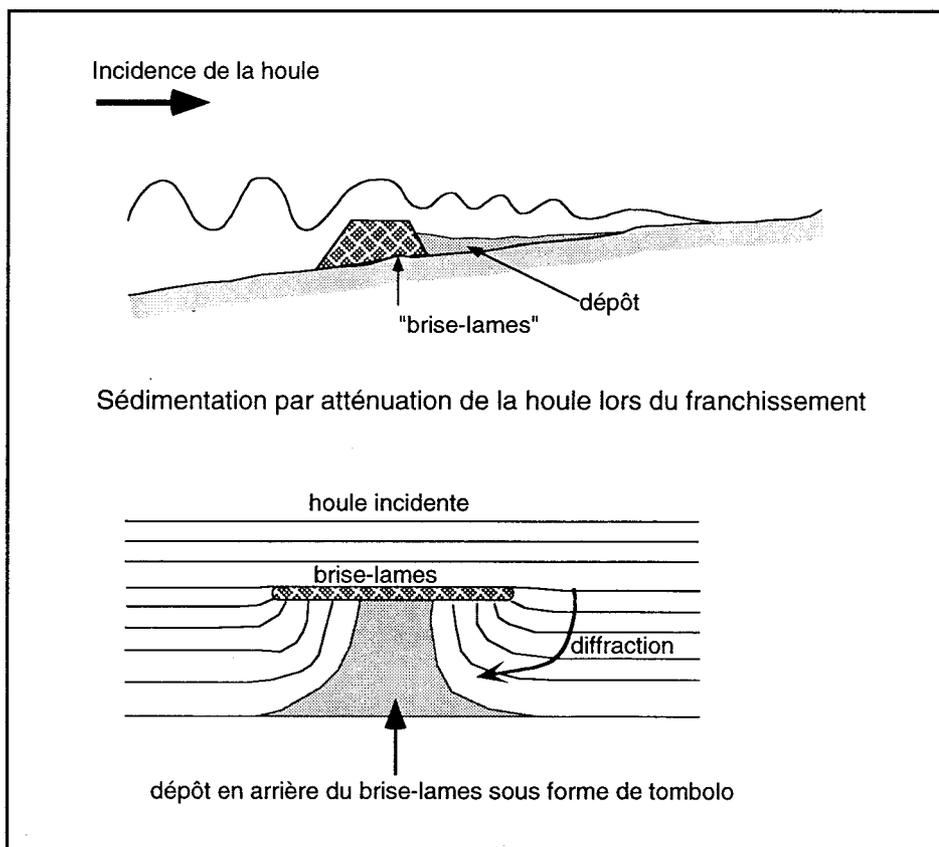
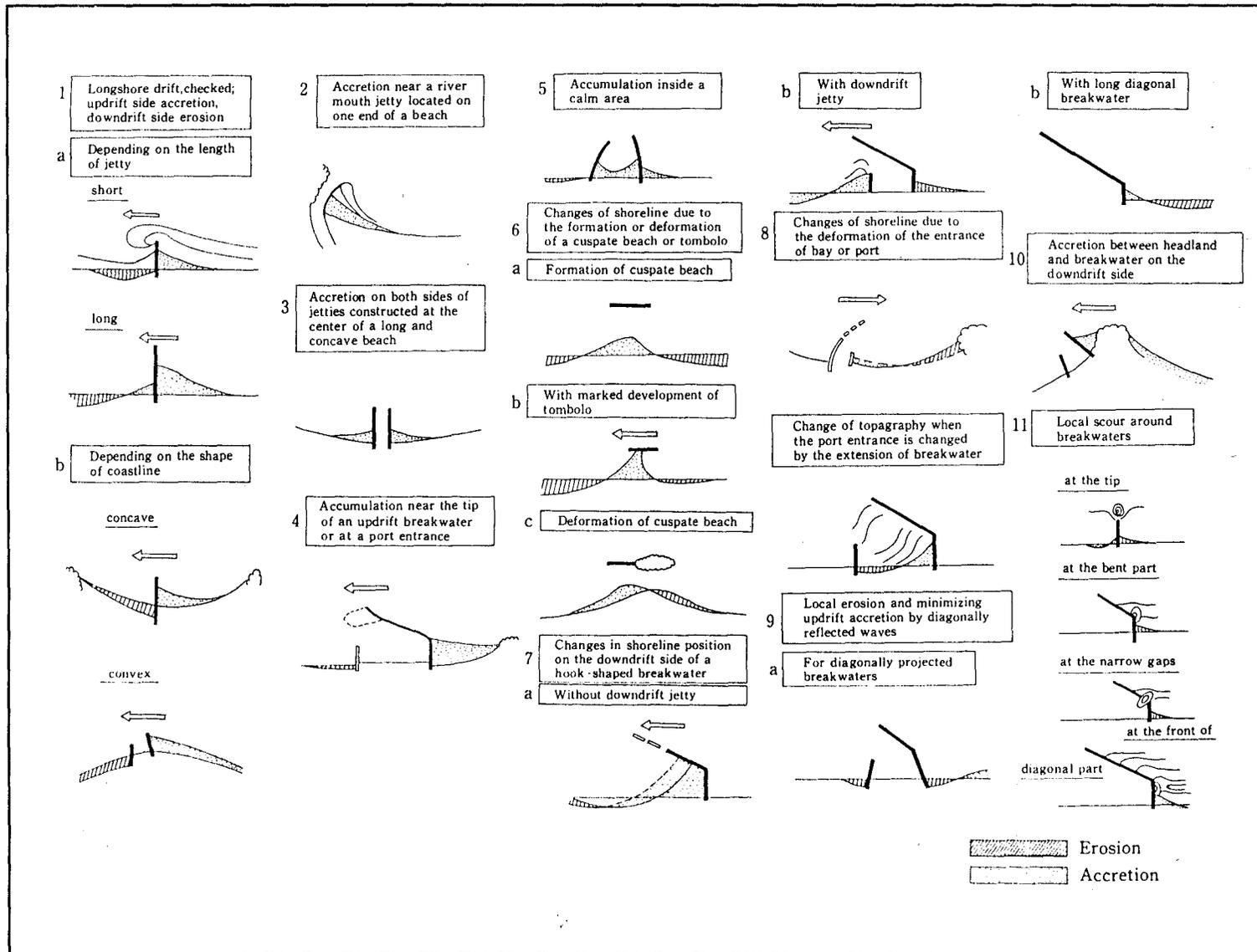


