

MEMOIRES — VERHANDELINGEN

---

# Etude des Ports Belges de la Mer du Nord.

---

ESSAIS SUR MODELES REDUITS.

---

L. BONNET,

Administrateur-Inspecteur Général  
honoraire des Services Maritimes  
d'Anvers.

J. LAMOEN,

Ingénieur en chef-Directeur des Ponts  
et Chaussées. Directeur du Laboratoire  
Hydraulique des Ponts et Chaussées  
Professeur extraordinaire à l'U. L. Br.

---

(Planches 17 à 19)

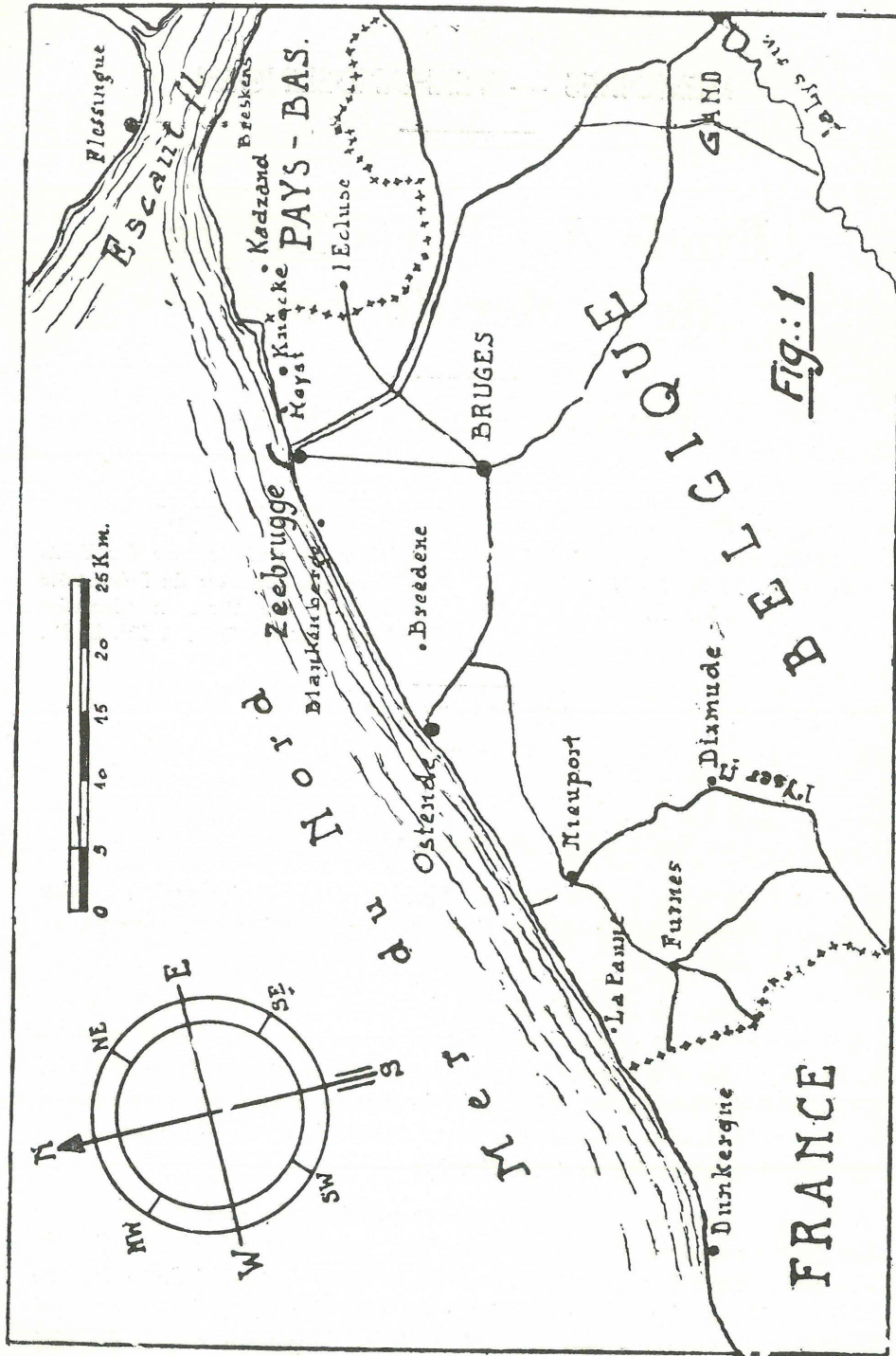
---

## Préambule.

Les ports belges de la Mer du Nord peuvent être classés en deux catégories suivant leur configuration et leur situation par rapport au bord de la mer :

1° Les ports situés à l'intérieur des terres, mais très proches de la plage cependant, et communiquant avec la mer par un chenal relativement peu large en rapport avec sa longueur, le chenal étant délimité par des jetées basses, qui dépassent de peu le niveau de marée basse, et bordé d'estacades en bois. Les ports d'Ostende et de Nieuport appartiennent à cette catégorie (voir fig. 1);

2° Les ports gagnés sur la mer et protégés du côté du large par des jetées massives s'avancant jusqu'aux grandes profondeurs. Sur la côte belge il n'existe qu'un seul port de ce type, c'est celui de Zeebrugge (fig. 1). Il est abrité par une jetée du côté des vents dominants, qui soufflent du secteur Ouest à Nord, et il est largement ouvert du côté Nord à Est.



Ce sont les ports de la première catégorie qui furent les premiers à être construits en Belgique. Leur réalisation est relativement aisée; elle n'exige pas des moyens d'exécution très puissants et leur coût n'est pas excessif. Les ports de cette catégorie furent conçus pour recevoir des navires de faible et moyen tonnage et ils n'ont pas besoin d'un chenal d'entrée très large.

Quand on se limite à ce genre de navires, les ports avec chenal d'accès donnent pleine satisfaction et le maintien des profondeurs nécessaires sous marée basse, qui ne doivent pas dépasser cinq à six mètres, ne présente pas de difficultés. Mais ces ports ne conviennent guère aux transatlantiques modernes, qui ont de grandes dimensions et qui ont besoin d'un large espace pour leurs évolutions. Aussi, dès qu'ils appaurent, le besoin se fit sentir de posséder, sur la côte belge, un port capable de les recevoir. Le seul dispositif qui puisse convenir, quand on ne dispose pas d'un large estuaire ou d'un fleuve à marée puissant, comme c'est le cas sur la côte belge, c'est celui des môles s'avancant jusqu'aux grandes profondeurs de la mer. Des ports de cette nature ont été construits avec plein succès sur les côtes de la Méditerranée et de l'Océan Atlantique, en des endroits où les eaux ne contiennent pas de vase en suspension et où l'afflux du sable n'est pas à redouter. Mais là où la marée, la vitesse des courants, l'estran sablonneux et la teneur en vase des eaux viennent compliquer le problème, les ports extérieurs, protégés par des digues massives, n'ont pas toujours donné entière satisfaction.

Sous ce rapport, la côte belge, et principalement la partie devant Zeebrugge, présente de sérieuses difficultés pour réussir du premier coup un port de cette espèce. En effet, la marée y marne en moyenne de 3 m. 70 et produit des courants dont la vitesse peut, en certains points, dépasser largement 1,50 m.-sec. D'autre part, l'estran sous-marin est composé d'un sable fin, tandis que l'eau contient environ 250 gr.-m<sup>3</sup> [chiffre moyen (1)] de vase en suspension.

Le sable est aisément mis en mouvement par les courants marins et entre dans un port abrité, où il forme des bancs qui constituent de sérieux obstacles à l'entrée et la sortie des navires. D'autre part, l'eau, en pénétrant dans une rade fermée, perd en grande partie sa vitesse et la vase qu'elle contient se dépose sur le fond.

On peut assez facilement enlever aux bancs de sable leur caractère de nuisance en faisant intervenir les dragues. Mais la lutte contre l'enva-

(1) La teneur en vase peut être considérablement plus basse; parfois aussi elle devient un multiple du chiffre indiqué.

sement est beaucoup plus difficile, à cause de son intensité et du fait qu'il se produit aussi aux emplacements réservés aux navires.

Les ingénieurs ont conscience de cette difficulté et certains vont jusqu'à dire que l'envasement est un obstacle insurmontable à l'établissement d'un port en eau profonde, non parcouru par des courants de marée.

Afin de combattre le dépôt de la vase, il fut prévu dans la jetée du port de Zeebrugge (voir planche n° 17) une claire-voie qui eût d'abord 400 mètres de long, mais qui fut raccourcie de 100 mètres en cours d'exécution.

