

3. — *Om de zekerheid van de wand te bepalen worden twee zekerheidscoëfficiënten ingevoerd :*

a) *de maximum gronddruk wordt beperkt. Dit is dus een klassiek zekerheidscoëfficiënt;*

b) *de elastische heilengte moet immer een minimum lengte hebben in verhouding met de volledige heilengte.*

De bekomen formules, die eenvoudig zijn, laten toe in alle klassieke gevallen het verloop van de zekerheidscoëfficiënten grafisch voor te stellen in verhouding tot de heilengte en in verband met de aard van het terrein. Een voorbeeld van een dergelijk grafiek wordt gegeven.

Etude des Ports Belges de la Mer du Nord.

ESSAIS SUR MODELES REDUITS.

(2^e Suite) *

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.

CHAPITRE IV.

ESSAIS SUR DES PROJETS A CLAIRE-VOIE OUVERTE.

§ 22. — Situation To avec claire-voie ouverte.

Avant d'entreprendre l'étude approfondie d'un dispositif de port avec claire-voie ouverte, nous avons réalisé en modèle la similitude avec la situation naturelle de la rade de Zeebrugge et de ses abords immédiats, telle qu'elle se présentait avant la fermeture de la claire-voie, laquelle fermeture fut terminée en 1929.

La similitude fut vérifiée, tant en ce qui concerne les courants, qu'en ce qui concerne les formes du fond mobile. A cette fin, le lit du modèle était constitué par du bimsstein, une sorte de pierre ponce, d'origine volcanique, provenant de la Silésie. Ce matériau était réduit à des grains d'un diamètre moyen de 2 à 3 mm.

La claire-voie présentait une ouverture de 300 mètres; son seuil descendait en ligne droite depuis la cote (0m00) près de l'estran jusqu'à (— 5m00) du côté du large.

(*) Pour le début et la 1^{re} suite voir fascicules 3 (juin) et 4 (août) 1948 pp. 367 et 555.

Lors des essais préliminaires, il est apparu que la durée d'un jusant ou d'un flot expérimentaux ne peut pas dépasser 1/4 d'heure environ. Si l'on maintient trop longtemps un sens de courant, les matériaux du fond sont déplacés trop loin, jusqu'en dehors de la partie utile du modèle et, après la renverse (étale), le courant de sens opposé ne parvient pas à les ramener dans cette même partie utile. Pour cette raison nous avons adopté 15 min. 40 sec., et 15 min. 20 sec., respectivement pour la durée du jusant et pour celle du flot. Ces temps sont dans le même rapport que les durées du jusant et du flot réels.

Nous avons constaté qu'après 4 marées (4 courants de jusant et 4 courants de flot) le fond mobile du modèle ne subissait plus de modifications appréciables et qu'il avait donc atteint une forme d'équilibre. Par la suite, lorsqu'il s'agissait d'essais concernant la forme du fond mobile, nous avons soumis le modèle à 5 marées consécutives, les expériences commençant toujours par un jusant et se terminant, en conséquence, par un flot.

Les caractéristiques des courants permanents de jusant et de flot que l'on réalisait ont été données ci-dessus. Pour le jusant, le débit était de 112 l/sec, avec une cote d'eau de (+ 1m07); pour le flot, ces grandeurs étaient respectivement 163,12 l/sec et (+ 3m80).

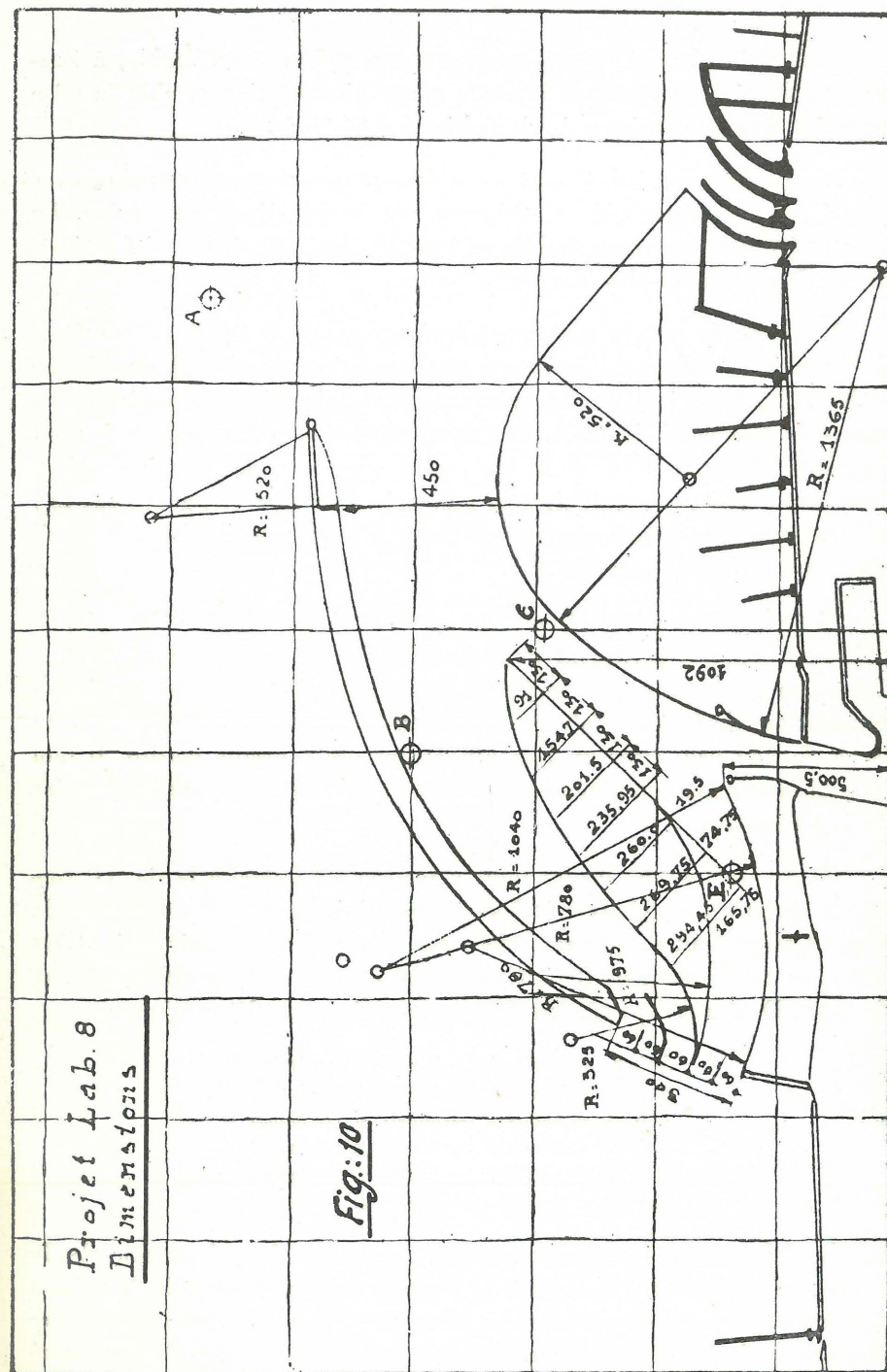
§ 23. — Projets Lab. 8 — Généralités.

