LE COIN DU LABORATOIRE

FILTRE A HOULE

(SYSTÈME NEYRPIC)

par F. BIESEL

Ancien Elève de l'Ecole Polytechnique

Dans l'étude du comportement de certains ouvrages à la mer, il est parfois possible de se ramener à un problème à-deux dimensions. C'est le cas, par exemple, pour une digue rectiligne attaquée de front par la houle. On peut alors se contenter d'étudier le mouvement de l'eau dans une tranche délimitée par deux plans verticaux perpendiculaires à la digue.

Cette façon de procéder implique que la houle se présente devant la digue avec des crêtes rigoureusement parallèles et horizontales.

Il est évident que la nature ne présente jamais une telle régularité, mais on sait que diverses considérations d'ordre expérimental ou théorique permettent, dans certains cas, d'accepter cette simplification.

Quoique la classe des problèmes auxquels elles s'appliquent soit assez restreinte, les considérations qui précèdent présentent un intérêt certain pour la technique des modèles réduits.

En effet, ces problèmes se prêtent à l'étude en canal qui est beaucoup plus économique que les essais sur modèles à trois dimensions et qui permet de faire des observations beaucoup plus complètes grâce à l'emploi de parois vitrées.

LES DÉFAUTS DU CANAL A HOULE

On connaît la disposition classique des éléments essentiels d'un canal d'essai de houle. La fig. 1 donne une coupe schématique d'un tel canal.

A une extrémité se trouve le batteur derrière lequel on aménage un amortisseur. A l'autre extrémité, se trouve le modèle. Nous avons, à dessein, donné à ce « modèle » l'allure d'une plage, car un canal ainsi équipé ne peut se prêter qu'aux essais de modèles « absorbants » **sur lesquels la houle vient se briser sans se réfléchir.**

Supposons, en effet, qu'il en soit autrement. Il est clair que dans la nature les ondes réfléchies par un tel ouvrage repartent vers le large où elles se perdent. Par contre, dans le modèle, ces houles réfléchies se réfléchissent à nouveau sur le batteur, qui les renvoie ainsi vers le modèle ; celui-ci les renvoie à son tour sur le batteur et ainsi de suite.

Des considérations théoriques simples montrent, en effet, que les batteurs des types courants sont de très bons réflecteurs pour ces houles parasites et qu'à cet égard, ils se comportent comme une paroi immobile occupant la position moyenne de l'organe producteur de houle.

L'expérience montre que les réflexions successives dont nous avons exposé le mécanisme, finissent par donner au plan d'eau situé entre le batteur et le modèle réfléchissant, une agitation désordonnée ne se prêtant ni aux mesures ni à la réalisation d'essais toujours semblables à eux-mêmes. Ces essais ne correspondent plus, d'ailleurs, à la réalité qu'ils veulent représenter.

fig. 1

LES REMÈDES CLASSIQUES

On cherchait parfois à éviter cet inconvénient en n'utilisant qu'un train de quelques ondulations dont on observait les effets avant que les réflexions sur le batteur aient pu causer une perturbation.

Outre que cette méthode a l'inconvénient d'être très lente, car il faut attendre entre chaque essai que l'eau se soit suffisamment tranquilisée, elle ne permet jamais que d'étudier des états transitoires qui peuvent être très différents du régime établi. Il devient, par exemple, impossible d'étudier l'effet prolongé des houles sur des enrochements.

Un autre procédé qui (en faisant appel à des raisonnements plus subtils) permet théoriquement de tenir compte des réflexions successives, consiste à donner au batteur un mouvement corrigé d'une façon telle qu'il émette, non pas une houle répondant aux spécifications de l'essai, mais le complément nécessaire pour transformer la houle qu'il réfléchit en une houle conforme à ces spécifications.

Nous allons développer cette idée sur un exemple type. Supposons que le modèle consiste en une paroi verticale. Si la distance entre le modèle et la position moyenne du batteur est égale à un nombre entier de demi longueurs d'onde, on voit que l'on peut établir un clapotis à ventres multiples entre le modèle et le batteur supposé immobilisé dans sa position moyenne.

