

43  
1170

151310

Ingénieurs & Industriels

n° 4 de 1933.

E. J. DEVROE  
INGÉNIEUR  
43, RUE JOUR  
BRUXELLES

— 527.514 —

**L'Exhaussement au moyen de murettes  
en béton armé (système de Muralt)  
des digues de mer en terre sujettes à  
l'attaque des vagues montantes, et  
des digues en terre de fleuves,  
canaux, etc. sujettes à la submersion.**

PAR

le Jhr. Ing. **R.-R.-L. de Muralt**  
Ingénieur civil

(Séance d'Etudes du 12 avril 1932).

# I. — EXPERIENCES FAITES AVEC L'ANCIEN SYSTEME D'EXHAUSSEMENT DES DIGUES DE MER AVEC PARAPET EN BETON ARME.

## a). — Avant-propos.

Il y a déjà plus de vingt-cinq ans que j'ai publié l'exposé de mon système, nouveau à cette époque, d'exhaussement des digues de mer, avec parapet en béton armé.

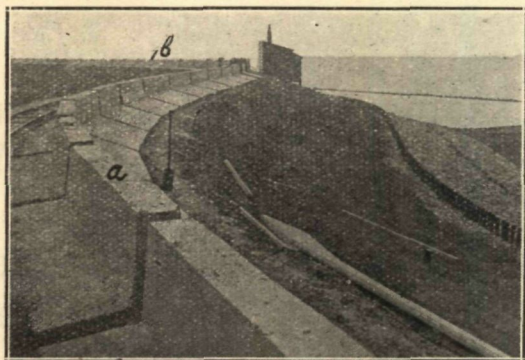


Fig. 1. — Parapet en béton armé, en cours d'exécution, sur une digue de mer, pour empêcher l'eau de la vague montante de surpasser la crête de la digue suivant l'ancien système de Muralt. Les éléments sont indiqués par *a* et les couvre-joints par *b*. Un certain nombre de ces couvre-joints ne sont pas encore placés.

Cet exhaussement, d'une construction spécialement souple, était constitué d'éléments de 2 m. 40 de longueur, réunis par des couvre-joints de 0 m. 45 d'épaisseur, entre lesquels pouvait s'opérer un certain glissement.

Les joints sont bien isolés des éléments par du papier d'asphalte (fig. 1).

La figure 2 nous montre une coupe transversale et une coupe horizontale courante d'un élément et d'un couvre-joint de la murette en béton, armée de barres de 6 et 8 millimètres, sur une digue de mer.

L'armement vertical est appliqué *onze fois* par élément de 2 m. 40 de longueur et *deux fois* par couvre-joint de 0 m. 45 d'épaisseur.

Le mélange du béton est :

Pour les éléments de : 1 ciment + 2 sable + 3 gravier ;

Pour les joints de : 1 1/2 ciment + 2 sable + 3 gravier.

La force **K**, nécessaire pour renverser un mètre du parapet autour du point **P** est de 3791 kilos, force que la vague montante n'atteint jamais pratiquement (calculée sans frottements) à cet **endroit** de la murette sur une digue de mer.

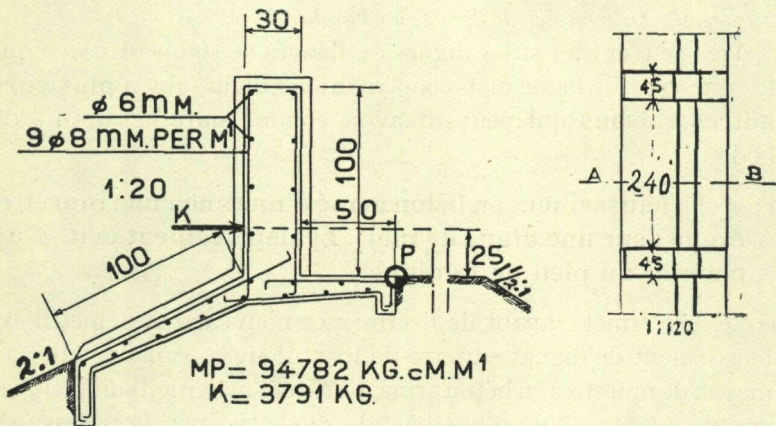


Fig. 2. — Coupe transversale et horizontale de la murette en béton armé sur une digue de mer.

Dès la publication de mon système, en 1905, des milliers et des milliers de mètres de parapets ont été exécutés sur des digues de mer dans plusieurs pays du monde.

En Zélande, par exemple, province située au sud de la Hollande, plus de **cent vingt-cinq kilomètres** en ont été construits.

Il est évident, qu'au cours de cette période de plus de vingt-cinq ans, mon système a subi quelques perfectionnements, entre autres concernant l'armement, la distribution des matériaux, le mélange du béton, etc., sans cependant que les principes de construction et d'application aient changé.

#### b). — Cause de la rupture d'une digue de mer.

Il y a lieu de remarquer que l'exhaussement de la digue de mer au moyen de la murette en béton armé a *uniquement* pour but d'empêcher que, en temps de tempêtes, les vagues montantes n'atteignent la crête de la digue et ne causent des inondations.

Ce sont justement ces vagues qui, en s'infiltrant par la fente du sommet dans le corps de la digue, provoquent, par la poussée hydrostatique, l'éroulement de la partie intérieure de la digue, ayant rendu d'avance cette partie boueuse.

Il est bien connu qu'il y a encore d'autres causes de rupture de digues de mer, mais en général on peut dire que dans **quatre-vingt-dix-neuf pour cent** des cas, les digues de mer se rompent parce que, en temps de tempête, la crête *n'est pas assez élevée au-dessus du sommet de la vague montante*.

Très souvent aussi les digues de fleuves se rompent parce que le crête est trop basse, mais concernant ces digues il y a **plusieurs autres raisons** qui peuvent avoir comme suite la rupture de la digue.

c). — **Exhaussement en béton armé d'une ancienne murette-digue (sur une digue de mer). Le déplacement évité d'un chemin au pied de la digue.**

Je me permets, avant de décrire mes nouveaux systèmes d'exhaussement de digues en terre de mer, fleuves, canaux, etc., au moyen de murettes en béton armé, d'attirer l'attention sur quelques grands avantages qu'offre, pour la digue de mer, le parapet en béton armé sur l'exhaussement en terre, ce qui est démontré à suffisance par une expérience de plus de vingt-cinq ans.

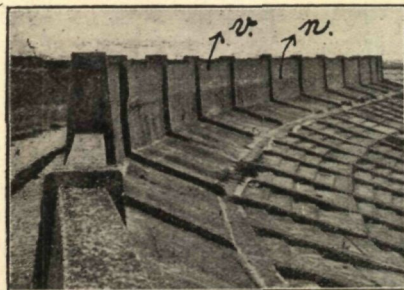


Fig. 3.— Une murette d'exhaussement *n* d'une digue de mer bâtie en 1907, à nouveau rehaussée avec du béton *v* en 1912 (photo 1931).

Un très grand avantage de l'exhaussement au moyen de la murette, c'est que, si celle-ci doit être plus tard rehaussée à nouveau, elle peut l'être facilement et sans de très grands frais avec une pièce en béton armé.

Une vue d'une murette de digue de mer construite en 1907, et à nouveau rehaussée avec du béton armé, en 1912, est donnée par la figure 3.

Ce rehaussement a coûté environ **vingt fois moins** qu'un rehaussement en terre, étant donné que ce dernier mode aurait absolument exigé l'élargissement du corps de la digue, ce qui eût certainement entraîné la suppression et le déplacement du chemin de macadam *au pied de la digue*.

Si par suite de circonstances extraordinaires un parapet en béton armé sur une digue devait être par exemple rehaussé de 2 m. 50, on n'emploierait plus le béton, mais on placerait de la terre derrière et au-dessus du parapet, appuyant contre la murette.

Mon nouveau système qui sera expliqué plus loin, prévient toutes les difficultés qui peuvent se présenter dans le cas où une ancienne murette doit être rehaussée **d'une hauteur importante**.

d). — **Le chemin sur la crête de la digue reste intact en appliquant la murette-digue pour l'exhaussement.**

L'exhaussement avec une murette a aussi le grand avantage de préserver le chemin qui se trouve souvent *sur la crête* de la digue en terre.

L'économie qu'ont apportée par exemple tels exhaussements en béton armé — comparés à un exhaussement en terre — en Zélande est de 60 à 70 p. c.

Ces exhaussements en béton armé qui résistent depuis plus de vingt-cinq ans aux assauts des très grandes tempêtes, n'ont pas coûté un sou d'entretien. Ils ne montrent aucune fissure, ils sont encore tous droits et ont l'air d'être érigés d'hier.

Tout près, plusieurs exhaussements en terre, sur la même digue, ont été détruits par **les mêmes** tempêtes.

e). — **Même un exhaussement de murette-digue de sommet trop bas, offre encore beaucoup plus de résistance aux vagues, qu'un exhaussement en terre de la même hauteur**

Une autre expérience très importante concernant les parapets en béton armé sur digues de mer, nous a démontré qu'une digue en terre exhaussée avec un parapet dont les vagues surpassent le

sommet offre un danger de catastrophe *beaucoup moindre* que si cette même digue avait été exhaussée à la même hauteur au moyen de terre.

