

CHAPTER 51

LA DEFENSE ET LE MAINTIEN DES PLAGES BELGES ENTRE ZEEBRUGGE ET LA FRONTIERE NEERLANDAISE

par

J. E. L. VERSCHAVE,
Ingénieur en Chef - Directeur
des Ponts et Chaussées,
Service de la Côte Belge,
OSTENDE.

CHAPITRE 1

LA COTE BELGE ENTRE ZEEBRUGGE ET LA FRONTIERE NEERLANDAISE

EVOLUTION

Au point de vue géologique, la partie orientale, comme d'ailleurs toute la côte belge, forme la limite septentrionale de la plaine maritime flamande.

Par rapport au niveau Z - 0.00, c'est-à-dire le niveau moyen de la marée basse de vives eaux à Ostende, niveau qui est situé à 2,50 m sous le plan de référence néerlandais N.A.P., les couches géologiques se présentent à Knokke dans l'ordre suivant:

A. Formation moderne: dunes

B. Ere quaternaire:

B1° Holocène supérieur : (Assise de Dunkerque)
Argile et limon entre Z + 3,00 et
Z + 1,50

B2° Holocène moyen et
inférieur: (Assise de Calais)
limon et tourbe Z + 1,50 à Z 0,00
sable Z - 0,00 à Z - 5,00
limon et sable Z - 5,00 à 9,00
sable Z - 9,00 à Z - 16,00

B3° Pleistocène: (Assise d'Ostende)
sable à coquillages
Z - 16 à Z - 18
sable Z - 18 à Z - 26

LA DEFENSE ET LE MAINTIEN DES PLAGES BELGES
ENTRE ZEEBRUGGE ET LA FRONTIERE NEERLANDAISE

C. <u>Ere tertiaire</u> :	C1° <u>Bartonien</u> : argile	Z - 26 à Z - 30
	C2° <u>Panisélien</u> : sable et argile	sous Z - 30
	C3° <u>Yprésien</u> : argile	sous Z - 60

Les polders, situés au sud du cordon littoral, ont une profondeur d'environ 10 à 15 km vers l'intérieur du pays et constituent une région agricole très fertile.

Le sol argileux et limoneux a été déposé pendant la dernière transgression de Dunkerque.

Le cordon littoral, constitué de dunes récentes et de digues artificielles, est complètement bâti. Les agglomérations de Zeebrugge, Heist, Duinbergen, Albert-Plage, Knokke et le Zoute y sont situées et l'exploitation balnéaire y est intense.

Jusqu'à dix km en mer, les profondeurs du fond sous-marin sont assez variables. Les chenaux et les bancs se succèdent et la profondeur maximale atteint Z - 13 m dans les Wielingen devant la côte belge. La profondeur augmente toutefois rapidement vers l'Est dans le rétrécissement de l'Escaut entre Breskens et Vlissingen.

Le fond de la mer est formé par des couches appartenant à l'assise de Calais en face de la côte belge.

Toute cette partie côtière a donc été formée par sédimentation marine depuis 8.000 ans avant J. C. jusqu'à la fin de la dernière transgression de Dunkerque et l'intervention de l'homme, vers le 11ème siècle après J. C.

La configuration et la topographie en ont toutefois été fortement modifiées depuis lors.

Au début du 14ème siècle, l'embouchure actuelle de l'Escaut occidental comptait trois bras:

Le Zwin:	débouchant entre le continent et l'île de Wulpen
Le Grote Rille:	débouchant entre les îles de Wulpen et de Schooneveld
L'Oostgat:	débouchant entre les îles de Schooneveld et de Walcheren

Au méridien de Heist, la côte se trouvait à 5 km au nord de la promenade actuelle. Au méridien de Knokke, elle se trouvait à 2 km au nord de la promenade actuelle.

Le Zwin passait alors entre Le Zoute et Kadzand, à l'endroit où le "Schorre" existe encore aujourd'hui.

COASTAL ENGINEERING

Plus à l'ouest la côte se trouvait également au nord du tracé actuel. Au nord de Wenduine se trouvait le hameau de Harendijke. Au nord de Blankenberge se trouvait le village de Scarphout ; au nord de Heist le village de Coudekerke, au nord de Knokke le village de Reygersvliet, etc . . .

Le début du 14^e siècle est caractérisé par une série de tempêtes violentes qui modifient sérieusement les côtes et l'estuaire de l'Escaut occidental. En 1334, par une marée tempête violente, Scarphout et Coudekerke disparurent en mer.

En 1337, une nouvelle marée tempête sévit et plusieurs villages sur les îles de Wulpen et Schooneveld sont engloutis. A cette époque, le Comte de Flandres, Jean Sans Peur, fait construire les digues de défense le long du littoral flamand. Ces digues s'appellent encore aujourd'hui les digues du Comte Jean.

En 1404, le hameau de Harendijke au nord de Wenduine disparût de la carte.

Le 18 novembre 1421, jour de Ste Elisabeth, une nouvelle marée tempête d'une rare violence accentua le travail de sape. La marée tempête de St Felix en 1530, créa les passes du Sloe entre les îles de Walcheren et de Zuid Beveland et du "Creecke" ou Kreekrak à l'est du Zuid Beveland. Une grande partie de l'île fût engloutie entre 1530 et 1552. Le jour de Toussaint, 1^{er} novembre 1570, est la date d'une des marées tempêtes les plus dramatiques et l'évolution de l'Escaut occidental comme grand estuaire maritime fit un bond d'importance.

La carte, dressée par Mercator en 1590, montre que l'estuaire a déjà une largeur de 3,5 km entre Breskens et Vlissingen.

Les îles du delta, comme Wulpen, Schooneveld et Coesant, ont disparu.

