

# Contribution à l'étude expérimentale des digues maritimes en enrochements

Autor(en): **Stucky, A. / Bonnard, D.**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Bulletin technique de la Suisse romande**

Band (Jahr): **63 (1937)**

Heft 18

PDF erstellt am: **12.07.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-48464>

## **Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.

Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.

Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

## **Haftungsausschluss**

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

COMMUNICATIONS DU LABORATOIRE  
D'HYDRAULIQUE DE L'ÉCOLE D'INGÉNIEURS  
DE L'UNIVERSITÉ DE LAUSANNE<sup>1</sup>

## Contribution à l'étude expérimentale des digues maritimes en enrochements,

par A. STUCKY, professeur, et D. BONNARD, ingénieur.

### I. Introduction.

En août 1936, à la demande de M. Abecasis, directeur général au Ministère des travaux publics du Portugal, et avec sa collaboration ainsi que celle de ses services techniques, le Laboratoire d'hydraulique de l'École d'ingénieurs de Lausanne entreprit une étude relative au nouveau brise-lames de Leixoes (port de Porto). L'Administration portugaise se proposait de construire, au large des ouvrages de protection de ce dernier port, un brise-lames en enrochements d'une longueur d'environ 1000 m, en vue de protéger la passe d'entrée contre les tempêtes du nord-ouest, du sud-ouest et de l'ouest-nord-ouest (voir plan schématique Fig. 1).

<sup>1</sup> N. d. l. Réd. : Il y a lieu de citer parmi les publications récentes du Laboratoire d'hydraulique de l'École d'ingénieurs de l'Université de Lausanne : « Action des vagues sur les digues à paroi verticale », par A. Stucky, prof., et D. Bonnard, ing., *Bulletin technique* du 7. 12. 35. « Contribution à l'étude expérimentale et analytique des chambres d'équilibre », par M. Stucky, professeur, *Bulletin technique* des 26. 9. 36 et 24. 10. 36.

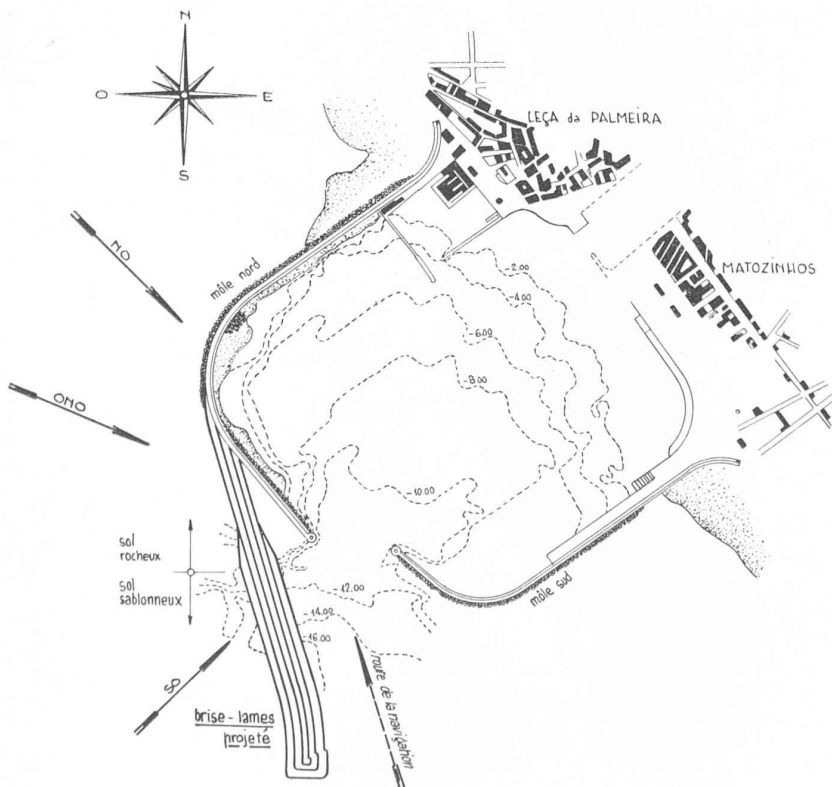


Fig. 1. — Plan général du port de Leixoes. Implantation des brise-lames projetés.  
Echelle 1 : 20 000.

L'ouvrage en question devait consister en une digue en enrochements complètement immergée, dont le profil en travers primitivement envisagé est donné à la Fig. 2 ci-contre :

La construction de ce brise-lames posait deux questions :

1. Quelles devaient être la forme extérieure et la constitution de l'ouvrage pour qu'il résiste sans dommage à l'assaut des vagues les plus puissantes et cela par haute et basse mer.

2. Quelle serait en définitive le degré de tranquillisation obtenu sur la ligne de navigation (voir Fig. 1) en période de tempête, ou en d'autres termes dans quelle mesure les vagues se propageront-elles au delà du brise-lames, par haute et basse-mer.