En réalité, un tel clapotis finirait par s'amortir par suite des pertes d'énergie. Si l'on admet, sans entrer dans le détail des phénomènes, qu'une houle partie du batteur revient, après réflexion sur le modèle, avec une amplitude diminuée de 10 %, pour fixer les idées, on voit facilement qu'il faut alors donner au batteur une amplitude résiduelle égale au dixième de celle qu'il aurait dû avoir pour réaliser la houle spécifiée, si le modèle avait été parfaitement absorbant.

Au contraire, si la distance modèle-batteur est supérieure d'un quart de longueur d'onde par rapport au cas précédent, il est alors nécessaire de donner au batteur une amplitude 1,9 fois plus grande que pour le modèle parfaitement absorbant.

Cette brève analyse nous permet de mettre en évidence l'inconvénient de ce procédé :

On voit, en effet, que ce que l'on pourrait appeler « l'efficacité » du batteur varie de 10 à $1/1,9$, suivant que la longueur du canal contient un nombre pair ou impair de quarts d'onde. Il est clair qu'en l'occurrence, ce n'est pas le réglage de la longueur du canal qui constitue le point délicat, mais bien le réglage de la longueur d'onde des houles. En effet, si l'intervalle batteur-modèle est par exemple de 10 longueurs d'onde, ce qui est un chiffre très plausible, on voit qu'une variation de $1/40$ sur celle-ci peut suffire à faire croître ou décroître l'amplitude dans le rapport de 1 à 19.

En définitive, on peut montrer que, dans ce cas, pour assurer la constance de l'amplitude à 10 ou 20 % près, il peut être nécessaire de réaliser la longueur d'onde avec une précision de quelques millièmes.

La fréquence du batteur doit donc être extrêmement régulière et ce, pendant des durées considérables, ce qui pose déjà un problème difficile.

Mais les inconvénients de ce procédé ne s'arrêtent pas là. Tout d'abord, le fait que la longueur d'onde ne dépende pas seulement de la fréquence, mais aussi de la profondeur, interdit pratiquement l'emploi de modèles à fond mobile ou à niveau variable.

Ensuite, le raisonnement fait plus haut n'est applicable que si le modèle renvoie une houle non distordue. Cette restriction élimine les cas peut-être les plus intéressants. En effet, il est rare qu'un ouvrage réfléchisse la houle sans aucune distorsion. Il est même permis de supposer que cela n'est parfaitement réalisé que dans le cas d'une digue verticale lisse et d'un fond fixe horizontal. L'étude sur modèle réduit de ce dernier cas offre d'autant moins d'intérêt que les équations du mouvement sont connues au second et même au troisième ordre près. Par contre, chaque fois que la forme du modèle s'éloignera par trop de celle d'une digue verticale, chaque fois que le fond présentera des irrégularités notables (enrochements, affouillement, etc...), il se produira des mouvements secondaires et la houle réfléchie sera plus ou moins irrégulière, c'est-à-dire plus ou moins chargée d'harmoniques qu'aucun réglage du batteur ne pourra éliminer. La production faible mais continue de ces harmoniques dans un volume d'eau limité peut conduire à un renforcement des perturbations susceptibles d'interdire tout essai sérieux.

fig. 2

Filtre à tôles perforées.

Un des éléments est sorti du canal d'essai, ce qui permet de voir le détail de sa construction.

Enfin, un autre inconvénient est que le réglage est pratiquement impossible à prévoir. Il faut le déterminer expérimentalement ce qui constitue une perte de temps. On sait, en effet, que même dans les cas les plus simples (c'est-à-dire, d'ailleurs, les moins intéressants), il subsiste encore des incertitudes de quelques pour cent sur les formules théoriques les plus sûres, telles que celles qui donnent la longueur d'onde d'une houle en profondeur constante en fonction de sa période.

LE FILTRE NEYRPIC (Procédé breveté)

Le filtre à houle NEYRPIC que nous voudrions présenter ici, apporte à ces difficultés une solution satisfaisante. Il a, en outre, l'avantage de réaliser une sélection avantageuse dans les longueurs d'onde qui le traversent.

Son principe est le suivant :

Le filtre est construit de telle façon qu'il absorbe une fraction sensible de l'énergie des houles qui le traversent, sans que celles-ci se réfléchissent d'une façon notable sur lui.

Un tel filtre pourra, par exemple, être constitué par une série de tôles minces verticales équidistantes, parallèles aux parois du canal (fig. 2) ⁽¹⁾.