Blankenberge est situé à la côte. La côte entre Heist et Knokke se situe légèrement au nord de la côte actuelle ; tout au plus quelques centaines de mètres.

Le Zwin y figure toujours avec une largeur de près d'un kilomètre. L'érosion et le déplacement de matériaux dans la zone triangulaire Breskens, Westkapelle, Wenduine, entre 1300 et 1600, c'est-à-dire en trois siècles, doivent être évalués à plus d'un milliard (10⁹) de m³.

Depuis lors l'approfondissement de l'embouchure de l'Escaut occidental s'est encore poursuivi.

Les données hydrographiques manquent entre 1600 et 1830, mais l'étude des cartes marines dressées et des sondages pratiqués depuis 1830, prouve

LA DEFENSE ET LE MAINTIEN DES PLAGES BELGES ENTRE ZEEBRUGGE ET LA FRONTIERE NEERLANDAISE

que l'approfondissement du delta sous-marin de l'Escaut occidental a continué jusqu'à nos jours, spécialement dans une zone de 10 km de largeur au nord de la ligne Breskens-Wenduune. La côte belge entre Zeebrugge et la frontière néerlandaise fait partie de ce rivage au sud du delta sous-marin.

La largeur de l'Escaut entre Breskens et Vlissingen a, de nos jours, une largeur d'environ 4,2 km et la section mouillée en dessous de marée basse a augmenté d'environ 35 % entre 1840 et 1955.

Selon les études du Dr ir. J. Van Veen, l'approfondissement moyen du delta serait de 5,4 dm entre 1872 et 1933 et l'approfondissement moyen de la zone méridionale serait de 7,5 dm pendant la même époque.

Nous avons estimé qu'entre 1840 et 1955 les bancs se sont abaissés, les chenaux ont maintenu leur profondeur devant la côte belge, mais se sont considérablement approfondis dans l'étranglement de l'Escaut, c. à. d. dans les eaux néerlandaises. Le fond moyen sur le méridien de Heist et sur le méridien du Zoute, jusque 10 km au nord des plages s'est abaissé de 0,50 m. Il y a donc certainement continuation de l'érosion du fond de la mer devant le littoral en question jusqu'à nos jours, érosion due à l'évolution de l'estuaire de l'Escaut.

+ + + +

CHAPITRE 2

L'EROSION DES PLAGES DEPUIS 1900 ET SES CAUSES

L'érosion des plages de Heist, Dunbergen, Albert-Plage, Knokke et le Zoute s'est surtout prononcée depuis 1900, après la construction du port de Zeebrugge.

Déjà en 1920 de sérieuses pertes de sable étaient enregistrées et, malgré l'établissement d'une série d'épis sur les plages entre 1920 et 1940, le recul de la laisse de marée basse s'accroissait progressivement

Les causes naturelles de l'érosion, les interventions et ouvrages des hommes ont produit des réactions défavorables les unes sur les autres et vice-versa et ont accéléré le désensablement.

CAUSES NATURELLES

1. Tassement naturel du sous-sol; contenant de la tourbe et léger

COASTAL ENGINEERING

relèvement du niveau moyen de la mer.

2. L'érosion des fonds marins, due à l'évolution de l'estuaire de l'Escaut (augmentation du flux et des vitesses)

La fosse de l'Appelzak, située immédiatement au nord des plages, s'est rapprochée de la côte, s'est allongée vers l'est, approfondie en certains points.

Le banc du Paardemarkt, au nord de la fosse de l'Appelzak, a été érodé et sa crête s'est abaissée d'environ 2,50 à 3 m entre 1840 et 1955.

Les côtes comparatives sont les suivantes:

	1840	1955	Abaissement
<u>Devant Heist</u>	Z - 34 dm	Z - 60 dm	2,6 m
<u>Devant Knokke</u>	Z - 25 dm	Z - 54 dm	2,9 m
<u>Devant le Zwin</u>	Z - 25 dm	Z - 59 dm	3,4 m

3. Cet abaissement du banc a facilité l'attaque des plages par des vagues de tempête de plus en plus fortes.

CAUSES DUES A L'INTERVENTION DE L'HOMME.

1. Construction du môle et du port de Zeebrugge, entre 1890 et 1907 déplacement résultant de la fosse de l'Appelzak vers l'est - séparation de la fosse de celle du môle - attaque du flanc sud de la fosse par les courants (force de Coriolis et effet centrifuge)

La fosse de l'Appelzak se prolonge actuellement jusqu'au Wielingen devant Kadzand et l'approfondissement devant le Zwin est d'un mètre depuis 1840 (actuellement Z - 82 dm au lieu de Z - 71 dm en 1840)

2. Fermeture de la claire-voie du môle de Zeebrugge, après la première guerre mondiale et diminution du transport de sable vers l'est.

3. Le développement foudroyant des cités balnéaires de Duinbergen, Albert-Plage, Knokke et Le Zoute entre les deux guerres mondiales.

Toutes les dunes ont été endiguées et vendues comme terrains à bâtir et des promenades ont été établies en bordure des plages. Les réserves naturelles de sable étaient de ce fait perdues pour les plages. La pente des talus est d'ailleurs beaucoup trop forte.

4. La construction d'épis trop courts entre 1920 et 1939, accélérant

LA DEFENSE ET LE MAINTIEN DES PLAGES BELGES ENTRE ZEEBRUGGE ET LA FRONTIERE NEERLANDAISE

l'érosion de la plage vers marée basse au versant sud de l'Appelzak ; les sérieux dégâts causés aux épis par les tempêtes et par faits de guerre entre 1940 et 1944 et le manque total d'entretien pendant ces années.