L'étude dont nous donnons ici les résultats essentiels est une contribution à la solution de ces problèmes. Effectuée pour le cas particulier du brise-lames de Leixoes, elle jette quelque lumière sur la manière dont se comportent les ouvrages de ce type en général.

### II. Les installations d'expérimentation et de mesure.

Les questions fondamentales faisant l'objet de nos expériences, à savoir la stabilité de l'ouvrage d'une part et la propagation des vagues au delà du brise-lames, ont été étudiées sur deux modèles. Le premier, à deux dimensions, constitué par un tronçon réduit de digue interposé dans un chenal vitré de 15,00 m de longueur et de 30 cm de largeur (voir Fig. 3), permet l'observation en coupe des phénomènes et leur prise de vue photographique et cinématographique. Le second, consistant en un tronçon de digue beaucoup plus étendu fut construit dans un bassin de grande surface (voir Fig. 4). Ce deuxième mode de faire s'est révélé moins utile que le premier et servait principalement de contrôle des résultats obtenus par ailleurs.

L'étude de la stabilité de la digue a consisté à faire agir sur divers types d'ouvrages une succession régulière de lames de dimensions bien déterminées et à observer l'effet produit sur les enrochements par les déferlements. Ces observations ont été protocolées principalement par voies photographique et cinématographique.

Pour l'étude de la propagation des lames au delà du brise-lames, nous avons mis au point un procédé électrique dont le principe est le suivant : sur un oscillographe Siemens furent enregistrées les variations d'intensité de courant d'un circuit électrique sur lequel était intercalé une électrode plongeant dans le chenal et dont la résistance variait en raison de son degré d'émergence au droit du point où nous voulions mesurer

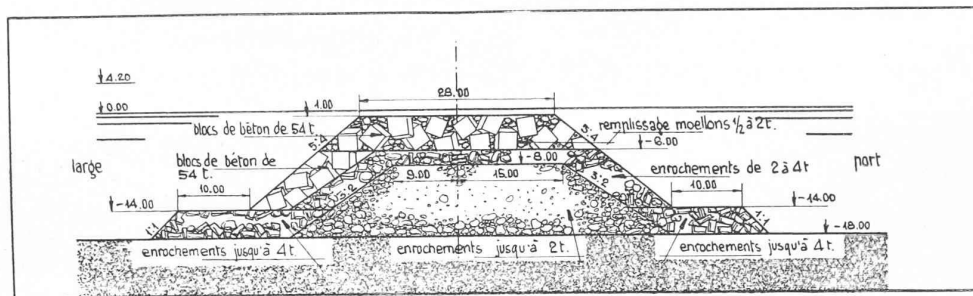


Fig. 2. — Coupe transversale du brise-lames (projet primitif).  
Echelle 1 : 1000.

l'amplitude des vagues. On aperçoit sur les figures déjà citées divers éléments de cet appareillage de mesure. Ce procédé a donné toute satisfaction ; il est utilisé au Laboratoire d'hydraulique de Lausanne dans toutes les expériences où la fréquence des oscillations est suffisamment haute pour que le mouvement ne puisse plus être enregistré avec suffisamment de précision par un simple flotteur.

### III. Mouvements de la mer au voisinage d'un brise-lames immergé en enrochements.

Alors que dans le cas de jetées à paroi verticale les lames sont réfléchies, se composent et donnent naissance à un mouvement ondulatoire plus ou moins stationnaire, le *clapotis*, lorsqu'il s'agit de digues en enrochements, à talus en pente douce, les vagues *déferlent* et se brisent sur l'ouvrage. L'énergie de la tempête, loin de se conserver au sein d'un mouvement ondulatoire est complètement dissipée sur l'ouvrage. Ce dernier est alors exposé à des efforts intenses.

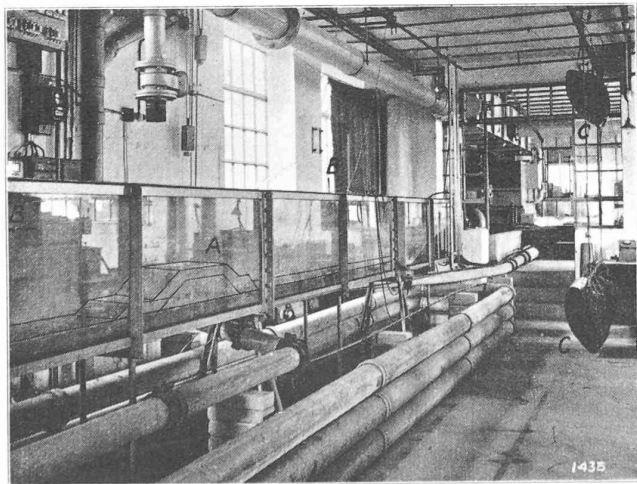


Fig. 3. — Vue partielle du chenal de 15,0 m renfermant le modèle à deux dimensions. L'échelle de ce modèle varia au cours de l'étude de 1 : 70 à 1 : 50.