Figure 3 : Fonctionnement d'un brise-lames (d'après Lalaut, 1992)



**Figure 2 :** Classification des changements morphologiques dus à la présence de ouvrages. Les flèches indiquent la direction du transport sédimentaire résultant ( In Horikawa, 1988)

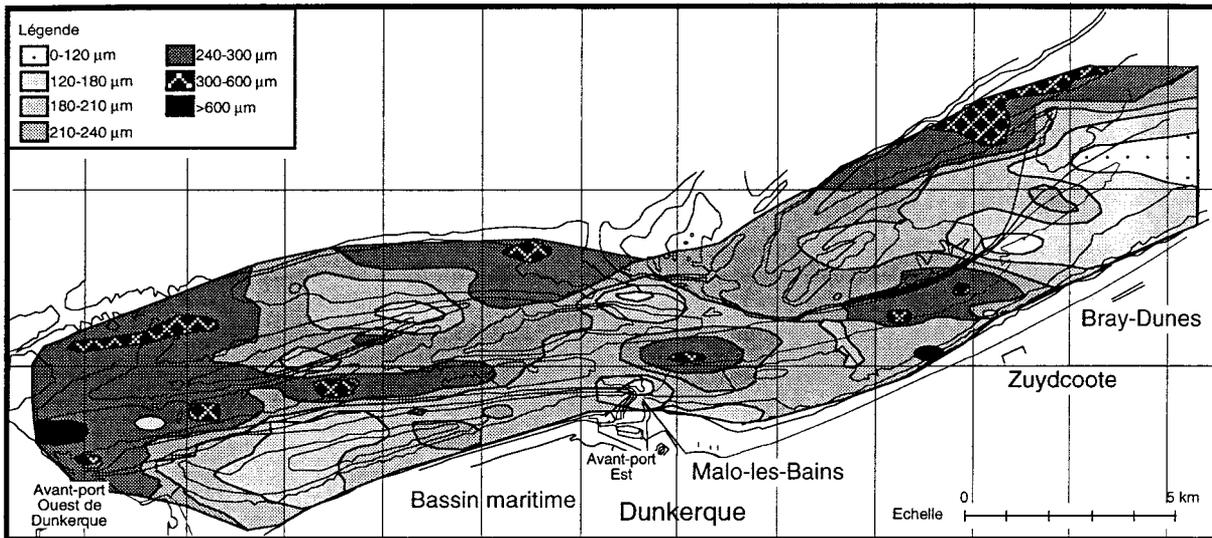


Figure 1 : Cadre de répartition de la médiane en 1988 (en µm)