Dans ce qui suit, nous allons exposer le fonctionnement du filtre pour un cas particulier. Nous avons choisi, pour plus de clarté, le cas qui est théoriquement à la fois le plus simple et le plus défavorable au point de vue des réflexions multiples, c'est-à-dire celui où la transmission des houles dans le canal et leur réflexion sur le modèle ou sur le batteur, se fait sans aucune déperdition d'énergie (donc d'amplitude).

Il est bien évident que jamais des conditions aussi rigoureuses ne sont réalisées. Même dans le cas où le modèle est une paroi verticale lisse,

les pertes d'énergie le long du parcours dans le canal sont appréciables. Et, d'autre part, ainsi que nous l'avons déjà dit à propos de la distorsion des houles réfléchies, les ouvrages qui nécessitent une étude sur modèle réduit sont ceux où le mouvement de l'eau est complexe et où, par conséquent, le mouvement ondulatoire de la houle subit une destruction partielle.

Nous serons donc obligés, pour développer notre exemple schématique, de supposer au filtre un pouvoir de réduction beaucoup plus important que celui qu'on est conduit à lui donner pour la quasi totalité des essais réels. Nous allons supposer, par exemple, que les houles traversant le filtre y perdent les deux tiers de leur amplitude. Il convient d'ailleurs de noter qu'un tel filtre serait très aisément réalisable.

Supposons ensuite que l'on veuille faire l'essai avec une houle incidente de 9 cm, d'amplitude (à l'échelle du modèle bien entendu). On réglera alors le batteur de façon à ce qu'il produise une houle de 27 cm. d'amplitude. Cette houle aura donc bien 9 cm. d'amplitude en arrivant sur le modèle après une première traversée du filtre.

Le modèle étant parfaitement réfléchissant, il renvoie ainsi vers le batteur une houle de 9 cm. d'amplitude. Cette houle réfléchie devra, pour atteindre le batteur, traverser une seconde fois le filtre et ainsi être réduite à une amplitude de trois centimètres. Nous voyons, enfin, que quoique le batteur soit parfaitement réfléchissant pour cette houle, celle-ci ne pourra revenir perturber les essais que moyennant une troisième traversée du filtre, c'est-à-dire avec une amplitude réduite à 1 cm.

On conçoit que l'on puisse ainsi réduire d'une façon satisfaisante l'effet nuisible de ces réflexions multiples, grâce à l'emploi de filtres convenablement calibrés.

Pour éviter des longueurs, nous avons utilisé, dans le raisonnement qui précède, le principe de la superposition des trains d'onde, c'est-à-dire que nous avons admis que les différentes houles réfléchies pouvaient se croiser ou se superposer dans le canal sans se perturber mutuellement. On sait que cette hypothèse est conforme à la fois aux lois déduites de l'expérience et aux théories qui permettent de rendre compte d'une façon satisfaisante de la plupart des propriétés des houles de cambrure modérée.

(1) Cependant les variantes de réalisation sont très nombreuses, tout d'abord en restant dans le type des filtres à plaques parallèles, on peut augmenter la rugosité de celles-ci par des perforations des enduits rugueux ou tout autre procédé. Un mode de réalisation entièrement différent consiste en l'emploi d'un réseau de fils de fer fait par exemple à partir d'un grillage replié sur lui-même. Nous avons réalisé avec succès des filtres de ce dernier type, mais nous ne les employons que comme dégrossisseurs, car ils ne donnent pas à la surface le même « fini » que les filtres à plaques. D'une façon plus générale, le filtre NEYRPIC est constitué essentiellement par des obstacles d'posés dans l'eau de façon que la surface frontale totale qu'ils présentent à la houle et sur laquelle des réflexions gênantes risquent de se produire, soit faible par rapport à la section de l'ensemble du filtre (rapport de 1 à 10 par exemple) : on obtient ainsi un filtre amortisseur pratiquement non réfléchissant.

Nous avons également admis implicitement que le coefficient d'amortissement des houles passant dans le dièdre était indépendant de leur amplitude. Cette hypothèse appelle quelques commentaires.

Au cours de la mise au point du procédé que nous décrivons ici, nous avons réalisé au Laboratoire NEYRPI le dispositif d'essai représenté sur la fig. 3 :

fig. 3

Un canal d'essai de houle équipé d'un filtre, était muni à une extrémité d'un volet battant producteur de houle et à l'autre d'un amortisseur aussi parfait que possible. L'amplitude de la houle était mesurée à l'entrée et à la sortie du filtre.