Quand on ouvre la claire-voie, dans l'intention de maintenir les profondeurs de la rade par les courants marins, passant par cette ouverture pratiquée dans le môle, il est deux conceptions qui se présentent naturellement à l'esprit :

Première conception : on peut laisser aux courants le seul entretien du chenal du côté intérieur du môle et avoir recours aux dragages pour le chenal vers l'écluse, voie empruntée par les bateaux qui se rendent au canal maritime de Bruges.

Seconde conception : on peut réaliser un dispositif de port plus complet, où les courants entretiennent aussi bien le chenal du môle que la majeure partie du chenal vers l'écluse.

Ces deux conceptions ont été examinées par le Laboratoire. Lorsqu'on adopte la première, la largeur du chenal du môle peut être plus grande que lorsqu'on suit la seconde conception, mais les frais de dragage du chenal vers l'écluse seront beaucoup plus élevés.



A la suite de nos études, nous croyons qu'il est préférable, à Zeebrugge, de réaliser une rade selon la seconde conception et c'est la mise au point d'un tel projet qui fait l'objet des §§ 23 à 26.

Les projets dits Lab 8 sont les meilleurs que nous ayons pu trouver parmi les dispositifs qui se réclament de la deuxième conception. Le laboratoire d'Anvers les a établis en 1940 et, dès 1941, ils ont été présentés au Département des Travaux Publics.

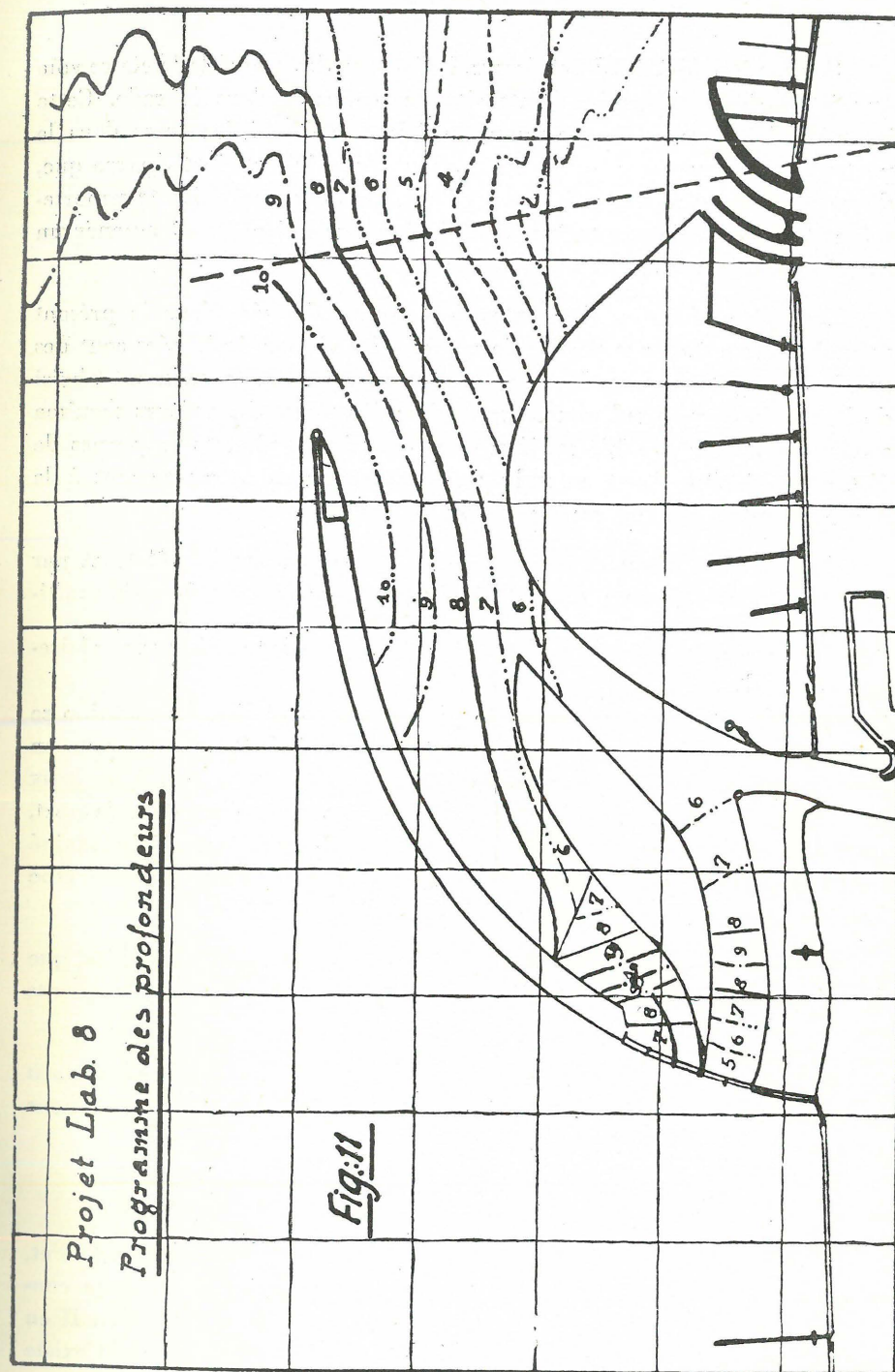
Les ports de ce type sont représentés en plan à la fig. 10; 120 mètres de l'ancienne claire-voie servent à l'alimentation du chenal de l'écluse et les 180 mètres restants de la même claire-voie laissent passer le courant vers le chenal du môle. Les deux parties de cette claire-voie sont pourvues chacune d'un seuil horizontal arasé suivant les indications données plus loin. Le seuil situé le plus près du rivage (longueur 120 m.) se trouve, soit au même niveau, soit à un niveau plus élevé que le seuil plus au large (longueur 180 m.).

Si l'on se borne à la réouverture pure et simple de la claire-voie, de puissants courants pénètrent par cette dernière dans le port pendant le flot et en sortent pendant le jusant, mais leur effet utile est considérablement diminué par le fait qu'ils s'étalent dans une rade beaucoup trop large. Si l'on veut tirer un bon rendement des courants marins, il faut les concentrer dans des chenaux dont la largeur est fixée par les besoins de la navigation.

Le programme des profondeurs à réaliser est donné à la fig. 11. Une fois la largeur de la claire-voie fixée, l'intensité des courants dans la rade dépend avant tout de la profondeur des seuils de cette claire-voie. C'est donc sur cet élément qu'il faut agir pour obtenir le dispositif optimum de port. Dans cet esprit, nous avons successivement les projets :

- Lab 8 = seuils à (-3m00) et (-4m00)
- Lab 8a = seuils à (-4m00) et (-4m00)
- Lab 8b = seuils à (-4m00) et (-5m00)
- Lab 8c = seuils à (-4m00) et (-6m00)
- Lab 8d = seuils à (-5m00) et (-7m00)
- Lab 8e = seuils à (-3m00) et (-5m00)

Le laboratoire a encore examiné un projet dont la partie de la claire-voie, entretenant le chenal de l'écluse, était prolongée de 60 mètres vers le rivage. Cette ouverture avait donc une largeur de 180 m., de même que celle qui conduit au chenal longeant le môle. Ce projet n'a pas donné de bons résultats.