On distingue :

- A. Le tronçon de brise-lames (modèle proprement dit).
- B. Les électrodes du système d'enregistrement des oscillations au large et du côté du port.
- C. Les projecteurs et les sources lumineuses indispensables aux prises de vue cinématographiques et photographiques.

L'appareil générateur des vagues ne figure pas sur cette photographie ; il en est de même de toute la partie gauche du chenal d'essai.

Si, comme c'est le cas pour le brise-lames de Leixoes, la digue en enrochements est arasée à une cote inférieure à celle de la basse mer, le déferlement des lames pourra être incomplet et une partie de l'oscillation se propagera au delà de l'ouvrage, qui de ce fait sera moins sollicité. En outre, un brise-lames tel que défini à la figure 1, présentant à la mer un talus de pente relativement forte et venant prendre appui sur des risbermes arasées à des profondeurs suffisantes pour éviter tout déferlement préalable des vagues, pourra susciter une réflexion partielle des lames.

Le mouvement des masses d'eau au voisinage d'un tel ouvrage est donc complexe. Il dépend non seulement des dimensions des lames, du profil en travers de la digue et de sa fondation, mais aussi de la position du niveau moyen de la mer à l'instant où sévit la tempête.

Considérons en premier lieu le cas du niveau moyen de la mer à la cote 4,20 et d'un ouvrage conforme à celui de la Fig. 1 arasé à la cote -1,00 et fondé à la cote -18,00, subissant l'assaut de lames d'amplitude croissante. (Voir Fig. 5, 6 et 7.) Les vagues d'amplitude au large

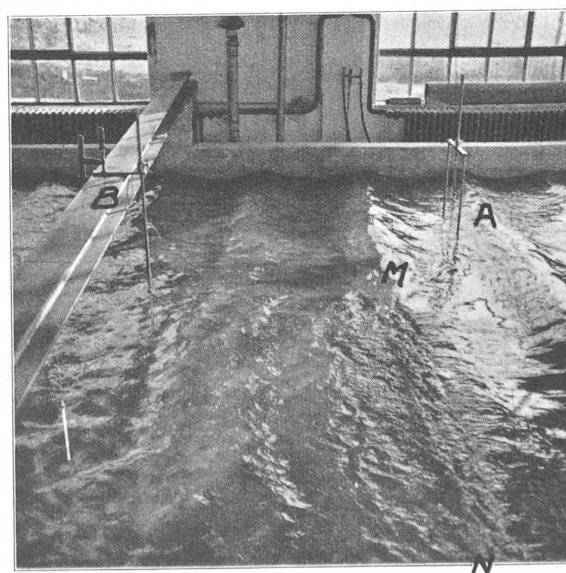


Fig. 4. — Modèle à trois dimensions, vue générale. On distingue au second plan les vagues cheminant de la droite vers la gauche. Leur amplitude est enregistrée à l'aide de l'électrode A. Au premier plan, les lames se brisent sur l'ouvrage situé en NM et se propagent du côté port avec une amplitude réduite mesurée à l'aide de l'électrode B que l'on peut déplacer parallèlement à la digue.

Ouvrage en eau profonde, fondé à la cote  $-18,00$ .  
Niveau de la mer au repos :  $+4,20$ .

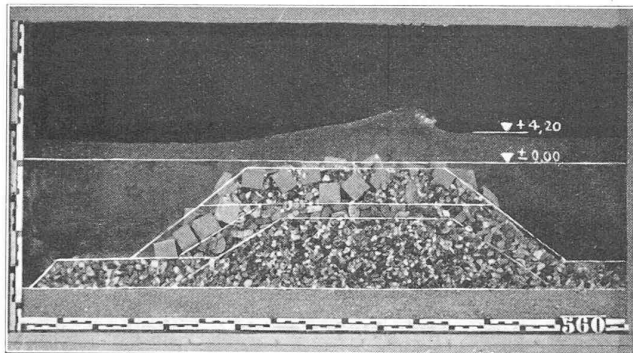


Fig. 5. — Dimensions de la vague  $2h = 4,00$  m,  $2L = 100$  m. La vague franchit l'obstacle en déferlant très légèrement. Elle perdra une partie de son énergie au droit de l'ouvrage; elle se brise partiellement.

Ouvrage en eau profonde, fondé à la cote  $-18,00$ .  
Niveau de la mer au repos  $+0,20$ .

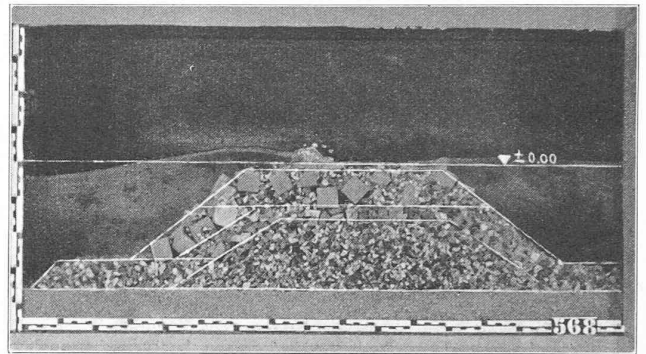


Fig. 8. — Dimensions de la vague  $2h = 4,00$  m,  $2L = 100$  m. Une vague, même d'amplitude relativement faible, se brise immédiatement, la propagation côté port est minime.

