

Oostende - Belgium
 FLANDERS MARINE INSTITUTE
 VLAAMS INSTITUUT VOOR DE ZEE
 VLIZ (VZW)

PREMIERS EFFETS DU REHAUSSEMENT ARTIFICIEL
 D'UNE PLAGE SABLEUSE LE LONG DE LA COTE BELGE

par

G. DE MOOR

*Geologisch Instituut, Rijksuniversiteit Gent
 Krijgslaan 271, B-9000 GENT (Belgique)*

R E S U M E

En utilisant des profils de plage et des bilans résiduels, l'auteur montre d'abord l'effet d'une mégaprotubérance côtière érosive, attaquant un secteur de la côte belge et caractérisée par un abaissement de l'estran et un recul du front dunaire. Par après il suit, au cours de ses premiers six mois, l'évolution d'une plage rehaussée par la méthode Longard, et s'étendant sur une partie de la zone démaigrée, tout en la comparant avec celle de la plage adjacente non rehaussée.

A B S T R A C T

Mainly by beach profiling and beach budget computation the author studies the evolution of an erosional coastal megaprotuberance, hitting a section of the Belgian coast and provoking a lowering of the beach and a retreat of the dune foot. He elaborates a comparison of the first six months evolution of an artificial beach in that section made by sand nourishment using the Longard method, and that one of the adjacent natural beach.

M O T S - C L E S : Profil de plage, Erosion de plage, Structures humaines littorales.

K E Y W O R D S : Beach profile, Beach erosion, Man-made coastal structures.

1. INTRODUCTION

Entre le Cap Blanc Nez, où débute vers l'ouest une côte à falaises crayeuses ou gréseuses et à baies développés dans la boutonnière du Boulonnais et l'embouchure de l'Escaut, où commence vers l'est le complexe deltaïque-estuarien Escaut-Meuse-Rhin, s'étend une côte essentiellement rectiligne et sableuse. La côte belge qui en fait partie, se prolonge sur 65 km. Elle est orientée vers le N 55° E à l'ouest de Wenduine, à partir d'où elle se dirige vers l'ENE.

Elle est constituée d'un estran de sable fin (tableau 1), à pente généralisée très faible (tableau 2), adossé à une cordon dunaire ne dépassant que rarement l'altitude +20 m (N.O.) et devancé par une zone pré-littorale de faible profondeur (fig. 1). La première isobathe de 5 m (en dessous de MMBBVE) se situe vers 1500 m en avant du trait de côte. Plus au loin, l'avant-côté se continue dans la zone des Bancs de Flandre qui est constituée de rangées de bancs et de passes tapissant le fond d'une mer épicon-tinentale peu profonde. Ces rangées sont plus ou moins parallèles à la côte. Une première, située entre 2 et 6 km au devant de la côte comporte des éléments parallèles ou légèrement obliques à celle-ci. Une rangée plus avancée, se situant vers 10 à 15 km au devant de la côte, comprend des éléments à obliquité plus importante. Ces bancs sont considérés respectivement comme dunes paraboliques de courant de flot et de courant de jusant (J. VAN VEEN, 1936). Les détails de leurs déplacements, de leurs changements morphologiques et de leur dynamisme sédimentologique ne sont que peu connus (C. VAN CAUWENBERGHE, 1971).

L'estran même comprend un bas de plage de type à crêtes et à sillons parallèles à la côte. Les dénivellations entre crêtes et sillons ne dépassent que rarement 1,0 m. Le nombre de crêtes émergées peut atteindre 3 à 4 par mer basse de vive eau. Un système de crêtes et de sillons surbaissés se continue sur le fond même de la zone pré-littorale. Le cordon littoral est faiblement développé et s'étend sur une largeur de 30 à 50 m. Une crête de plage de quelque importance y manque le plus souvent. Le trait de côte ne se marque morphologiquement que très rarement. De faibles gradins de plage sont souvent visibles entre la laisse de pleine mer de vive eau et celle de morte eau, plus spécialement au cours des périodes en morte eau.

Les caractéristiques morphographiques (tableau 1) et sédimentologiques varient quelque peu le long de cette côte. Ces variations géographiques longitudinales sont toutefois moins importantes que les variations sédimentologiques en fonction de la micromorphologie transversale (tableau 2) et que les changements saisonniers que connaît cette micromorphologie et dont une des caractéristiques est la transition d'une plage d'été à crêtes et à sillons bien marqués vers un bas de plage d'hiver, montrant une succession de gradins, à peine masqués par la présence d'ondes sableuses longitudinales longeant l'emplacement des crêtes.

Du point de vue dynamique, c'est une côte ouverte, macrotidale (tableau 3), à marée semi-diurne avec une nette différence d'amplitude entre les marées de vive eau et celles de morte eau et une différence assez importante entre les hauteurs de basse mer de vive eau et celle de morte eau. La hauteur et l'amplitude des marées diminue légèrement de l'ouest vers l'est (tableau 3).

Dans la zone d'avant-côte, les courants de marée, régis par le centre amphidromique en face du Suffolk, sont essentiellement orientés vers le nord-est par pleine mer et vers l'ouest par basse mer. Les vitesses maximales peuvent monter jusqu'à 3,1 noeuds par pleine mer. Un second maximum, moins important, se place vers deux heures avant la basse mer. Très souvent les vitesses maximales en vive eau atteignent le double de celles en morte eau. Le courant de reflux est de plus longue durée que celui de flux et cette différence augmente vers l'ouest, atteignant 35 minutes en face de Nieuwpoort. (Service hydrographique de la côte). Sur la côte même, la vitesse de montée et de descente de la marée correspond assez bien à la règle des douzièmes ce qui est important pour la différenciation hydrodynamique et morphologique de l'estran.

Par son orientation et sa position dans l'ensemble de la Mer du Nord méridionale, la côte belge connaît un dynamisme littoral fortement influencé, non seulement par la force et la direction des vents, mais également par leur haute variabilité et par la passage de dépressions sur la Mer du Nord. Par vent du nord-ouest, force Beaufort 9, la surélévation peut atteindre 0,8 à 1 m et une dépression de 30 mm y provoquer une surélévation de 30 cm.

La stabilité géographique et hypsométrique des bancs d'avant-côte et des crêtes de bas de plage forment un autre facteur qui influence la dynamique littorale soit par sa signification pour les changements des courants dans la zone pré-littorale, soit par son importance pour les caractéristiques des vagues dans la zone littorale.

Sauf en ce qui concerne l'influence du dynamisme estuarien de l'Escaut Occidental, cette côte n'est que très peu affectée par des apports de l'arrière pays. L'embouchure du petit bassin côtier de l'Yzer, largement situé en région poldérienne, ne se marque que très peu, et celle du Zwin est actuellement réduit à un chenal de schorre. Oostende, Blankenberge et Zeebrugge connaissent des exutoires creusés à travers les dunes et qui actuellement servent à l'évacuation des eaux des polders.

Le cordon dunaire en place s'est développé après la transgression du Dunkerque 2. Il repose localement sur des noyaux de dunes moyennes (Klemskerke) ou même anciennes (à l'ouest de De Panne) ou sur la tourbe de surface qui même peut affleurer en avant des dunes, formant localement une plateforme d'abrasion (Middelkerke). Le substrat géologique de cette côte est généralement formé de dépôts marins atlantiques discontinus, localement surmontés de tourbe de surface et reposant sur des dépôts sableux fluviopéniglaciaires Weichseliens surmontant eux-mêmes des forma-

tions littorales Eemiennes. La base érosive des formations quaternaires, recoupant le substrat tertiaire constitué d'argiles et sables, à minces couches gréseuses éocènes, se situe vers le niveau -25 à -35 m (N.O.). Le cordon dunaire s'est développé à l'avant d'un paysage de wadden Dunkerquiens qui à partir de la transgression Dunkerque 2 à progressivement été endigué et changé en polders de la plaine côtière.

La stabilité tectonique holocène est prouvée par le fait que, dans cette plaine côtière qui s'étend jusqu'à une dizaine de kilomètres en arrière des dunes, dépôts sommitaux des wadden et cordons littoraux de la mer Eemienne (E4) se rencontrent à la même altitude que les dépôts de wadden Dunkerquiens (G. DE MOOR e.a., 1973).