La digue a un tracé courbe. Elle part du rivage et s'avance en mer jusqu'à une distance de 1.300 mètres de la côte, où elle est établie dans les profondeurs de 8 m. 00 sous marée basse.

La claire-voie commençait à 232 mètres du bord et était dotée d'une estacade métallique dont l'ensemble des travées avait une ouverture de 300 mètres. Le fond était défendu contre les érosions par un enrochement arasé à la cote (0.00 m) <sup>(1)</sup> du côté du rivage et à la cote (— 5,00 m.) du côté du large.

La claire-voie ainsi aménagée permettait aux courants de marée de pénétrer dans la rade, mais leur action était fortement gênée par le manque de profondeur de la claire-voie et par la divagation des courants à l'intérieur de l'avant-port.

La conception théorique de la claire-voie était excellente, mais son adaptation pratique était mauvaise. Il en résulta que les profondeurs de 8 m. 00 sous marée basse, que l'on désirait obtenir au pied du môle, ne purent être atteintes. De plus, la vase se déposa dans tout le port et, d'une façon particulièrement intense, au centre de celui-ci et à l'Est du chenal conduisant à l'écluse maritime, laquelle donne accès au canal maritime de Bruges. Il y eut donc formation d'un banc au centre de la rade, en même temps qu'apparition d'une zone boueuse du côté Est du port.

À la suite de cet insuccès, des discussions s'élevèrent entre les ingénieurs hydrauliciens, discussions qui avaient pour objet de déterminer les causes de l'envasement et la recherche des moyens pour y mettre fin.

(1) Le plan de référence (0 m. 00) de tous les sondages, dont question dans le présent mémoire, passe par la cote de marée basse moyenne des marées de vives-eaux normales à Ostende. Ce plan dépasse de 1 m. 48 le seuil de l'écluse donnant accès aux anciens docks de commerce de cette ville. Les cotes positives sont situées au-dessus de ce plan de référence; les cotes négatives se trouvent au-dessous.

Diverses solutions furent proposées. Les unes fermaient complètement la claire-voie et transformaient le port de Zeebrugge en une rade sans courants maritimes directs <sup>(1)</sup>. Les autres, au contraire, accentuaient le rôle de la claire-voie et comptaient sur un renforcement des courants marins, ainsi que sur un meilleur guidage de ceux-ci, pour empêcher le dépôt de la vase.

Les protagonistes de l'un ou l'autre système présentaient des arguments, mais ils ne parvenaient pas à faire pencher la balance en faveur d'une solution déterminée. Devant la stérilité de ces controverses, le Gouvernement belge décida de faire examiner le problème de la rade de Zeebrugge par des laboratoires de recherches hydrauliques.

Une première étude fut entreprise par le Waterloopkundig Laboratorium à Delft (Pays-Bas). Une seconde fut exécutée par le Laboratoire de Recherches Hydrauliques des Ponts et Chaussées de Belgique à Borgerhout-Anvers.

C'est le compte rendu de l'examen fait par le laboratoire belge qui fait l'objet de la première partie du présent mémoire. Il montre le mécanisme de l'atterrissement dans la rade de Zeebrugge et analyse les moyens qui peuvent être mis en œuvre pour le diminuer ou y mettre fin.

La seconde partie du mémoire concerne les essais effectués pour le port d'Ostende, dont on désire améliorer l'entrée, la largeur de celle-ci étant devenue insuffisante pour les unités de plus en plus rapides de la ligne des paquebots Ostende-Douvres. Pour mettre au point un projet améliorant la situation existante, nous avons dû rechercher au préalable les causes d'envasement et d'ensablement du port d'Ostende. Une fois ces causes connues, nous avons pu indiquer le rendement maximum qu'on peut tirer d'un port dont l'accès est assuré par un chenal relativement long comparé à sa largeur.

Dans le présent mémoire nous étudions donc le comportement des ports de différents types pouvant être établis sur une côte sablonneuse, soumise à marée et baignée par des eaux contenant de la vase en suspension. Nous indiquons les meilleures dispositions à donner à ces ports, ainsi que leurs possibilités maxima au point de vue des dimensions des navires qui peuvent les fréquenter.

(1) La claire-voie fut fermée en 1929.

## PREMIERE PARTIE.

### Essais sur modèles relatifs à l'amélioration de la rade de Zeebrugge.

#### CHAPITRE I.

##### INSTALLATION DES MODELES.

###### § 1. — Objet des recherches.

Comme il a déjà été dit dans le préambule de ce mémoire, le Laboratoire de Recherches Hydrauliques de l'Administration des Ponts et Chaussées (Ministère des Travaux Publics de Belgique) fut chargé d'entreprendre des essais sur modèles réduits concernant les moyens à mettre en œuvre pour diminuer les atterrissements dans la rade de Zeebrugge.

A la suite d'un échange de vues avec les services intéressés, il fut décidé d'étudier en premier lieu les projets cherchant à réaliser l'amélioration du port de Zeebrugge par la suppression des courants marins dans cette rade. Ces projets s'inspirent de la situation existant depuis 1929, année au cours de laquelle on ferma la claire-voie qui fut ménagée lors de la construction du port. On réalise ainsi des ports dits « sans courant », dans lesquels les volumes liquides, nécessaires pour suivre les variations du plan d'eau avec la marée, ne peuvent être amenés dans la rade que par son côté Est.

Après ce premier examen, le Laboratoire reçut mission d'étudier des dispositifs à claire-voie ouverte, celle-ci donnant admission à des courants marins qu'il s'agissait de guider convenablement par des digues appropriées.

###### § 2. — Projets soumis à l'examen.

Il n'a pu être question, dans ce mémoire, de publier intégralement tous les essais effectués, car le Laboratoire d'Hydraulique à Borgerhout-Anvers a étudié un très grand nombre de projets.

Nous avons rédigé le présent exposé dans l'intention uniquement de donner une synthèse des expériences et nous ne parlerons donc que de la situation existant en 1933, avec claire-voie fermée (situation qui sera toujours désignée ci-après par le symbole To), ainsi que de quelques-

uns des projets choisis parmi les plus importants ou les plus typiques, nous laissant surtout guider dans ce choix par les résultats que les dits projets permettent d'atteindre.

Ces dispositifs portent les noms suivants :

*Projets à claire-voie fermée* : T 14; Lab 3; Lab 4; M 2.

*Projets à claire-voie ouverte* : To à claire-voie ouverte; Lab 8 d.

###### § 3. — Description succincte du modèle.

La partie de la côte qui fut reproduite en modèle est figurée, en plan, à la planche n° 17. Elle fut exécutée selon la carte hydrographique Breedene-Kadzand (voir fig. 1) de 1933. Le port de Zeebrugge est situé entre ces deux localités.

L'alimentation en eau du modèle est assurée par une pompe centrifuge qui aspire l'eau d'un réservoir inférieur et la refoule dans un bac de jauge, pourvu à son extrémité aval d'un déversoir rectangulaire en mince paroi, lequel déversoir permet la mesure des débits envoyés dans le modèle. La conduite de refoulement de la pompe comporte une vanne pour le réglage des débits. Le courant liquide passe par-dessus le déversoir et se jette dans une chambre dont les deux extrémités sont pourvues chacune d'une porte. Le mouvement de ces deux portes est rendu solide par des tringles; celles-ci sont établies de telle façon que la porte de droite est entièrement ouverte lorsque celle de gauche est complètement fermée, et vice-versa. Au sortir de la chambre, l'eau s'engage dans un canal qui la conduit vers une des extrémités du modèle proprement dit : soit l'extrémité Ouest en cas de courant de flot, qui vient du Pas de Calais et se dirige vers l'embouchure de l'Escaut; soit l'extrémité Est, lors du courant de jusant. De part et d'autre de la chambre, un vannage est prévu dans la paroi du canal. Un de ces vannages est destiné au réglage du niveau d'eau du modèle lors du flot; l'autre vannage remplit le même office pour le jusant. Après avoir traversé le modèle, l'eau retourne au réservoir inférieur mentionné ci-dessus, d'où elle est à nouveau aspirée par la pompe et le même cycle recommence.

###### § 4. — Echelles du modèle.

Comme échelle des dimensions horizontales, on a choisi  $\frac{1}{n} = \frac{1}{650}$ .

Cette échelle résulte de la place disponible dans le Laboratoire, quand on prévoit, en outre, une prolongation ultérieure du modèle vers l'Est, afin de pouvoir utiliser la même maquette pour une étude concernant la défense de la côte à Knocke et aux environs de cette localité.