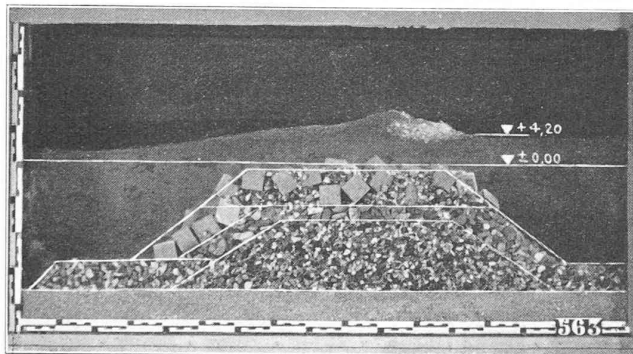


Fig. 6. — Dimensions de la vague  $2h = 6,00$  m,  $2L = 120$  m. La vague déferle nettement et se brise presque complètement, perdant la plus grande partie de son énergie. L'amplitude de l'oscillation se propageant au delà du brise-lames n'est plus du même ordre de grandeur que celle de la vague incidente (forte diminution). Le passage de la vague fait osciller les éléments les plus légers du faite de la digue (éléments de  $1/2$  t. à 2 t.).

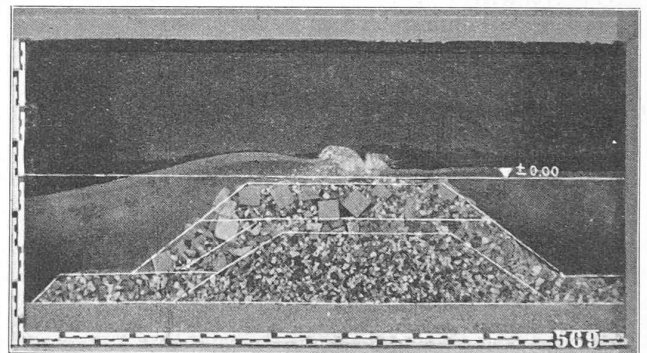


Fig. 9. — Dimensions de la vague  $2h = 6,50$  m,  $2L = 120$  m. Une vague d'amplitude moyenne provoque sur l'ouvrage des courants vers le large et vers le port, entraînant les éléments les moins lourds et déchaussant les gros blocs.

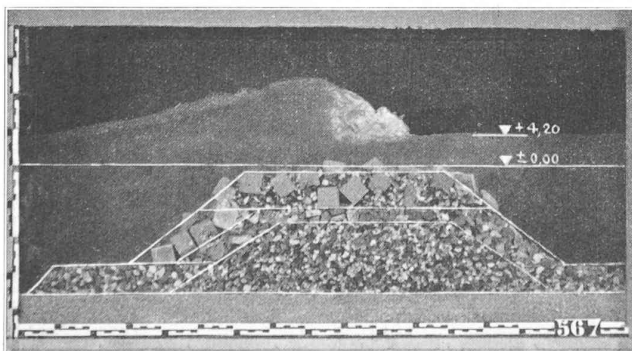


Fig. 7. — Dimensions de la vague :  $2h = 9,00$  m,  $2L = 220$  m. L'énorme masse d'eau déferle très violemment sur l'ouvrage. La vague est en grande partie détruite. Toutefois les gros blocs de la superstructure ne bougent pas malgré la violence du phénomène. L'agitation côté port est très importante.

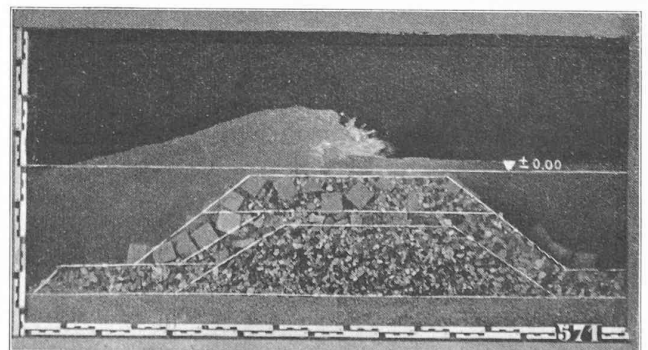


Fig. 10. — Dimensions de la vague  $2h = 9,00$  m,  $2L = 220$  m. Le sommet de la digue est exposé à de très grands efforts, les gros blocs eux-mêmes sont emportés de part et d'autre de l'ouvrage. L'agitation côté port est importante.



Ouvrage en eau moyenne, fondé à la cote  $-12,00$   
Niveau de la mer au repos  $+4,20$ .