Fin 1977, des structures de défense se continuaient tout au long de la côte belge, à l'exception de la zone Klemskerke-Wenduine et de la section Nieuwpoort-Koksijde. Ces structures sont constituées de digues longitudinales devancées d'épis (à l'ouest de De Panne; à De Haan) ou d'épis sans digues (e.a. entre Bredene et Klemskerke). Fin 1978 deux zones avaient été pourvues de rehaussements artificiels, notamment la zone à l'est de Duinbergen-Knokke om des sables ont été pompés en 1957 et à nouveau en 1978, et la zone de Bredene, rehaussée en 1978, et où le rehaussement sera prolongée vers l'est sur 2 km en 1979. En de nombreux endroits on essaie de capter du sable en transport éolien ou de fixer les dunes.

Des passes artificielles transversales sont entretenues pour l'accès de Nieuwpoort, d'Oostende et de Zeebrugge. Le seul ouvrage important est le môle de Zeebrugge qui se prolonge sur 2 km mais qui, vers l'est, se courbe progressivement parallèlement à la côte.

2. PROTUBERANCES EROSIVES

Depuis quelques dizaines d'années certains secteurs de la côte belge sont soumis à un phénomène de démaigrissement qui s'étend sur quelques kilomètres de côte, gagne graduellement en intensité et se développe progressivement en longueur de côte. Il se continue avec des intensités variables, étant surtout activé par de fortes tempêtes. Ces protubérances érosives affectent aussi bien des secteurs à structures de défense que des secteurs qui actuellement en sont dépourvus. Elles provoquent un abaissement de la plage sur une certaine longueur de côte. Dans les secteurs sans digues longitudinales cet abaissement est accompagné d'un recul soit seulement de la ligne de flexion, soit (le plus souvent toutefois) du pied de dune, provoquant ainsi le sapement du front de dune avec formation d'une falaise de sapement et un recul du front de dune par glissement massif ou localisé. Là où le front dunaire est peu élevé ou de faible largeur, les dunes sont menacées d'être percées par temps de tempête. Le sable dunaire répandu sur le cordon littoral est alors repris par les mécanismes érosifs agissant sur l'estran, spécialement au cours des périodes de vive eau. Tout en étant continuellement recyclé par l'action des vagues, par celle des marées et par les mécanismes des sillons, ce sable transite par le bas de plage, peut temporairement être stocké dans sa partie la plus basse, mais disparaît néanmoins lentement de la section sans qu'il y ait des indications que ce soit autrement qu'en rejoignant la zone d'avant-côte.

Ces protubérances érosives sont chronologiquement cycliques et géographiquement répétitives. Elles font partie de mégaproturbérance côtières (G. DE MOOR, 1979), constituées d'une alternance de phases érosives et accumulatives qui affectent successivement des secteurs côtiers s'étendant sur plusieurs kilomètres et se prolongent au cours de plusieurs dizaines d'années, tout au moins en ce qui concerne le secteur étudié de la côte belge. Leurs causes et mécanismes ne sont toutefois pas élucidés. Elles ont été mises en rapport avec des déplacements et des changements hypsographiques affectant simultanément plusieurs bancs et crêtes de l'avant-côte et de la plage même (G. DE MOOR, 1979).

Une protubérance érosive a atteint le secteur entre Heyst et Knokke dans la période 1935-1955, provoquant un démaigrissement des plages, un déchaussement des digues et un recul des dunes dans les sections non endiguées longitudinalement. Elle a culminé dans un paroxysme érosif lors de la grande tempête du 1 février 1953, avec percement des dunes en plusieurs endroits, démolition locale des digues et enlèvement d'une rangée de dunes non défendues à l'est du Zoute. Entre 1955 et 1957 l'administration a procédé sur une distance de 7,2 km entre Heyst et le Zoute au rehaussement artificiel sur une épaisseur de 0,7 à 1,7 m par la répartition de 1.000.000 m³ de sable amené par pipe line du sous-sol sableux du polder situé en arrière du cordon dunaire. En 1978-1979 de nouveaux pompages de sable sur la plage y ont eu lieu.

Depuis 1960 une autre proturbérance érosive, quoique de moindre intensité, affecte le littoral à Koksijde.

Une troisième protubérance érosive attaque la côte à l'ouest de De Panne. En 1975-1976 le front de dune y fut percé en plusieurs endroits et des dépressions dunaires inondées sur des centaines de mètres de profondeur. Pour parer à cette action érosive, l'administration y fit construire en 1976 une digue longitudinale qui toutefois ne tardait pas à être emportée lors de la tempête du 26 décembre 1976 et qui a été réparée en 1978.

A partir de 1976 la situation est devenue particulièrement désastreuse entre Bredene en De Haan, où le démaigrissement a débuté vers 1955 en partant de l'Ouest (Bredene). Il s'est progressivement étendu vers l'est, malgré la construction d'épis ayant jusqu'à 300 m de longueur dans la zone à l'ouest de Klemskerke (Vosseslag). En 1960 la borne grève 38 à Klemskerke se situait encore dans un complexe de petites avant-dunes embryonnaires mouvantes au pied du front de dune. Son sommet dépassait à peine d'un mètre la surface du sol. Jusqu'en 1970 le phénomène de démaigrissement y était à peine amorcé. Le 30 mars 1979, cette même borne se situait à 40 m en avant du trait de côte, marqué par une falaise de sapement de 50 à 100 cm de hauteur, et son sommet se dressait à plus de 2,5 m au-dessus de la surface du sol. Le démaigrissement et le recul y sont devenus particulièrement importants après la tempête du 1 janvier 1976. Par le recul du front dunaire et l'abaissement du cordon littoral, le sommet podzalisé des dunes moyennes a été mis en affleurement sur la falaise de sapement près de Vosseslag, des dépôts de waddens y ont été mis à jour et, à 300 m à l'est de la borne grève 38, une ancienne structure longitudinale a été exhumée sur le trait de côte actuel, démontrant ainsi le caractère cyclique et répétitif de la protubérance érosive (G. DE MOOR, 1979).

Quelques profils transversaux de plage successifs (fig. 2) et quelques valeurs pour la mobilité transversale et le solde migratoire transversal (ces grandeurs sont définies dans la section 3.1) (tableau 4) illustrent l'évolution de cette protubérance érosive et l'importance du démaigrissement dans la Zone de Klemskerke.

En 1978 l'administration a procédé à un rehaussement artificiel de la plage entre la borne grève 35 (Bredene) et Klemskerke (Vosseslag) sur environ 2,5 km en utilisant le système Longard. Celui-ci comprend la mise en place d'une structure rectangulaire de tuyaux plastifiés de 1 et 2 m de diamètre, placés longitudinalement et perpendiculairement à la côte à des distances respectives d'environ 70 et 40 m, remplis de sable par injection sous pression hydraulique. Dans la zone de Bredene-Klemskerke, une première structure longitudinale se situe à environ 30 m, une seconde vers 100 m en avant de l'ancien pied de dune. La structure rectangulaire a servi d'armature pour le recouvrement de sable, formant un rehaussement important, changeant le profil transversal de la plage (fig. 3; tableau 2) et affectant ses caractéristiques granulométriques (tableau 1). En plus, par le déplacement de la laisse de pleine mer de vive eau initiale à environ 50 m au devant de pied de dune, il s'était formé une arrière-plage assez importante tandis que la structure longitudinale la plus avancée allait devenir la ligne de flexion de la plage artificielle. Au total 500.000 m³ de sable, amenés par pipeline d'Ostende, ont été répandus sur la plage par hydraulic sluicing. Au début il provenait de dragages dans le port de pêche d'Ostende. Vu sa granulométrie fine et la présence de tourbe, on ne l'a plus utilisé après avoir atteint la borne grève 36. Plus vers l'est on a employé des sables plus grossiers (tableau 6) et riches en coquilles amenés d'abord de la Stroombank (à 2,5 km en face d'Ostende) et plus tard encore de la Kwintebank (à 15 km en face de Nieuwpoort) (données fournies par l'ingénieur BURKI).