Sur la figure 4 le fait est suffisamment démontré.

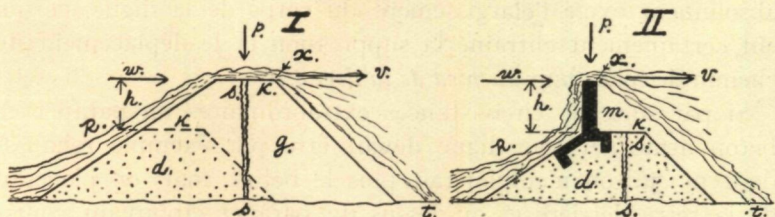


Fig. 4. — Le bout  $x$  de la murette (II) et de la crête de l'exhaussement en terre (I) sont de la même hauteur. Néanmoins, par la même vague  $R$ , le corps de la digue (I) est infiltré, tandis que l'ancienne crête  $k$ . (II) n'est pas même touchée par l'eau. Le vent  $W$  joue ici un rôle important.

f). — **Par temps de tempêtes, l'exhaussement en terre est précaire, surtout les premières années, tandis que l'exhaussement avec un parapet est tout de suite en état d'empêcher la submersion.**

Surtout les grandes tempêtes de 1911 et 1916 ont appris que les exhaussements en terre des digues de mer, appliqués sur les digues après la grande tempête du 12 mars 1906 (spécialement sur les nombreuses digues en Zélande-Hollande), ne peuvent guère inspirer confiance.

Plusieurs de ces travaux ont été emportés par les vagues montantes, tandis que les murettes-digues restaient indemnes.

Principalement, les digues des Bathpolders, en Zélande (tout près de la frontière de la Belgique), ont subi alors beaucoup de dégâts.

Après la grande tempête du 12 mars 1906, j'avais déjà proposé de *réparer* ces digues avec de la terre, mais de les *exhausser* avec un parapet en béton armé.

On n'y a pas alors donné suite! Les travaux en terre qui furent exécutés, ont coûté environ deux cent mille florins.

Le 30 septembre 1911, tous ces travaux ont subi beaucoup de dégâts.

En 1911, « Dommage rend Sage », les digues des Bathpolders furent, — sous ma direction —, exhaussées avec des parapets en béton armé.

L'économie obtenue avec l'exhaussement en béton, comparativement à celui en terre, se chiffrait par mètre à plus de seize florins (en tout 112 mille florins).

Dès l'exécution de ces exhaussements les Bathpolders n'ont subi, même pendant les plus grandes tempêtes, le moindre dégât !

**g). — La légèreté de la murette en béton armé, pour l'exhaussement sur la crête de la digue, donne un grand avantage, comparé avec un lourd exhaussement en terre.**

L'expérience m'a appris que plusieurs techniciens, qui sont chargés du service des digues, en général ne se rendent pas toujours assez compte du fait que les digues exhausées (et par suite élargies) avec de la terre, perdent souvent lentement de leur hauteur *par le grand poids de la terre*.

Un exhaussement avec une murette **légère**, mais néanmoins très stable, comme l'indique la figure 2, reste intact et revient beaucoup meilleur marché.

**h). — La vague montante marche plus haut, en sens vertical, le long d'un talus en terre que le long de la murette digue.**

Cela est démontré à la figure 5.

Pour simplifier le calcul, puisqu'il s'agit seulement de prouver que la même vague **e** surpasse certainement la crête de la digue en terre **c**, tandis qu'elle est parfaitement repoussée par le parapet **d**, j'ai négligé dans mes calculs les frottements sur les deux talus; les frottements réciproques des différentes couches de l'eau de la vague; les poussées que la partie supérieure de l'eau en mouvement reçoit de la partie inférieure de cette eau, etc.

Surtout, j'ai aussi négligé l'influence **du vent**, qui se fait toujours sentir justement quand les vagues s'élèvent contre la digue de mer en temps de tempêtes.

Si on tenait compte de ce vent, la différence de hauteur, atteinte par la vague contre le talus en terre, serait — on le voit à première vue et sans aucun calcul — *beaucoup plus grande*.

Le vent étant généralement perpendiculaire au parapet, son influence pour élever l'eau est presque nulle à l'endroit de la partie verticale de la murette-digue

Enfin, j'ai pris, pour faciliter bien plus le calcul, la pente du talus égale à 1 : 1.

Au point  $a$  de la murette et  $a_2$  du talus, la vitesse  $v$  de l'eau de la vague  $e$  est la même.

Supposons que le choc de l'eau au point  $a$  du parapet soit tout à fait inexistant et qu'elle puisse continuer son chemin le long de la partie verticale du parapet.

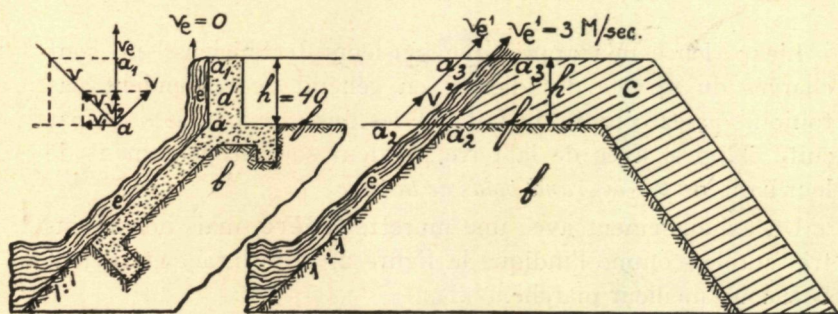


Fig. 5. — Ce croquis démontre qu'une même vague  $e$  monte le long d'une même digue beaucoup plus haut — en sens vertical — quand la crête est exhaussée avec de la terre plutôt qu'une murette.

Nommons  $v_2$  la vitesse de l'eau au point  $a$  dans le sens vertical le long de cette partie.

Supposons encore que la vitesse de l'eau  $v_2$  dans le sens vertical devienne nulle à 40 centimètres de hauteur du sommet de la murette ( $v_e = 0$ ).

Alors :

$$v_2^2 = 2 g h$$

$$g = 1000 \text{ et } h = 40 \text{ centimètres;}$$

$$v_2 = 200 \sqrt{2} \text{ cm.}$$

Si on désigne par  $v'_e$  la vitesse de l'eau à la crête du talus en terre  $C$ , on a alors :

$$1/2 m. v^2 - 1/2 m. v'_e{}^2 = m g h.$$

$$v'_e = \sqrt{v^2 - 2 g h} = \sqrt{160.000 - 80.000} = 200 \sqrt{2}, \text{ cm/sec.}$$

$v' =$  environ trois mètres par seconde.



Il est bien entendu que ces calculs sont très approximatifs, mais il en résulte nettement que l'eau de la même vague monte certainement considérablement moins haut contre le parapet que le long du talus en terre, en sens vertical.

Un simple calcul nous apprend que l'eau dans ce cas doit encore monter de 40 centimètres au-dessus de la crête de l'exhaussement en terre — mesuré le long d'un même talus — en sens vertical, avant que la vitesse n'atteigne également zéro.

On en déduit, qu'un exhaussement avec murette peut être effectivement *plus bas* qu'un en terre.

i). — **Expérience au laboratoire de l'Université Technique de Delft, en Hollande.**

On a également constaté qu'un parapet établi sur une digue de mer peut être moins élevé que le même exhaussement en terre sur la même digue et néanmoins donner le même rendement quand il s'agit de repousser la même vague.

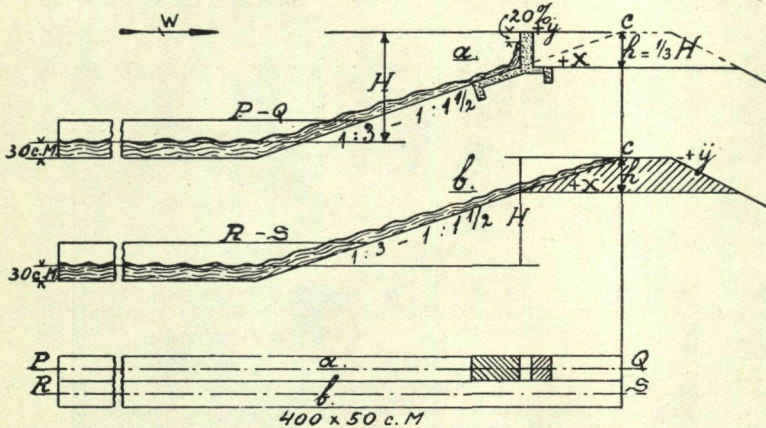


Fig. 6. — Croquis de l'appareil pour constater que la même vague monte le long d'une pente en terre 20 p. c. plus haut que contre le même exhaussement — en sens vertical — avec une murette en béton armé.

L'ingénieur en chef, M. J. Th. Thyse, directeur du Laboratoire Hydraulique à l'Université Technique de Delft (Hollande), bien connu par ses études nettement réussies concernant les suites de la fermeture du Zuiderzee par la grande digue, a également constaté qu'un parapet établi sur une digue de mer peut être moins élevé que le même exhaussement en terre sur

la même digue et néanmoins donner le même rendement quand il s'agit de repousser la même vague montante.

M. Thyse a, par des expériences, démontré que la même vague monte, en général, 20 p. c. plus haut — en sens vertical — le long d'une pente en terre que le long d'un parapet (voir fig. 6).