Comme échelle des profondeurs, on a pris  $\frac{1}{m} = \frac{1}{64}$ , afin de conserver une profondeur suffisante dans toute l'étendue du modèle.

L'exagération verticale ou « distorsion » du modèle atteignait donc une valeur de

$$\frac{650}{64} = 10,16.$$

Ce chiffre n'est pas excessif; il est admis par différents laboratoires pour des essais similaires. A Delft (1), la distorsion du modèle de Zeebrugge était de  $\frac{400}{60} = 6,67$  et les laboratoires anglais dépassent fréquemment les deux distorsions que nous venons d'indiquer. Ainsi, pour un modèle de l'embouchure de la Severn, le Professeur A. H. Gibson admet successivement pour la distorsion

$$\frac{8500}{100} = 85 \text{ et } \frac{8500}{200} = 42,5.$$

Dans son rapport sur cette étude (2), il qualifie d'usuelles (such vertical exaggerations as are usual) des distorsions de 20 à 40 et il déclare même : « in practice the ratio of horizontal to vertical scale ratio usually lies between 30 and 120 ». Par « practice » il faut évidemment entendre ici la pratique anglaise des essais sur modèles réduits.

Signalons encore que, pour la première maquette qu'il construisit pour la Mersey, Reynolds prit le rapport  $\frac{31.800}{960} = 33,2$ . Dans le deuxième modèle de ce cours d'eau, les échelles étaient de 6 pouces pour 1 mille (statute mile), ce qui donne

$$\frac{2 \times 3 \times 1.760}{12 \times 33} = 26,7.$$

Vernon Harcourt prit pour son modèle de l'embouchure de la Seine  $\frac{40.000}{400} = 100$ .

Enfin Sir Alexander Gibb and Partners, bureau d'ingénieurs conseils à Londres, adoptèrent les échelles suivantes pour un modèle du delta du Rangoon

horizontalement : 9 pouces pour 1 mille marin,  
verticalement : 1 pouce pour 16 pieds,

d'où une distorsion de 41.

(1) Selon un rapport non publié du Waterloopkundig Laboratorium, rapport que nous citerons encore souvent par la suite.

(2) Prof. A. H. Gibson : « Construction and Operation of a Tidal Model of the Severn Estuary ». His Majesty's Stationery Office. Londres 1933.

Il résulte de ces données que la distorsion de 10,16 pour le modèle de Zeebrugge est parfaitement admissible.

Par application de la règle de similitude de Reech-Froude nous obtenons :

$$\text{pour l'échelle des vitesses : } \frac{1}{\sqrt{m}} = \frac{1}{\sqrt{64}} = \frac{1}{8}$$

$$\text{pour l'échelle des sections mouillées : } \frac{1}{n m} = \frac{1}{650 \times 64} = \frac{1}{41600}$$

$$\text{pour l'échelle des temps : } \frac{\sqrt{m}}{n} = \frac{8}{650} = \frac{1}{81,25}$$

Nous avons adopté une échelle des vitesses empirique  $\frac{1}{4,4}$ , afin de réaliser en modèle des courants suffisants pour le transport des matières solides en traînage et en suspension.

#### § 5. — Régime des marées. Niveaux d'eau et courants dans le modèle.

D'après des renseignements figurant sur la carte hydrographique Breedene-Kadzand 1933, les cotes des marées basses et hautes sont les suivantes :

Marée moyenne . . . . .	}	basse	(+ 0,58 m.)
		haute	(+ 4,27 m.)
Mortes-eaux . . . . .	}	basse	(+ 1,17 m.)
		haute	(+ 3,58 m.)
Vives-eaux . . . . .	}	basse	(+ 0,09 m.)
		haute	(+ 4,83 m.)

Les niveaux extrêmes qui furent enregistrés sont :

plus basse marée basse : (− 0,58 m.) en 1916  
plus haute marée haute : (+ 6,45 m.) en 1906

Dans les essais, nous nous sommes bornés à opérer avec des courants permanents. Nous avons adopté un courant permanent de flot et un courant permanent de jusant, dont les caractéristiques sont indiquées plus loin. Le niveau d'eau du modèle était donc indépendant du temps, sauf qu'il présentait une discontinuité au passage du flot au jusant, ou inversement.

Cette technique expérimentale nous obligeait à soustraire constamment un certain débit à la rade ou à l'y introduire, afin de nous rapprocher le plus possible du phénomène réel, qui est influencé par la variation, en fonction du temps, du niveau d'eau (gagnant et perdant).

Lors du gagnant, l'eau est aspirée par le chenal d'accès à l'écluse maritime, ainsi que par une fente horizontale ménagée dans la digue de mer. Le bord inférieur de cette fente se trouve à la cote (+ 2,50 m.), le bord supérieur à (+ 3,80 m.), ce qui est précisément aussi le niveau d'eau maintenu en modèle lors du courant permanent de flot.

En plan, la fente s'étend depuis le point J, à la terminaison du môle contre la côte (voir planche n° 18, situation To), jusqu'au point K, situé à 1800 mètres à l'Est de J. Le point K se trouve sur la normale abaissée sur la côte par l'extrémité Est du môle. Une diguette, arasée à la cote (— 1,00 m), est établie au travers du chenal d'accès. Elle règle la répartition du débit d'aspiration entre le chenal de l'écluse et la fente de la digue côtière, de manière à réaliser dans la rade des courants offrant une bonne ressemblance avec ceux de la nature. Pour parfaire encore cette similitude, nous avons relié, par une conduite de 2 pouces L M (planche n° 18, situation To), le puisard de la petite pompe d'aspiration à l'extrémité, côté rivage, du chenal longeant le môle.

Lors du courant permanent de jusant (courant expérimental) les eaux du modèle sont maintenues au niveau (+ 1,07 m). Lorsqu'en période de perdant cette même cote est atteinte dans la nature, les courants de vidange de la rade sont concentrés dans le chenal contigu au môle et dans celui qui conduit à l'écluse maritime. Il est clair que la même situation s'obtiendra en modèle si, au lieu de soutirer de l'eau au puisard, on y verse au contraire un certain débit. Celui-ci se répartira entre le chenal du môle et le chenal de l'écluse maritime et il s'écoulera ainsi vers la mer.

Avant d'adopter cette disposition expérimentale, nous avons accordé quelque attention à la question suivante. En modèle, le niveau d'eau ne varie pas dans le temps. Est-il possible, par prélèvement ou apport d'un certain débit à la rade en miniature, de reproduire en cette dernière les courants de la réalité, qui sont influencés dans une certaine mesure par la variation continue du plan d'eau, par suite du phénomène de la marée ?

Nous sommes arrivés à la conclusion que cette façon d'opérer ne peut conduire, du point de vue théorique, à une similitude irréprochable avec ce qui se passe dans la nature, où le volume, compris entre marée haute et marée basse dans le port, se remplit et se vide périodiquement.

C'est seulement en analysant les résultats d'essais sur modèles effectués avec des installations expérimentales diverses que l'on peut juger de la valeur pratique de la méthode.

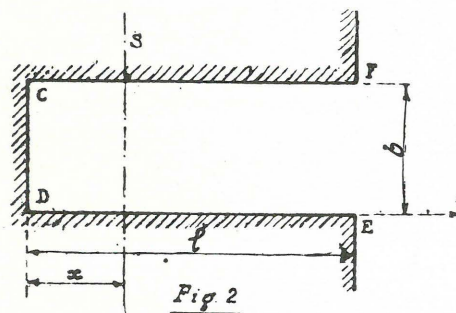
Dans le cas présent, cela peut se faire en comparant les résultats obtenus à Delft et à Anvers dans l'étude du même problème.

A Delft, l'aspiration ou l'apport avaient lieu par de nombreux tuyaux de faible diamètre débouchant dans le fond de la rade.

Examinons d'abord, à l'aide du schéma simple de la fig. 2, les objections qui peuvent être formulées contre le dispositif anversois.

*Premier cas (Anvers).*

Considérons (fig. 2) un canal à section rectangulaire invariable et à fond horizontal. Supposons la longueur  $l$  suffisamment petite, pour pouvoir négliger



la propagation ondulatoire, en d'autres mots, admettons que la profondeur  $h$  dépende uniquement du temps  $t$  et non de  $x$ .

Le débit dans une section quelconque  $S$  est alors  $bx \frac{dh}{dt}$ ; en  $EF$  il vaut  $bl \frac{dh}{dt}$  et en  $CD$  il s'annule. Si  $h$  est maintenu constant et si l'on évacue (si l'on introduit) par  $CD$  un débit  $bl \frac{dh}{dt}$  ( $\frac{dh}{dt}$  étant la vitesse positive ou négative de montée du plan d'eau) on aura à l'embouchure  $EF$  le débit exact, mais aux autres points du canal le courant est trop fort.