3. EVOLUTION INITIALE DE LA PLAGE REHAUSSEE

3.1. Méthode

L'évolution de la plage rehaussée au cours de la première période de six mois et de la plage naturelle adjacente dans le secteur Bredene-Klemskerke a été étudiée non pas en partant de l'observation quantifiée directe du dynamisme sédimentologique, mais en mesurant quantitativement et progressivement son effet résiduel sur l'hypsographie détaillée de l'estran à l'aide de nivellements transversaux successifs, répétés aux mêmes endroits, considérés comme représentatifs pour la section rehaussée (station borne grève 37) et pour la plage naturelle (station borne grève 38). L'étude envisageait une quantification des processus à partir de nivellements transversaux.

A la station 38 les observations quantifiées avaient déjà commencé en janvier 1976 dans le cadre de l'étude du phénomène de la protubérance érosive. Elles y ont été poursuivies, d'abord assez irrégulièrement, et, à partir du 1 juillet 1978, par au moins 1 nivellement par semaine, effectué soit par basse

mer de vive eau, soit par basse mer de morte eau. A la station 37 les observations ont débuté en juillet 1978 (avant le rehaussement), et se sont continuées à partir du 26 septembre 1978, date de la fin du rehaussement, à la même cadence qu'à la station 38. Les deux stations sont distantes de 1 km et le rehaussement a dépassé la station 37 sur environ 500 m. Des repères de nivellement et d'altitude absolue étaient fixés sur les bornes grève.

Les données des nivellements successifs ont servi à établir une séquence chronologique de profils de plage et à monter des zones de balayage; les variations altimétriques à chaque point de mesure entre deux nivellements quelconques ont permis de calculer des mobilités et des soldes migratoires (ou bilans) transversaux résiduels pour différentes périodes.

Ces valeurs ont été calculées entre nivellements successifs, pour des cycles consécutifs de vive eau et de morte eau, pour des périodes de plus longue durée mais aussi pour des cycles diurnes. Le but de cette étude n'est pas de les utiliser pour une analyse factorielle ou pour des prognoses, mais seulement pour la description et l'évolution des phénomènes.

Les nivellements transversaux ont été effectués moyennant des observations altimétriques répétées à une distance unitaire de 3 m le long de la ligne de visée transversale. Régulièrement le front dunaire et la zone pré littorale de faible profondeur ont été englobés dans les profils.

La mobilité et le solde migratoire longitudinaux n'ont pas été pris en considération. Les observations qualitatives permettent d'avancer que, suite à la grande variabilité dans l'orientation des déplacements longitudinaux et aussi suite à la redistribution par le mécanisme des sillons et des chenaux de bas de plage, les déplacements longitudinaux, tout en étant fort importants, avaient des effets sur l'évolution morphologique résiduelle qui, dans les durées et les distances considérées, étaient peu importantes. A cette fin quelques profils longitudinaux sur 1 km furent également effectués. Pour une même raison nous n'avons pas fait de distinction en ce qui concerne l'origine des déplacements du sable sur l'estran.

Pour des motifs pratiques, mobilités et soldes migratoires transversaux résiduels ont été établis soit pour la partie de l'estran situé entre la laisse de pleine mer de vive eau et celle de basse mer de morte eau (mobilité ou bilan global), soit pour les différentes zones micromorphologiques situées dans ces limites (mobilité ou bilan interne par zone micromorphologique). Il s'est avéré qu'au cours des six mois considérés l'emplacement même des crêtes et des sillons n'avait que très peu changé, permettant ainsi une comparaison facile à divers moments de l'évolution. Pour la station 38 nous avons repris les limites des zones micromorphologiques au 26.9.78. Pour la station 37 dont le profil transversal ne présentait pas de différenciations morphologiques à cette date, nous sommes partis des zones sédimento-dynamiques existant à cette date et qui très vite se sont développées en zones micromorphologiques. L'utilisation conjointe des profils de plage reste donc nécessaire.

Les pertes éventuelles par action éolienne au profit de la zone dunaire ou de l'arrière-plage n'ont pas été prises en considération, estimant que l'effet résiduel des déplacements longitudinaux y était également négligeable mais surtout que, vu le recul de ces zones par l'érosion, toute perte transversale à leur profit était très vite recyclée dans le transit par l'estran.

Ces mobilités et bilans transversaux globaux ont été calculées pour une largeur de plage constante, comprise entre les limites sus-mentionnées et considérée comme unité de largeur ($L_1 = 230$ m à la station 38), et pour une longueur de 1 m, considérée comme unité de longueur (E_1). Les valeurs correspondantes sont donc des mobilités et soldes migratoires transversaux, effectifs, globaux et unitaires. Il est évident qu'ils ne portent que sur la période considérée. Les mobilités et bilans internes ont été calculés pour la largeur de chaque zone et pour l'unité de longueur.

Mobilités et bilans ont été calculés par sommation des différences de volume obtenus entre deux nivellements, par distance unitaire (3 m) le long de la ligne de visée, -les pertes comptées en moins, les gains en plus. La mobilité globale ou celle par zone micromorphologique est exprimée par la sommation des valeurs absolues sur les largeurs correspondantes; le bilan global ou celui par zone micromorphologique est exprimé par la sommation des valeurs algébriques sur les largeurs correspondantes.

Afin de pouvoir comparer et apprécier les valeurs très variables de ces mobilités globales M et de ces soldes migratoires globaux B sur des périodes de durée variable, on a non seulement calculé leur valeur totale pour les périodes considérées, mais également leurs moyennes diurnes (\bar{M} , \bar{B}) pour ces périodes. Vu la différence entre la largeur des différentes zones micromorphologiques, mobilités et bilans internes ont été calculés en valeur totale (m , b) mais également en valeur élémentaire (\bar{m} , \bar{b}), c.a.d. par mètre de largeur de chaque zone.

3.2. Evolution globale

Le tableau 5 rend compte de l'évolution globale pour les profils représentatifs de la section rehaussée et de la plage naturelle.

Au cours de la période considérée la mobilité résiduelle totale de la zone rehaussée a continuellement augmenté, tandis que celle de la plage naturelle est restée assez stable. Partant d'une valeur beaucoup moins importante, la mobilité sur la plage artificielle a presque atteint le double de la mobilité effective sur la plage artificielle après les premiers six mois.

Le bilan résiduel total au contraire montre que les pertes qui, au début de la période considérée étaient peu importantes sur la plage naturelle ont graduellement augmenté à partir du troisième mois et ont dépassé le double des pertes sur la plage rehaussée. Celles-ci avaient été importantes depuis le second mois, mais se sont plus ou moins stabilisées à partir du

4° mois.

Le système de rehaussement semble donc retarder l'évolution érosive globale mais ne pas l'arrêter. Ni la situation par rapport à la protubérance érosive, ni des conditions énergétiques différentes, ni leur évolution saisonnière, ni la pente ne peuvent être avancées pour expliquer les différenciations.

3.3. Evolution par zone micromorphologique (tableau 6 et 6bis; fig. 4)

La plage naturelle accuse des pertes résiduelles importantes et continues sur toutes les unités micromorphologiques, sauf sur la seconde crête près de la laisse de mer basse de morte eau. Ces pertes sont les moins importantes dans la zone de flexion, les plus importantes dans le premier sillon, surtout si l'on considère les valeurs élémentaires. La zone des gradins subit un démaigrissement fort important et continu, et ce malgré les apports en provenance du front dunaire (fig. 2). La stabilité de la zone de flexion est partiellement commandée par le recyclage du sable arraché à la zone des gradins. Le démaigrissement de la première crête ne se manifeste que depuis le dernier mois.