Au laboratoire de Delft, on a aussi constaté que lorsque l'inclinaison du talus n'est pas forte (par exemple 1 : 6) et que le parapet est placé beaucoup plus bas qu'en général sur une digue de mer, il peut se former des vagues sautantes qui peuvent *aller plus haut* le long du parapet que le long de la pente en terre.

Il est évident que ce fait **ne peut pas se produire aux digues de mer**, par exemple en Zélande, où les parapets sont placés au moins de 2 à 3 mètres au-dessus de la marée haute en temps de tempêtes, c'est-à-dire de 4,5 à 5,5 mètres au-dessus de la marée haute ordinaire.

7). — **Expérience avec des vagues sautantes.**

La figure 7 montre une vague sautante atteignant une hauteur dépassant de 5 mètres celle atteinte par les vagues normales.

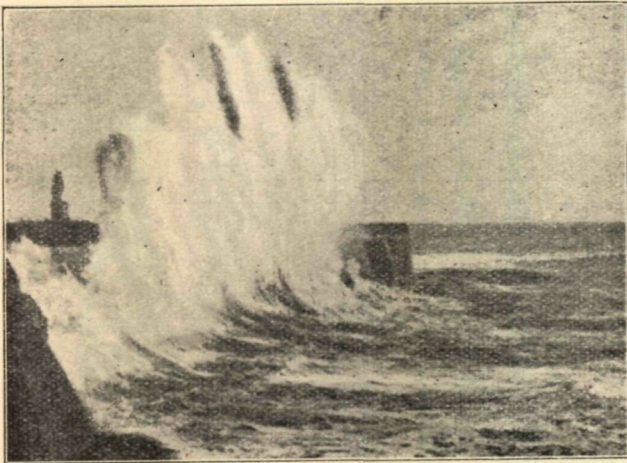


Fig. 7. — Vague sautante.  
Elle dépasse de 5 mètres la vague normale.

A la figure 8 est démontré comment il est possible de former des vagues sautantes.

En entrant dans l'entonnoir A, la vague *v* forme une concentration d'énergie, c'est-à-dire qu'une partie de l'eau donne son

énergie à l'autre partie avec laquelle celle-ci poursuit sa course ( $y$ ). La vague montante ordinaire, par contre, ne dépasse pas même la ligne  $x$ .

Il est évident que *la masse d'eau* de la vague sautante est beaucoup plus petite que celle de la vague montante normale. On rencontre aussi ces vagues sautantes sur les pentes des digues de mer normales.

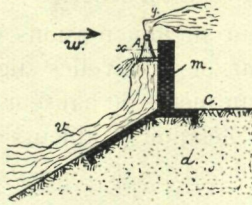


Fig. 8. — Vague sautante formée artificiellement.

Scientifiquement, au moyen des paraboles qui se forment quand la vague se jette sur le talus et se recroqueville, on peut calculer que les obstacles qui naissent par l'eau elle-même, provoquent des vagues sautantes. Ces études, en elles-mêmes très intéressantes, n'entrent pas dans le cadre de ma causerie de ce soir.

## II. — NOUVEAU SYSTEME D'EXHAUSSEMENT DES DIGUES DE MER AVEC PARAPET EN BETON ARME. (1)

### k). — Avant-propos.

L'exhaussement des digues de mer en terre par un parapet en béton armé suivant l'ancien système présente un inconvénient assez sérieux en ce sens qu'il ne peut être appliqué à une digue nouvellement érigée.

La résistance de la nouvelle digue dépendant du sol sur lequel elle est érigée et du mode de construction, il faut toujours attendre cinq à six années avant qu'elle puisse — si nécessaire — être exhaussée par un parapet en béton armé selon l'ancien système.

On a déjà dû redresser des parapets qui avaient été érigés sur certaines digues de mer nouvellement construites.

(1) Ce chapitre a été ajouté par l'auteur en complément à sa communication au Comité d'Études.

Je me rappelle les pourparlers que j'ai eus avec le célèbre ingénieur hollandais décédé, le **D<sup>r</sup> Ing. C. Lely**, ancien Ministre des Ponts et Chaussées (à qui l'on doit, en majeure partie l'assèchement du Zuiderzee), non pas pour les digues en terre mêmes qui devaient repousser les vagues de l'Ysselmeer, mais pour **l'exhaussement de ces digues sur une hauteur de un mètre**, qui, éventuellement, devraient seules repousser les vagues si la grande digue de clôture venait à céder.

Ni ce grand ingénieur ni moi n'osions entreprendre ou proposer de construire sur des nouvelles digues des parapets en béton armé d'environ un mètre de hauteur d'après mon système appliqué si souvent en Zélande et ailleurs; l'économie en aurait pourtant été considérable.

*Mon nouveau système, si simple, et que je décris ci-dessous n'était pas connu à cette époque.*

L'épaisseur d'une digue en terre dépend de la hauteur de celle-ci et bien souvent cette épaisseur est **beaucoup trop grande** eu égard aux marées qui doivent être normalement repoussées.

En d'autres termes, leurs dimensions sont presque toujours trop grandes en regard des marées — même ~~extraordinairement~~ hautes — qu'elles doivent repousser et qui sont ordinairement de courte durée.

La murette-digue suivant mon nouveau système subvient à toutes ces difficultés.

#### l). — **Nouveau projet pour un exhaussement — avec un parapet en béton armé — d'une digue nouvellement érigée.**

Comme indiqué sur la figure 9, en coupe transversale et horizontale, le parapet contient des cavités, lesquelles ont une forme légèrement conique (large en haut).

Sur la figure 9 divers calculs (graphostatiquement) sont faits. L'énorme stabilité de la construction est suffisamment démontrée.

Quand les éléments et couvre-joints, munis des cavités (en général quatre pièces dans un élément et une pièce dans un couvre-joint) sont bien durcis, par exemple **après trois semaines** la cavité est fermée en bas par un bouchon en béton (non-armé).

Puis on remplit la cavité avec du sable ou **avec de la terre sèche provenant de la digue** et l'on ferme alors la cavité en haut avec du béton de même dosage que l'élément du parapet.

Le dosage du béton pour le parapet est en outre le même que celui prescrit pour le parapet suivant l'ancien système.

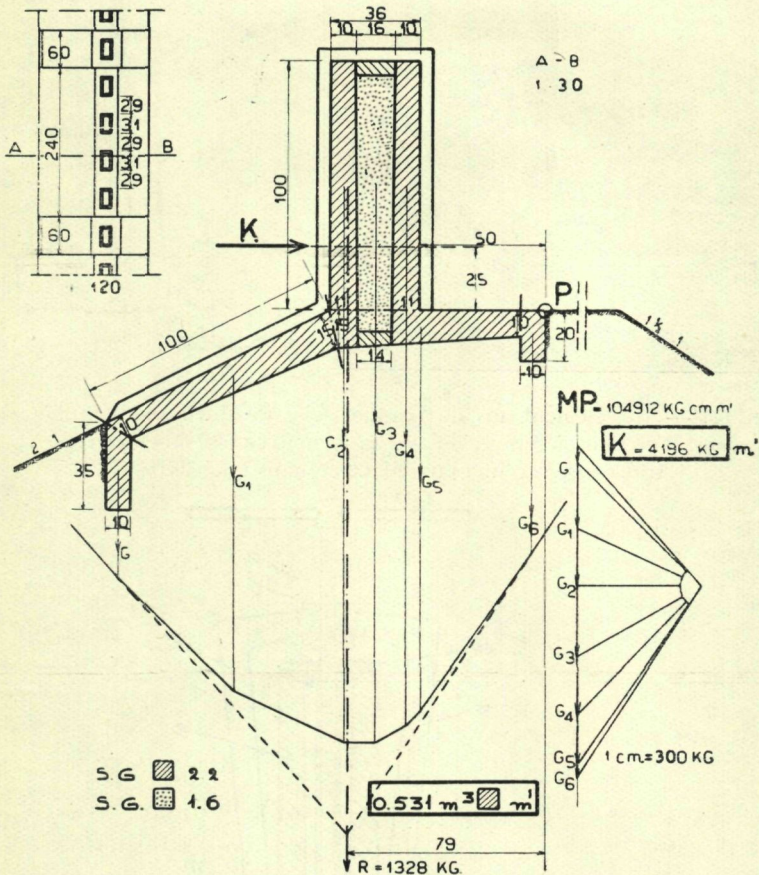


Fig. 9. — Coupes transversale et horizontale d'une murette-digue munie de cavités. Les éléments sont isolés des joints par du papier d'asphalte de double épaisseur.

*m*). — Application du nouveau système (redressement d'une murette qui s'est inclinée).

Quand une murette érigée sur la crête d'une digue —, laquelle par exemple vient d'être érigée —, commence à s'incliner, on ôte le remplissage des trous (cavités) et on place ensuite des appareils à vis dans les deux trous au bout de l'élément de 2 m. 40.

Sur les figures 10 et 11 l'exécution est suffisamment démontrée.

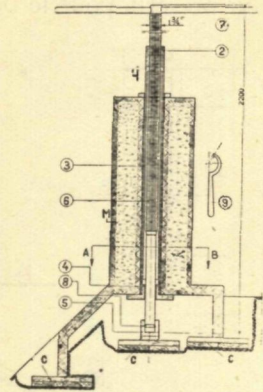


Fig. 10. — Un élément  $m_2$  du parapet levé de quelques centimètres par deux appareils à vis  $v_1$  et  $v_2$  et à nouveau remis droit. Coupe transversale d'un appareil placé dans une cavité.