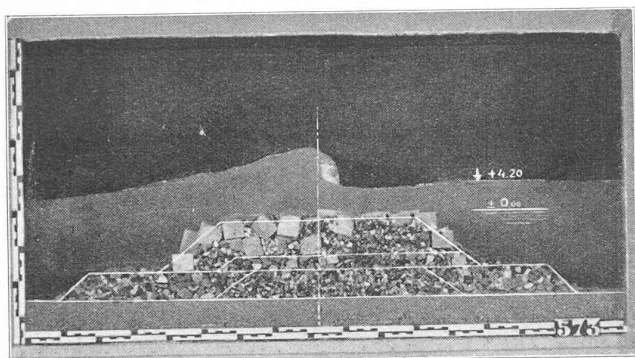


Fig. 11. — Dimensions de la vague  $2h = 6,00$  m.  $2L = 120$  m. Vue prise à l'instant où la vague vient d'aborder le brise-lames.

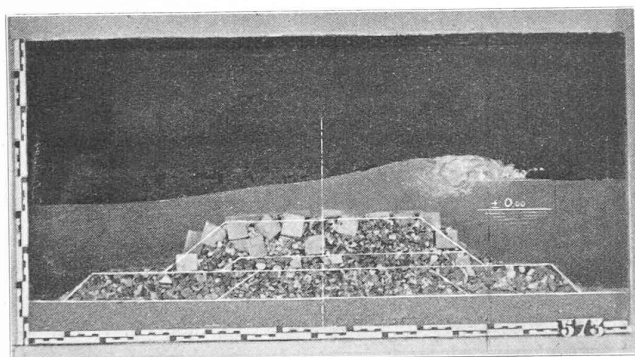


Fig. 12. — Dimensions de la vague  $2h = 6,00$  m.  $2L = 120$  m. Vue prise à l'instant du déferlement complet de la vague.

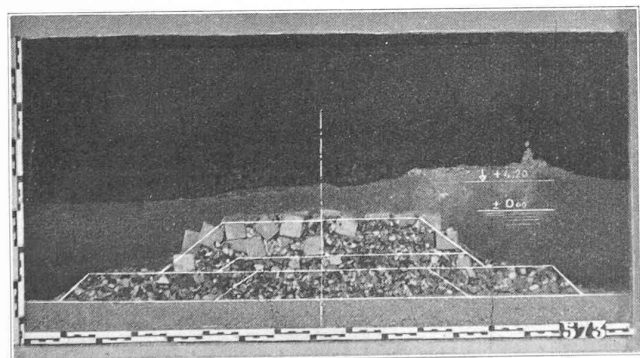


Fig. 13. — Dimensions de la vague  $2h = 6,00$  m.  $2L = 120$  m. Vue prise à l'instant de la naissance de l'intumescence se propageant du côté du port.

$2h = 4,00$  m et de longueur entre crêtes  $2L = 100$  m (Fig. 5) franchissent le brise-lames en se déformant, mais sans déferler véritablement. Elles se propagent presque intactes du côté du port et ne sollicitent que très faiblement l'ouvrage. Les vagues de  $6,00$  m (Fig. 6) et à plus forte raison celles de  $9,00$  m (Fig. 7) se cassent nettement au droit du brise-lames, mais après s'être déformées et atténuées. Dans ces trois cas toutefois, l'énergie est loin d'avoir été entièrement détruite par le brise-lames, elle est

conservée en partie dans les oscillations se propageant au delà.

En répétant une série d'expériences semblables, mais avec un niveau moyen de la mer à la cote  $0,00$  on obtient les images des figures 8, 9 et 10. Quelles que soient les dimensions des vagues, celles-ci se brisent complètement en soumettant la digue à des efforts considérables. Du côté du port subsistera une oscillation relativement peu importante dont la forme n'aura que peu d'analogie avec celle des lames incidentes. La plus grande partie de l'énergie a été détruite par le brise-lames.

Nous pouvons enfin répéter la même vague qu'à la figure 7, mais pour le cas d'un ouvrage fondé non plus à la cote  $-18,00$ , mais à la cote  $-12,00$ . Une telle expérience est représentée aux figures 11, 12 et 13, montrant, à trois instants différents, l'allure de la ligne d'eau au droit de l'ouvrage. De violents courants apparaissent, lors du passage de la vague, sur le pourtour du brise-lames. Les éléments légers de sa fondation sont d'autant plus sollicités que la profondeur d'eau est dans ce cas plus faible.