Comme il a déjà été dit ci-dessus, la hauteur des seuils de la claire-voie (projets Lab 8) détermine l'intensité des courants dans la rade. Cette intensité doit être suffisante pour empêcher le dépôt des vases dans le port. Par ailleurs, ces courants ne peuvent devenir trop forts, parce que, d'une part, ils gêneraient la navigation et, d'autre part, ils transporteraient trop de sable par traînage sur le fond, ce qui pourrait amener un certain ensablement.

Dans l'appréciation des cartes de courant, données dans le présent mémoire, il ne faut pas perdre de vue que les vitesses indiquées sont des maxima, car, tant pour le flot que pour le jusant, le moment choisi de la marée correspond aux courants les plus forts. Ces valeurs maxima sont à multiplier par $\frac{2}{3}$ environ pour obtenir les vitesses moyennes de flot et de jusant, étant entendu que ces moyennes se rapportent à la durée complète du flot ou du jusant.

Au § 5 nous avons exposé comment, par aspiration (au flot) et par refoulement (au jusant) d'un débit égal à la surface de la rade multipliée par $\frac{dh}{dt}$, on produisait dans le modèle, pour les projets avec claire-voie fermée, une situation semblable à celle de la réalité. La question se pose si, dans un port avec claire-voie tel que le Lab 8, et qui forme en fait un système continu de canaux communiquant avec la mer à ses deux extrémités, il faut maintenir l'aspiration et le refoulement dans le port, quand on effectue les essais avec niveaux fixes. Ce problème a été examiné avant de pousser plus avant les expériences sur les dispositifs du type Lab 8.

Nous sommes arrivés à la conclusion que l'aspiration, aussi bien que le refoulement, ont fort peu d'influence sur la répartition des courants dans la rade et nous avons donc renoncé à l'artifice en question.

De tous les projets du type Lab 8, c'est le port Lab 8d qui est apparu comme étant le plus favorable. Dans les lignes qui vont suivre nous sommes limités à l'analyse du Lab 8d.

§ 24. — Essais de courants sur le dispositif Lab. 8d.

Les vitesses mesurées sont données, pour le flot, à la planche n° 18 et, pour le jusant, à la planche n° 19. On constate que par flot les courants sont très régulièrement répartis sur toute la surface du port. Il en est de même au jusant, sauf au sommet de la presqu'île Est, où il existe une petite zone d'eaux mortes.

Les vitesses furent prises dans un modèle avec fond de bims, après que 5 jusants et 5 flots eurent donné à celui-ci une configuration stable, d'après ce que a été dit au § 22.

Si l'on relève les seuils de la claire-voie et si l'on en arrive à un projet comme le Lab 8c (voir le § précédent), les vitesses sont amoindries tant au flot qu'au jusant et la zone d'eaux mortes qui, par jusant, se produit à l'extrémité (côté du large) de la presqu'île Est, se transforme en un tourbillon faible, tournant dans le sens sinistrorsum. Ce tourbillon se produit d'autant plus facilement que la section de passage à la claire-voie est plus petite.

§ 25. — Essais sur la configuration du fond dans le projet Lab. 8d.

Dans ces essais, on commençait par modeler le fond de la rade suivant les indications de la fig. 11. Puis on faisait passer 5 marées et le résultat obtenu était enregistré par voie photographique.

La photo n° 11 donne la situation finale d'un des essais. A l'extrémité Est de la protection du fond du chenal longeant le môle (du côté Ouest cette protection s'arrête contre le seuil de la claire-voie) le sol est creusé, de sorte que dans la nature il faudra prévoir une prolongation vers l'Est de cette protection, par exemple au moyen de fascinages. Une protection du fond s'impose aussi dans la partie Ouest du chenal de l'écluse, dans la zone attenante à la claire-voie.

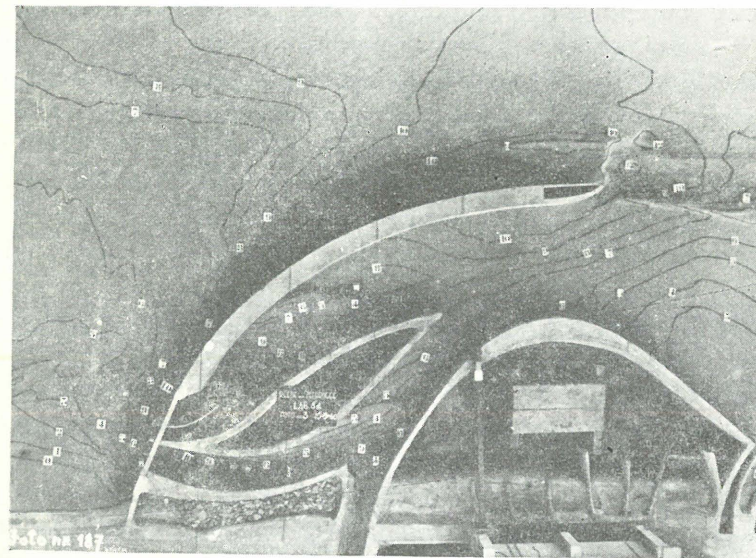


Photo 11. — Projet Lab. 8d. Situation du fond après 5 essais.

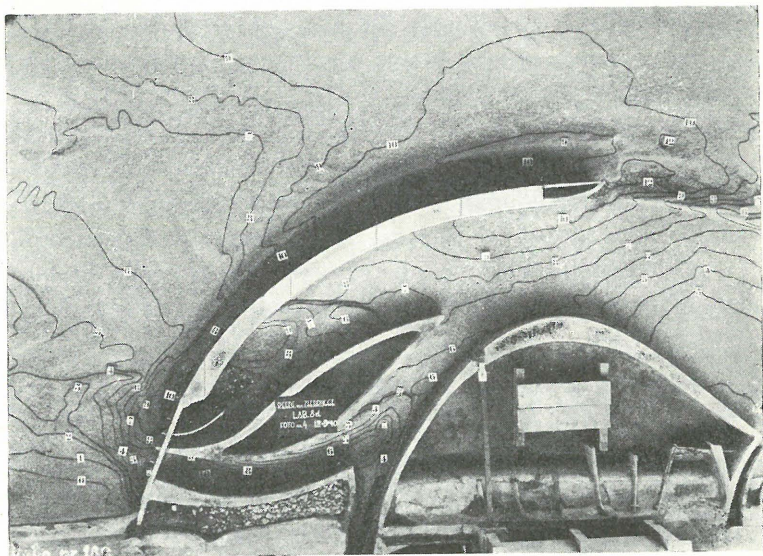


Photo 12. — Projet Lab. 8d.
Situation du fond après 10 essais et un dragage.

La photo n° 11 montre également la formation d'un seuil (qui, dans la réalité, sera en sable) dans les chenaux du môle et de l'écluse. Les matériaux déposés proviennent de la zone érodée située immédiatement à l'Ouest de la claire-voie. Il est permis de supposer que cette formation de seuils dans les chenaux du port, cessera dès que le fond affouillé aura atteint sa configuration d'équilibre, c'est-à-dire lorsqu'il aura pris une forme en rapport avec les courants marins.