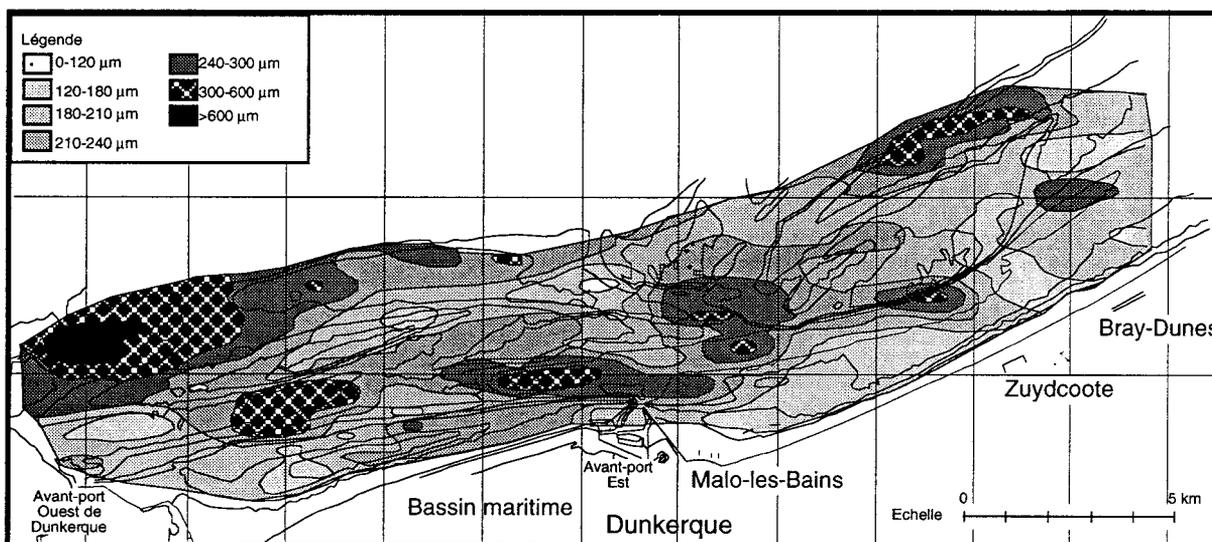
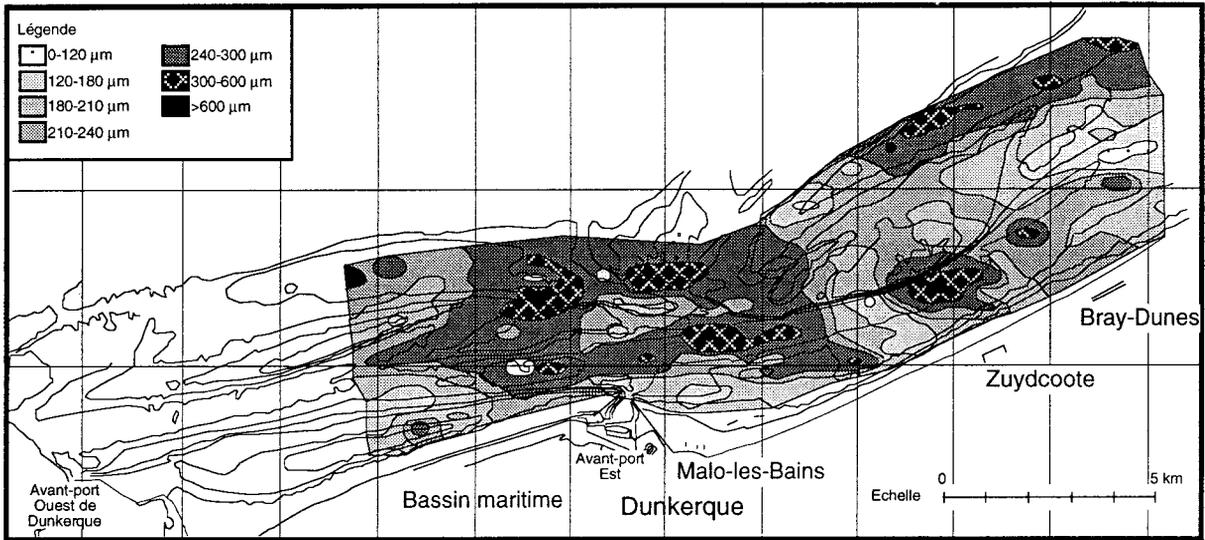
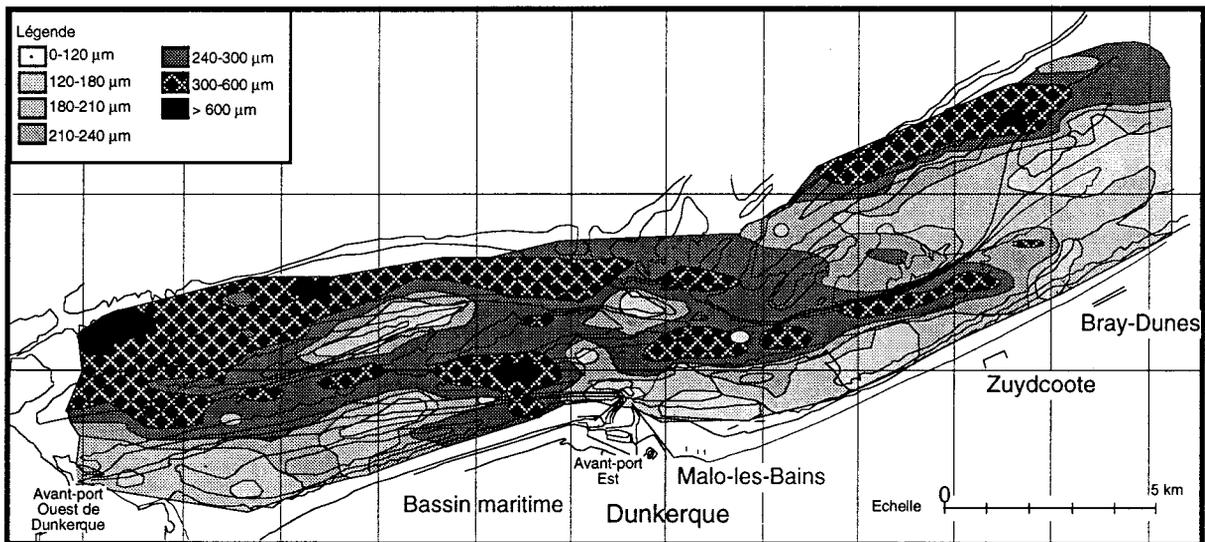