5. La nécessité de réparer les dommages de guerre et de reconstruire les ports entre 1944 et 1950 et le manque de crédits pour les travaux d'amélioration des plages.

Au début de 1952, la situation des plages, surtout à Knokke et Le Zoute, était devenue réellement critique. La laisse de marée basse s'était rapprochée à certains endroits jusqu'à 150 m de la fondation des perrés et, à chaque marée haute, les vagues battaient les revêtements des digues.

A chaque tempête, de fortes vagues réfléchissaient contre les digues, affouillaient les fondations et créaient des érosions catastrophiques sur la plage.

A 350 m de la crête des digues, on sondait des profondeurs de 7, 50 m sous le niveau de marée basse aux vives eaux.

Le versant sud de la fosse de l'Appelzak s'était rapproché dangereusement des promenades et se retrouvait entre 170 m et 350 m des digues.

L'estran de Heist s'était abaissé entre 1910 et 1952 de plus de deux mètres.

A Knokke-Le Zoute, des dunes de plus de 5 mètres de hauteur avaient été balayées sur une largeur de plus de 20 mètres.

Une estimation grossière a révélé qu'environ 8.000.000 m³ de sable ont été enlevés entre 1910 et 1952 de la plage, de l'estran et de la terrasse sous-marine, dans cette zone côtière d'environ 10 km de longueur.

C'est en 1952, en accédant à la direction du service de la côte belge, que nous avons établi un programme complet de construction de vingt cinq longues jetées entre Heist et la frontière néerlandaise, dans ce triple but:

1. d'arrêter l'érosion et de défendre les digues;
2. de regagner du sable sur la terrasse sous-marine entre les jetées et de refouler la laisse de marée basse vers le nord ;
3. de créer la possibilité de relever les plages par des apports artificiels de sable le long des digues et de stabiliser ces apports.

COASTAL ENGINEERING

CHAPITRE 3

ETUDE PREALABLE DU PLAN DE DEFENSE ETABLI EN 1952

En vue de l'établissement du plan de défense, certaines opérations hydrographiques préalables et urgentes furent exécutées en mer. Ces opérations étaient:

a) sondages du fond de la mer sur le versant sud et au milieu de la fosse de l'Appelzak ;

b) reconnaissance superficielle de la nature des fonds dans la fosse de l'Appelzak et sur le banc du Paardenmarkt ;

c) mesure et étude de la vitesse des courants à la surface et près des fonds, déduction des courants moyens ;

d) 'étude de la houle et du plan des vagues, estimation des vagues de tempête les plus fortes ;

e) quelques mesures comparatives de transport de matériaux près du fond.

Ces opérations hydrographiques ont été complétées et suivies par des études, des déductions théoriques et des comparaisons avec nos connaissances au sujet de ces différents phénomènes et des situations à d'autres endroits de la côte belge.

Un aperçu succinct des résultats de ces mesures et de ces études, doit suffire dans le cadre de cet exposé:

1. AMPLITUDES ET NIVEAUX DES MAREES.

Les niveaux moyens de marée haute et de marée basse sont approximativement les mêmes à Zeebrugge, à Heist et à Knokke.

	<u>Vives eaux moyennes</u>	<u>Mortes eaux moyennes</u>
Niveaux moyens de marée haute	Z + 4,70	Z + 3,75
Niveaux moyens de marée basse	Z + 0,25	Z + 1,00
Amplitude	4,45 m	2,75 m

La marée de tempête la plus violente, pour laquelle nous disposons de mesures, a été celle du 1er février 1953. La marée haute a atteint le niveau Z + 6,90.

**LA DEFENSE ET LE MAINTIEN DES PLAGES BELGES
ENTRE ZEEBRUGGE ET LA FRONTIERE NEERLANDAISE**

L'amplitude de la marée lunaire est: 3,40 m. L'amplitude moyenne des marées est 3,60 m. La célérité de l'onde marée est d'environ 15 m/sec.

La durée entre la marée haute et la marée basse suivante est à Zeebrugge en moyenne de 6 h 30'.

2. SONDAGES - PROFONDEURS.

Les profondeurs sondées sur le versant sud et le fond de la fosse de l'Appelzak en 1952, sous Z 0.00 (niveau moyen des vives eaux à Ostende) sont reprises dans le tableau suivant. Les profils ont été pris suivant une perpendiculaire à la digue de Mer.

Les distances cumulées sur les profils sont mesurées à partir de la ligne reliant les extrémités septentrionales des revêtements carrossables des jetées à construire (+ vers le nord - vers le sud à partir de cette base).

Profils		Crête de la digue de Mer	Profondeurs sous Z - 0.00 (m) - Dist. cum. à partir base.				
N°	Axe de la jetée	Endroit	Entre distance (m)	Côte	distan- ce à la base	- 125 m.	- 75 m.
1	51	Heist Parc Heist	950	+9,35	- 434		
2	1	Duinb Avancée W		+9,46	-379		
3	3	Duinb Avancée E		+9,54	-342		
4	7	Duinb. Albert Plage	1870	+9,53	-495	2,50	4,50
5	1	Knokke Av. Lippens		+9,54	-326		
6	5	Knokke Pl. Albert	2250	+9,64	-370		
7	10	Knokke Lekkerbek		+9,80	-311		
8	12	Knokke Le Zoute	1000	+9,73	-358		2,00
9	14	Knokke Le Zoute		+9,55	-325		
10	22	Knokke Zwin		1440	+10,50	-320	

(suite)

N° /	- 25 m.	+ 25 m.	+ 75 m.	+ 125 m.	+ 175 m.	+ 225 m.
1		2,20	3,65	4,10	4,45	4,90	5,20
2		2,20	3,65	4,45	4,80	5,10	5,20
3		2,80	4,70	5,80	5,80	5,80	5,80
4		5,40	5,40	5,75	5,80	6,00	6,00
5		6,80	8,80	8,80	8,65	8,55	8,50
6		2,60	4,90	7,10	7,65	7,75	7,80
7		4,00	5,70	6,90	7,45	7,45	7,45
8		3,70	5,30	6,40	6,90	7,35	7,55

COASTAL ENGINEERING

N°	- 25 m.	+25 m.	+ 75 m.	+125 m.	+ 175 m	+ 225m
9	3,40	5,30	6,40	7,00	7,25	7,30
10	3,25	4,15	5,35	6,35	7,10	7,25

Il résulte clairement de ce tableau qu'à 400 m au nord de la crête des digues et des promenades, on retrouve les grandes profondeurs de la fosse de l'Appelzak, entre l'avenue Lippens à Knokke et le Zwin.