Nous avons constaté sur ce dispositif que le rapport de réduction dépendait de la grandeur absolue des amplitudes, la réduction relative étant d'autant plus forte que les amplitudes absolues étaient plus grandes.

Ce phénomène trouvait aisément son explication théorique grâce aux considérations de turbulence.

En effet, la théorie ⁽¹⁾ laissait prévoir que si l'écoulement avait été laminaire, l'amortissement relatif des houles aurait été indépendant de leurs amplitudes absolues.

Mais, en réalité, le mouvement de l'eau est turbulent. Dans les équations du mouvement laminaire, il faut donc remplacer la viscosité constante par un facteur (viscosité fictive) croissant avec la turbulence, donc avec les vitesses absolues.

Les pertes de charge ne sont donc pas proportionnelles aux vitesses, c'est-à-dire aux amplitudes, mais probablement à leur carré ou à une fonction d'allure analogue.

Nous avons pourtant raison d'admettre que dans le cas de l'utilisation normale du filtre, l'amortissement est indépendant des amplitudes (27, 9 et 3 cm. dans l'exemple ci-dessus). En

effet, toutes ces houles passant simultanément dans le filtre bénéficient, si l'on peut dire, du même état de turbulence.

Par conséquent, dans les équations du mouvement laminaire **de ces trois houles**, il faut remplacer la viscosité vraie **par une même viscosité fictive** correspondant à la turbulence totale induite par l'action simultanée de toutes les houles passant dans le filtre.

INCONVÉNIENTS DU FILTRE

L'emploi d'un tel filtre n'est pas absolument sans inconvénients. Les principaux en sont :

a) la nécessité d'avoir un batteur surpuissant pouvant produire des houles d'amplitude deux, voire même trois fois plus grandes que celles qui sont nécessaires aux essais.

b) l'impossibilité d'étudier par ce procédé les houles d'amplitude limite (crête à 120°). En effet, dans ce cas, il serait nécessaire que le batteur émette des houles d'amplitude supérieure à la limite, ce qui est absurde.

Le premier de ces inconvénients provoque évidemment une certaine augmentation du prix du batteur qui doit être très largement calculé.

Heureusement que pour les essais en canal aux échelles usuelles, le batteur représente rarement une charge financière considérable. (D'autant moins que le filtre, ainsi que nous le verrons plus loin, permet l'emploi de batteurs d'un modèle très économique).

Le second inconvénient est plus grave. Remarquons cependant que pour les études pratiques, il ne se présentera que rarement car, d'une part, il est rare qu'au voisinage des côtes les houles aient des cambrures voisines de la limite, et d'autre part, les côtes ou les ouvrages parfaitement réfléchissants, qui exigent des filtres très actifs, sont rares à la mer, surtout d'ailleurs à l'égard des houles de gros temps.

De toute façon, cette difficulté n'est pas insurmontable. En effet, il est possible de renforcer les houles sortant du filtre sans rien enlever de l'efficacité de ce dernier. Pour cela, il suffit que

(1) Cette théorie est basée sur un article d'O'Brien et Chaffin paru dans le « Geophysical Union » en 1942, sous le titre : The effect of Wall-Friction on gravity Waves.

le canal soit convergent à l'aval du filtre. Cet artifice étudié et mis au point au Laboratoire NEYRPIC nécessite un canal plus long et en partie plus large, ainsi que des filtres et un batteur plus importants.

L'ACTION RÉGULATRICE DU FILTRE

La théorie et l'expérience s'accordent pour montrer que la diminution d'amplitude subie par les houles en traversant le filtre est d'autant plus forte, que leurs longueurs d'onde sont plus courtes. D'une façon plus précise, si une houle de longueur L est réduite dans le rapport de 1

à n , une houle de longueur $\frac{L}{K}$ est réduite dans

le rapport de 1 à $n^{\frac{3}{4}}$

[1]

Or, un batteur, même de conception rudimentaire, satisfaisant seulement à la condition d'être animé d'un mouvement périodique de période T ,

émet un mélange de houles de période $T, \frac{T}{2},$

$\frac{T}{3}, \dots, \frac{T}{p}$, etc... c'est-à-dire de longueurs $L,$

$\frac{L}{4}, \frac{L}{9}, \dots, \frac{L}{p^2}$ (pour des profondeurs suffisantes

et en dehors du domaine des rides capillaires bien entendu).