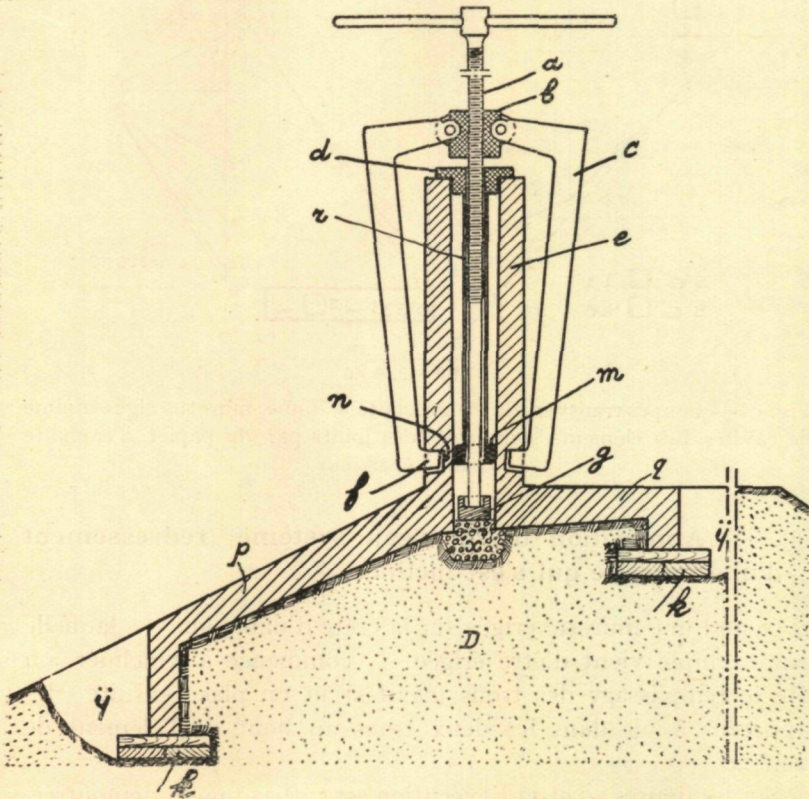


Fig. 11. — Appareil à vis (d'autre construction que celui montré dans la fig. 10 et plus praticable).

L'élément est levé de *quelques centimètres*, de sorte qu'on peut très facilement le remettre droit.

Alors on commence à damer un peu de terre humide par les cavités où il ne se trouve pas d'appareils.

Quand la nouvelle fondation de la murette est terminée, au milieu on ôte les deux appareils des cavités et on met la dernière main au parfait damage de la terre sous la murette par les deux cavités au bout de l'élément. Après quoi, on prend soin de fermer à nouveau, au moyen de bouchons, les cavités d'en haut et d'en bas.

*n*). — **Application du nouveau système pour l'exhaussement de la crête de la digue avec de la terre rapportée sous la murette.**

Il est bien compréhensible qu'on peut aussi facilement rehausser plus tard, par exemple après dix années, comme il était à certains endroits nécessaire en Zélande (fig. 12), la digue en terre avec de la terre rapportée *sous le parapet*.

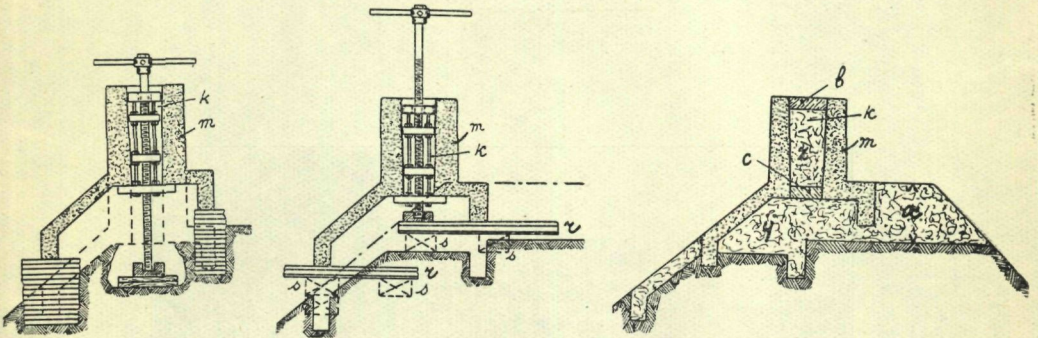


Fig. 12. — Rehaussement avec de la terre rapportée sous le parapet.

Cela peut être nécessaire quand par exemple un rehaussement de l'ancienne murette n'est pas désirable avec du béton, vu le fait que la murette deviendrait elle-même trop haute.

Les figures 13, 14 et 15 démontrent suffisamment comment un tel rehaussement est exécuté.

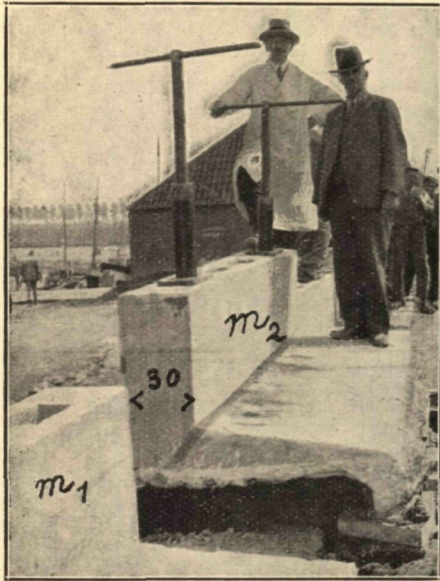


Fig. 13. — Un élément remonté de 0 m. 30.

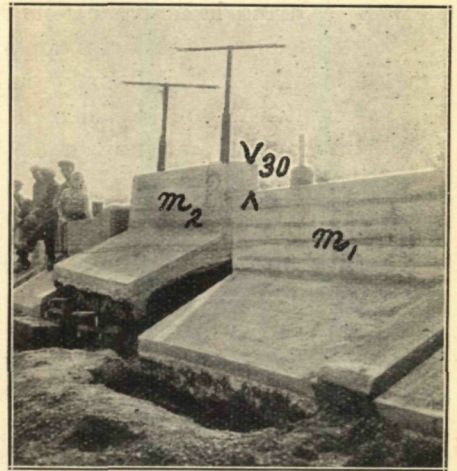


Fig. 14. — Le même élément poussé de 0 m. 30 de côté.



Fig. 15. — Le nouveau talus (extérieur)  $t$  en cours de construction.



o). — **Remarques.**

Je fais observer que le déplacement de la murette sur le côté peut se faire commodément en poussant les appareils à vis 10 centimètres sur le côté chaque fois que l'élément est levé de 5 centimètres. C'est ce que la pratique a enseigné.

Il faut bien faire attention que le bouchon en dessous de la cavité soit, si besoin, facile à démolir. Le mélange suivant pour le béton est dans ce cas recommandable : 1 ciment + 6 sable + 7 gravier.

Le bouchon à la tête de la cavité peut être constitué avec le même mélange que l'élément du parapet, mais avant de le fixer, bien l'enduire de goudron, afin que tout en fermant bien la cavité (remplie de terre sèche), il ne s'attache pas trop au béton du parapet.

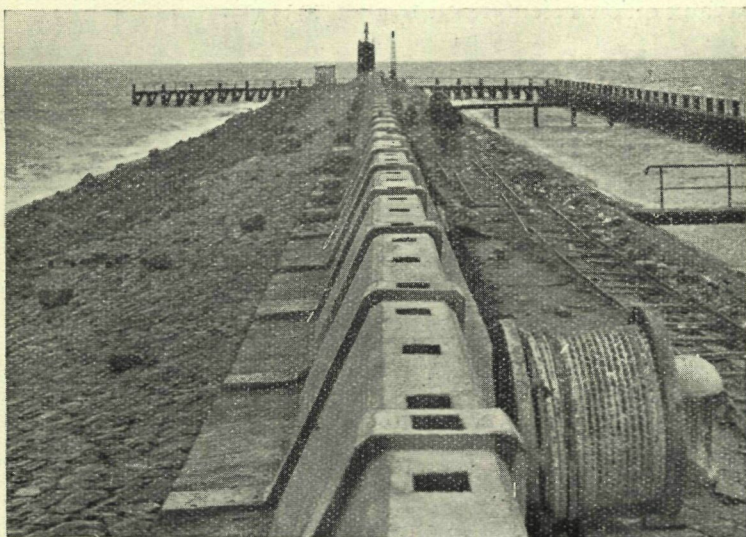


Fig. 16. — Exhaussement d'un brise-lame suivant le nouveau système de Muralt.

Pour damer la terre **sous la murette**, on doit d'avance la mouiller.

La cavité peut très bien être remplie de sable de n'importe quelle qualité, même la terre de la digue ou celle que l'on trouve dans le voisinage (avant qu'elle ne sèche) peut très bien convenir.

Il est bien entendu que, dans mon nouveau projet, le parapet *est beaucoup plus stable* que la murette de l'ancien système, sans qu'il soit nécessaire d'employer plus de béton pour sa construction, tandis que le sable ou la terre qui remplit les cavités ne coûte rien.