En 1952, la laisse de marée basse des vives eaux s'était rapprochée jusqu'à 170 m de la crête de la digue, devant l'avenue Lippens et devant le Lekkerbek à Knokke (profils 5 et 7)

3. NATURE DES FONDS.

Le versant sud de la fosse de l'Appelzak est en somme une section à faible pente à travers les anciennes couches géologiques entre Z-0.00 et Z- 9.00, On y rencontre de la tourbe, du limon et du sable à faible profondeur.

Ce versant, tout comme le fond de la fosse, sont toutefois recouverts par une couche de sable d'épaisseur variable. Ce sable subit des mouvements et des charriages.

On retrouve des fonds de sable dans la fosse du môle devant le port de Zeebrugge ; devant Heist et dans les grandes profondeurs des Wielingen en face de Kadzand.

Le banc du Paardenmarkt et le Zand au Nord de Zeebrugge sont couverts d'une couche limoneuse,

La couche a 0,50 m. d'épaisseur au Paardenmarkt entre Z -5,50 et Z - 6,00 et plus de 2 m au Zand entre Z - 7,00 et Z - 9,00

Une faible couche de sable, à certains moments mélangé de vase, et ayant 2 à 3 cm d'épaisseur, est charriée sur ces bancs.

4. VITESSE DES COURANTS

Dans l'axe de la fosse de l'Appelzak, les vitesses des courants maxima de flot et de jusant s'établissent dans la direction de cet axe, c. à. d. parallèlement à la côte.

Le courant de flot est dirigé vers l'Est (70 à 80°), s'établit entre 2 h 50' avant marée haute, jusqu'à 2 h 30' après marée haute et atteint

**LA DEFENSE ET LE MAINTIEN DES PLAGES BELGES
ENTRE ZEEBRUGGE ET LA FRONTIERE NEERLANDAISE**

son maximum de vitesse vers 50' à 1 h avant marée haute.

Le courant de jusant est dirigé vers l'Ouest (250 à 260°) s'établit entre 2 h 30' après marée haute jusqu'à 3 h avant la marée haute suivante et atteint son maximum 5 h après la marée haute ou 1 h 30' avant la marée basse.

Les renversements entre ces deux directions opposées sont très rapides (durée maxima de 10' surtout aux vives eaux)

Les vitesses maxima sont variables selon l'amplitude de la marée verticale, abstraction faite des influences du vent et de la houle.

Quelques vitesses maxima mesurées à différentes profondeurs sont indiquées dans les tableaux suivants:

Courant de flot - Vitesse en cm/ sec.

Amplitude de la marée verticale m	à la surface	à 3m sous la surface	à 2m au- dessus du fond	à 0,15 m du fond
A = 2,60	87	76	62	41
A = 3,60	145	127	88	69
A = 4,70	200	178	124	96

Courant de jusant - Vitesse en cm/sec.

Amplitude de la marée verticale m	à la surface	à 3m sous la surface	à 2m du fond	à 0,15 m. du fond
A = 2,60	68	65	57	40
A = 3,60	114	108	80	68
A = 4,70	160	151	105	95

Toutes ces vitesses sont élevées et de nature à affouiller sérieusement les fonds de sable. Elles peuvent créer des transports de matériaux conséquents.

5. HOULE ET VAGUES DE TEMPETE.

Les vents prédominants viennent du secteur S-W à W. Le fetch ne

COASTAL ENGINEERING

dépasse toutefois par 180 km à partir de l'embouchure de la Tamise et de la côte anglaise.

Les vents soufflant du secteur W à N-W sont déjà plus dangereux et le fetch augmente légèrement à partir de la côte anglaise entre Harwich et Great Yarmouth.

Les vents de tempête les plus dangereux sont, ceux venant du secteur NW-N et N-NE, le fetch dépassant largement le millier de miles.

Selon les statistiques du service de la météorologie marine en Allemagne (1), 36% des vagues ne dépassent pas 1 m en hauteur, 67 % ne dépassent pas 2 m et seulement 5 % dépassent 5 m.

Pour 96% des cas, la période est comprise entre 3 et 8 secondes, et pour 50% des cas, entre 5 et 6 secondes.

Nous avons enregistré au bateau-phare West-Hinder, le 16 octobre 1958, pendant une violente tempête du NW-N (échelle Beaufort 11), quelques vagues de 6,6 m de hauteur avec période de 7 secondes. Cet enregistrement a été fait avec un Shipborne Wave-Recorder de Tucker. La marée haute atteignit ce jour là Z + 5,70 à Ostende.

Il faut toutefois noter, que les profondeurs dans le delta de l'Escaut entre le Wandelaar et la frontière néerlandaise ne dépassent pas 10 m sous marée basse et 12,5 m sous le niveau moyen de la mer, et que plusieurs bancs, à une profondeur de 6 à 8 m sous le niveau moyen de la mer, protègent la côte.