La présence de ces harmoniques donne à la houle un aspect très irrégulier ⁽¹⁾ et surtout rend difficile la mesure précise de ses caractéristiques. Elle interdit également les vérifications précises des équations théoriques.

(1) Voir page suivante.

La photographie du haut montre une houle convenablement filtrée. Au contraire, celle du bas est nettement déformée par un harmonique de fréquence double. On distingue quatre crêtes successives de cet harmonique sur la photographie.

Or, le filtre élimine presque totalement ces parasites. La formule [1] permet aisément de s'en rendre compte.

On voit en effet, d'après cette formule, que si le rapport de réduction $\frac{1}{n}$ est de $\frac{1}{2}$ pour la houle fondamentale, il sera de :

$$\frac{1}{7,1} \text{ pour le premier harmonique.}$$

$$\frac{1}{36,8} \text{ pour le second, etc... ;}$$

et que si le rapport de réduction $\frac{1}{n}$ est de $\frac{1}{3}$ pour la houle fondamentale, il sera de :

$$\frac{1}{22,4} \text{ pour le premier harmonique.}$$

$$\frac{1}{302} \text{ pour le second, etc...}$$

On voit que, même en partant d'une houle médiocre, on arrive aisément à une houle excellente. Cette circonstance permet de réaliser des batteurs extrêmement rustiques. On réalise ainsi une économie qui compense très largement la surpuissance exigée par l'emploi des filtres.

Remarquons, à ce propos, l'analogie qui existe entre le fonctionnement du filtre en tant que régularisateur de houle et le processus naturel de régularisation subi par les vagues de tempête.

(1) Le fait que les harmoniques parasites soient les harmoniques de temps ($\frac{T}{2}$, $\frac{T}{3}$, etc...) et non ceux d'espace ($\frac{L}{2}$, $\frac{L}{3}$, etc...)

semble presque évident au point de vue théorique étant donné que le seul élément de périodicité imposé au système est la période du batteur.

D'ailleurs cette conclusion semble bien vérifiée par l'observation. Elle rend compte, en particulier, de l'aspect caractéristique des houles produites par de « mauvais » batteurs, ou par de bons batteurs mal employés. On sait que de telles houles semblent avoir deux crêtes (voir figure de la page précédente). Cette impression provient de ce que sur chaque intumescence de la houle fondamentale de longueur L il y a place pour deux crêtes de la houle de

longueur $\frac{L}{4}$. Or, cette houle parasite quoique d'amplitude rela-

tivement faible présente, étant donné sa faible longueur d'onde, des courbures relativement importantes (pour une amplitude quatre fois plus faible, par exemple, les courbures de la houle de longueur $\frac{L}{4}$ sont encore quatre fois plus fortes, que pour la houle

fondamentale). Ce sont ces courbures raides qui rendent les harmoniques courts si apparents.

On voit l'extrême rusticité des batteurs dont les filtres autorisent l'emploi. Il s'agit d'un simple volet battant plan sans étanchéités latérales.

Ces vagues, en parcourant des centaines et même des milliers de kilomètres, finissent par se débarrasser de leurs harmoniques les plus courts (et les plus vulnérables à l'usure). Elles deviennent alors la houle longue et lisse bien connue des marins. Les quelques mètres de longueur du filtre jouent, sous une forme condensée, le même rôle que les espaces immenses de l'océan.

APPLICATION AUX MODÈLES A TROIS DIMENSIONS (maquettes de port, etc...)

Pour les essais à trois dimensions, le danger des réflexions parasites est, le plus souvent, moins grave que dans un canal.

En effet, l'épanouissement des houles provoque, en général, une déperdition appréciable de l'énergie réfléchiée. Quand les modèles étudiés ne seront pas extrêmement réfléchissants, il suffira presque toujours de prendre la précaution

de garnir d'amortisseurs toutes les parois de la cuve, qui ne correspondent pas à des limites naturelles du plan d'eau ou pour lesquelles il n'est pas nécessaire de conserver un pouvoir réflecteur. Ce dernier artifice (qui a d'ailleurs également fait l'objet d'un brevet NEYRPIE) permet même d'étudier des modèles très réfléchissants à condition de prévoir pour les houles réfléchies, des plans d'eau d'épanouissement considérables, ainsi que le montre la disposition schématique de la fig. 4.