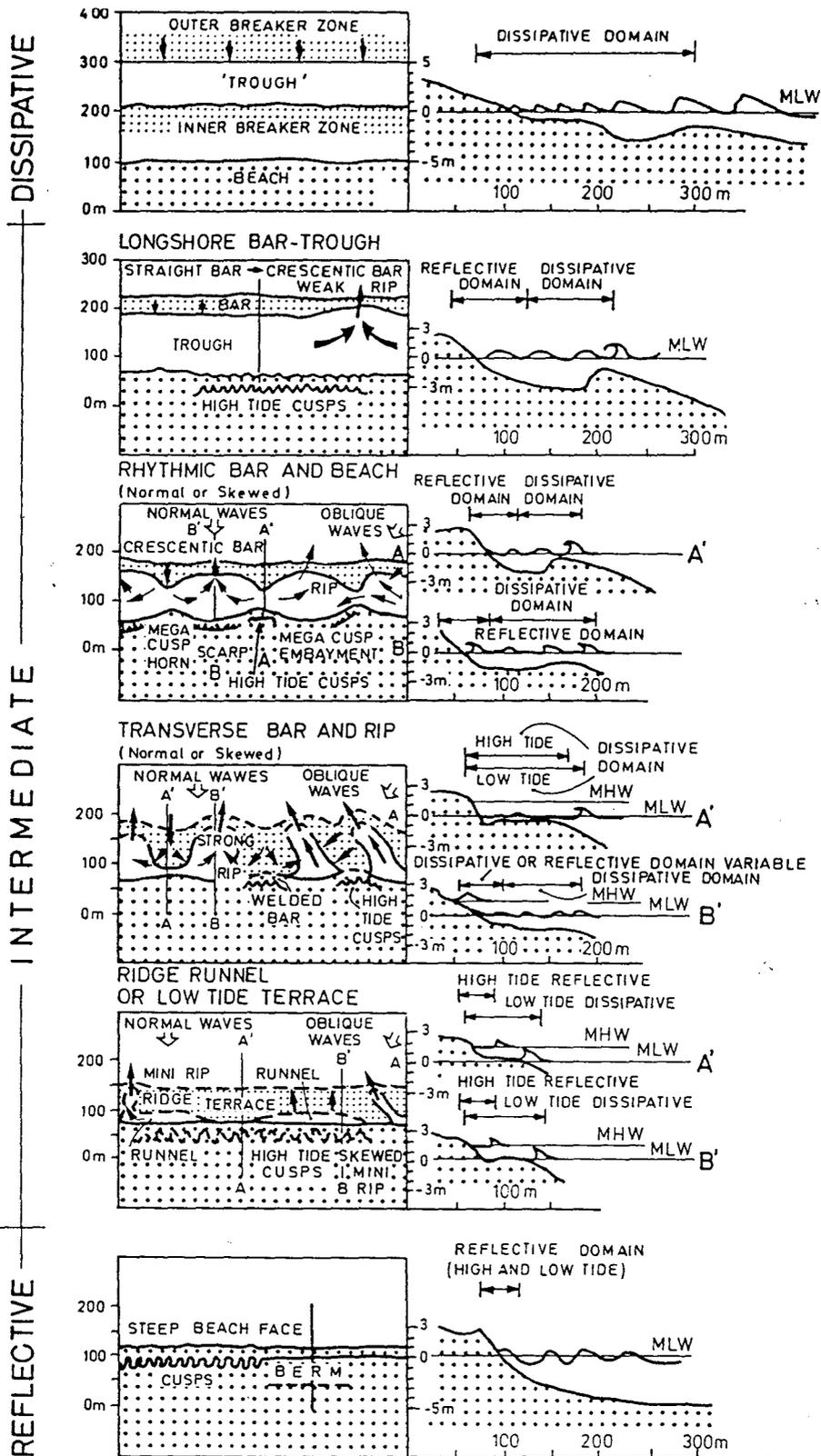
Figure 2 : Répartition de la médiane en septembre 1992 (en µm)