Les fonds sont très irréguliers. La houle forte et les vagues à haute amplitude se réfractent plusieurs fois avant d'aborder les côtes.

La réflexion des vagues contre les perrés trop raides produisait avant 1953 et à marée haute une houle très gaufrée et très irrégulière. C'était surtout le cas avant la construction des longues jetées.

La diffraction de la houle autour du môle de Zeebrugge et la réfraction sur les fonds à faible profondeur devant Heist à l'Est de la rade, produisent une houle incidente normale à la plage entre les écluses et le parc de Heist. Le programme de défense dont traite cette étude n'a pas été étendu à cette zone. Devant Duinbergen, Albert Plage, Knokke et Le Zoute, les profondeurs plus grandes de l'Appelzak favorisent la progression de la houle dans le sens de la passe, c. à. d. vers l'Est. C'est aussi la direction des vents prédominants. A cause du versant à forte pente, les fortes vagues

LA DEFENSE ET LE MAINTIEN DES PLAGES BELGES ENTRE ZEEBRUGGE ET LA FRONTIERE NEERLANDAISE

attaquent avec déferlement la plage sous un angle de 45° à 30° avec la normale sur les digues.

En tout cas, la présence des bancs et, spécialement, celui du Paardemarkt, limite la hauteur maxima des vagues qui peuvent attaquer la plage pendant les plus violentes tempêtes ; à marée basse, cette hauteur est limitée à 4 m. A marée haute, à 6 m environ.

Comme les grains de sable ont un diamètre inférieur à 200 microns (de 60 à 160 microns), des vitesses alternatives au fond d'environ 0,10 m/sec peuvent déjà les soulever.

Une houle de 2 m de hauteur et d'une période de 6 secondes produit déjà une telle vitesse à 27 m de profondeur.

Les fortes houles et les vagues de tempête sont donc également, par intermittance mais d'une manière beaucoup moins continue que les courants de marée, des agents transporteurs de matériaux très actifs. Elles alimentent surtout la zone du delta en matériaux provenant de la mer et du large en période de tempête.

Avant 1953, les vagues de tempête à forte cambrure attaquaient obliquement et dangereusement les plages par déferlement sur le sable et par ressac contre et affouillement devant les digues.

Depuis la construction des jetées, elles déferlent sur les talus à faible pente de celles-ci et la réflexion a été réduite dans une large mesure.

Il faut noter que les houles longues et régulières de 0,50 m. à 1 m de hauteur et d'environ 50 m de longueur continuent à progresser vers les plages sous un angle d'incidence réduit par rapport à la direction NW-N et restent de précieux agents engraisseurs des plages.

6. TRANSPORT DES MATERIAUX.

Le transport des matériaux dans la fosse de l'Appelzak et sur son versant méridional est avant tout causé par les courants marins.

Le courant de flot, étant le plus fort, transporte les matériaux vers l'Est. Le courant de jusant crée un transport vers l'Ouest. Dans l'Appelzak la résultante du mouvement reste dirigée vers l'Est. Les houles et vagues créent à partir d'une certaine amplitude et longueur d'onde, un transport supplémentaire dirigé vers la plage (S. E.) et vers l'Est.

La résultante annuelle de tous ces transports reste donc nettement dirigée vers l'Est le long de la côte et dans la fosse de l'Appelzak.

COASTAL ENGINEERING

Il faut toutefois remarquer, que dans la passe des Wielingen au nord du Paardemarkt, la résultante des transports, dûs aux courants de marées, est dirigée vers l'Ouest. Il en est de même à l'embouchure de l'Escaut entre Breskens et Vlissingen.

L'eau est toujours fortement chargée de vase et d'argile marine (2 à 20microns) même dans les couches supérieures à cause des courants marins à vitesse élevée et de la turbulence.

La visibilité dans l'eau est nulle, sauf à très courte distance (quelques décimètres) par beau temps et pendant quelques minutes seulement au renversement du courant.

Le sable est surtout charrié sur les fonds par temps calme, mais entre partiellement en suspension quand la mer devient houleuse.

Les mesures effectuées avec un appareil "SPHYNX" pour déterminer les quantités de matériaux, transportés près du fond, donnent des résultats très divergents, mais qui, en moyenne, concordent avec des mesures indirectes et avec nos calculs.

Notre étude, publiée au Congrès International de Navigation de Londres en 1957 (2), a traité ce sujet en détail.

Nous voulons simplement rappeler ici, que nous estimons le transport global de sable sur le fond de la mer à travers une section perpendiculaire à la côte à environ 200 m³ par mètre du fond et par an devant le port d'Ostende. Il s'agit de la somme du transport de flot vers l'Est et du transport de jusant vers l'Ouest.

Dans la fosse devant le port de Zeebrugge et dans l'Appelzak, ce transport est évalué à environ 400 m³ par mètre de fond et par an.

La résultante absolue du transport vers l'Est à travers une section bien déterminée ne serait toutefois que de l'ordre de 80 m³ par mètre de fond et par an

La fosse de l'Appelzak est alimentée en matériaux par l'Ouest, le Nord et même par l'Est (jusant)

La distance entre Zeebrugge et la frontière néerlandaise est d'environ 12 km.

Aux vives eaux et en surface, le flux vers l'Est (flot) est d'environ 20 km et vers l'Ouest (jusant) d'environ 18 km.

La fosse de l'Appelzak est donc parcourue par les courants sur toute sa longueur et, à chaque marée, par deux courants inverses.

LA DEFENSE ET LE MAINTIEN DES PLAGES BELGES ENTRE ZEEBRUGGE ET LA FRONTIERE NEERLANDAISE

Les matériaux sont alternativement transportés dans les deux sens opposés.