De ces premières et nombreuses expériences, dont nous n'avons donné ici que quelques exemples, et dont le but était de définir le mouvement de l'eau et sa façon d'agir dans le voisinage immédiat du brise-lames, on put retenir les faits essentiels suivants :

a) *La stabilité de l'ouvrage risque d'autant plus d'être compromise que le niveau moyen de la mer est plus bas à l'instant de la tempête.*

b) *Les fondations de l'ouvrage seront d'autant plus instables que la profondeur au pied du brise-lames sera plus faible, pour autant toutefois que cette profondeur ne soit pas inférieure à la profondeur critique de déferlement des grandes lames. L'effet de ces dernières serait alors atténué par un déferlement préalable.*

c) *L'amplitude des oscillations, au delà de l'ouvrage au droit de la ligne de navigation sera d'autant plus importante que le niveau moyen de la mer sera plus élevé à l'instant de la tempête.*

#### IV. Etude de la stabilité de l'ouvrage.

Aux expériences faisant l'objet du chapitre précédent et définissant qualitativement les phénomènes, nous avons fait succéder des essais de durée, au cours desquels les modèles du brise-lames furent soumis à l'action soutenue des vagues. La durée d'une expérience équivalait généralement, compte tenu de l'échelle du modèle, à une tempête de 8 à 10 heures.

On pouvait observer et fixer par voie photographique et cinématographique les modifications apportées à l'ouvrage par les lames au cours du temps. En répétant un très grand nombre de fois les mêmes expériences et en modifiant de proche en proche les formes de la digue, la disposition et le tonnage des divers éléments, il fut possible d'émettre un avis motivé sur l'opportunité de tel ou tel changement à apporter à la construction.

Nous devons nous borner à faire figurer dans ce chapitre quelques-unes seulement de nos expériences les plus caractéristiques.

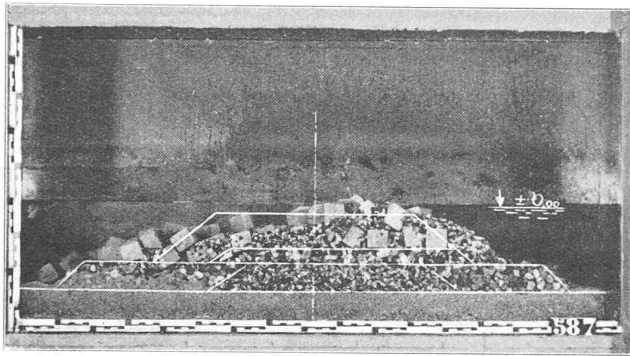


Fig. 14. — Effet d'une tempête de 10 heures sur l'ouvrage tel que défini à la Fig. 2. Hauteur des vagues  $2h = 6,00$  m; longueur entre crêtes:  $2L = 140,0$  m. Cote de la mer au repos:  $+ 0,20$  m.

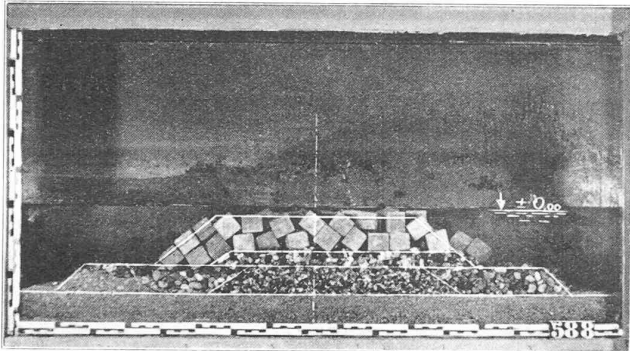


Fig. 15. — Effet d'une tempête de 10 heures sur l'ouvrage tel que défini à la Fig. 2, mais après suppression des moellons de  $\frac{1}{2}$  à 2 T. Hauteur des vagues  $2h : 6,00$  m. Longueur  $2L = 140$  m. Cote de la mer au repos:  $+ 0,20$ .

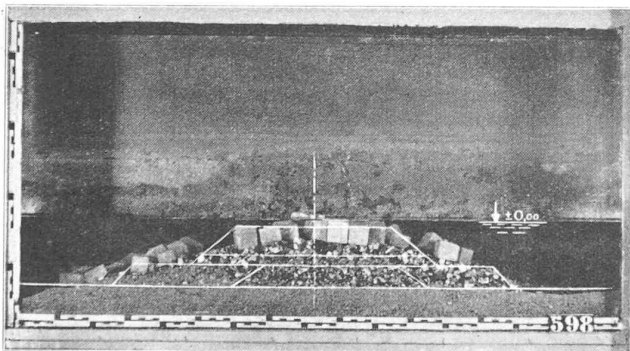


Fig. 16. — Effet d'une tempête de 4 h. 30 sur un ouvrage ayant le contour extérieur et l'infrastructure conformes à la Fig. 2, mais avec des blocs de 100 t. au lieu de 54 t. Hauteur des vagues:  $2h = 9,00$  m; longueur:  $2L = 220$  m. Cote de la mer au repos:  $+ 0,20$ .

Les défauts de l'ouvrage apparaissant d'autant mieux que l'action destructive de la mer se fait plus rapidement sentir, nous avons d'emblée soumis la digue, telle que projetée primitivement (Fig. 2) à l'action frontale de lames de  $2h = 6,00$  m et  $2L = 140$  m et en période de basse mer (cote au repos:  $0,20$ ). Nous avons en outre choisi pour ce faire un tronçon de l'ouvrage fondé en profondeur moyenne, à la cote  $-12,00$  (voir conclusions du chapitre III). La durée de la tempête fut de 10 heures.