Afin de vérifier l'exactitude de cette hypothèse, nous avons, après une première série de 5 marées, remis à profondeur les seuils qui s'étaient formés dans la rade, puis nous avons fait passer une nouvelle série de 5 marées et avons à nouveau photographié le fond. La situation hydrographique obtenue ressort de la photo n° 12. Elle montre que, si les seuils sont revenus, les faibles profondeurs de (— 4m00) et (— 5m00) du premier essai ne reparaissent cependant plus. Il a été procédé une nouvelle fois à l'enlèvement des seuils (de la photo n° 12) et au rétablissement des profondeurs de la fig. 11, aux endroits où ces profondeurs avaient diminué. Puis on a derechef envoyé 5 marées par le modèle, ce qui nous a permis de prendre la photo n° 13, selon laquelle les seuils ont de moins en moins tendance à se reformer. Comme après quelque temps, le fond à l'Ouest de la claire-voie atteindra une configuration d'équilibre plus profonde, il faut s'attendre à ce que les seuils réapparaîtront de moins en moins. On ne peut cependant perdre de vue que, dans tout ce qui précède,

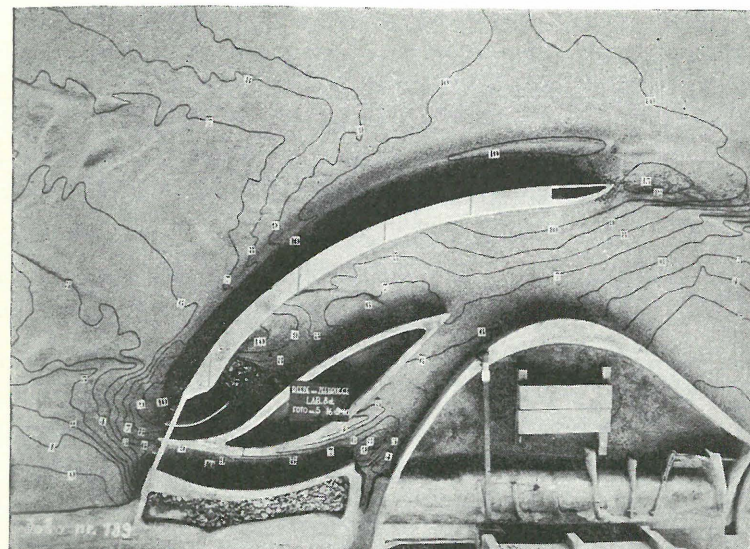


Photo 13. — Projet Lab. 8d.
Situation du fond après 15 essais et deux dragages.

nous avons uniquement envisagé des situations moyennes, tandis que dans la nature, il peut aussi se présenter des situations anormales, pendant les fortes tempêtes p. ex., qui donneront lieu à un trainage intensif de sable. Il n'est donc pas exclu qu'il se produise dans le port des ensablements locaux et momentanés, mais ces derniers n'auront jamais un caractère de régime.

§ 26. — Essai d'envasement sur le projet Lab. 8d.

Les essais faits à ce sujet ont montré que l'envasement n'est pas à craindre. Sous ce rapport, il n'y a qu'un seul endroit qui pourrait présenter quelque danger; c'est, lors du jusant, la zone d'eaux mortes contre le sommet de la presqu'île Est. On peut la faire disparaître, si nécessité il y a, en abaissant davantage les seuils de la claire-voie.

CHAPITRE V.

ESSAIS SUR LA PENETRATION DE LA HOULE DANS LE PORT.

§ 27. — Considérations générales.

C'est le même appareil générateur de houle qui fut utilisé pour les modèles de Zeebrugge et d'Ostende.

Cet appareil (*) est représenté ci-après. Il est constitué par un flotteur qui, en sa position moyenne, peut être placé à différentes hauteurs. Ce flotteur est animé d'un mouvement oscillatoire vertical dont l'amplitude est réglable. La fréquence est réglée par un régulateur de vitesse Flender, non représenté. Ce Flender permet une variation continue de la fréquence de la houle dans un domaine très étendu. Le régulateur Flender est actionné par un moteur électrique.

Comme le flotteur du générateur de houle est rectiligne, les vagues formées dans le modèle ont des crêtes droites, parallèles entre elles.

Avant de procéder à l'examen des conditions qui doivent être remplies pour qu'il y ait, au point de vue de la houle, similitude entre le modèle et la nature, il convient de rappeler quelques résultats théoriques. Nous utilisons les symboles suivants, les petits caractères se rapportant au modèle, les grands aux phénomènes réels :

- λ, Λ longueur d'onde de la houle (distance entre deux sommets ou deux creux consécutifs de la houle).
- c, C célérité de la houle.
- t, T période de la houle.
- h, H profondeur sous le niveau moyen de l'eau (plan d'eau qui s'établit lorsqu'il n'y a pas de houle).
- a, A demi-amplitude de la houle (moitié de la différence de niveau entre un sommet et un creux).
- t/min nombre d'immersions par minute du flotteur de l'appareil générateur.