La plage rehaussée montre un démaigrissement important et continu de l'arrière plage et de la zone des gradins. Les pertes résiduelles y dépassent même celles de la zone la plus touchée de la plage naturelle. Pourtant ces zones sont défendues par l'armature longitudinale. Mais celle-ci, assez vite mise à nu, montre des points de sapement et d'enfoncement par où l'érosion est très fortement activée. La zone de flexion même, en avant de la structure longitudinale, montre un démaigrissement résiduel, mais pertes et gains s'y succèdent, probablement à cause des épis transversaux qui en cette zone influencent fortement la mobilité locale longitudinale. Les valeurs élémentaires y accusent des périodes de très grandes pertes. Le premier et le second sillon ont subi très vite un faible démaigrissement pendant que la première crête connaissait un gain important se continuant au cours des premiers mois. Plus tard le premier et le second sillon allaient connaître des gains presque continus tandis que les crêtes, surtout la première, tout en restant en bilan résiduel positif pour la période considérée, allaient néanmoins subir d'importantes pertes dans les derniers mois.

Il s'avère donc que dans la période initiale après le rehaussement, le sable enlevé à l'arrière-plage de l'estran rehaussé est temporairement stocké sur les différentes unités morphologiques du bas de plage et qu'il y a même eu une diminution graduelle de la différenciation micromorphologique surtout par l'abaissement de la première crête. Il est probable que le stockage sur le bas de plage a provoqué un freinage supplémentaire sur les parties plus hautes de l'estran.

4. BIBLIOGRAPHIE

- BASTIN, A. - (1974) - Regionale sedimentologie en morfologie van de Zuidelijke Noordzee en van het Schelde estuarium. Leuven, Katholieke Universiteit, 72 cart., 14 tabl.

- BRIQUET, A. - (1931) - Le littoral du Nord de la France et son évolution morphologique.
Paris, Masson.
- CHARLIER, R. & AUZEL, M. - (1961) - Géomorphologie Côtière : migration des sables sur la côte Belge.
Z.f. Geomorphol., 5, 181-184.
- CODDE, R. & DE KEYSER, L. - (1967) - Noordzee-Kust-Scheldemonding-Zeeschelde, in : Atlas van België, blz. 18a en 18b en commentaar.
Brussel, Nationaal Comité voor Geografie, 64 p.
- DE BREUCK, W. & DE MOOR, G. - (1967) - Een Paniseliaan-ontsluiting op het strand te Wenduine ?
Natuurwetensch. Tijdschr., 49, 229-234.
- DE MOOR, G. - (1979) - Recent beach erosion along the Belgian North Sea Coast.
Bull. Soc. Belge Geolog., 88, 1-2.
- DE MOOR, G. & DE BREUCK, W. - (1973) - Sedimentologie en stratigrafie van enkele pleistocene afzettingen in de Belgische kustvlakte.
Natuurwetensch. Tijdschr., 55, 3-96.
- DEPUYDT, F. - (1972) - De Belgische strand- en duinformaties in het kader van de geomorfologie der zuidoostelijke Noordzeekust.
Verh. Kon. Acad. voor Wetensch., Lett. en Sch. Kunsten v. België, Kl. Wet., 34, nr. 122, 228 p.
- L'ABBE, M. - (1977) - Pebbles and cobbles on the Belgian North Sea Beach.
Bull. Soc. belge Géologie, 86, p. 113-118.
- MACAR, P. - (1935) - Quelques analyses granulométriques de sables d'origine marine et éolienne de la côte belge.
Soc. Géol. belge., 58, 156-164.
- RAHIR, E. - (1935) - "Contribution à l'étude géographique de la côte belge".
Bull. Soc. Roy Belge Géogr., 59, 4, p. 3.
- SNACKEN, F. - (1956) - Eolisch zandtransport langs het Belgisch strand.
Natuurwetensch. Tijdschr., 38, 89-99.
- TAVERNIER, R. - (1947) - L'évolution de la plaine maritime belge.
Bull. Soc. Belge Géol., 56, 332-343.
- TAVERNIER, R.; AMERYCKX, J., SNACKEN, F. & FARASIJN, D. - (1970) - Kust- Duinen, Polders, in : Atlas van België, blz. 17 en commentaar.
Brussel, Nationaal Comité voor Geografie, 32 p.
- VAN CAUWENBERGHE, C. - (1971) - Hydrografische analyse van de Vlaamse Banken langs de Belgische Kust.
Het ingenieursblad, 40, nr. 19, 563-571.
- VAN CAUWENBERGHE, C. - (1972) - Overzicht van de tijwaarnemingen langs de Belgische Kust.
Brussel, Ministerie van Openbare Werken.
- VAN MIERLO, C. - (1899) - La carte lithologique de la partie méridionale de la Mer du Nord.
Bull. Soc. Belge Géologie, 13.
- VAN VEEN, J. - (1936) - Onderzoekingen in de Hoofden in verband met de gesteldheid der Nederlandse Kust.
Nieuwe Verh. Bataafschr. Genootsch. Proefond. Wijsbeg., Rotterdam, 252 p., 2° reeks, dl. 11.

- WARTEL, S. - (1972) - Sedimentologisch onderzoek van de opbouw van het Schelde-estuarium.
Leuven, Kathol. Universiteit, 3 tōmes.
- WERY, J. - (1908) - Sur le littoral belge.
Bruxelles, Lamertin, 223 p.
- WOLLAST, R. - (1972) - Etude des s̄diments r̄cents de la mer du Nord.
Bruxelles, Rapport de synth̄se CIPS.

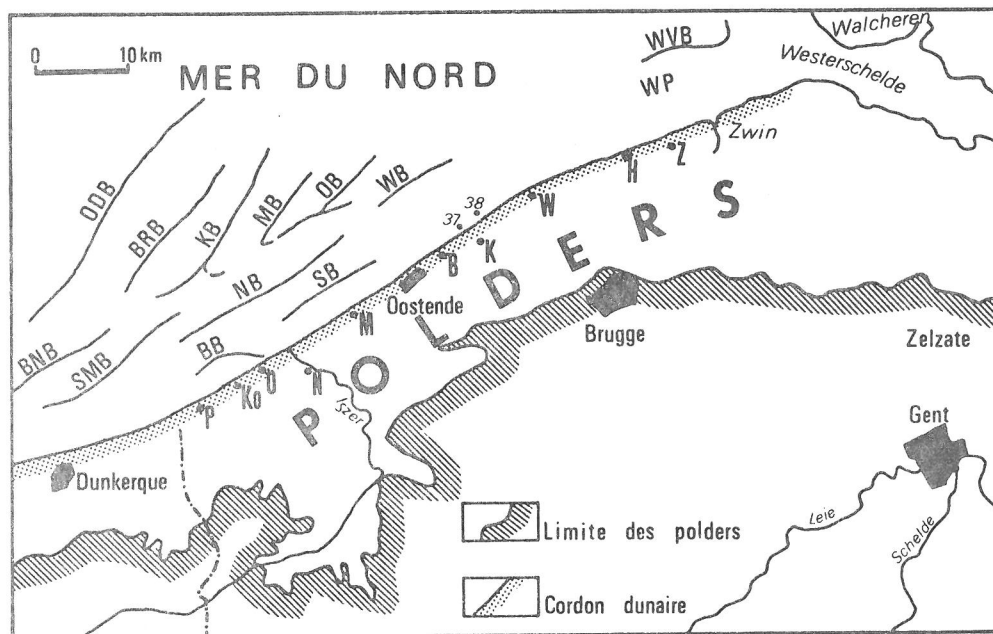


Fig. 1 : La côte belge et son avant-côte.

Stations d'observation :

Borne grève 37

Borne grève 38

Localités

P = De Panne
 K_o = Koksijde
 O = Oostduinkerke
 N = Nieuwpoort
 M = Middelkerke
 B = Bredene
 K = Klemskerke
 W = Wenduine
 H = Heist
 Z = Knokke-Zoute

Bancs

WVB = Walvisstaart
 WB = Wenduine bank
 NB = Nieuwpoort bank
 SB = Stroom bank
 BB = Broers bank
 OB = Oostende bank
 MB = Middelkerke bank
 KB = Kwinte bank
 BRB = Buiten Ratel
 ODB = Oost Dijck
 BRB = Breed Bank
 SMB = Smal Bank
 WP = Passe des Wielingen

Tableau 1

Caractéristiques de l'estran, entre la laisse de pleine mer de vive eau et celle de basse mer de vive eau le long de la côte belge

B.G.	Localisation	Date	Pente généralisée (%)	Largeur transversale (m)
3	De Panne	9.8.78	1,3	510
12	Oostduinkerke	9.8.78	1,5	480
37(x)	Klemskerke	19.8.78	2,7	260
37(xx)	Klemskerke	26.9.78	2,0	360
42	Vlissegem (Wenduine)	28.9.78	2,1	310
38	Klemskerke	5.8.78	2,0	340
51	Zeebrugge	6.8.78	1,7	320
65	Knokke-Zwin	24.7.78	2,4	200

B.G. = borne-grève, distance unitaire 1 km

(x) = avant le rehaussement de la plage

(xx) = après le rehaussement de la plage et englobant une arrière-plage de 45 m de largeur transversale.