La Fig. 14 donne l'état du brise-lames après l'expérience. L'observation des phénomènes durant l'essai permit de formuler les constatations suivantes:

a) Dès le début, les moellons de remplissage, de faible tonnage ( $\frac{1}{2}$  à 2,0 tonnes) sont emportés soit du côté du port soit du côté du large. Il se produit un déchaussement des gros blocs qui ne tardent pas à vaciller, principalement sur l'arête supérieure, du côté du large.

b) Les enrochements de  $\frac{1}{2}$  t. à 4 t. constituant la risberme du large sont également emportés et vont se perdre dans le fond sablonneux.

c) Les gros blocs du talus du large s'écroulent sur la risberme. Le faite de l'ouvrage se trouve de ce fait dégarni et la mer a prise sur les enrochements de 2 à 4 tonnes constituant l'infrastructure de l'ouvrage.

C'est à la présence des moellons de remplissage de  $\frac{1}{2}$  à 2 t qu'il faut attribuer pour une grande part l'importance des dégâts survenus à l'ouvrage. En effet, les résultats obtenus en répétant la même expérience mais après suppression de ces moellons diffèrent complètement (Fig. 15).

Seuls quelques blocs se sont effondrés du côté du port. Un très grand nombre d'autres expériences semblables nous ont permis de contrôler cette *action néfaste des éléments de remplissage*.

Ce premier fait acquis, nous avons soumis à des lames de dimension plus forte, soit  $2L = 220$ ,  $2h = 9,00$  m, l'ouvrage tel que défini à la Fig. 15 ci-contre. Il n'a pas résisté de manière satisfaisante. D'autre part, une augmentation du tonnage des blocs de 54 t. à 100 t. n'a pas amélioré suffisamment la stabilité de l'ouvrage. Pour tous les cas où le contour extérieur du brise-lames fut conservé conforme à celui du projet primitif, sa stabilité fut précaire sous l'action de grandes lames et cela quel que soit le tonnage de gros blocs. Preuve en est l'expérience de la Fig. 16 ci-contre, effectuée avec des blocs de 100 t.

Le manque de stabilité de l'ouvrage put ainsi être attribué non pas principalement à un tonnage insuffisant de blocs de la superstructure, mais avant tout à une *composition et à une disposition défectueuse de l'infrastructure*, à un épaulement insuffisant des talus et à une pente exagérée de ces derniers.

À la suite de ces essais, les modifications suivantes furent décidées:

a) *Suppression des éléments de  $\frac{1}{2}$  à 2 t. intercalés entre les gros blocs.*

b) *Augmentation du tonnage des blocs de 54 t. à 78 t.*

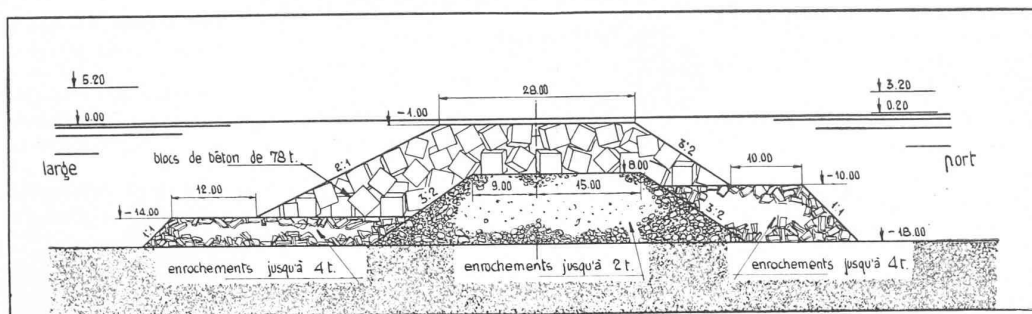
c) *Adoucissement de pente du talus de  $\frac{5}{4}$  à  $\frac{2}{1}$  du côté du large et de  $\frac{5}{4}$  à  $\frac{3}{2}$  du côté du port.*

d) *Suppression sous le faite de l'ouvrage de la couche intermédiaire d'éléments de 2 t. à 4 t., les gros blocs descendant à la cote  $-8,00$  au lieu de  $-6,00$  m.*