+ ++ +

CHAPITRE 4

PLAN DE DEFENSE JUSTIFICATION TECHNIQUE ET FINANCIERE

L'endigement complet des dunes, l'existence des perrés, des promenades et des propriétés privées sur toute la longueur de la côte ne permettaient plus de recul des plages.

Il fallait donc refouler la laisse de marée basse vers le Nord et gagner du terrain sur la mer et plus particulièrement sur la fosse de l'Appelzak.

C'était sans doute une solution onéreuse à cause des grandes profondeurs de la fosse, mais c'était l'unique solution possible. Si la solution était devenue onéreuse, c'était avant tout à cause de l'énorme retard qu'on avait accumulé et toléré avant de résoudre le problème.

L'amplitude de la marée, les vitesses élevées des courants de marée longitudinaux, les directions de la houle, la présence de sable sur les fonds et les transports de sable causés par les courants, ont dicté en 1952 l'unique programme de défense possible, notamment le prolongement et la construction jusque dans la fosse de l'Appelzak d'une série de 25 jetées d'une longueur variant entre 350 et 535 m à partir de la crête des perrés, bordant les digues.

La longueur minimum de 350 m a été établie de façon à obtenir une hauteur de l'estran minima devant le para fouille les digues de $Z + 3,70$. Le niveau supérieur des para fouilles est à la côte de marée haute aux mortes eaux, c. à d. $+ Z + 3,50$. Les calculs préalables avaient prouvé qu'il fallait, pour atteindre ce but, regagner un volume de sable de 3.000.000 m³ entre les jetées.

Les extrémités du côté mer se trouvent à la côte $Z + 0,70$ et sont établies sur une ligne de base régulière déjà située dans la fosse, aux grandes profondeurs (fig. 1)

La hauteur des enrochements de la tête atteint par endroits 8 à 9 m.

COASTAL ENGINEERING

L'entredistance est variable en fonction de la longueur des jetées et de leur situation devant les digues.

Le profil en long de chaque jetée présente une pente variant entre 2 et 1,5 % selon la présence ou l'absence d'une possibilité de réflexion de la houle contre les digues de mer à forte pente.

La pente à la tête des jetées du côté mer est de 5 : 1 (revêtement perméable) (fig. 2)

La section transversale de la tête présente un plan horizontal à la côté Z + 0,70 de 6 m de largeur avec une voie carrossable de 3 m de largeur et des pentes vers les fonds de 4 : 1 (revêtement perméable) (fig. 3)

Aucune pente, même dans les sections les plus proches des digues, n'est plus forte que 3 : 1 dans la partie supérieure et que 5 : 1 dans la partie inférieure (revêtement imperméable)

Le but a été d'intercepter la houle et les vagues mais d'éviter toute réflexion

La voie carrossable est établie sur toute la longueur de la crête de la jetée ; afin de faciliter l'exécution et l'entretien ultérieur.

L'urgence des mesures à prendre a été prouvé d'une manière éclatante lors de la marée tempête du 1er février 1953. Les dégâts causés aux digues et épis des plages belges de l'Est sont chiffrés à 250.000.000 F. B., montant plus élevé que les frais de réparation aux autres sites balnéaires et aux ports de la côte belge dans leur ensemble

A ce moment, les travaux de la première jetée venaient tout juste de commencer.

Or, l'exécution des travaux a coûté depuis lors:

25 jetées	:	325 millions de francs
refoulement de sable:		29 millions de francs
		<hr/>
Total:		<u>354 millions de francs</u>

Si le programme avait été exécuté et terminé avant le 1er février 1953, il n'existe aucun doute, que pas mal de millions de francs auraient été économisés.

Nous avons en outre chiffré le montant des investissements publics et privés, rien que dans la zone de 250 mètres de large et de 8.000 m de long formant la véritable digue de mer en ces endroits:

LA DEFENSE ET LE MAINTIEN DES PLAGES BELGES
ENTRE ZEEBRUGGE ET LA FRONTIERE NEERLANDAISE

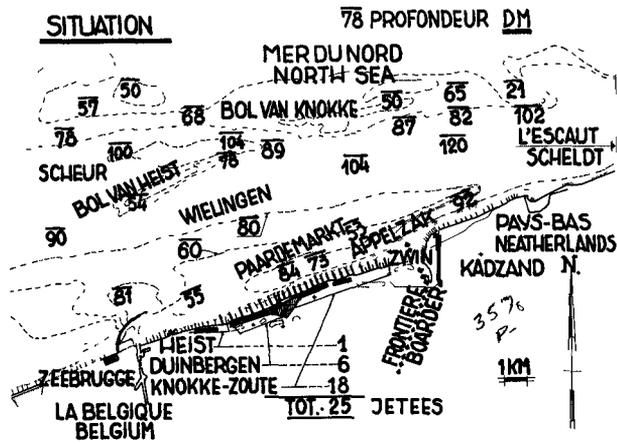


Fig. 1. Situation-profondeurs-jetées.

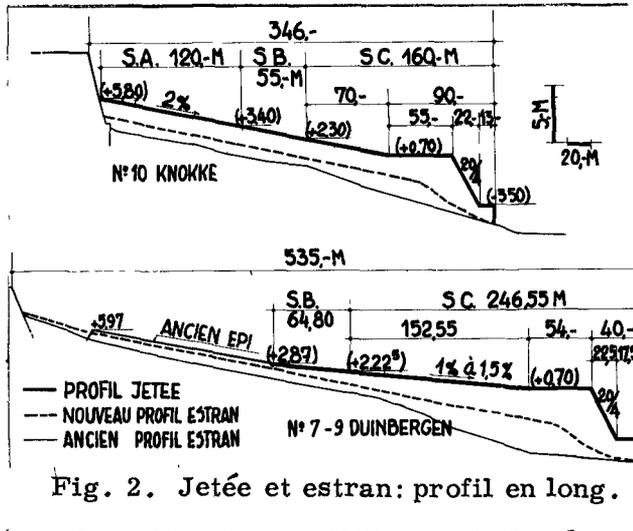


Fig. 2. Jetée et estran: profil en long.