Si on peut se contenter de la même stabilité, le nouveau système est beaucoup *meilleur marché*. Par conséquent on peut dire, que mon ancien système ne sera plus jamais appliqué.

Le nouveau système est plus stable; plus épais; meilleur marché; plus facile à rehausser avec une pièce en béton, etc.

En 1932, plusieurs travaux ont été entrepris suivant le nouveau système au nord et sud de la Hollande.

Je suis disposé à les montrer à ceux de nos collègues qui s'intéressent à ces travaux. Je pourrais également les faire assister à plusieurs démonstrations (par exemple redresser et visser par le haut un élément et un couvre-joint) au cours des travaux qu'on exécutera en 1933 et 1934 (1).

### III. — NOUVEAU SYSTEME D'EXHAUSSEMENT DES DIGUES DE FLEUVES, CANAUX, ETC., AVEC UN PARAPET EN BETON ARME.

#### p). — Avant-propos.

L'idée d'exhausser les digues de canaux et de fleuves **a déjà été réalisée** plusieurs fois.

En 1908, par exemple, on a exhaussé en Hollande la digue du canal du Beemsteruitwatering, près de Hoorn, province Noord-Hollande.

Les joints de ce parapet en béton armé sont construits à *peu près* imperméables.

En ce temps-là, on m'a consulté à propos de cet exhaussement. Jusqu'à présent le parapet s'est très bien comporté.

De plus, on a construit en 1917 et en 1931, suivant un procédé appliqué en Zélande, des exhaussements en béton armé au moyen de murette-digue sur les digues des grands fleuves :

« le Merwede » et « le Nord », dans la province Zuid Holland.

---

(1) Nous donnons ci-après l'adresse de l'auteur, à l'intention des membres qui seraient désireux de se mettre en rapport avec lui, Jhr. R. de Mural, ingénieur, Bachmanstraat, 18, La Haye. Tél. 10.68.00.

On a construit le long de ces fleuves des parapets à seule fin d'empêcher les petites vagues d'atteindre **trop souvent en temps de crue**, le chemin établi sur la crête des digues.

Ces murettes pénètrent *dans le corps* de la digue, comme je l'ai indiqué sur la figure 18.

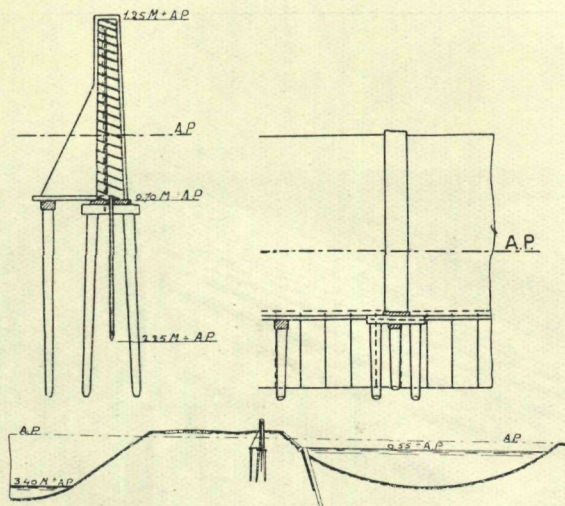


Fig. 17. — Croquis de la construction de l'exhaussement de la digue du canal du « Beemster », en Hollande. (Projet W. v. d. Oord.)

Ce procédé serait mauvais et même dangereux pour l'exhaussement des digues de fleuves qui, pendant des jours et des semaines doivent repousser l'eau qui dépasse la crête de la digue.

Pour éviter tout malentendu, je souligne que les murettes érigées sur les digues des fleuves mentionnés ci-dessus, ont seulement pour but de repousser les vagues et même très rarement (voir fig. 18).

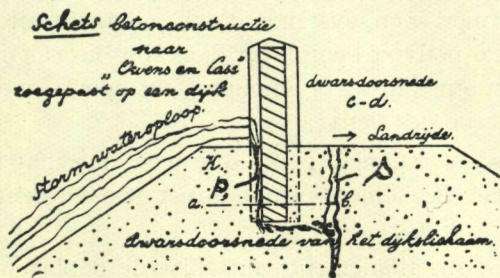


Fig. 18. — Méthode dangereuse d'exhaussement d'une digue de fleuve dans le cas indiqué sur la figure 32 (dangereuse aussi quand il s'agit d'une digue de mer).

Comme le montre la figure 19, il est nécessaire, dans le cas où l'on applique une murette-digue sur une digue de mer comme le montre la figure 19, de **réduire le danger** en protégeant le talus avec un revêtement en béton armé.

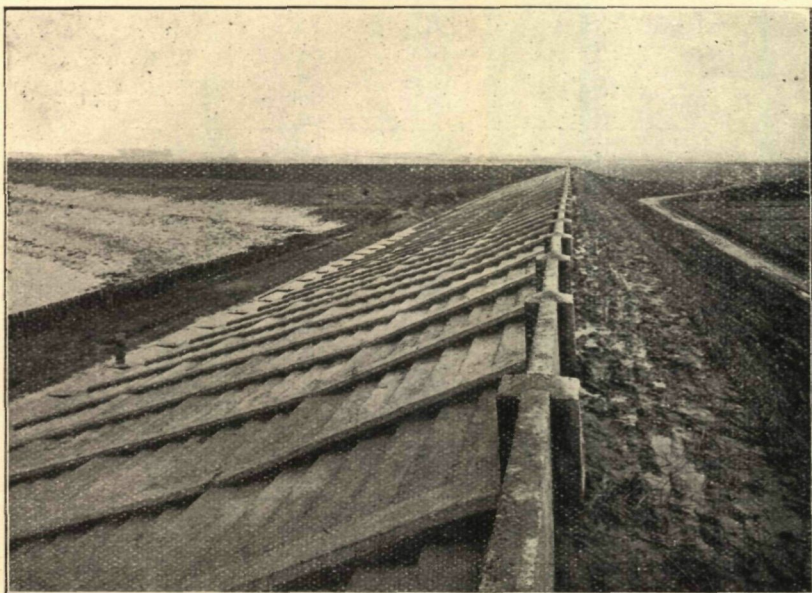


Fig. 19. — Exhaussement en béton armé (Owens & Case) protégé par un revêtement en béton armé (système de Muralt).

g.). — **Recherche d'un nouveau système pour exhausser les digues de fleuves avec un parapet en béton armé.**

Il y a déjà longtemps qu'on m'a sollicité de plusieurs côtés pour transformer mon système d'exhaussement de digues de mer, de façon à pouvoir l'employer dans tous les cas pour retenir les eaux pendant plusieurs semaines (et même indéfiniment) en temps de crue des fleuves.

J'y ai toujours renoncé, parce que je n'étais pas tout à fait convaincu que les éléments du parapet résisteraient vraiment *comme des monolithes*.

Je craignais que finalement, par suite de déplacements de la digue (celle-ci ne reste jamais tout à fait immuable) de petites fissures ne se produisent dans ces éléments.

Ces fissures ne sont, c'est évident, pas dangereuses dans un parapet dont *le seul but* est de repousser les vagues montantes par temps de tempêtes ou d'inondations.

Il en est autrement quand ce parapet doit *constamment* tenir tête aux eaux provenant de la crue des fleuves.

L'expérience a, entre temps, démontré que cette crainte, ou pour mieux dire, cette prudence, était superflue.

Au cours de ces dix-sept à vingt dernières années, aucune fissure n'a été constatée dans les éléments des parapets érigés sur les digues de mer de la Zélande (Hollande) et exécutés suivant le projet montré sur la figure 2.

Il en a été de même dans certains cas où les digues se sont comportées anormalement, et où l'on a constaté des glissements de plus de cinq centimètres des éléments par rapport aux joints.

7). — **Forme, dimensions, armement, mélange du béton, etc.**

Les éléments de l'exhaussement en béton armé d'une digue de fleuve, se présentent ordinairement, suivant la même coupe générale, prise dans le centre d'un élément, comme ceux de l'exhaussement d'une digue de mer.

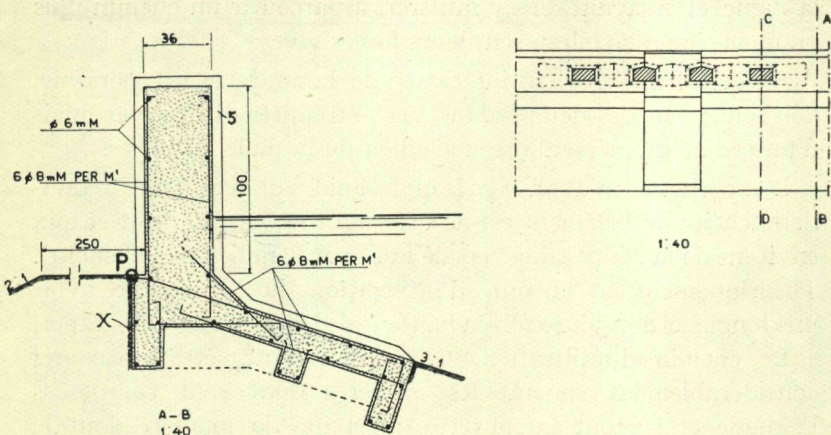


Fig. 20. — Coupe transversale A.B et coupe horizontale d'un élément de parapet en béton armé sur une digue de fleuve.