Nous avons d'abord les relations

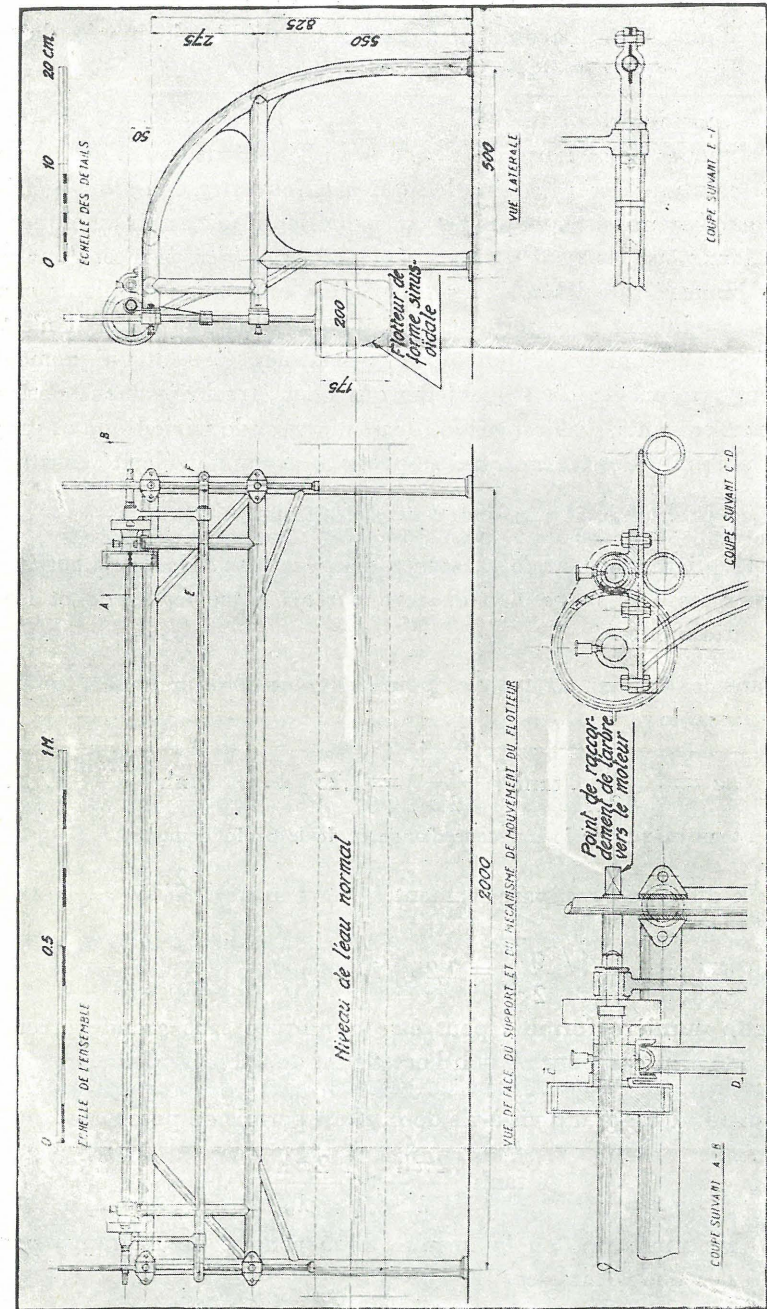
$$\lambda = ct \dots\dots\dots (11)$$

$$t/\text{min} = \frac{60c}{\lambda} \dots\dots\dots (12)$$

Les ondes produites dans la maquette sont des ondes de gravité, dites « courtes », pour lesquelles les accélérations verticales des particules liquides ne sont pas négligeables. Par ailleurs les mouvements de ces particules diminuent rapidement à mesure que l'on s'enfonce sous la surface libre.

D'autres ondes de gravité présentent un caractère tout différent; ce sont les « ondes longues », pour lesquelles les accélérations verticales sont négligeables vis-à-vis des accélérations horizontales et pour lesquelles aussi l'on admet, en première approximation, que les vitesses horizonta-

(*) Conçu et exécuté en grande partie par M. H. De Bruyn, technicien d'essais attaché au Laboratoire. M. De Bruyn conduisit le modèle de Zeebrugge et fit les observations requises avec une rare compétence, à laquelle nous tenons à rendre ici hommage.



les sont uniformément réparties sur toute la section (droite) mouillée. Les changements du plan d'eau laissés de côté, ces ondes ont tout à fait l'aspect d'un courant ordinaire dans un canal. L'onde marée doit être rangée dans cette catégorie.

Les considérations théoriques sur les « ondes courtes » et les formules obtenues ne se rapportent qu'à des phénomènes possibles. On cherche les solutions les plus simples qui satisfont aux équations générales de l'hydrodynamique, auxquelles on a d'ailleurs fait subir quelques simplifications pour les rendre plus aisément intégrables. Il n'est donc nullement démontré que les schémas théoriques, auxquels les calculs conduisent, se produisent nécessairement dans la réalité. De même il n'est pas prouvé que ce sont les seules solutions possibles. Ce sont uniquement les solutions approchées d'un problème qui peut être brièvement posé dans les termes suivants : « Trouver la forme d'une onde périodique et progressive, à potentiel des vitesses, qui se propage avec une célérité constante ».

A ce problème, il y a différentes solutions.

Cette digression sur le caractère des résultats théoriques suffit pour expliquer les écarts que l'on observe parfois entre les essais et les formules rationnelles.

Dans les traités on trouve, pour la célérité d'une onde, quand $\frac{a}{\lambda}$ est négligeable

$$c = \sqrt{\frac{g \lambda}{2 \pi} \cdot \tanh\left(\frac{2 \pi h}{\lambda}\right)} = 1,25 \sqrt{\lambda} \cdot \sqrt{\tanh\left(\frac{2 \pi h}{\lambda}\right)} \dots (13)$$

où il est tenu compte de la longueur d'onde et de la profondeur.

Si h est grand comparativement à λ , on a $\tanh \frac{2 \pi h}{\lambda} \approx 1$ et (13)

$$\text{se simplifie en } c = \sqrt{\frac{g \lambda}{2 \pi}} = 1,25 \sqrt{\lambda} \text{ en m/sec} \quad (14)$$

Cette dernière formule peut être appliquée sans grande erreur dès que $\lambda \leq 2 h$, car pour $\lambda = h$ l'erreur est de 0,2 % seulement.

Quand λ est grand vis-à-vis de h , il est permis de poser

$$\tanh \frac{2 \pi h}{\lambda} \approx \frac{2 \pi h}{\lambda}$$

et (13) se transforme en la formule bien connue de Lagrange pour la célérité des ondes longues

$$c = \sqrt{gh} = 3,13 \sqrt{h} \text{ en m/sec} \quad (15)$$

Si $\frac{a}{\lambda}$ n'est plus négligeable, et pour $h = \infty$, Stokes arrive à la relation suivante.

$$c = \sqrt{\frac{g \lambda}{2 \pi} \left(1 + \frac{2 \pi^2 a^2}{\lambda^2}\right)} \quad (16)$$

d'où il ressort que la célérité dépend aussi de l'amplitude.

Les théories qui conduisent à (13) et (16) supposent toutes deux l'existence d'un potentiel des vitesses (mouvement irrotationnel). Dans le mouvement théorique correspondant à (13), les particules liquides décrivent des trajectoires fermées qui sont des ellipses. Dans la théorie de Stokes, le mouvement des particules dans le sens de propagation des ondes n'est pas entièrement compensé par leur mouvement en sens inverse. En dehors du mouvement oscillatoire, le fluide subit également une certaine translation dans le sens de progression de la houle, translation qui décroît rapidement à mesure que la couche d'eau observée se rapproche du fond. Cette translation s'observait parfaitement dans le modèle, d'où l'on peut conclure que, dans nos essais, la célérité des vagues était influencée, dans une certaine mesure, par leur amplitude.

Pour l'onde de Stokes, Michell trouve comme valeur maximum du rapport $\frac{2a}{\lambda}$:

$$\frac{2a}{\lambda} = 0,14 \quad (17)$$

Suivant cette théorie, il ne peut exister de vagues pour lesquelles $2a > 0,14 \lambda$. Quand l'amplitude atteint la valeur limite $0,14 \lambda$, la vague déferle. Pour les houles observées dans la réalité, $\frac{2a}{\lambda}$ était toujours beaucoup plus petit que 0,14.

En produisant les vagues du modèle, nous avons toujours pris soin de ne pas réaliser de trop grandes valeurs de $\frac{2a}{\lambda}$, car il est clair qu'une houle, dont la configuration se rapprochera du point de déferlement, se comportera autrement que celle possédant une plus grande réserve de stabilité interne.

En combinant (16) et (17), on trouve l'accroissement maximum que c peut subir du fait que l'amplitude a a une valeur finie. Il vient

$$c = 1,097 \sqrt{\frac{g \lambda}{2 \pi}} \text{ au lieu de } c = \sqrt{\frac{g \lambda}{2 \pi}}$$

Examinons maintenant jusqu'à quel point il est possible de réaliser la similitude entre le modèle et la réalité. A cet effet, il faut envisager l'action des forces suivantes : pesanteur, forces d'inertie, tension superficielle, vent et frottements.