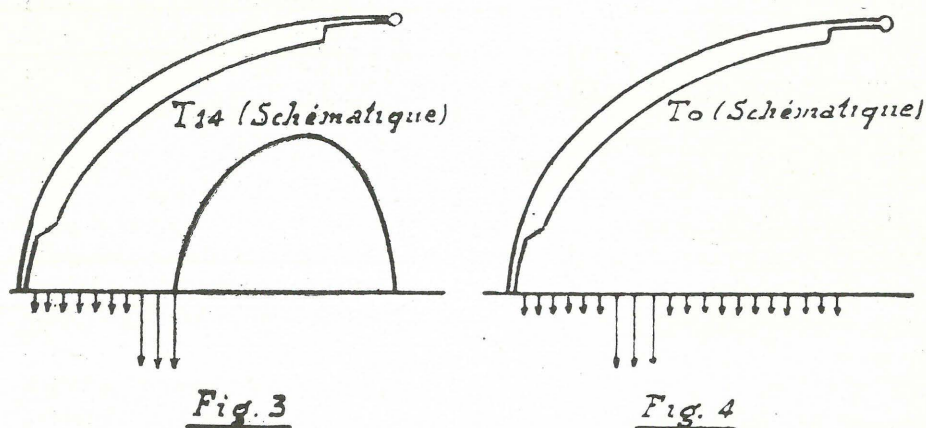
Ce cas est celui du projet T 14 (fig. 3) tel qu'il fut étudié à Anvers, mais ramené à sa plus simple expression.

Nous attirons spécialement l'attention sur le fait que le débit exact est réalisé à l'embouchure. Or, c'est là le phénomène principal à reproduire en modèle, car les échanges d'eau entre la rade et la mer (voir le § 6 ci-après) se produisent à l'embouchure et il importe donc de créer les débits exacts en cet endroit.

*Deuxième cas (encore le dispositif anversois).*

On aspire (ou l'on introduit) le long de  $DE$  (fig. 2) un débit  $b \frac{dh}{dt}$  par unité de longueur. Dans une section quelconque  $S$  se développe alors

le débit exact  $b \times \frac{dh}{dt}$ , mais à proximité de la paroi se produisent des courants qui sont obliques par rapport à cette paroi. C'est la schématisation de la situation  $T_0$  telle qu'elle fut étudiée à Anvers (fig. 4).



Remarquons que, dans le premier comme dans le second cas, il ne se forme que des vitesses horizontales, ce qui est conforme à la réalité. Observons encore que les vitesses obliques à la côte, que nous venons de signaler lors de la discussion du second cas, apparaissent très peu sur la carte du flot de l'état  $T_0$  (carte des courants de la planche n° 18), d'où nous concluons que leur influence sur les phénomènes d'écoulement est minime et pratiquement à peine décelable.

A Delft, l'aspiration ou l'introduction du débit, liée à la variation  $\frac{dh}{dt}$  du plan d'eau, se faisait par une douzaine de points convenablement répartis sur le fond de la rade. Ces points correspondent au débouché dans le port des tuyaux de faible diamètre mentionnés ci-dessus. En ces endroits, il y aura des vitesses verticales assez fortes, ce qui ne semble pas en concordance avec une propriété des courants de marée, à savoir que les accélérations verticales y sont généralement très petites, de sorte que, dans la théorie de ces mouvements liquides, on les néglige par rapport aux accélérations horizontales.

Malgré ces imperfections théoriques et les différences dans les dispositifs employés, les paragraphes 6 et 7 ci-dessous montrent que, pour les situations  $T_0$  et  $T_{14}$ , il existé une bonne concordance entre les résultats obtenus à Delft et à Anvers. Si, pour des ports aussi différents que  $T_0$  et

$T_{14}$ , et par des méthodes aussi divergentes que celles suivies à Delft et Anvers, pour tenir compte de la variation  $\frac{dh}{dt}$  du plan d'eau, on obtient les mêmes courants, tant pour le flot que pour le jusant, on peut dire que les inconvénients signalés précédemment ont peu d'importance pratique et que les deux modes opératoires conduisent à des résultats dignes de confiance.

A l'exemple de Delft, nous avons pris la marée de vives-eaux comme base des essais, en nous plaçant  $3/4$  d'heure avant marée haute et  $1 1/2$  h. avant marée basse. En adoptant comme courbe marégraphique la courbe moyenne de vives-eaux, on trouve comme niveaux pour les états permanents réalisés dans le modèle :

courant de flot,  $3/4$  d'heure avant marée haute = (+ 3 m. 80)  
 courant de jusant,  $1 1/2$  heure avant marée basse = (+ 1 m. 07)

La détermination des débits du modèle est plus difficile ici que dans le cas d'un fleuve à marée, car, pour ce dernier, on peut se baser sur les débits de la réalité, qui sont connus avec une approximation suffisante par l'opération de la cubature.

Les sections mouillées du modèle sont environ :

81,56 dm<sup>2</sup> sous (+ 3 m. 80)  
 et 58,57 dm<sup>2</sup> sous (+ 1 m. 07).

Nous avons fixé à 20 cm./sec. la vitesse moyenne du courant de flot expérimental. Cette vitesse fut considérée comme convenable à la suite d'essais préliminaires effectués avec de l'eau vaseuse. Cette vitesse empêche, en effet, la formation de dépôts de vase dans le modèle, aux endroits où il ne s'en produit pas non plus dans la réalité et elle convient pour le traînage des matériaux sur le fond, en vue de l'étude de la formation des bancs de sable. Le débit de flot est donc égal à  $81,56 \times 2 = 163,12$  l./sec.

Quant au débit de jusant, il fut fixé à 112 l./sec. suivant la justification donnée au paragraphe suivant.

## CHAPITRE II.

### ESSAIS DE COURANTS AVEC EAU LIMPIDE ET PROJETS SANS COURANT (C'EST-A-DIRE A CLAIRE-VOIE FERMEE).

§ 6. — Essais sur To, soit la situation actuelle non améliorée.

(Voir planches nos 18 et 19; photos nos 1 et 2 en hors-texte.)

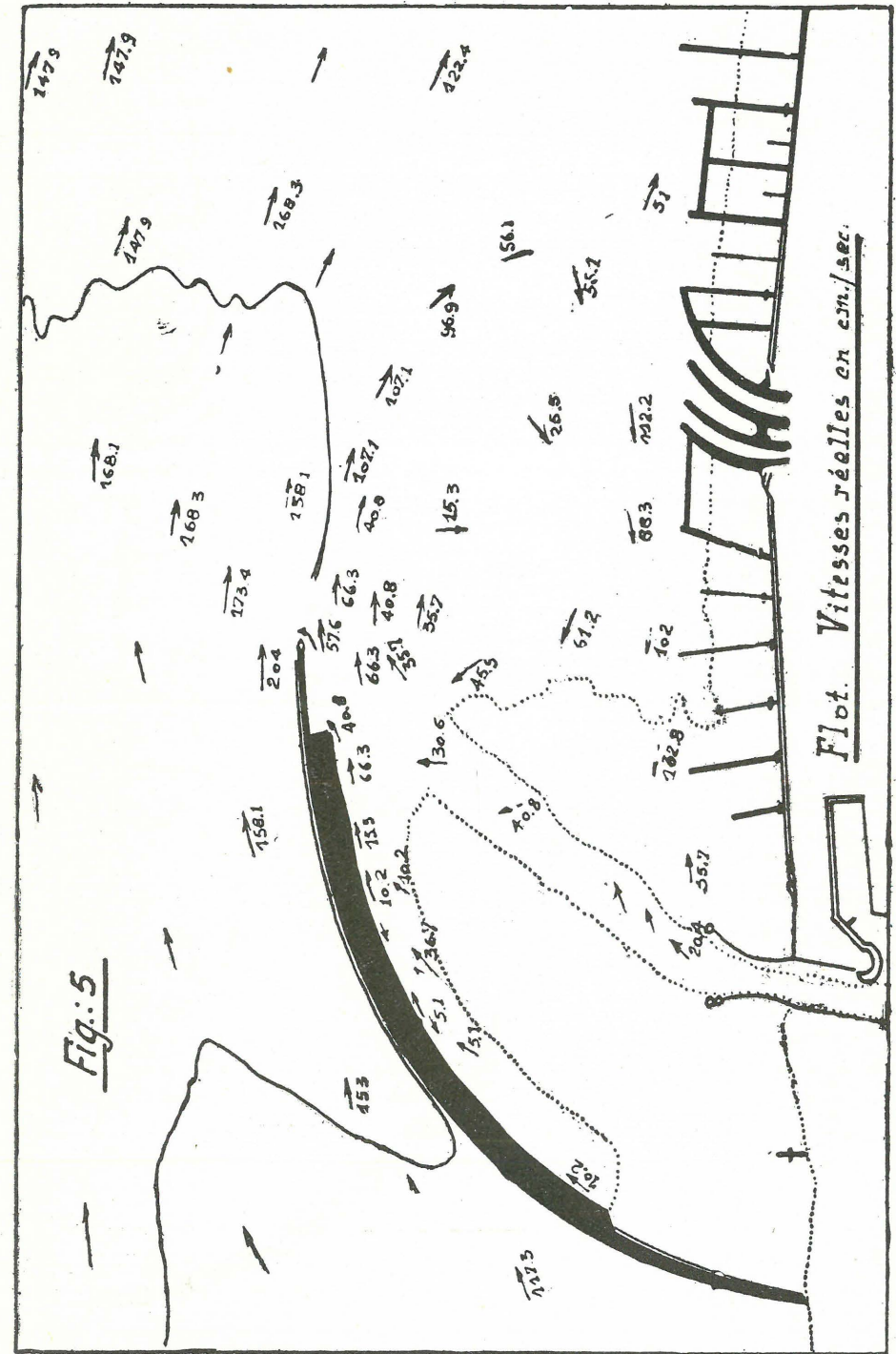
Le premier soin du Laboratoire fut de réaliser dans la situation To les courants tels qu'ils existent dans la nature. La vérification était faite par photographie. A cette fin, le plan d'eau du modèle était parsemé abondamment de petits bouts de papier (confetti). Ces confetti se déplaçaient avec les courants de surface et faisaient apparaître nettement les trajectoires et les tourbillons (à axe vertical). Les situations naturelles qu'il fallait reproduire en maquette sont représentées à la figure 5 pour le flot et à la figure 6 pour le jusant.