Le placement du parapet diffère cependant, en ce que le côté arrière de la murette se raccorde avec le côté extérieur de la crête de la digue.

Le sommet du parapet s'élève de 0 m. 50 au-dessus du niveau de l'eau qu'il retient.

De ce que — selon mon avis — *le parapet n'est applicable que pour retenir les eaux de fleuves, lesquelles ne s'élèvent pas à plus de 0 m. 75 au-dessus de la crête en terre*, il résulte que la hauteur maximum du parapet est de 1 m. 25 (dans les courbes des fleuves il peut être prudent en vue de la possibilité que les vagues montent un peu plus haut, d'élever le sommet du parapet jusqu'à 1 m. 50 au-dessus de la crête de la digue).

Sur la figure 20 sont indiquées suffisamment les autres dimensions.

La longueur des éléments est de 2 m. 40. L'épaisseur des joints est supérieure de 0 m. 10 à celle des éléments. La largeur du joint est de 0 m. 40 à 0 m. 60.

Le dosage du béton ne diffère pas en général de celui du parapet sur une digue de mer.

L'armature est appliquée onze fois dans un élément de 2 m. 40, et deux fois dans un joint (fig. 20 et 29).

#### s). — Le chemin d'infiltration.

Comme le montre la figure 20, il faut obliger les eaux battant la digue et essayant de s'y infiltrer, à parcourir un chemin plus ou moins long, où elles usent leurs forces vives.

A cette fin, l'assiette inférieure de la murette est pourvue, non seulement des deux redans aux extrémités du parapet, mais d'un redan supplémentaire au milieu de la dalle en pente.

L'expérience m'a enseigné qu'à l'aide de ces trois redans l'étanchéité de l'élément est assurée (en tout cas au droit et aux environs de la coupe transversale faite par le milieu de l'élément). Théoriquement, le chemin d'infiltration de l'eau doit avoir une longueur de 15 à 20 fois la hauteur de l'eau le long du parapet.

Le chemin d'infiltration peut cependant être raccourci considérablement suivant les matières dont sont composées la digue et surtout la murette, ainsi que la manière dont le béton de l'assiette, avec ses redans, est refoulé dans la crête (le corps) de la digue.

L'expérience m'a appris, qu'en général, une longueur de 4 à 6 fois la hauteur d'eau qui doit être retenue suffit.

Je fais remarquer qu'il est nécessaire au préalable d'examiner la question à fond.

Mais j'ajoute tout de suite, qu'à l'aide de travaux d'un autre genre on peut, quand le parapet est achevé, toujours améliorer plus tard l'étanchéité, sans endommager ou même toucher à la construction même du parapet.

*C'est là le point essentiel de mon nouveau projet, dont il n'a jamais encore été fait mention dans les manuels hydrauliques.*

#### t). — L'Etanchéité propre des éléments.

Il est bien entendu que chaque élément lui-même de la murette doit être absolument étanche, et que ses extrémités seront à cet effet pourvues de joues latérales, encaissant les parties de la pente de la digue.

Il est désirable d'ajouter au pied du parapet, du côté du canal, un revêtement de 1 mètre à 1 m. 50 de largeur le long du parapet. Ce revêtement ne peut être en béton, mais doit être construit avec des pierres, par exemple du basalte, Quenast, etc. (fig. 23).

Malgré les précautions que je viens d'exposer, *les extrémités de l'élément donnent encore à l'eau l'occasion de s'infiltrer.* Ce cas d'infiltration s'aggrave le long de la partie de la pente de l'élément allant de bas en haut.

Ainsi, à la partie courbe, l'eau peut s'infiltrer.

L'étanchéité de l'élément n'est plus assurée en ces deux points.

Un simple calcul nous apprend qu'à ces deux endroits, le chemin à parcourir par l'eau n'est peut-être pas même la moitié du chemin pratiquement nécessaire pour empêcher suffisamment l'infiltration.

Plus loin, je décrirai comment j'y ai obvié radicalement et définitivement.

Je vous ferai remarquer dès maintenant que le remède que j'ai trouvé constitue aussi un point capital de mon nouveau projet. Il renverse **en partie** les principes et les théories appliquées jusqu'à ce jour.

#### u). — Le but du bon isolement des joints des éléments du parapet.

Les joints du parapet en béton armé sur la digue de fleuve sont également eux-mêmes imperméables.

Ils sont aussi élastiques afin de pouvoir empêcher l'infiltration sans s'opposer aux déplacements relatifs dus au durcissement

des matériaux ainsi qu'aux mouvements du corps de la digue en terre, qui n'est jamais tout à fait immobile.

Ils ne s'opposent pas non plus aux poussées provenant du choc des objets tels que arbres, glace, etc., qu'entraînent les eaux du fleuve en temps de crues.

v.) — **Construction des joints.**

Sur les figures 21, 22 et 23 on voit en coupes verticale et horizontale la pièce intercalaire **t** formant joint.

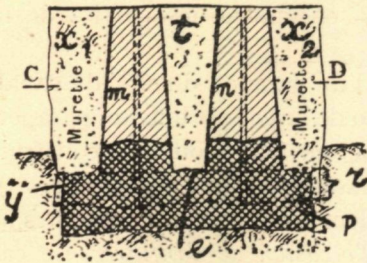


Fig. 21.  
Coupe verticale d'un joint.

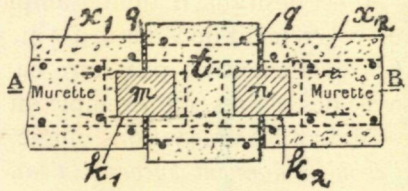


Fig. 22.  
Coupe horizontale d'un joint.

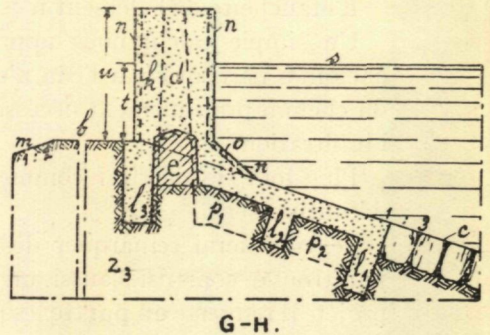
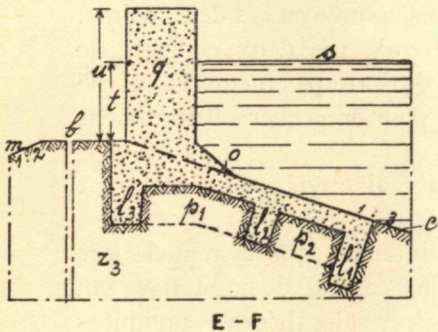


Fig. 23. — Coupe transversale d'un élément et d'un joint.  
(Voir E-F. et G-H, fig. 26).

Cette pièce en béton armé se présente en général sous la même coupe que les éléments (voir fig. 23).

Deux **cavités verticales** **k<sub>1</sub>** et **k<sub>2</sub>** sont formées par des logements (alvéoles) en partie dans la pièce intercalaire **t** et en partie dans les éléments **x<sub>1</sub>** et **x<sub>2</sub>** à droite et à gauche.



J'ai donné à ces cavités une forme évasée vers le bas, comme le montre la figure 21.

Les deux cavités communiquent entre elles par une rainure **e** (voir fig. 21 et 23) formée dans la base de la pièce intercalaire. Elles mesurent en haut  $10 \times 15$  cm. et en bas  $15 \times 20$  cm.

*w*). — **Formation des noyaux dans les cavités.**

Quand le parapet en béton armé est bien durci, par exemple après quatre semaines, on dame dans les cavités, lentement, des couches d'une matière compressible et plastique bien mouillée (presque boueuse).

Ainsi se forment les noyaux **m** et **n** qui communiquent par la rainure **e**. (fig. 22 et 23).

A la suite de plusieurs expériences, j'ai constaté qu'une matière argileuse convient et est à conseiller.

Un mélange de 50 p. c. d'argile + 40 p. c. de terre noire + 10 p. c. de sable fin, a donné satisfaction.

*Une matière d'argile pur ou de la glaise sont des matériaux dont on ne peut se servir.*

Je préviens ceux qui, résolument, appliqueront mon nouveau système, de bien suivre mes indications au sujet de la matière à employer pour le remplissage des cavités.

La forme évasée des cavités facilite le damage des noyaux et évite, ainsi que toutes les expériences l'ont prouvé, tout danger de la rupture des parois en cas de gelée. La gelée cheminant de haut en bas, enfoncera le noyau dans la partie sous-jacente non gelée.

Toutes les expériences que j'ai faites m'ont appris que la plus forte gelée ne peut faire éclater les parois des cavités, ce qui est évident, puisque le remplissage ne contient que 25 p. c. d'eau libre (maximum) laquelle provoque — une fois complètement gelée — une dilatation linéaire de 1,6 millimètre pour un morceau d'argile de  $10 \times 10 \times 10$  centimètres.

Il va sans dire que les cavités, **qui sont déjà munies de fentes** entre les éléments et la pièce intercalaire (joint), ne souffrent pas le moins du monde de la gelée.

*x*). — **L'Étanchéité du joint est parfait.**

La figure 24 démontre très bien ce qu'il arrive quand l'eau tâche de s'infiltrer derrière la pièce intercalaire.