Dans le présent paragraphe, nous limiterons notre étude à l'action de la pesanteur et des forces d'inertie. La considération de ces deux forces, à l'exclusion des autres, conduit, comme on sait, à la règle de similitude de Reech-Froude. La formule (13) aussi ne tient compte que de la pesanteur et des forces d'inertie, de sorte que nous l'utiliserons pour établir la règle de report. En appliquant la relation (13), on trouve pour la célérité, respectivement dans le modèle et dans la nature,

$$c = \sqrt{\frac{g \lambda}{2 \pi} \cdot \tanh\left(\frac{2 \pi h}{\lambda}\right)} \quad \text{et} \quad c = \sqrt{\frac{g A}{2 \pi} \cdot \tanh\left(\frac{2 \pi h}{A}\right)}$$

On voit immédiatement que, pour les longueurs d'onde, il ne faut pas prendre l'échelle horizontale, mais bien l'échelle verticale $\left(\frac{\lambda}{A} = \frac{1}{m}\right)$ et que, pour la célérité, on retrouve alors la règle de Reech-Froude.

$$\frac{c}{C} = \sqrt{\frac{1}{m}} = \sqrt{\frac{1}{64}} = \frac{1}{8}.$$

Lorsqu'on travaille sur des modèles à échelle trop petite, il peut arriver que la tension superficielle y joue un rôle hors de proportion avec son influence infime dans la réalité. Avant de pouvoir affirmer que les phénomènes observés sur la maquette reproduisent fidèlement les faits réels, il faut d'abord s'assurer que les situations créées en modèle n'étaient pas telles qu'il pouvait y avoir intervention de la tension superficielle.

Quand on tient compte de cette dernière force, que nous désignerons par ζ , la formule (13) devient

$$c = \sqrt{\left(\frac{g \lambda}{2 \pi} + \frac{2 \pi \zeta}{\rho \lambda}\right) \cdot \tanh \frac{2 \pi h}{\lambda}} \quad (18)$$

ρ étant la masse spécifique du liquide.

Pour l'eau, et pour des valeurs suffisamment grandes de h , la relation (18) s'écrit approximativement

$$c = \left(1 + \frac{0,00015}{\lambda^2}\right) \sqrt{\frac{g \lambda}{2 \pi}} \quad (19)$$

les unités étant le mètre et la seconde.

Pour $\lambda = 10$ cm, l'accroissement de c , par suite des forces capillaires, vaut 1,5 % et pour $\lambda = 30$ cm cette augmentation est de 1 ‰ seulement.

Etant donné ces faits, nous avons toujours utilisé des longueurs d'onde comprises entre 20 et 70 cm, de sorte qu'on peut admettre que nos essais n'étaient pas influencés par la tension superficielle.

On peut aussi se demander si les forces qui amortissent la houle, ne peuvent venir troubler la similitude. Cette source d'incertitude peut être négligée s'il s'agit des forces de frottement interne du liquide (viscosité), car les effets de ces forces sur la propagation de la houle sont toujours forts petits (voir *Handbuch der physikalischen und technischen Mechanik*, Partie V, pp. 321-322, édition Johann Ambrosius Barth à Leipzig). Quant au frottement contre le fond, il est difficile de faire une comparaison entre le modèle et la réalité.

Une autre objection peut être faite contre la façon de produire les vagues. Dans la nature, elles naissent sous l'action du vent qui souffle sur toute (ou sur une très grande partie de) la surface libre de l'eau. Dans le modèle, il fallut renoncer à engendrer les vagues par un courant d'air, lui-même créé par des ventilateurs, car une telle installation aurait donné lieu à de multiples difficultés au point de vue de la technique expérimentale.

Le laboratoire de Delft fait remarquer (*) que l'exagération verticale de la maquette présente des inconvénients quand on étudie le déferlement ou la réflexion des vagues sur un fond en pente. La montée de la houle sur un estran incliné est rendue d'une façon défectueuse dans un modèle à exagération verticale. En d'autres mots, on pourrait dire que cette exagération a pour effet de diminuer le pouvoir qu'a l'estran d'absorber la houle qui l'aborde.

Deux moyens peuvent être employés en modèle pour prévenir la réflexion des vagues, c'est-à-dire pour absorber celles-ci.

Le premier moyen, qui convient pour les longueurs d'onde envisagées dans nos essais, fut appliqué le long du mur rectiligne qui forme la limite longitudinale du modèle tout entier du côté du large. Les ondes engendrées par l'appareil de houle, et se propageant vers la haute mer, devaient être absorbées près de ce mur, car, si elles avaient pu s'y réfléchir, cela aurait empêché l'envoi d'une houle régulière du flotteur oscillant vers l'estran de la maquette. A cette fin on a placé, à quelque 20 cm du mur en question, lequel est très approximativement parallèle à la direction générale de la côte, un treillis en fil de fer et l'espace compris entre la paroi extérieure du modèle et le treillis fut rempli de copeaux de bois qui absorbaient parfaitement la houle se dirigeant vers le large.

(*) Rapport non publié cité au § 4.

Le deuxième moyen pour empêcher la réflexion des vagues consiste à les laisser monter un fond en pente faible.

Après avoir indiqué les difficultés qui surgissent lors d'un essai de houle en laboratoire et montré les écueils à éviter, voyons la conclusion qui peut être tirée de l'exposé ci-dessus quant à la valeur intrinsèque des essais de vagues. A ce propos, le rapport de Delft, sur la question de Zeebrugge, s'exprime de la façon suivante : « *het is niet zozeer het breken op en het terugkaatsen van hellende belopen dat moet worden bestudeerd. Zowel het bestaande havenhoofd als de ontworpen nieuwe dam zijn nagenoeg verticaal uitgevoerd. Op het strand wordt de toestand verkeerd weergegeven, doch men mag aannemen dat de verschijnselen in de havengeulen en langs de hoofden daardoor niet in belangrijke mate worden beïnvloed.* »

(Traduction : « ce n'est pas tant le déferlement ou la réflexion sur des fonds inclinés qui doit être étudié. Le môle existant aussi bien que le nouvel endiguement projeté, ont des parois à peu près verticales. Sur l'estran la situation naturelle est mal reproduite, mais on peut admettre que cela n'influencera pas dans une grande mesure les phénomènes dans les chenaux et le long des murs de la rade »).

Nous partageons cette manière de voir. Les essais de houle ne peuvent donner que des indications qualitatives, mais ils permettent cependant de faire une comparaison judicieuse entre les différents projets en présence.

§ 28. — Observations dans la nature.

Pour conduire des essais de houle, il est indispensable d'être renseigné sur les amplitudes des vagues qui se produisent simultanément en mer et dans la rade, puis de les ramener à des chiffres proportionnels, 100 représentant conventionnellement l'amplitude en mer.

Nous disposons des chiffres suivants, relevés par un vent de N.N. Ouest, de force 4 suivant l'échelle de Beaufort. Les points de mesure A, B, C, D sont indiqués à la planche n° 17.

TABLEAU II.

Emplacement des points de mesure.	Élévation des eaux au-dessus du plan de référence (0m00).	Amplitude de la houle.	Longueur d'onde des vagues.
A	38 dm	10 dm	13 m
B	41 dm	4 dm	très grande
C	43 dm	4 dm	4 m
D	32 dm	17 dm	14 m

L'amplitude plus grande en D doit être attribuée à la réflexion de la houle contre le môle.