Tableau 2

Caractéristiques granulométriques du sable de plage à Klemskerke

Localisation et date	Frac-tion (6)	Pourcentages (poids) pour des échantillons pris à une Distance (m) en dessous (-) ou au dessus (+) de LPMME (2)											
		+60	+30	+15	0	-15	-30	-45	-60	-90	-120	-150	-180
B.G. 38 26.9.78	a			18,3		15,3	12,3	17,5	16,5	15,3			
	b			67,2		64,5	63,7	61,1	60,0	66,8			
	c			8,9		16,7	16,0	15,5	13,4	12,0			
	d			3,4		1,8	2,9	1,7	4,5	2,0			
	e			0,6		0,7	3,3	1,4	4,1	1,0			
B.G. 38 20.12.78	a	31,1	18,9	7,5	7,6	5,1	3,8	7,8	9,4	8,2	9,0	16,8	13,4
	b	56,3	63,6	65,5	65,1	57,1	44,9	49,8	53,1	54,8	55,0	68,3	57,3
	c	8,9	13,7	15,0	21,0	31,1	33,4	23,6	20,8	26,1	16,9	6,5	13,7
	d	1,1	0,7	7,1	3,1	4,5	7,1	7,2	6,4	6,0	5,7	2,6	5,5
	e	0,3	0,2	4,2	1,8	1,8	8,6	8,7	6,9	3,6	7,6	3,8	7,2
B.G. 37 (7) 26.9.78		(4)											
	a	19,3	7,1		12,3	4,8			16,5				
	b	36,8	23,1		41,7	16,2			48,8				
	c	18,6	17,8		25,5	41,2			23,3				
	e	10,2	22,5		5,0	8,4			5,7				3,7
B.G. 37 10.12.78		(5)											
	a	6,9	9,0	9,5	20,7	5,1	2,9	4,3	10,2	23,8	30,5	33,5	32,8
	b	25,5	46,0	72,3	26,2	38,0	22,8	30,3	35,4	57,1	45,6	53,1	52,0
	c	26,4	22,7	15,7	37,3	25,8	25,7	22,5	26,8	13,8	10,2	5,2	8,0
	d	11,2	6,2	1,8	13,4	10,7	17,5	19,5	8,0	1,7	0,2	2,3	1,2
e	11,3	6,9	0,3	2,3	15,0	23,6	18,7	11,3	1,4	5,2	1,9	1,3	

(1) Les échantillons ont été pris entre 2 et 20 mm de profondeur. Traitement par tamisage d'échantillons de 100 gr. durant 20 minutes

(2) LPMME = Laisse de pleine mer à morte eau

(3) Sable dunaire

(4) Sable de rehaussement

(5) Sable du rehaussement, remanié par le cent

(6) Fractions granulométriques : a = 125-177 μ m; b = 177-250 μ m; c = 250-297 μ m; d = 297-354 μ m; e = 354-500 μ m

(7) Echantillonnage immédiatement après le rehaussement. La fraction inférieure à 1%, celle au-dessus de 500 μ m reste inférieure à 5%, ne comptant pas les coquilles supérieures à 2 mm

Tableau 3

Hauteur moyenne de la marée en m (au-dessus de MMBVE)

	Moyenne	Pleine mer		Basse mer	
		Vive Eau	Morte Eau	Vive Eau	Morte Eau
Nieuwpoort	2,77	5,2	4,3	0,4	1,1
Oostende	2,62	5,0	4,1	0,4	1,1
Zeebrugge	2,44	4,7	3,8	0,4	1,1

Tableau 5

Evolution de la Mobilité M et du Solde Migratoire B pour des périodes de durée croissante

Station	Mobilité				Solde migratoire			
	totale $m^3/E_1/L_1$		Moyenne diurne $m^3/E_1/L_1/d$		total $m^3/E_1/L_1$		Moyenne diurne $m^3/E_1/L_1/d$	
	37	38	37	38	37	38	37	38
du 26.9.78 (1) jusqu'au								
11.10.78 (2)	34,73	67,82	2,32	3,08	-3,50 (3)	+4,92	-0,23	+0,22
24.11.78	45,33	81,11	0,84	3,64	+3,64	+7,17	+0,07	+0,13
10.12.78	43,45	55,80	0,60	0,74	-16,48	-9,71	-0,22	-0,13
23.12.78	54,80	67,43	0,62	0,77	-13,10	+0,16	-0,15	+0,002
03.01.79	81,43	46,92	0,82	0,47	-34,71	-15,00	-0,35	-0,15
20.01.79	89,45	54,77	0,77	0,47	-15,50	-6,52	-0,13	-0,06
07.02.79	99,45	43,07	0,74	0,32	-10,98	-12,47	-0,08	-0,09
22.02.79	101,18	61,34	0,68	0,41	-20,32	-35,44	-0,14	-0,24
07.03.79	100,50	63,70	0,62	0,39	-22,68	-34,47	-0,14	-0,21
22.03.79	101,95	65,72	0,58	0,37	-21,70	-47,07	-0,12	-0,27

(1) 26.9.78 = date de la fin du rehaussement à la station 37

(2) Toutes les dates correspondent à des mortes eaux complètes

(3) + = gains; - = pertes

Tableau 4

Evolution de la mobilité transversale résiduelle globale unitaire (M) et du solde migrateur transversal résiduel global unitaire (B) à la hauteur de la borne-grève 38 à Klemserke pour différentes périodes p. - Plage non réhaussée, sans défenses

période	valeur totale mobilité (m ³ /E ₁ /L ₁)	moyenne diurne (m ³ /E ₁ /L ₁ /d)	valeur totale solde migratoire (m ³ /E ₁ /L ₁)	moyenne diurne (m ³ /E ₁ /L ₁ /d)
24.1.76/08.1.77	49,1	0,140	- 25,5	-0,051
08.1.77/15.1.78	83,4	0,224	- 79,0	-0,212
15.1.78/15.1.79	34,8	0,095	- 2,6	-0,007
24.1.76/15.1.79	109,6	0,101	-109,1	-0,101

d = par jour

E₁ = par unité longitudinale (1 m)

L₁ = par unité transversale = distance entre laisse de pleine mer de vive eau et laisse de basse mer de morte eau (= 230 m à la station 38)

+ = gain

- = perte

Tableau 6

Evolution du solde migratoire transversal résiduel par zone micromorphologique pour des durées croissantes à partir de la fin du rehaussement en B.G. 37