**Figure 3 :** Répartition de la médiane en juin 1993 (en µm)

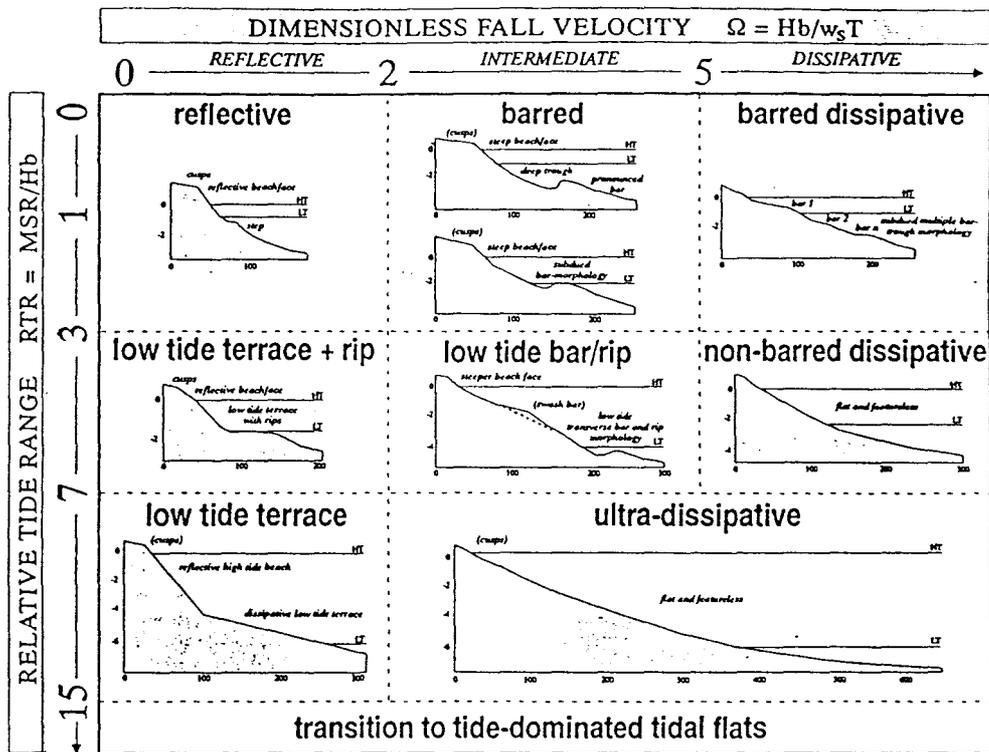


**Figure 4 :** Répartition de la médiane en septembre 1993



Plan and profile configuration of the three beach types (dissipative, intermediate and reflective) and six beach stages. (Modified after Wright and Short 1983)

Figure 1: Concept morphodynamique



Conceptual beach model. Beach state is a function of dimensionless fall velocity ( $\Omega = Hb/w_s T$ ) and relative tide range ( $RTR = TR/H_s$ ). HT and LT refer to mean high tide and mean low tide level, respectively.

**Figure 2 :** Concept morphodynamique appliquée aux plages macrotidales (Masselink, 1993)