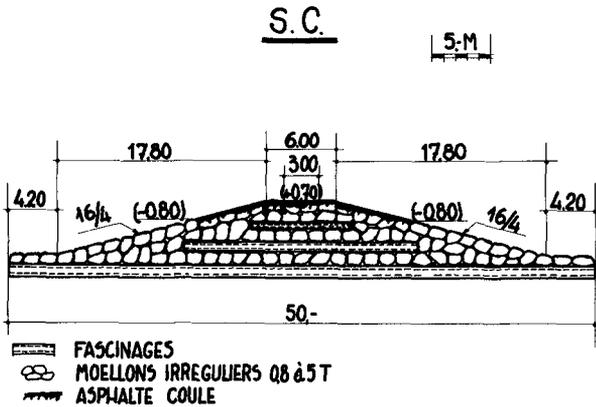


Fig. 3. Groyne and beach profile, Section C.

COASTAL ENGINEERING

a) investissements publics (perrés - promenades - chaussées égouts - canalisations - cables) :	1 milliard de francs B.
b) valeur des terrains privés :	15 milliards de francs B.
c) valeur des bâtiments privés :	15 milliards de francs B.
Total:	<u>31 milliards de francs B.</u>

Le programme de défense de ces plages a donc coûté un peu plus de 1 % de la valeur de la première digue de défense du pays contre l'envahissement par la mer.

+ ++ +

CHAPITRE 5

EXECUTION DES TRAVAUX - 1952 - 1960

Les travaux aux trois premières jetées ont commencé fin 1952, trois mois avant la marée tempête du 1er février 1953, et les deux dernières jetées ont été terminées en juin 1960.

Mais déjà en septembre 1956 vingt-trois des vingt-cinq jetées étaient ou terminées ou en voie d'achèvement.

C'est à ce moment en 1956, 1957 que l'engraissement des plages a été accéléré par le refoulement de 1.250.000 m³ de sable sur les perrés des digues de mer.

Ce sable a été sucé et emprunté dans le sous-sol de la région poldérienne au sud du chemin de fer Heist-Knokke (formation holocène moyen et inférieur et pleistocène).

Un étang de 10 ha et de 28 m de profondeur y a été créé à environ 1,5 km au sud de la digue de mer.

Le sable a été refoulé sur les plages sans reprise à une distance maxima de 5 km de l'étang par un cutter très puissant (Vlaanderen XI).

Les particularités essentielles de la construction des jetées sont les suivantes:

La partie la plus importante est la section C, située en mer sur la terrasse sous-marine. Cette section est construite sur pièces échouées

LA DEFENSE ET LE MAINTIEN DES PLAGES BELGES
ENTRE ZEEBRUGGE ET LA FRONTIERE NEERLANDAISE

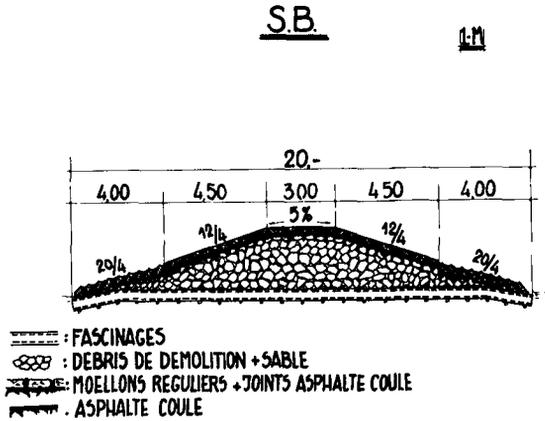


Fig. 4. Groyne and beach profile, Section B.

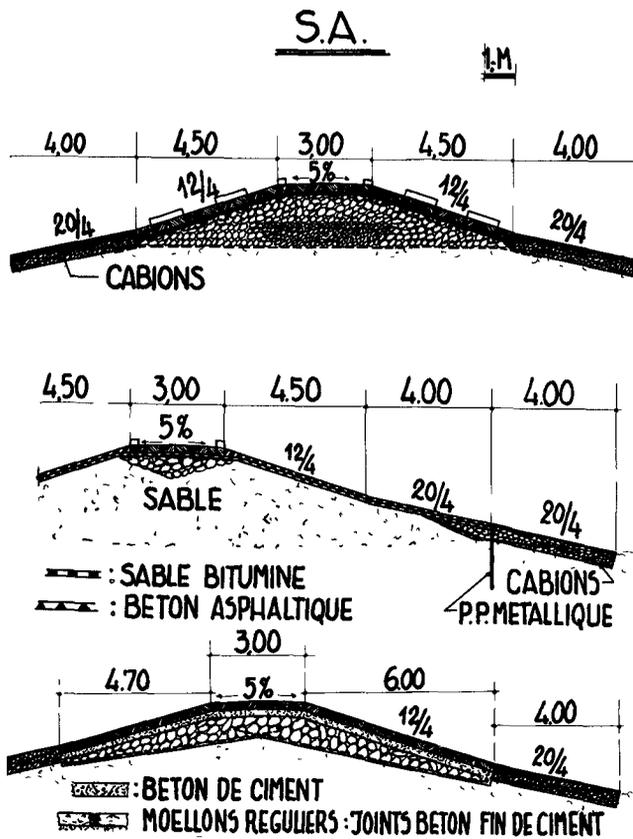


Fig. 5. Groyne and beach profile, Section A.