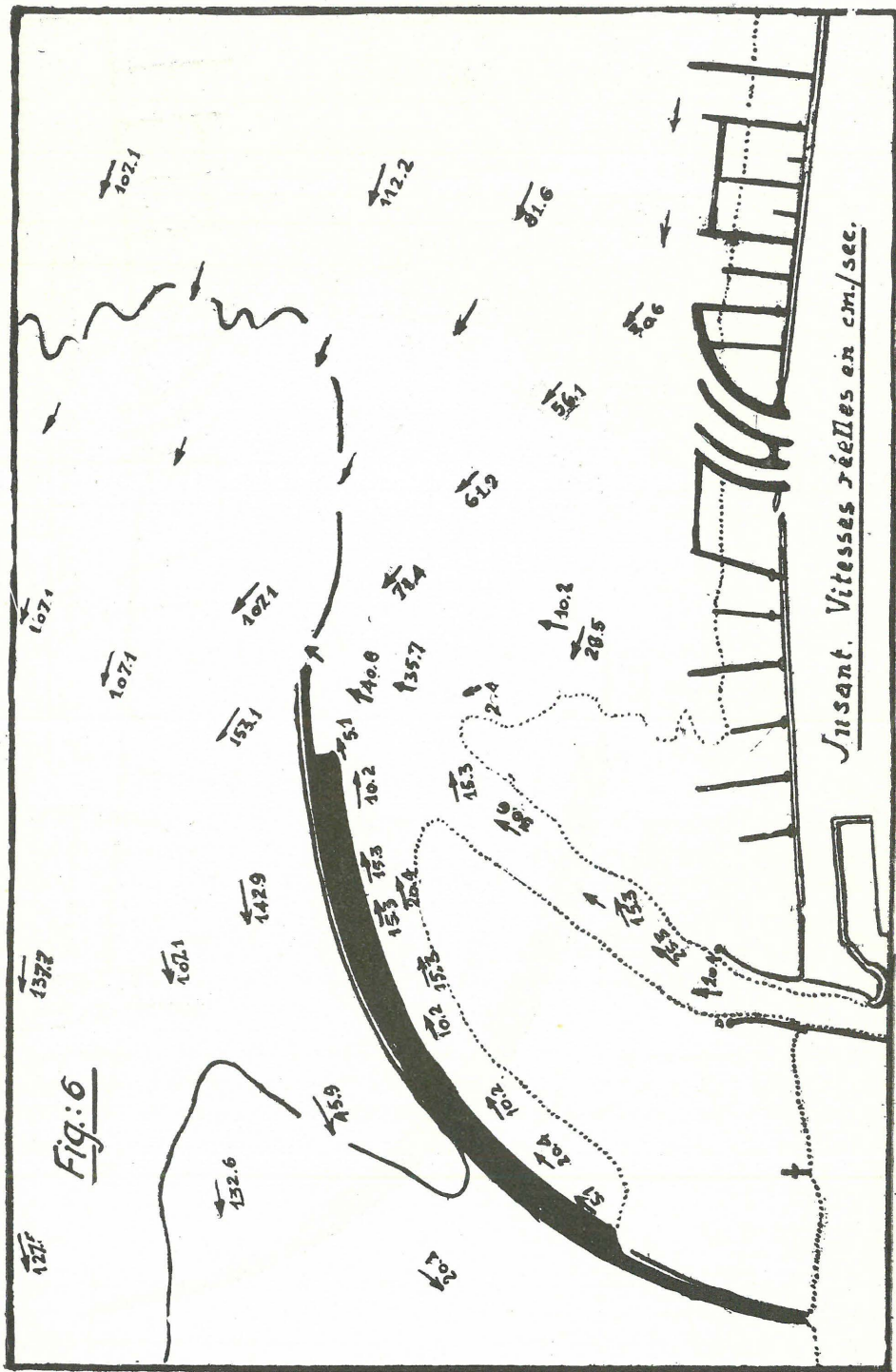
Le flot est caractérisé par la présence d'un grand tourbillon à l'Est du môle; pour la concision du langage, nous le nommerons dans la suite le « grand tourbillon Est ». Ce phénomène primordial est clairement indiqué à la figure 5 et il faut absolument qu'on le retrouve en modèle, si l'on veut que le fonctionnement de ce dernier soit semblable à la réalité.

Ce tourbillon est provoqué par le frottement que les courants en mer exercent sur l'eau de la rade. Cette action se comprend aisément quand on considère les figures 7a et 7b, qui représentent schématiquement, vu en plan, un port sans courant débouchant dans une eau courante. Il va de soi que le phénomène se présente de façon identique quand il n'y a aucun mouvement vertical du plan d'eau et qu'une rade est en communication par une de ses extrémités avec une mer à niveau constant, mais parcourue par des courants marins.

Il va sans dire que l'envasement de la rade de Zeebrugge est dû pour une bonne part au grand tourbillon Est lors du flot et à l'« échange » d'eau qui va de pair avec ce tourbillon. Pendant le gagnant, nous désignerons par le terme « échange » (1) le débit qui pénètre dans le port en

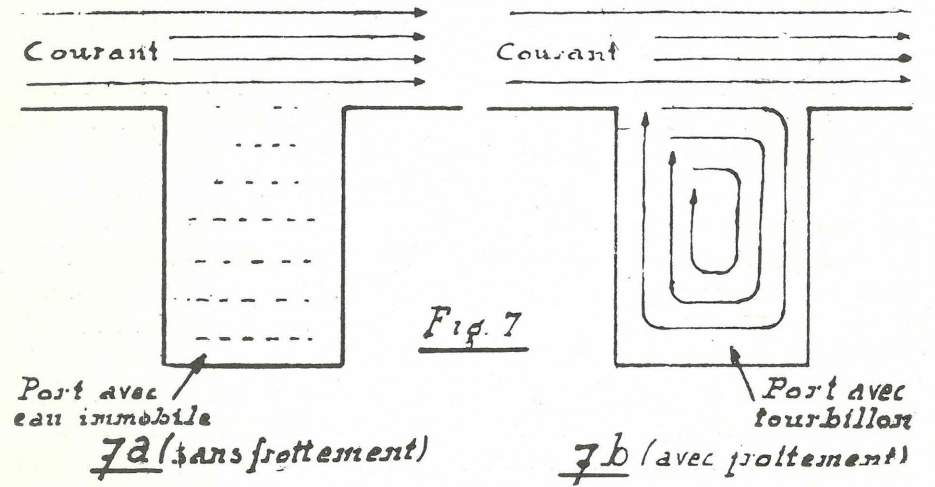
(1) Quand il y a « échange » lors du gagnant ( $\frac{dh}{dt} > 0$ ), il se produira nécessairement des courants dirigés vers la mer en certains points de la surface que l'on adopte comme séparation entre la rade et la mer. Lorsqu'il y a « échange » pendant le perdant ( $\frac{dh}{dt} < 0$ ) il y aura des vitesses vers la rade en certains points de la susdite surface de séparation.





supplément de celui qui est strictement nécessaire (soit  $\Omega \frac{dh}{dt}$  à chaque instant de la marée,  $\Omega$  étant la superficie du port) pour réaliser dans le port la vitesse de montée exacte du niveau.