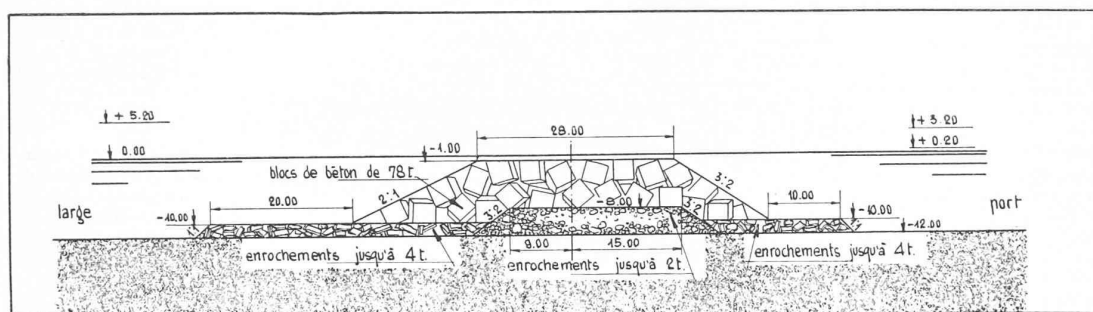
e) *Suppression également de cette couche intermédiaire de blocs de 2 t. à 4 t., sur les talus.*

f) *Amélioration de la stabilité du talus du côté du port en le constituant en gros blocs venant prendre appui sur la risberme arasée à la cote  $-10,00$ .*

g) *Prolongement de la risberme du large de 10,00 m à 12,00 m.*



Profil en eau profonde.



Profil en eau moyenne.

Fig. 17. — Profils en travers types du brise-lames.  
Dimensions résultant de l'interprétation des essais de Laboratoire. Echelle 1 : 1000.

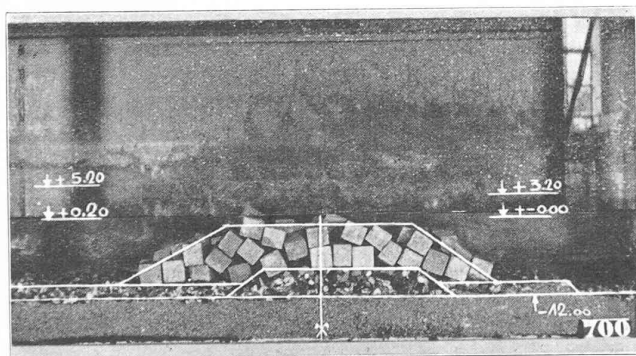


Fig. 18. — Effet d'une tempête de 12 heures sur l'ouvrage défini sur la base des résultats des essais et tel que donné à la figure 17. Hauteur des vagues  $2h = 9,00$  m ; longueur  $2L = 220$  m. Cote de la mer au repos :  $+ 0,20$  m.

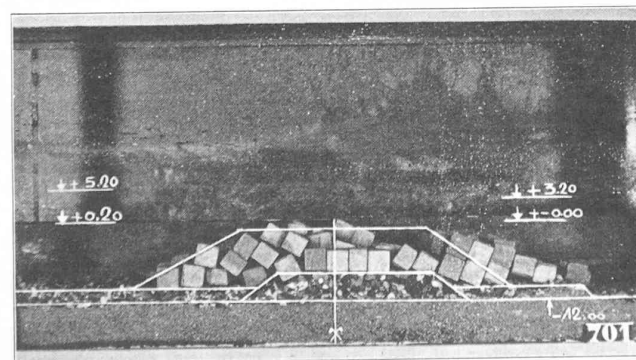


Fig. 19. — Effet d'une tempête de 12 heures sur l'ouvrage défini sur la base des résultats des essais (fig. 17). Hauteur des vagues :  $2h =$  environ  $12,00$  m ; longueur :  $2L = 220$  m. Cote de la mer au repos :  $0,20$  m.

Le profil en travers du brise-lames devint tel que donné à la Fig. 17.

On pourra juger de l'opportunité des modifications proposées en comparant l'état de l'ouvrage amélioré, après une tempête de 12 heures ( $2h = 9,00$  m,  $2L = 220$  m) (Fig. 18) à l'état de l'ouvrage initialement projeté après une tempête même plus faible (Fig. 14).

Il fallut des lames de  $2h = 12,00$ ,  $2L = 220$  (Fig. 19) pour provoquer un écoulement partiel du parement côté port, le parement côté large n'ayant pratiquement pas souffert. (A suivre.)

## SOCIÉTÉS

Société suisse des ingénieurs et des architectes.

Procès-verbal  
de l'assemblée des délégués du 5 juin 1937.

(Suite et fin.)<sup>1</sup>

Art. 19 à 29, sont admis comme suit :

V. L'organisation.

ART. 19. — Les organes de la Société sont :

- A. l'Assemblée générale,
- B. l'Assemblée des délégués,
- C. le Comité central,
- D. les Conseils d'honneur,
- E. le Secrétariat.

A. Assemblée générale.

ART. 20. — L'Assemblée générale a lieu, dans la règle, tous les deux ans. En outre, elle doit être convoquée sur la demande de trois sections, au moins, ou de cent membres. Le Comité central peut aussi, de sa propre initiative, convoquer une Assemblée générale, lorsqu'il estime que les circonstances l'exigent.

ART. 21. — L'Assemblée générale ordinaire prend connaissance des rapports du président sur l'activité de la Société pendant les deux dernières années.

<sup>1</sup> Voir Bulletin technique du 14 août 1937, page 220.