COASTAL ENGINEERING

de fascinages, dont les largeurs atteignent jusque 60 m (fig. 3).

La crête est établie à la côte Z + 0,70 en moyenne. Des gros moëllons dont le poids atteint 3 000 à 5.000 kg en carapace, constituent cette section.

A l'extrémité nord de la section C, les talus sont consolidés et protégés par le déversement d'asphalte coulé à chaud à raison de 900 kg par m². La crête de 6 m de large reçoit une pénétration d'asphalte coulé et est établie en voie carrossable.

La section B est située sur l'estran entre la côte (0,00) et la côte (+ 1,00). Il s'agit d'une pièce d'échouage en fascines, lestée par moëllons au débris de démolitions. Un revêtement en moëllons réguliers de 300 à 400 Kg recouvre tout le massif. Ces moëllons sont fixés et rejointés par l'asphalte coulé (fig. 4)

La démolition des ouvrages militaires datant de la seconde guerre mondiale et qui étaient très nombreux dans les dunes et le long du littoral, a permis la récupération de débris et de moëllons, qui constituent maintenant le corps des sections A et B des nouvelles jetées.

La Section A, située sur l'estran proprement dit, se construit de diverses façons, selon qu'il s'agit d'une jetée toute nouvelle ou d'un rehaussement d'une jetée existante, selon qu'il y a présence ou non de tourbe etc. . . (fig. 5)

La section A, entre la digue et la section B, est constituée de parafouilles et/ou de plates-bermes, d'un massif formant le corps de la jetée et d'un revêtement.

Le parafouille est constitué de palplanches métalliques ou de gabions métalliques remplis de moëllons. Les vides sont remplis d'asphalte coulé ou de béton.

Le corps est constitué de débris de démolition et de sable. Le revêtement est exécuté soit en moëllons de pierres calcaires maçonnés ou rejointoyés au bitume ou à l'asphalte coulé, soit en blocs de béton préfabriqués.

Pour certaines jetées, la partie supérieure, située au-dessus de mi-marée, a reçu un revêtement en sable bitumineux et béton asphaltique.

Les fascines ne sont jamais employées au-dessus de la côte (+1,00)

+ + +

LA DEFENSE ET LE MAINTIEN DES PLAGES BELGES
ENTRE ZEEBRUGGE ET LA FRONTIERE NEERLANDAISE

CHAPITRE 6

RESULTATS OBTENUS

Des sondages réguliers nous ont permis de suivre la progression du réensablement de la fosse entre les jetées nouvellement construites (voir réf. 2).

Les derniers sondages ont été effectués en septembre 1959.

Le tableau suivant donne un aperçu des résultats obtenus et donne le gain en m² par profil, à partir de la digue jusqu'à la ligne de base, reliant l'extrémité des jetées, ainsi que le relèvement maximum :

Profil situé entre les jetées	Relèvement maximum en m	Gain de sable en m ² par profil
n° 51 à Heist et n° 1 à Dunbergen	1,5	345
n° 3 et n° 5 à Dunbergen	1,5	350
n° 9 et n° 10 à Duinbergen	1,3	440
n° 2 et n° 3 à Knokke	2,6	510
n° 4 et n° 5 à Knokke	0,9	243
n° 6 et n° 7 à Knokke	1,4	430
n° 9 et n° 10 à Knokke	2,5	425
nr 12 et n° 14 à Knokke	1,6	240
 <u>2 Profils à gain record:</u>		
n° 10 à Duinbergen et n° 1 à Knokke	<u>3,1</u>	<u>850</u>
n° 11 et n° 12 à Knokke	<u>2,7</u>	<u>685</u>

Les deux profils, où nous atteignons un gain record, sont situés dans des zones où une très forte érosion existait avant et où actuellement la marée haute n'atteint plus les digues

Le bilan qui en résulte s'établit comme suit en septembre 1959:

COASTAL ENGINEERING

gain naturel de sable entre 1953 et 1959:	1.750.000 m ³
déversement artificiel en 1956 et 1957 entre jetée 49 à Heist et jetée 12 à Knokke:	<u>1.250.000 m³</u>
Gain total en profil:	3.000.000 m ³

Le gain naturel a été d'environ 300.000 m³ par an jusque 1957 et a diminué depuis à l'approche du nouvel état d'équilibre.

Entre septembre 1957 et septembre 1959, le gain total sur le fond de la fosse au nord de la laisse de marée basse et au sud de la ligne de base reliant les extrémités des jetées a été d'environ 600.000 m³.

Pendant cette même période de deux ans, un certain volume de sable, déversé artificiellement en 1956 et 1957 devant les digues, a été balayé et transporté vers les profondeurs au nord de la laisse de marée basse.

Le volume du sable déplacé s'élève à environ 300.000 m³. Ce déplacement a eu lieu entre les jetées 1 et 3 à Duinbergen et les jetées 1 et 10 à Knokke. Ce sont les deux zones où la réflexion des vagues contre les digues reste fréquente en cas de tempête.

Il reste donc pendant ces deux années un gain naturel de 300.000 m³ ou 150.000 m³ par an en moyenne.

Le gain total de 3.000.000 m³ de sable représente la quantité estimée préalablement nécessaire pour la stabilisation et pour le nouvel état d'équilibre des plages belges du littoral Est entre Dunbergen et la frontière néerlandaise.

REFERENCES

1. O. PETRI : Statistik der Meereswellen in der Nordsee
Seewetteramt des Deutschen Wetterdienstes.
2. J. E. L. VERSHAVE: Maintenance of Beaches between the port of Zeebrugg
and the Netherland's frontier
19 th. International Navigation Congres 1957 London