Ce débit supplémentaire retourne évidemment à la mer, mais pendant son passage par la rade, il dépose une partie de ses matières solides en suspension ou en traînage. D'après des observations faites sur place,



il semble que le débit d'échange est environ deux fois plus grand que le débit strict de remplissage  $\Omega \frac{dh}{dt}$ .

Dans tous les projets pris en considération pour l'amélioration de la rade, et qui comportent un môle complètement fermé (c'est-à-dire sans claire-voie), on s'est efforcé avant tout de limiter l'échange à un minimum, tant au flot qu'au jusant.

Pour le jusant, nous avons admis un débit de 112 l./sec. Celui-ci a été fixé en posant la condition que les courants du modèle fussent en parfaite concordance avec la réalité, représentée à la figure 6, et cela tant en direction qu'en intensité. Ce débit donne en maquette une vitesse moyenne de  $\frac{112}{58,57} = 19$  cm. sec., ce qui est satisfaisant pour les essais d'envasement.

Pour la situation To il y a, au point de vue du courant de flot, une concordance parfaite entre le modèle (planche n° 18) et la nature (fig. 5). Pour le jusant, la ressemblance entre maquette et réalité est également bonne (on comparera la planche n° 19, situation To, et la fig. 6), mais on remarque cependant que le modèle décèle l'existence de tourbillons

le long du môle, du côté de la mer, tourbillons qui n'apparaissent pas à la fig. 6. Un examen minutieux sur place a prouvé que ces tourbillons se produisent également dans la nature, et par la suite nous les appellerons les « tourbillons Ouest ».

Si maintenant, pour l'état To, on compare les essais de Delft (1) à ceux effectués au laboratoire d'Anvers, on est frappé de la bonne concordance entre les résultats néerlandais et belges.

§ 7. — Essais sur le projet T 14.

(Voir planches n<sup>os</sup> 18 et 19; photos n<sup>os</sup> 3 et 4.)

Ce projet est le meilleur auquel le laboratoire de Delft est arrivé, étant entendu que cet institut avait reçu pour mission d'examiner uniquement des situations à claire-voie fermée.

Pour ce projet également, le laboratoire d'Anvers est arrivé aux mêmes conclusions que Delft.

Considérons d'abord la période de flot. Pour celle-ci T 14 signifie indubitablement une grande amélioration par rapport à To. L'ampleur du grand tourbillon Est est diminuée et il est rejeté entièrement en dehors du port, à l'Est de la presqu'île projetée.

A l'entrée du port (c'est-à-dire entre l'extrémité Est du môle existant et le point le plus en mer de la presqu'île projetée) les courants qui entrent dans la rade sont assez réguliers.

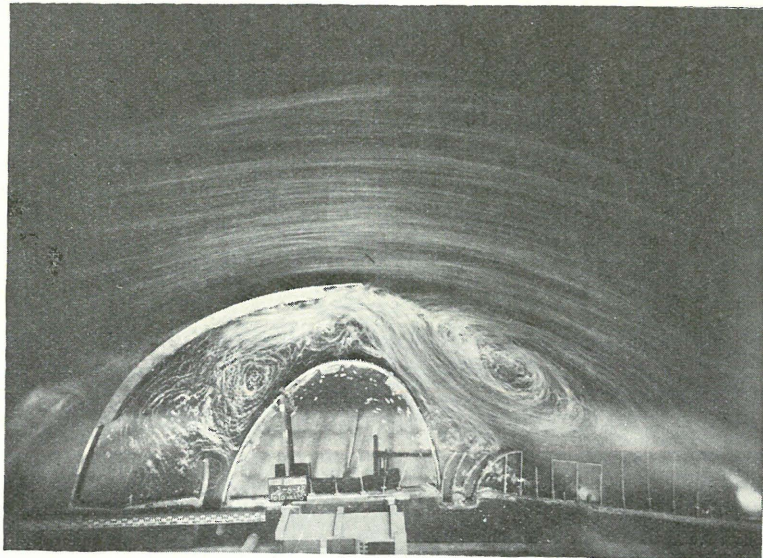


Photo 3 — Projet T 14. Courant de flot.

(1) Rapport non publié, cité également au § 4.

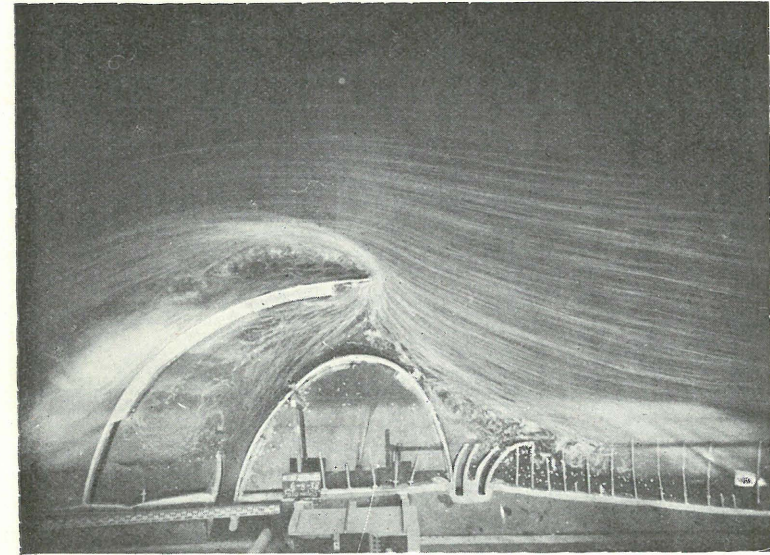


Photo 4. — Projet T 14. Courant de jusant.

Ainsi qu'il ressort de la photo n<sup>o</sup> 3 et de la planche n<sup>o</sup> 18, le courant dans l'entrée du port est plutôt concentré dans la moitié de cette entrée qui est contiguë au môle. Dans l'autre moitié, contre la presqu'île, les mouvements de l'eau sont beaucoup plus faibles et l'on y décèle même un léger « échange » (tourbillon peu prononcé).

En examinant le jusant on ne remarque, pendant cette période de la marée, aucune modification notable par rapport à To.

L'inconvénient majeur présenté par T 14 est sans doute le suivant : dans la région du grand tourbillon Est, à l'Est de la presqu'île, il y aura envasement. Il se formera donc un fond vaseux dans le voisinage immédiat du port et le danger de voir ce dernier s'envaser davantage n'est pas écarté. Les eaux pénétrant dans la rade peuvent, en effet, être fortement chargées de matières en suspension, à cause de la présence de ce banc de boue.

§ 8. — Essais sur le projet Lab 3.

(Voir planches n<sup>os</sup> 18 et 19; photos n<sup>os</sup> 5 et 6).

Ce projet est le plus avantageux de tous ceux pour lesquels la presqu'île de T 14 a été étendue vers l'Est.

Cependant, vis-à-vis de T 14, les changements intervenus dans les courants sont plutôt minimes.

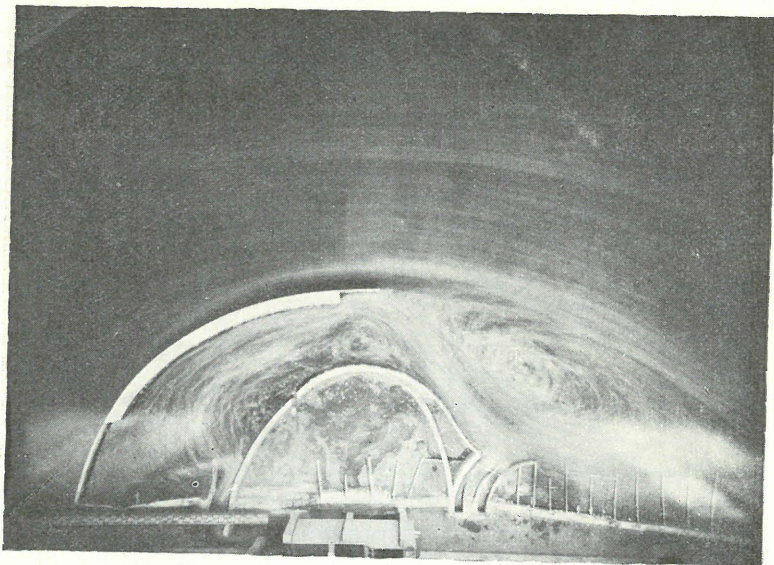


Photo 5. — Projet Lab 3. Courant de flot.