On voit que l'emploi combiné du filtre et des amortisseurs de paroi permet d'envoyer sur le modèle une houle bien définie, exempte de toute perturbation parasite.

Pour les modèles à trois dimensions, plus encore que pour les modèles en canal, il peut sembler inutile, voire même nuisible, de s'attacher à avoir une houle bien régulière. En effet, la nature est loin de présenter une telle

fig. 4

Cette solution est assez onéreuse car elle exige la construction de bassins et de batteurs beaucoup plus grands que le modèle. Au contraire, l'emploi du filtre permet de réduire les dimensions du bassin au strict minimum.

Une disposition d'étude d'un modèle réfléchissant est donnée par la fig. 5.

régularité. Aussi est-on tenté de trouver plus conforme à la réalité, l'état plus ou moins cahotique qui résulte du libre jeu des réflexions. En fait, il n'en est rien. Quoique cet état cahotique puisse paraître « à l'œil » une meilleure imitation de la nature, il présente, en réalité, deux défauts rédhibitoires.

fig. 5

Tout d'abord, il serait presque impossible de faire des essais comparables entre eux et de définir, avec quelque précision, à quelle houle correspond l'étude que l'on fait.

Ensuite, cette ressemblance entre l'aspect toujours tourmenté de la mer et celui d'un modèle où l'eau serait agitée de façon désordonnée, n'existe que pour un observateur très superficiel. En effet, le désordre de la nature n'est pas « reproduit à l'échelle » mais remplacé par un autre désordre (le plus souvent incontrôlé et incontrôlable) dont les effets peuvent être entièrement différents.

En définitive, une telle irrégularité ne pourrait être souhaitable que si elle reproduisait « à l'échelle » celle de la mer. Sa réalisation poserait alors un problème très difficile sinon insoluble.

Mais heureusement, l'étude des houles réelles autorise une simplification considérable. En effet, sauf dans des cas relativement rares, à savoir celui de la houle due uniquement à un vent local (elle est alors d'amplitude minime), et celui de la superposition de houles d'origines diverses (dont l'effet peut s'étudier séparément sur le modèle), la houle possède une direction de propagation bien définie. Là, comme en tant d'autres domaines, la nature masque, sous une irrégularité plus apparente que réelle, une volonté organisée. D'une façon plus positive, nous dirons que la houle réelle, qui n'a pas, à proprement parler, de direction de propagation unique rigoureusement définie, peut être considérée comme résultant d'un ensemble de houles dont les directions de propagation sont comprises dans un angle très étroit ⁽¹⁾.

Si bien que l'erreur commise en rassemblant

toutes ces composantes sur une direction unique — c'est-à-dire en remplaçant la houle réelle par une houle rigoureusement « cylindrique » — est pratiquement négligeable. D'autre part, cet artifice permet de rester parfaitement maître du phénomène que l'on réalise et de pouvoir donner les caractéristiques précises de la houle étudiée.

Pour être complets, nous soulignerons encore que l'apparence irrégulière de la mer est accentuée par la présence de perturbations superficielles dues au vent local. Ces perturbations ne sont pas reproduites sur le modèle, mais quoique leur importance spectaculaire soit considérable, leurs effets dangereux ou destructeurs sont négligeables.

CONCLUSION

En résumé, nous voyons que le filtre NEYRPIC présente deux avantages essentiels.

Tout d'abord, il permet de supprimer ou de réduire considérablement l'effet nuisible des réflexions successives qui n'ont pas d'équivalent en mer.

Ensuite, il permet de réaliser des houles très régulières, très belles, avec des appareils producteurs rustiques.

L'obtention de telles houles est indispensable en ce qui concerne les études théoriques mais, même sur le plan pratique, elle offre l'avantage considérable de permettre l'exécution d'essais toujours semblables à eux-mêmes, donc contrôlables, ainsi que la réalisation des mesures de houle dans des conditions de commodité maximum.

(1) Ainsi que le montrent, par exemple, les photographies aériennes.