Station : 38

Période du 26.9.78 (1) Dunes jusqu'au	Gradins		Flexion		1° Sillon		1° Crête		2° Sillon		2° Crête	
	a	b	a	b	a	b	a	b	a	b	a	b
Distances (3)	+39m/-24m		-24m/-36m		-36m/-66m		-66m/-120m		-120m/-165m		-165m/-198m	
11.10.78 (2)	+ 1,06	+0,017	+2,90	+0,240	- 8,87	-0,296	+13,37	+0,248	-14,13	-0,314	+12,00	+0,363
19.11.78	- 5,50	-0,087	-3,94	-0,328	-15,56	-0,519	+20,06	+0,379	- 6,68	-0,148	+19,57	+0,593
10.12.78	- 4,78	-0,076	-5,34	-0,455	-10,39	-0,346	+ 8,66	+0,160	- 7,47	-0,166	- 9,30	-0,282
23.12.78	-10,04	-0,159	-5,38	-0,448	-10,50	-0,350	+14,12	+0,261	- 3,30	-0,073	+14,73	+0,446
03.01.79	-11,12	-0,177	-2,45	-0,204	-12,00	-0,400	+ 7,77	+0,144	- 3,48	-0,077	+ 6,20	+0,188
20.01.79	-12,22	-0,194	+0,74	+0,062	-12,70	-0,423	+11,71	+0,216	- 2,07	-0,046	+ 8,00	+0,242
07.02.79	- 8,82	-0,140	-2,48	-0,207	-11,07	-0,369	+ 6,98	+0,129	- 3,14	-0,070	+ 6,08	+0,184
22.02.79	-14,47	-0,230	-1,06	-0,088	-13,28	-0,443	- 5,30	-0,098	-13,49	-0,300	+12,17	+0,369
07.03.79	-15,22	0,242	-0,99	-0,083	-14,67	-0,489	- 2,64	-0,049	-11,70	-0,260	+10,76	+0,326
22.03.79	-18,25	-0,290	-0,95	-0,079	-18,52	-0,617	- 3,43	-0,064	-13,03	-0,290	+ 8,28	-0,251

Tableau 6bis

Station 37

Distance (3) Période du 26.9.78 (1) arrière-plage jusqu'au	Zones micromorphologiques													
	+45m/+15m		+15m/-36m		-36m/-66m		-66m/-84m		-84m/-135m		-135m/-168m		-168m/-198m	
	a	b	a	b	a	b	a	b	a	b	a	b	a	b
11.10.78(2)	+ 0,94	+0,031	- 8,30	-0,020	- 4,85	-0,162	-10,76	-0,489	+12,33	+0,242	- 1,41	-0,042	+1,39	-0,046
19.11.78	- 2,31	-0,077	-11,95	-0,234	+ 2,09	+0,070	- 0,14	-0,006	+13,63	+0,267	- 1,31	-0,040	+3,21	-0,107
10.12.78	- 0,02	-0,001	-14,20	-0,278	- 4,24	-0,141	+ 0,11	-0,005	+ 8,50	+0,167	- 3,71	-0,112	+0,02	+0,001
23.12.78	- 4,28	-0,143	-16,25	-0,332	- 7,40	-0,247	+ 2,36	+0,107	+ 9,51	+0,186	+ 0,25	+0,008	+3,42	+0,114
03.01.79	- 7,79	-0,260	-19,96	-0,391	-24,03	-0,801	+ 1,62	+0,079	+ 5,70	+0,118	+ 7,07	+0,214	+6,32	+0,211
22.01.79	-11,18	-0,373	-23,24	-0,456	-12,69	-0,423	+ 3,44	+0,156	+10,74	+0,488	+10,70	+0,210	+9,40	+0,313
07.02.79	- 8,40	-0,280	-27,46	-0,538	-13,35	-0,445	+ 6,76	-0,307	+ 6,79	+0,119	+16,18	+0,490	+10,49	+0,350
22.02.79	-10,71	-0,357	-35,59	-0,698	- 8,21	-0,274	+ 7,35	+0,334	+ 2,64	+0,052	+16,71	+0,328	+8,39	+0,280
07.03.79	- 8,95	-0,298	-33,37	-0,654	-12,17	-0,406	+ 6,19	+0,281	+ 3,22	+0,063	+16,40	+0,322	+8,46	+0,282
22.03.79	-17,17	-0,572	-32,87	-0,645	- 8,08	-0,270	+ 7,69	+0,350	+ 7,77	+0,152	+12,51	+0,379	+8,36	+0,279

(1) 26.9.78 = fin du rehaussement

(2) les dates correspondent à des mortes eaux complètes

(3) la position des zones micromorphologiques et indiquée en mètres de distance transversalement à la ligne kilométrique relayant les bornes-grèves, et négativement en direction de la mer

(4) + = gains; - = pertes

(5) la limite extérieure correspond à un double ligne longitudinale à diamètre 1 m

a = solde migratoire transversal résiduel unitaire par zone micromorphologique en m³/E₁/longueur de la zone

b = solde migratoire transversal résiduel élémentaire par zone micromorphologique en m³/m²

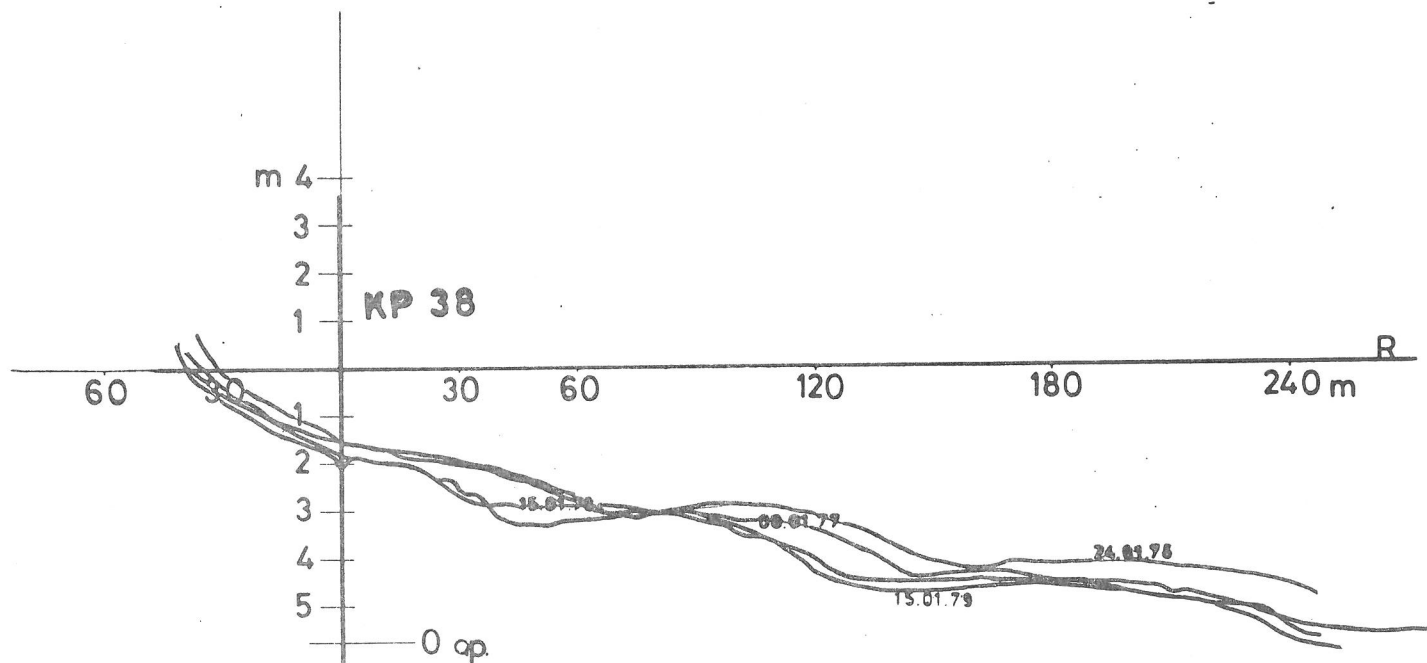


Fig. 2a : Borne Grève 38 (Klemskerke).
 Profils transversaux de la plage naturelle.
 Evolution résiduelle au cours de la période janvier 1976-
 janvier 1979. Abaissement général sur tout l'estran,
 progressant graduellement à partir de la laisse de
 basse mer. Recul des parties exposées des crêtes de
 plage. La zone des gradins reste encore relativement
 épargnée par l'apport de sable dunaire. Le côté sous
 la mer de la première crête reste relativement stable.