Il semble que, par flot, le courant pénètre dans la rade sur une plus grande largeur que dans T 14. Il semble aussi que le centre du grand tourbillon Est soit déplacé un peu vers l'Est.

Néanmoins, étant donné le caractère variable des courants, on ne peut attacher trop d'importance à ces différences légères.

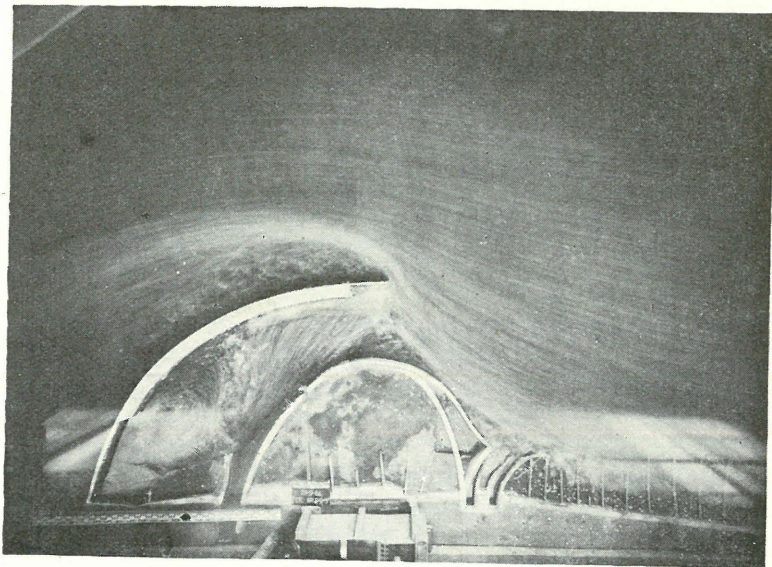


Photo 6. — Projet Lab 3. Courant de jusant.

Pour le jusant, aucun fait saillant n'est à signaler. Pour les états To, T 14 et Lab 3, la zone des tourbillons Ouest n'est pas sensiblement différente.

En résumé nous pouvons dire que Lab 3 ne constitue pas une amélioration appréciable de T 14. L'inconvénient signalé au dernier alinéa du § 7 subsiste.

#### § 9. — Essais sur le projet Lab 4.

(Voir planches n<sup>os</sup> 18 et 19; photos n<sup>os</sup> 7 et 8 en hors-texte.)

Ce projet est dérivé du Lab. 3 : à la presqu'île de celui-ci il a été ajouté, du côté Est, une digue basse arasée à la cote (+ 1 m. 50).

Les courants observés par flot sont très satisfaisants. La digue basse a pour effet de répartir les vitesses de surface très régulièrement sur la largeur entière de l'entrée de la rade.

Il y a lieu d'examiner cependant jusqu'à quel point cette amélioration peut être retenue. Il est fort probable que l'avantage obtenu par rapport à T 14 reste assez faible, car cette dernière situation est proche du projet d'amélioration optimum, quand on s'en tient à la claire-voie fermée. Or, au voisinage d'un maximum, les variations des fonctions représentant des phénomènes naturels sont toujours faibles. D'un autre côté, l'exécution de la digue basse exige une dépense supplémentaire importante et la présence de cette digue constitue un danger pour la navigation.

Lors du jusant, l'eau quitte régulièrement le port sur toute la largeur de son embouchure. Dans l'angle aigu formé par la presqu'île et la digue basse, on constate un tournoiement de petits tourbillons variables et très faibles. On peut dire que, dans cet angle, l'eau est presque morte. La zone des tourbillons Ouest est quelque peu diminuée.

L'inconvénient signalé au dernier alinéa du § 7 subsiste évidemment.

#### § 10. — Essais sur le projet M 2.

(Voir planches n<sup>os</sup> 18 et 19; photos n<sup>os</sup> 9 et 10.)

Le môle Est, partant des écluses de Heyst, a sa crête à la cote (+ 1 m. 50).

Par courant de flot, il se forme un grand tourbillon dans la partie Est de la rade et il y a « échange » à l'entrée du port. Le grand tourbillon Est subsiste à l'Est du môle projeté (môle partant des écluses de Heyst).

Pendant le jusant, les vitesses dans le port sont très petites, ce qui favorise le dépôt des vases.

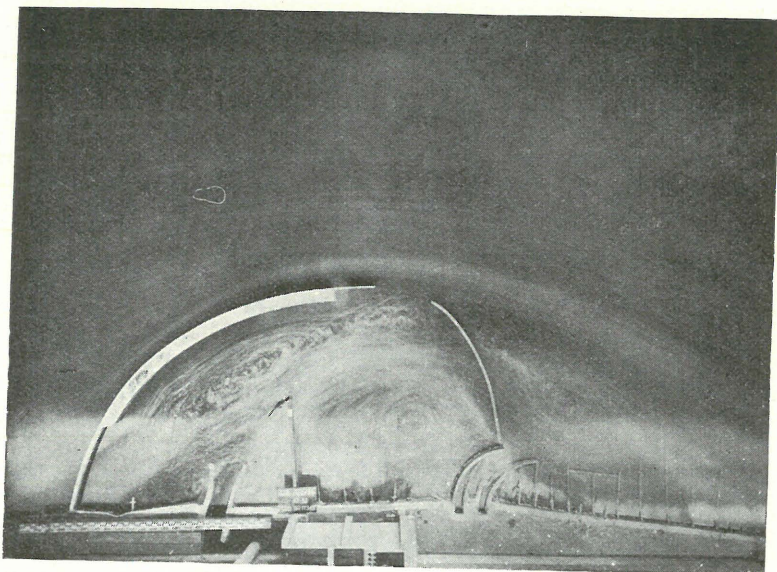


Photo 9. — Projet M 2. Courant de flot.

§ 11. — Conclusion du chapitre II.

Le présent chapitre II concerne uniquement des observations de courants sur des projets à claire-voie fermée et tous les essais qui y sont rapportés furent effectués avec une eau dépourvue de matières solides en suspension. Des expériences qui se limitent au seul mouvement des

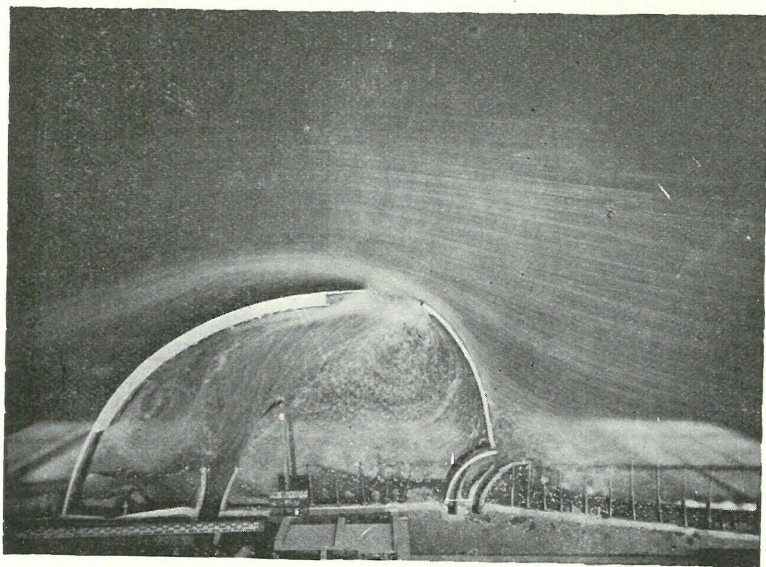


Photo 10. — Projet M 2. Courant de jusant.

eaux peuvent néanmoins être instructives et fournir des éléments d'appréciation quant aux avantages et inconvénients des diverses solutions proposées pour l'amélioration de la rade de Zeebrugge.

Pour les projets qui maintiennent la claire-voie fermée, elles permettent notamment de déterminer dans quelle mesure on a réussi à réduire l'« échange ». Mais à lui seul ce procédé expérimental est insuffisant, parce qu'il ne tient pas compte d'autres facteurs qui interviennent également dans l'envasement du port. Ainsi, les situations To, T 14, Lab 3, Lab 4 et M 2 présentent, lors du flot, un grand tourbillon Est, tandis que pendant le jusant les tourbillons Ouest apparaissent. Ces tourbillons forment des zones de décantation active de la vase, et bien que ces zones se trouvent en dehors du port dans les situations améliorées, elles auront cependant comme conséquence, à certains états de la marée, de surcharger l'eau de boue dans le voisinage immédiat de la rade.