§ 29. — Essais de houle sur la situation To.

Les amplitudes en B et C sont chaque fois exprimées en pourcents de celle observée au point A (pour la position de ces points on se reportera à la planche n° 17).

Le tableau III donne les résultats pour une tempête de Nord-Est.

TABLEAU III
(Tempête du Nord-Est.)

Amplitudes en		
A	B	C
100	56	75

Pour une tempête venant de la direction Nord-Ouest on se reportera au tableau IV.

TABLEAU IV.
(Tempête du Nord-Ouest.)

Amplitudes en		
A	B	C
100	22	30

§ 30. — Essais de houle sur le projet T 14.

Les résultats sont les suivants :

TABLEAU V.
(Tempête du Nord-Est.)

Amplitudes en		
A	B	C
100	75	88

TABLEAU VI.
(Tempête du Nord-Ouest.)

Amplitudes en		
A	B	C
100	16	27

En groupant les chiffres obtenus, pour la tempête du Nord-Est, aux §§ 29 et 30, on peut dresser le tableau comparatif suivant :

TABLEAU VII.
(Tempête du Nord-Est.)

Situation	A	B	C
To	100	56	75
T 14	100	75	88

Pour la tempête du Nord-Ouest on a :

TABLEAU VIII.
(Tempête du Nord-Ouest.)

Situation	A	B	C
To	100	22	30
T 14	100	16	27

Nous croyons donc pouvoir affirmer que, pour les tempêtes du Nord-Est, qui par ailleurs sont relativement rares, le T 14 sera un peu moins favorable que le To, c'est-à-dire que la situation actuelle (1933). Pour les tempêtes du Nord-Ouest les deux situations seront pratiquement équivalentes.

§ 31. — Essais de houle sur To à chenaux approfondis et claire-voie ouverte.

TABLEAU IX.
(Tempête du Nord-Est.)

Amplitudes en		
A	B	C
100	72	76

TABLEAU X.
(Tempête du Nord-Ouest.)

Amplitudes en		
A	B	C
100	34	32

§ 32. — Essais de houle sur le projet Lab. 8.

Les points A, B, C et E où les amplitudes sont mesurées, sont indiqués à la fig. 10. Les points A, B, C sont les mêmes que ceux donnés à la planche n° 17, situation To.

Voici les résultats :

TABLEAU XI.
(Tempête du Nord-Est.)

Amplitudes en			
A	B	C	E
100	77	82	58

TABLEAU XII.
(Tempête du Nord-Ouest.)

Amplitudes en			
A	B	C	E
100	34	38	21

Ensuite nous avons donné, pour le projet Lab 8, un fruit de $\pm 12/4$ (valeur du modèle) aux parois de l'île, de la presqu'île Est et de la défense côtière entre la claire-voie et le chenal de l'écluse. Cette inclinaison n'a été réalisée que sur la hauteur où ces parois sont soumises aux vagues. A cause de l'exagération verticale, le modèle Lab 8 ordinaire ne présente que des parois verticales et nous sommes d'avis que l'on est amené ainsi, au point de vue de la propagation de la houle, à juger ce projet d'une façon trop défavorable.

Avec parois inclinées on a trouvé :

TABLEAU XIbis.
(Tempête du Nord-Est.)

Amplitudes en			
A	B	C	E
100	77	20	20

TABLEAU XIIbis.
(Tempête du Nord-Ouest.)

Amplitudes en			
A	B	C	E
100	35	18	22

Comparons pour finir les résultats des §§ 31 et 32.

TABLEAU XIII
(Tempête du Nord-Est.)

Situation	A	B	C	E
To, claire-voie ouverte, chenaux approfondis.	100	72	76	—
Lab 8.	100	77	82	58
Lab 8, parois inclinées.	100	77	20	20

TABLEAU XIV.
(Tempête du Nord-Ouest.)

Situation	A	B	C	E
To, claire-voie ouverte, chenaux approfondis.	100	34	32	—
Lab 8.	100	34	38	21
Lab 8, parois inclinées.	100	35	18	22

Le projet Lab 8 est, comme on sait, un projet à claire-voie ouverte. Lors de la construction du port de Zeebrugge, on réalisa une situation To, également à claire-voie. Ce dispositif exista pendant une vingtaine d'années, sans que les vagues amenées par les tempêtes du Nord-Est et du Nord-Ouest n'inquiétassent les navires amarrés le long du môle. Voilà une donnée pratique, un résultat de l'expérience. Si donc le projet Lab 8 donne, en modèle, au point de vue de l'agitation au plan d'eau, des résultats tout aussi favorables que To à claire-voie et avec bonnes profondeurs (voir les tableaux XIII et XIV), on peut conclure que ce projet Lab 8 est satisfaisant en ce qui concerne la protection de la rade contre la houle.

CHAPITRE VI.

CONCLUSION DE LA PREMIERE PARTIE.

§ 33. — Conclusion. — Projet recommandé par le Laboratoire.

Les expériences décrites ci-avant, sur le modèle de la rade de Zeebrugge, ont amené le Laboratoire de Recherches Hydrauliques à proposer que le projet Lab 8 d soit pris en considération pour l'amélioration de ce port.

Il nous semble recommandable de commencer par araser le niveau des seuils de la claire-voie à (— 6 m. 00) et (— 8 m. 00), respectivement du côté du rivage et de celui du large, et de régler ensuite ces profondeurs par un apport d'enrochements, jusqu'à obtention de la section mouillée optimum de la claire-voie, en se laissant guider par les observations que l'on aura l'occasion d'effectuer quant à la tenue de la rade.

Il ne peut être attaché une trop grande importance à la zone d'eaux mortes qui, dans le projet Lab 8 d, apparaît, lors du jusant, à la pointe de la presqu'île Est. Il est infiniment probable que cette zone n'existera que pendant une partie du jusant et qu'elle disparaîtra dès que la vitesse de courant sera suffisamment inférieure à celle admise pour les essais. Ceci fut démontré par des expériences du laboratoire. Nous avons, en effet, pu constater que si le débit du jusant était ramené à 56 l./sec., soit la moitié de sa valeur normale, des courants réguliers traversaient l'endroit occupé auparavant par la zone d'eaux mortes.

Dans le Lab 8 d la tendance à l'envasement est nulle ou négligeable. On ne peut cependant perdre de vue qu'en modèle on travaille exclusi-

vement sur des situations moyennes, tandis que, dans la réalité, peuvent aussi se présenter temporairement des circonstances exceptionnelles. Ces dernières peuvent amener des dépôts en un endroit de la rade, mais ces faits se produisent dans tous les ports. Ce qu'il importe surtout de supprimer, c'est le régime d'envasement régulier et continu, et ce but est pleinement atteint par le projet Lab 8 d.

Enfin nous pouvons dire que, dans le projet Lab 8, l'agitation due à la houle n'est pas plus forte, pratiquement, que dans un port selon To, à claire-voie et dont les chenaux seraient maintenus à une profondeur convenable.