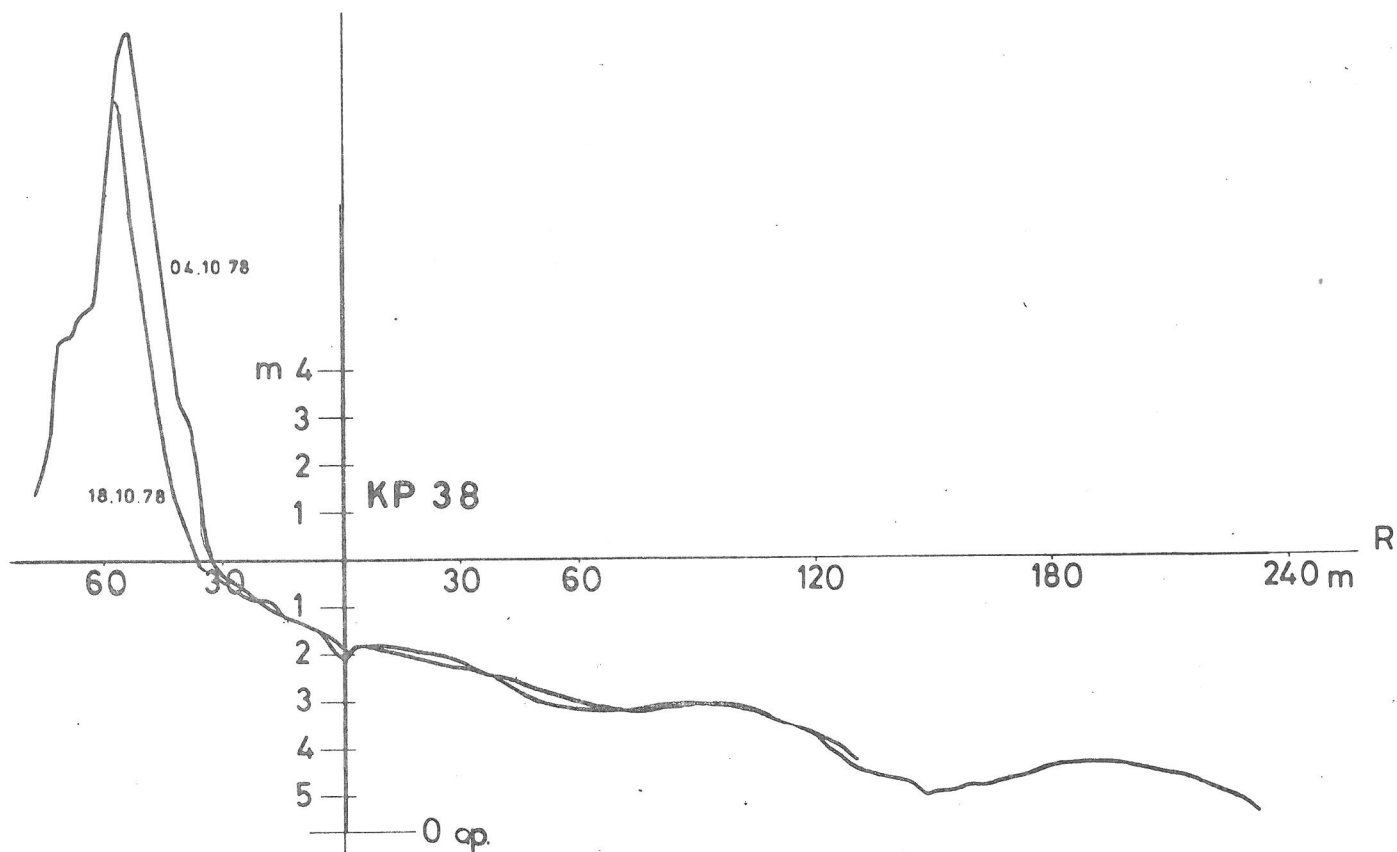


Fig. 2b : Borne grève 38 (Klemskerke)
 Profils transversaux de la plage naturelle.
 Recul du front dunaire au cours d'une période de
 12 jours (cycle de vive eau).

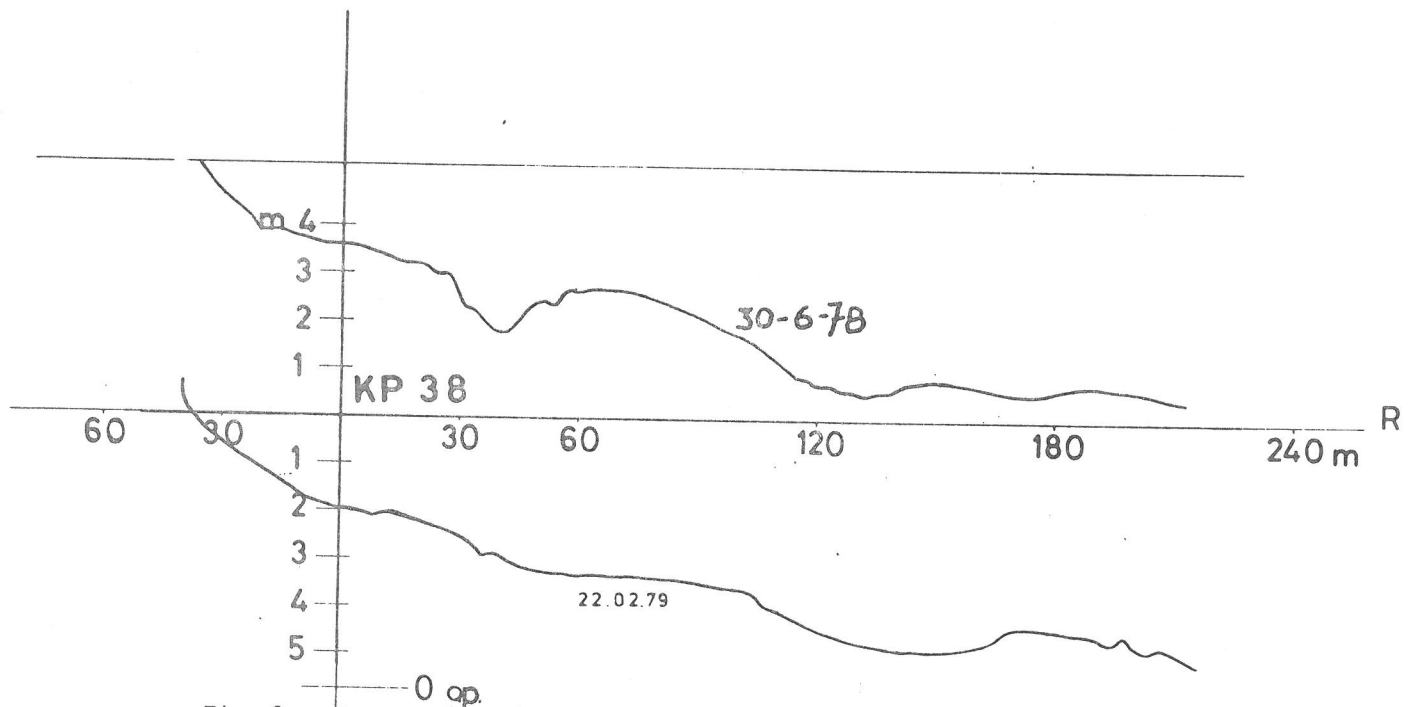


Fig. 2c : Borne grève 38 (Klemskerke).
 Profils transversaux de la plage naturelle.
 Différence micromorphologique entre plage d'été
 et plage d'hiver.