L'eau dont la retenue  $t$  est par exemple de 50 centimètres, tâche de s'infiltrer suivant les flèches  $r, r$ .

En effet, cette poussée peut faire naître une fissure assez importante  $c$ .

Mais cette même eau pousse suivant les flèches  $r, r$  (indiquées dans l'argile) l'argile contre la partie  $x - z$  du redan  $e$ . La poussée de l'eau empêche celle-ci de s'infiltrer plus loin.

L'expérience a démontré que plus la hauteur  $t$  de l'eau retenue est élevée, *plus certaine et parfaite est l'étanchéité*.

L'argile pénétrée dans le creux (la rainure) intercalaire  $y$  travaille comme un bouchon.

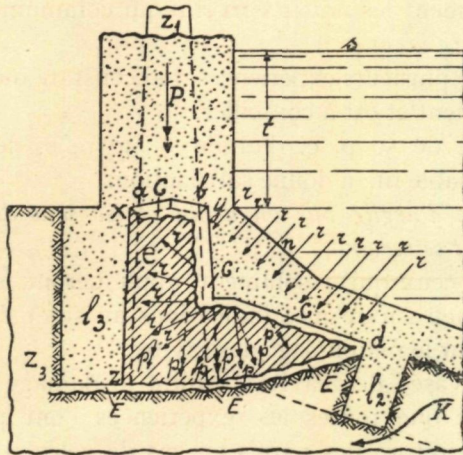


Fig. 24. — Bouchon argileux qui s'enfonce dans le parapet.

Entretiens, il se pourrait que l'eau s'infiltré par le chemin  $E, E$ .

Les expériences ont toutes définitivement démontré que si ce chemin se frayait, il se fermerait immédiatement de par lui-même. Si, par hasard, il ne se fermait pas tout de suite, un simple coup de maillet sur la tête du noyau en argile  $Z_1$ , selon  $P$ , le fermerait définitivement.

A première vue, il est étonnant qu'un simple coup de maillet ferme d'emblée la fissure  $E$ . C'est pourtant simple. L'argile humide (cela veut dire : la matière prescrite sous  $v$ ) joue à peu près le rôle d'eau dans les tuyaux communicants. Comme chaque poids par centimètre carré sur la tête fait naître théoriquement la même poussée sur chaque centimètre carré des tuyaux commu-

nicants, le coup sur la tête fait sentir, tout au moins partiellement, son influence dans toutes les cavités des environs et les redans (loi de Pascal).

Si le mélange (noyau) était devenu sec, il est tellement hygroscopique, qu'il deviendrait, **par l'eau qui s'infiltre**, tout de suite plastique de soi-même.

x). — **Evasement des cavités vers l'intérieur.**

Plusieurs expériences ont démontré qu'il est désirable d'évaser vers l'intérieur la cavité remplie par le noyau.

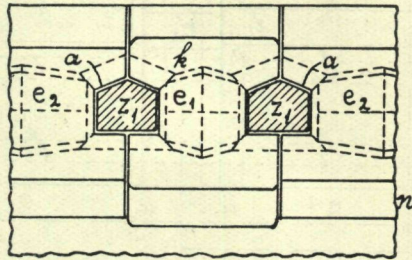


Fig. 25. — La cavité est évasée vers l'intérieur.

Quand l'eau a réussi à s'infiltrer à travers le joint, elle y entraîne des particules de l'argile du noyau, qui, par suite de la convergence des parois de la fente, s'accablent à la partie plus étroite de celle-ci et ont vite fait de l'obstruer, arrêtant ainsi **automatiquement** l'infiltration.

z). — **L'assurance de l'étanchéité des éléments là où ils rencontrent les joints.**

Comme déjà mentionné (voir plus haut) au paragraphe v, les deux cavités du joint sont communicantes entre elles au moyen d'une rainure formée dans la base de la pièce intercalaire (voir e., fig. 26).

Cette rainure maintenant, est prolongée latéralement dans la base de chaque élément voisin, aux deux côtés de la pièce intercalaire (e.).

La rainure dans l'élément aboutit à une cheminée h, tandis que la rainure est prolongée (e.) latéralement en impasse jusqu'à g.

L'étanchéité — mentionnée sous paragraphe *t* — est comme cela assurée.

Les croquis sur la figure 26 montrent nettement que les cheminées *r* ont aussi la forme évasée vers le bas, tandis que tous les plafonds et côtés des rainures *e*, etc., sont concaves.

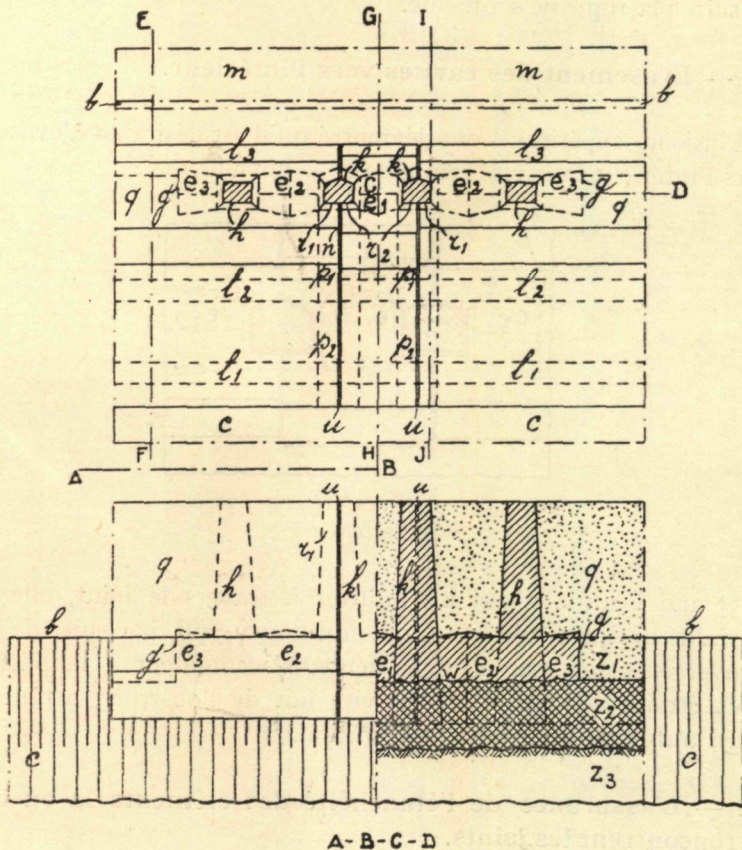


Fig. 26. — Croquis de plusieurs tranches concernant la pièce intercalaire C et les deux éléments des deux côtés. Les cavités *k* sont formées par la pièce intercalaire et les éléments *g*. Les cheminées sont indiquées avec *h*; le corps de la digue avec *z*<sub>3</sub>; la partie améliorée de la digue avec *z*<sub>2</sub>, tandis que le mélange d'argile damé dans les cavités et cheminées sont marqués avec la lettre *w*. Les rainures *e*<sub>1</sub>, *e*<sub>2</sub> et *e*<sub>3</sub> sont ainsi damés avec le mélange d'argile jusqu'aux bouts *g*. La coupe du béton est marquée avec *z*<sub>1</sub>.

Si on craint la gelée pour les cheminées, on peut les remplir avec du sable mêlé à de la tourbe (1 : 5) et les fermer approximativement avec un bouchon de béton, libre dans le trou.

La tourbe ne tient presque pas l'eau.

**En plus, les expériences ont ainsi appris que les cheminées ne se brisent pas aussi par la gelée.**

Il faut bien remarquer que la longueur de la prolongation des rainures horizontales dans le pied de la pièce intercalaire et les éléments dépend — outre la qualité de la terre de la digue — **de la hauteur de l'eau repoussée.**

Il peut arriver, que le prolongement doit aller si loin sous les éléments, qu'il va le long de **toute la base** de la murette. Il est évident que cette question doit être bien étudiée dans chaque cas particulier.

z). — **Préparation du sol où les joints seront érigés et où seront formées les prolongations des rainures dans les bases des éléments.**

Aux endroits où les joints seront érigés, et où les rainures seront prolongées, il faut **d'avance** renforcer la base.

On creuse à l'avance des chenaux (trous coniques) mesurant à la base environ 0 m. 40 et en haut environ 0 m. 50. Ces trous ont une profondeur de 0 m. 50.

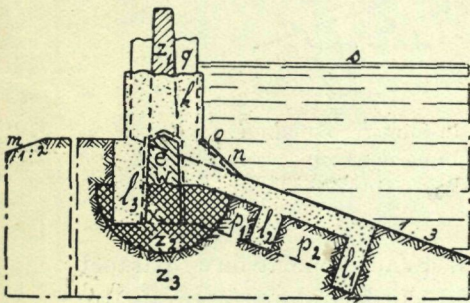


Fig. 27. — Croquis d'une coupe verticale d'un joint (voir fig. 26).

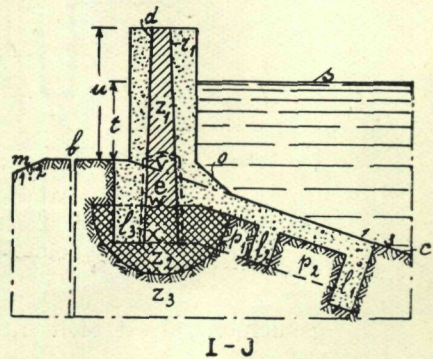


Fig. 28. — Croquis d'une coupe verticale d'un joint (voir coupe *i-j*, fig. 26).