Après réalisation du projet Lab 8 d, les travaux de dragage seront à peu près supprimés, d'où une économie annuelle de $310.000 \times 12 \times 3,50 = 13.020.000$ fr., en se basant sur les prix en vigueur avant la dernière guerre mondiale. Le chiffre de 310.000 m^3 d'envasement par mois se trouve justifié au tableau I du § 21 (port à bonnes profondeurs) et nous comptons 3,50 fr. par m^3 pour les produits dragués.

En admettant 4,5 % pour l'intérêt et l'amortissement, l'économie faite sur les dragages permet d'exécuter des travaux pour un montant total de $\frac{13.020.000 \times 100}{4,5} = 290.000.000$ fr.

Or, le Service spécial de la Côte (*) a estimé le coût du Lab. 8 d à 312.000.000 fr., somme qui présente une bonne marge de sécurité et est susceptible d'une réduction. On peut donc dire que les dragages d'entretien pour le maintien, de façon précaire, de profondeurs convenables dans le port actuel, coûtent autant que la réalisation du Lab 8 d, lequel projet offre, d'une manière stable, deux chenaux profonds, l'un le long du môle, l'autre vers l'écluse maritime.

Le chenal du môle atteint en certains points 10 mètres sous marée basse et présente encore un mouillage de 8 mètres près de la claire-voie.

Le Lab 8 d apporte donc bien la solution d'un port maritime en eaux profondes.

(A suivre.)

(*) Service de l'Administration des Ponts et Chaussées de Belgique.

SAMENVATTING :

Studie over de Belgische havens der Noordzee.

MODELPROEVEN.

(Vervolg.) *

HOOFDSTUK IV.

Proeven op ontwerpen met open claire-voie.

§ 22. Toestand To met open claire-voie.

§ 23. Ontwerpen Lab. 8. Algemeenheden.

Deze ontwerpen zijn, in plattegrond, afgebeeld op fig n^r 10; 120 meter der oude claire-voie dienen ter voeding der sluisgeul en 180 meter laten de stroom der havendamgeul door. Beide delen dezer claire-voie krijgen een horizontale drempel; de landwaartse dezer twee drempels (120 meter) ligt ofwel op hetzelfde, ofwel op een hoger peil dan de zeewaartse (180 meter).

De volgende ontwerpen Lab. 8 werden onderzocht :

Lab. 8 = drempels op (— 3,00 m.) en (— 4,00 m.).

Lab. 8 a = drempels op (— 4,00 m.) en (— 4,00 m.).

Lab. 8 b = drempels op (— 4,00 m.) en (— 5,00 m.).

Lab. 8 c = drempels op (— 4,00 m.) en (— 6,00 m.).

Lab. 8 d = drempels op (— 5,00 m.) en (— 7,00 m.).

Lab. 8 e = drempels op (— 3,00 m.) en (— 5,00 m.).

Het ontwerp Lab 8 d is het gunstigste gebleken.

§ 24. Stromingsproeven op het ontwerp Lab. 8 d.

§ 25 Proeven over de bodemvorming op het ontwerp Lab. 8 d.

§ 26. Slibproef op het ontwerp Lab. 8 d.

(*) Voor de aanvang en het 1^e vervolg, zie afleveringen 3 (Juni) en 4 (Augustus) van het T. O. W., blz. 390 en 577.

HOOFDSTUK V.

Golfproeven.

§ 27. Algemene beschouwingen.

Wat de theoretische beschouwingen omtrent « korte golven » betreft, kan worden gezegd dat de bekomen formules enkel betrekking hebben op mogelijke verschijnselen. Men zoekt de eenvoudigste oplossingen die voldoen aan de algemene vergelijkingen der hydrodynamica, aan welke vergelijkingen men bovendien enige vereenvoudigingen heeft laten ondergaan. Zo wordt dus geenszins bewezen dat de theoretische schemas zich noodzakelijkerwijze in de natuur voordoen en evenmin, dat zij alleen het zijn die kunnen optreden. Het zijn enkel benaderende oplossingen van een vraagstuk dat, in het kort, in de volgende termen gesteld wordt : « De vorm vinden ener periodische, progressieve golf met snelheidspotentiaal en die zich met eenparige vaart voortplant ».

Aan die vraag beantwoorden verschillende oplossingen.

Deze uitweiding over het karakter der theoretische uitkomsten is voldoende om de afwijkingen te verklaren die, bij proefnemingen, ten opzichte der wiskundige verwachtingen worden gevonden.

§ 28. Waarnemingen in de natuur.

§ 29. Golfproeven op de toestand T_0 .

§ 30. Golfproeven op het ontwerp T 14.

§ 31. Golfproeven op T_0 met uitgediepte geulen en open claire-voie.

§ 32. Golfproeven op het ontwerp Lab. 8.

HOOFDSTUK VI.

Conclusie uit het Eerste Deel.

§ 33. Conclusie. Door het Laboratorium aanbevolen project.

De beschreven experimenten op modellen der rede van Zeebrugge hebben het Waterbouwkundig Laboratorium er toe gebracht voor te stellen het project Lab. 8 d voor uitvoering in aanmerking te nemen.

Het schijnt ons zelfs aanbevelenswaardig de drempels der claire-voie in de beginne op (— 6,00 m.) en (— 8,00 m.) te brengen, respectievelijk landwaarts en zeewaarts, en de juiste diepte ter plaatse te regelen door eventueel uit te voeren ophogingen, zulks volgens de bij het bedrijf der haven opgedane ervaringen.

(Wordt voortgezet.)

Calcul de poutres reposant sur le sol.

LE COEFFICIENT DE RAIDEUR K DU SOL.

(2^{me} Suite.) *

Dr. Ir. E. E. DE BEER,

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

(Pl. 26 et 27.)

CHAPITRE IV.

Poutres sollicitées par une charge centrée et appuyées sur un sol ayant un module d'élasticité variable avec la profondeur ($E_s = C_p$).

§ 1. — Cas de la poutre $b = 1,50$ m $l = 6,00$ m $P = 100$ t.

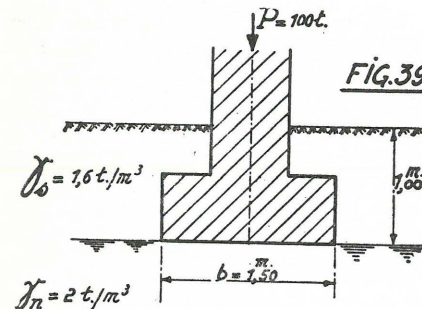
Au chapitre précédent nous avons examiné à fond les problèmes d'application de la nouvelle méthode, au cas de poutres reposant sur un sol ayant un module d'élasticité constant. Nous avons déjà attiré l'attention sur le fait que de tels sols constituent l'exception, et qu'en général le module d'élasticité d'un sol est variable avec la profondeur.

Nous allons d'abord considérer le cas concret suivant (fig. 39) :

Une poutre $b = 1,50$ m. $l = 6,00$ m. est fondée à 1 m. de profondeur en dessous de la surface du sol, dans une couche de sable ayant les caractéristiques suivantes :

Constante de compressibilité $C = 100$;

Poids volumétrique sec $\gamma_s = 1,6$ t/m³;



(*) Pour le début et la 1^{re} suite, voir fascicules 3 (juin) et 4 (août) 1948 des A. T. P., pp. 393 et 525.