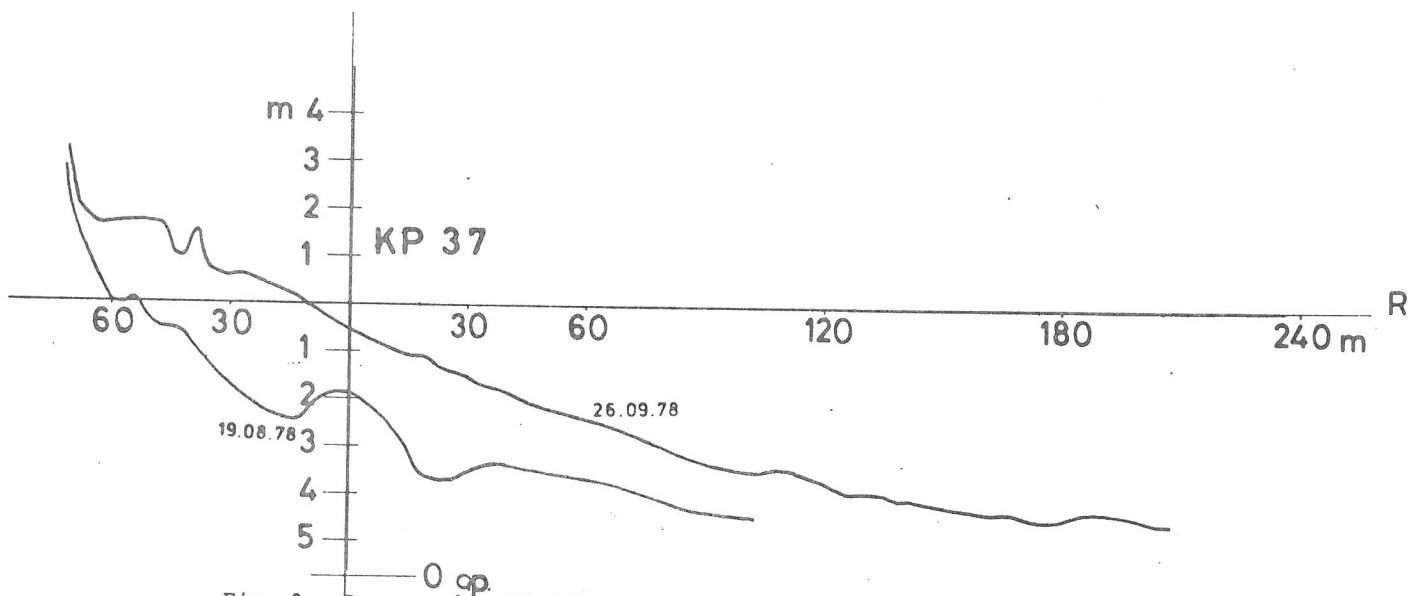


Fig. 3 : Borne grève 37 (Klemskerke).
 Profils transversaux de la plage avant et après
 le rehaussement.

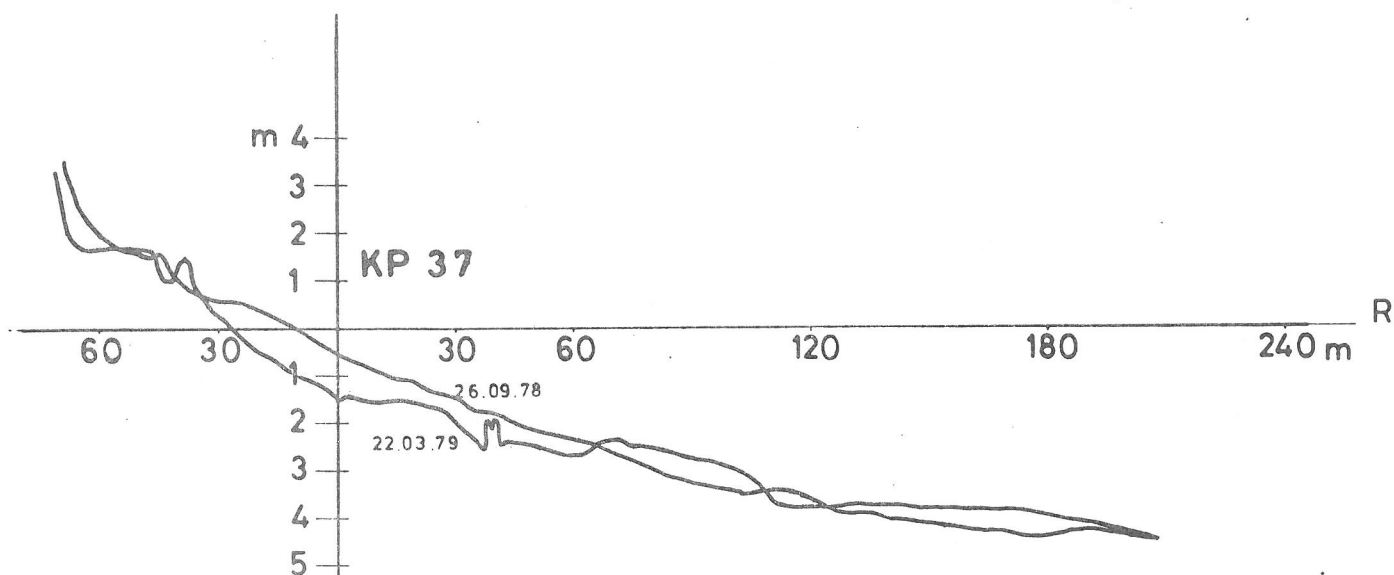


Fig. 4a : Borne grève 37 (Klemskerke).
 Profils transversaux de la plage rehaussée.
 L'évolution résiduelle au cours des six premiers mois de rehaussement est dominée d'une part par le démaigrissement de l'arrière plage, de la zone des gradins et de la zone de flexion et d'autre part par le stockage de sédiments sur les crêtes de bas de plage, qui sont même réhaussées.

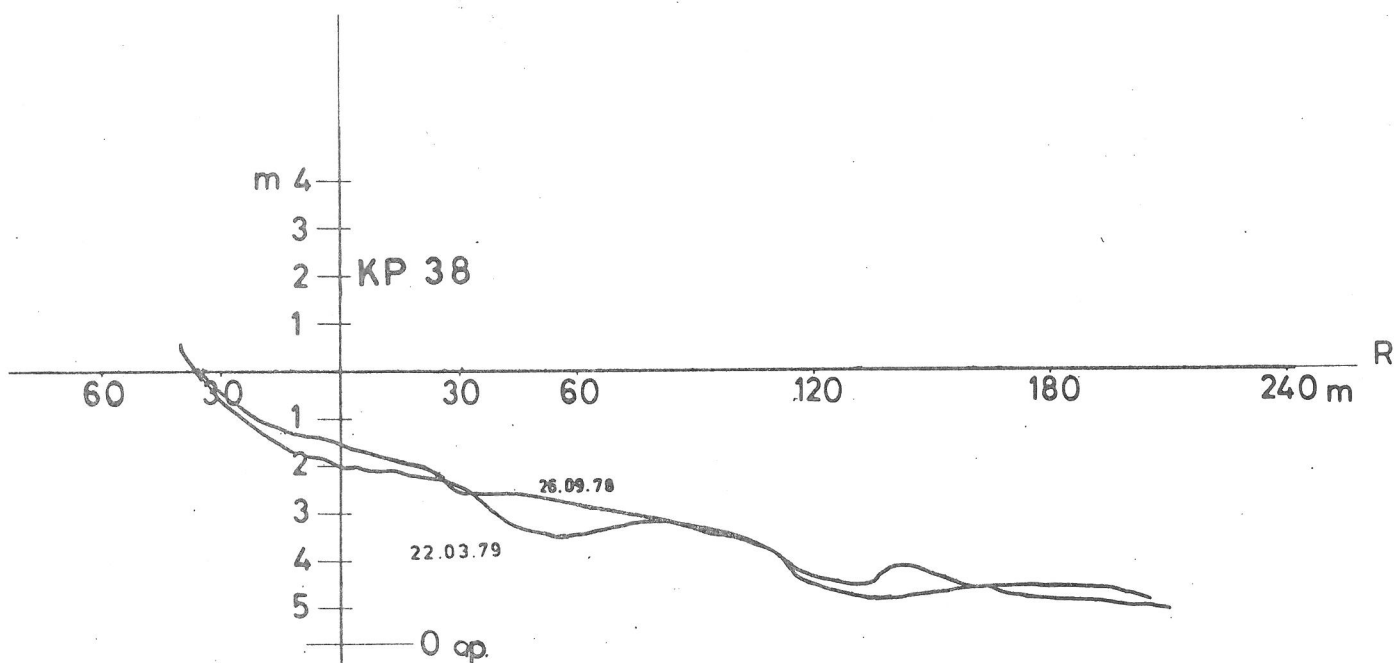


Fig. 4b : Borne grève 38 (Klemskerke)
 Profils transversaux de la plage naturelle.
 Evolution résiduelle au cours de la période correspondant aux six premiers mois de rehaussement à la borne grève 37. Cette évolution est caractérisée par le démaigrissement des sillons et du haut de l'estran et par un stockage sur la deuxième crête.