Dans ces trous (représentés par un demi cercle sur les fig. 27 et 28), on dame de l'argile d'assez bonne qualité, de sorte que celle-ci lorsqu'elle est damée, « **se perd** » dans le corps de la digue. Il est désirable de munir la base des chenaux de trous creusés au moyen d'un poteau. Comme cela on est certain de réaliser la solidarité de la partie améliorée de la crête avec le corps de la digue.

La longueur de ces trous damés avec de l'argile, est en outre dépendante de la longueur dont les rainures sont prolongées dans la base des éléments.

Quand les matériaux du corps de la digue sont eux-mêmes d'assez bonne qualité, il n'est préalablement **pas nécessaire d'améliorer** la crête aux endroits où les joints et cheminées, etc., seront élevés.

Je signale que l'armement du joint doit être exécuté soigneusement.

Je recommande un armement comme indiqué sur les figures 20 et 29 (coupes A-B et C-D).

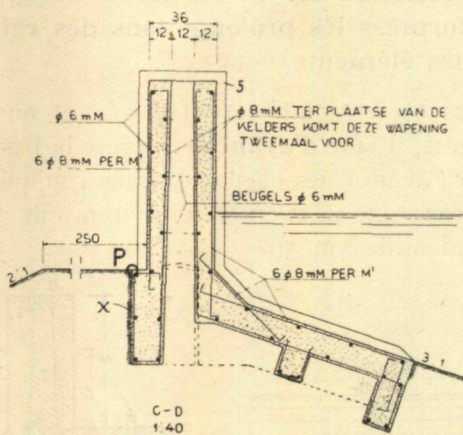


Fig. 29. — Armement du joint recommandé.  
Cet armement est appliqué deux fois dans chaque joint (voir fig. 20, coupe C-D).

Seulement, il est bien entendu, qu'au moment où le parapet (éléments et joints) en béton armé sera bien durci (après quatre semaines environ) on damera dans les cavités, les cheminées et les rainures, lentement, par petites couches bien humides, presque boueuses, à la fois, la matière compressible et plastique.

La forme évasée des cavités et cheminées, ainsi que la forme conique des rainures, etc., comme on le voit sur les figures, **facilitent le remplissage des rainures et le tassement des noyaux** dans les caves et les cheminées.

La stabilité de la murette est *énorme*, comme elle est indiquée en général sur la figure 34.

z<sub>2</sub>). — L'exhaussement avec une murette est beaucoup plus résistant qu'un exhaussement en terre.



La figure 30 démontre que la masse de glace L cherche et trouve plus facilement un point de destruction le long de a-b-c de l'exhaussement en terre G que le long de a'-b'-c' du parapet m comme le montre la figure 31.

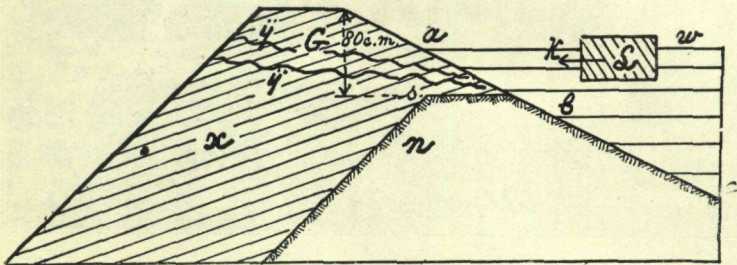


Fig. 30. — La masse de glace L pousse contre la partie a-b-c du talus non protégé. — Voyez les plans de glissements  $\gamma$ .

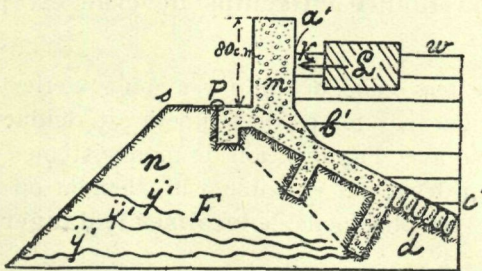


Fig. 31. — La partie a'-b'-c' tout à fait protégée contre les efforts de la glace. Voyez les plans de glissement  $\gamma'$ .

On verra, en examinant la figure 34, qu'un simple calcul suffit pour montrer qu'un parapet peut subir une poussée d'un objet (bateau, glace, etc.) qui pèse lui-même environ deux millions de kilogrammes, en supposant que cet objet atteint le parapet avec une vitesse de 1 m. 50 par seconde et le long d'une longueur de 25 mètres du parapet et supposant aussi, que la ligne horizontale ou l'objet touche le parapet est élevée de om. 15 au dessus la crête de la digue.

Un exhaussement en terre simple ne pourrait, en général, repousser de telles forces !

Sur la figure 32 est représentée une digue, munie d'un parapet en béton armé selon mon nouveau système, lequel résiste parfaitement à une poussée d'eau de 0 m. 65.



Fig. 32. — Essai avec une poussée d'eau de 0 m. 65. Parapet système de Muralt.

z<sub>3</sub>). — **La surveillance en temps de crue est plus facile qu'autrefois.**

Plusieurs de mes collègues m'ont avoué qu'effectivement la garde d'une digue par temps de tempête est rendue plus facile et plus agréable avec l'application de mon système.

S'il arrive un dégât par exemple à un élément ou à une pièce intercalaire, il sera plus facile de **localiser le danger**.

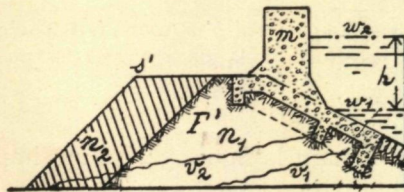


Fig. 33. — Combinaison d'un exhaussement avec une murette *m* et élargissement par une masse de terre *n*<sup>2</sup>.

Il peut arriver que le parapet reste intact et que la digue en-dessous du dit parapet s'affaisse. De telles digues ne sont pas à exhausser, **ni avec de la terre** ni avec une murette, sans avoir été améliorée d'avance.



Les digues peuvent, dans ce cas, être exhausées par un parapet  $m$  combiné avec un élargissement par une masse de terre  $n_2$ .  
 Les plans  $v_1, v_2$ , etc., de l'infiltration sont comme cela enrobés.

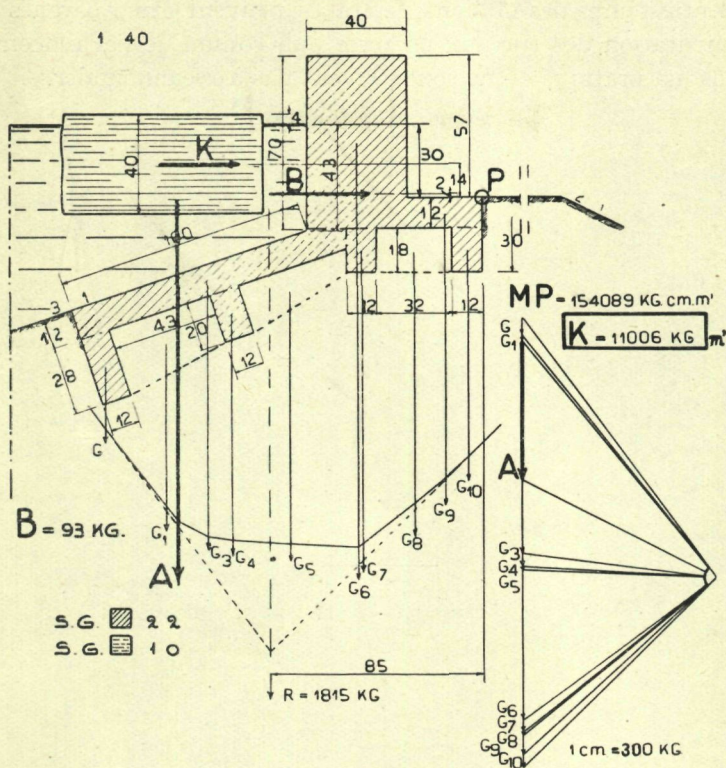


Fig. 34. — Coupe transversale d'une murette-digue de fleuve. Calculs graphostatiques (sans frottements). Propre, la force  $A$  devrait être mise perpendiculaire sur le centre de pente en béton. L'importance de cette anomalie est peu importante, mais rend la figure polaire plus simple.

Cet élargissement peut être construit après des dizaines d'années, quand les crues du fleuve, par des normalisations, etc., sont vraiment montées **jusqu'au-dessus de la crête**. Voir le croquis sur la figure 33.

Il n'y a pas la moindre raison d'hésiter à appliquer mon nouveau système. En effet, le parapet sera toujours placé sur la crête, où, les premières dizaines d'années, n'atteignent pas les

hautes crues. Les eaux ne viendront baigner le parapet qu'au bout d'un certain laps de temps. Vraiment, les ingénieurs ont assez de temps pour bien observer l'exhaussement et ne peuvent être surpris par les événements.

Entre-temps des millions de francs peuvent être épargnés en comparaison des travaux en terre qui, comme je l'ai rencontré dans ma pratique — ne sont souvent pas à recommander.