Si l'on était parvenu à dresser deux projets différents, mais pour lesquels cependant les échanges seraient égaux, il se pourrait quand même que ces deux projets ne soient pas équivalents au point de vue des atterrissements. Si même, pour deux formes de ports données, l'échange était nul, ces deux rades pourraient néanmoins présenter des degrés d'envasement différents. Il suffirait pour cela que les zones vaseuses extérieures, qui correspondent aux tourbillons Est et Ouest soient dans les deux cas d'une ampleur différente. Il était donc nécessaire de procéder aux expériences avec eau vaseuse qui sont décrites ci-après.

En ce qui concerne le port de Zeebrugge à claire-voie fermée, aucun des projets étudiés ne permet de supprimer les tourbillons extérieurs. C'est encore le projet T 14 qui est apparu comme étant la solution la plus favorable. Le T 14 peut être légèrement amélioré et transformé en Lab 4, mais ce n'est qu'au prix d'une grande dépense supplémentaire. Nous ne pensons pas que les avantages que l'on obtiendrait, en ce qui concerne la bonne tenue du port, compenseraient le prix de construction plus élevé.

(A suivre.)

SAMENVATTING :

# Studie over de Belgische havens der Noordzee.

## MODELPROEVEN.

### Inleiding.

Volgens hun vorm in plattegrond kunnen de zeehavens langs de Belgische kust in twee categorieën ingedeeld worden :

a) de havens waar verdieping een vermeerdering der aanslibbing veroorzaakt. Voorbeeld : Zeebrugge.

b) de havens waar verdieping geen noemenswaardige vergroting van het slibbezwaar met zich brengt. Voorbeeld : Oostende.

### EERSTE DEEL.

Modelproeven betreffende verbetering aan de rede van Zeebrugge.

#### HOOFDSTUK I.

##### Inrichting der modellen.

§ 1) Nadere omschrijving van het voorwerp der onderzoekingen.

§ 2) Onderzochte ontwerpen.

§ 3) Beknopte beschrijving van het model.

Het gebied door het model bestreken is in plattegrond afgebeeld op plaat n<sup>r</sup> 17.

§ 4) Modelschalen.

$$\text{Horizontale schaal} = \frac{1}{n} = \frac{1}{650}$$

$$\text{Verticale schaal} = \frac{1}{m} = \frac{1}{64}$$

§ 5) Tijbeweging. Modelwaterstanden en -stromingen.

Naar het voorbeeld van het Delftse Laboratorium hebben wij er ons toe beperkt met permanente waterbewegingen te werken, en wel één permanente vloed- en één dito ebstroom, waarvan de karakteristieken hieronder nader worden bepaald. Bij een bepaalde stromingstoestand werd dus de modelwaterspiegel constant gehouden en was het derhalve nodig, door afzuigen uit of door toevoeren van water tot de rede, de toestand te benaderen die in deze rede in de werkelijkheid optreedt ten gevolge van het voortdurend rijzen of dalen van het peil.

Bij vloed hebben we een debiet van 163,12 l/sec in het model gezonden, bij een waterstand van (+ 3,80 m).

Bij eb was het debiet 112 l/sec en de waterstand (+ 1,07 m).

#### HOOFDSTUK II.

Stromingsproeven met zuiver water op ontwerpen met gesloten claire-voie.

§ 6) Proeven op To, zijnde de tegenwoordige, onverbeterde toestand.

(Zie platen n<sup>rs</sup> 18 en 19, fotos n<sup>rs</sup> 1 en 2 buiten tekst.)

Eerst moest worden nagegaan of de bij To bestaande werkelijke stromingstoestanden in het model natuurgetrouw weergegeven worden.

De te benaderen natuurlijke stromingstoestanden zijn afgebeeld op de figuren 5 en 6, respectievelijk voor vloed en eb.

Het belangrijkste punt voor de vloedstroom is de natuurgetrouwe nabootsing der grote neer ten Oosten van de havendam. Korthedshalve zal in het vervolg deze wervel (of wat er in de diverse ontwerpen nog van overblijft) de naam « grote Oosterwervel » krijgen.

Wat de overeenstemming der model eb met de werkelijke eb (fig. 6) betreft, dient opgemerkt dat in het model wervelingen werden vastgesteld langs de zee kant van de havendam, wervelingen die niet voorkomen op fig. 6. Na een onderzoek ter plaatse is gebleken dat die neren inderdaad bestaan. We zullen ze in het vervolg « Westelijke wervelingen » noemen.

§ 7) Proeven op het ontwerp T 14.

(Zie platen n<sup>rs</sup> 18 en 19; fotos n<sup>rs</sup> 3 en 4.)

Dit project is, met gesloten claire-voie, het meest gunstige waartoe het laboratorium te Delft is gekomen.

De overeenkomst tussen de Delftse resultaten en de onze mag voortreffelijk heten, zoals trouwens ook voor de situatie T<sub>0</sub> het geval was.

§ 8) Proeven op het ontwerp Lab 3.

(Zie platen n<sup>rs</sup> 18 en 19; fotos n<sup>rs</sup> 5 en 6.)

Dit is het voordeligste der ontwerpen waarbij het schiereiland van T 14 meer naar het Oosten uitgebreid wordt.

§ 9) Proeven op het ontwerp Lab 4.

(Zie platen n<sup>rs</sup> 18 en 19; fotos n<sup>rs</sup> 7 en 8 buiten tekst.)

Aan het schiereiland van ontwerp Lab 3 wordt Oostwaarts een lage dam toegevoegd met kruin op de cota (+ 1,50 m).

Het stroombeeld dat we bij vloed te zien krijgen is zeer gunstig. Het aanbrenge van de lage dam heeft voor gevolg dat het water nu over de ganse breedte der havenmonding gelijkmatig naar binnen stroomt.

§ 10) Proeven op het ontwerp M. 2.

(Zie platen n<sup>rs</sup> 18 en 19; fotos n<sup>rs</sup> 9 en 10.)

De Oostelijke havendam, uitgaande van Heyst-sluizen, heeft zijn kruin op de cota (+ 1,50 m).

§ 11) Conclusie uit Hoofdstuk II.

Overwegingen ter rechtvaardiging der hieronder beschreven experimenten met slibhoudend water, welke toelaten nog meerdere klaarheid te brengen in het ingewikkeld vraagstuk der aanslijking van de rede van Zeebrugge.

(Wordt voortgezet.)

# Calcul de poutres reposant sur le sol.

## LE COEFFICIENT DE RAIDEUR K DU SOL.

Dr. Ir. E. E. DE BEER,

Ingénieur principal des Ponts et Chaussées,  
Directeur de l'Institut Géotechnique de l'Etat.

(Pl. 20 à 22.)

### INTRODUCTION.

Dans plusieurs manuels de stabilité un chapitre est consacré au calcul des poutres reposant sur un terrain élastique. Pour effectuer ces calculs on introduit la notion de « coefficient de raideur » K (bettungsziffer-beddingsconstante- modulus of soil reaction). On suppose que si on applique à la surface du sol une charge p par unité de surface, celle-ci engendre un tassement s, donné par  $p = K s$  (1)

D'après cette définition K a les dimensions d'un poids volumétrique, par ex. t/m<sup>3</sup> ou kg/m<sup>3</sup>.

En outre, toujours d'après la définition de la formule (1), K serait une constante pour un sol déterminé. Le tassement s serait le même que la charge p par unité de surface agisse sur une surface de 10 cm<sup>2</sup>, ou sur une surface de 100 m<sup>2</sup>.

En se basant sur les propriétés réelles des terres, on constate sans difficulté que la loi (1) ne peut être exacte, et que par conséquent il n'existe pas de coefficient de raideur K, qui soit caractéristique pour un sol déterminé.

La notion de « coefficient de raideur » K a été introduite tout d'abord dans la technique des chemins de fer. Il s'agissait de caractériser le tassement des traverses posées sur le ballast. Les surfaces de chargement ont alors des dimensions transversales pratiquement constantes; les charges à reporter au sol sont les mêmes pour toutes les traverses. Il n'y a que la nature du sol sous le ballast qui peut varier d'une traverse à l'autre. En ce cas le « coefficient de raideur » peut rendre certains services.

Par après la notion de coefficient de raideur a été extrapolée au cas où les dimensions en plan des surfaces de chargement ainsi que les charges étaient variables.