THE LABORATORY'S OWN COLUMNS

THE WAVE FILTER NEYRPIC METHOD

In analysing the action of water on certain civil structures, it is very often possible to reduce the problem to one of two dimensions. For example, this is possible in the case of a straight dike subjected to wave action. In such a case the movement of the water can be studied in a section bounded by two vertical planes perpendicular to the dike. However this method implies that the waves approach the dike in parallel alignment and with their crests horizontal. It is evident that such a regularity rarely, if ever, will occur in nature. Nevertheless, with due regard for theory and the experiment, it is often possible to accept this simplification.

Although this class of problem is very limited, the preceding conditions present a certain interest in the technique of the use of models.

In practice such a problem can be studied in a flume which is more economical than analysing the problem in three dimensions and at the same time has the advantage of allowing much more complete observations by the use of a transparent window in the side of the flume through which the actual action of the water on the structure can closely be seen.

THE DRAWBACKS OF A WAVE FLUME

Below in fig. 1, is shown schematically the classical disposition of the essential elements of a wave flume.

The wave machine (1) is located at one end, behind this is the dampening device (2) ; at the other end of the flume, is the model (3). On purpose a « model » with the appearance of a beach has been selected for such a flume arrangement can only analyse « absorbant models », that is

models upon which the waves break without reflection.

Suppose for instance the case were otherwise. It is clear that in nature the waves would be reflected and would return to open sea where their energy would be dissipated. On the other hand, in the flume model, the waves would be reflected to the wave machine, where they would again be reflected and so return again to the model, again and again this would be repeated.

Simple theoretical considerations show that in effect the current type of wave machines are very good reflectors for these parasitic waves and in this regard, act as an immobile wall occupying the mean position of the wave machine.

Experience has shown that these successive reflections give to the surface of the water between the model and the wave machine a disorderly agitation which affects the measurements and makes the repetition of the identical conditions almost impossible. Besides, in such a condition, the experiments do not correspond to the reality the experiments attempt to simulate.

THE CLASSICAL REMEDIES.

To avoid the above inconvenience, one method is to utilize a train of several waves where the observations are taken before the reflections against the wave machine become effective.

Besides the disadvantage of being very slow, it being necessary to wait between each experiment until the water becomes sufficiently calm, this method has the added disadvantage that it permits only the study of a transitory stage which might be very different from the established conditions. It is impossible for instance, to study

the prolonged effect of waves on rock-fill or riprap structures.

One other method, which depending on very subtle reasoning and theoretically takes into account the successive reflections, consists in giving the wave machine a corrected movement in such a way that it produces not a wave according to the specifications but the complement which is necessary to transform the reflected wave into a wave which meets the specification.

Below this idea is developed by an example : first let us suppose that the model consists of a vertical wall. If the distance between the model and the mean position of the wave machine is equal to an integral number of half wave lengths, it is apparent that there exists a multiple number of standing waves between the model and the wave machine, which is assumed to be immovable in its mean position.

If it is admitted, without going into the details of the phenomena, that the wave in reflection loses a part of its energy we can assume in this instant case that it returns to the wave machine after reflection having lost 10 % of its amplitude. Then to return it to its original amplitude it is necessary that the wave apparatus impart to the reflected wave a residual amplitude of one tenth that which it would have needed had the model been perfectly absorbant. On the other hand, if the distance from the model to the wave machine had been greater by a quarter of a wave length than in the preceding case, it would be necessary to give the wave machine an amplitude of 1,9 times as great as if the model were perfectly absorbant, because it would be necessary in this off phase condition to first destroy the wave and then recreate it.

The above brief analysis then shows the essential inconvenience of this procedure :

In effect, the « efficiency » of the wave machine varies from 10 to $1/1,9$, depending on whether the flume contains an even or odd number of quarter wave lengths. If the interval from the wave machine to the model is for example 10 wave lengths - which is a very plausible figure - it is seen that a variation of $1/40$ of a wave length (the double interval the wave and its reflection covers is 20 wave lengths, and $1/40$ of a wave length puts the wave reflecting on the wave machine exactly out of phase) changes the amplitude from 1 to 1,9.

Finally, it can be shown that in order to insure

the accuracy of the amplitude to 10 % or 20 %, it is necessary to regulate the length of the wave with a precision of a few thousandths.

The frequency of the wave machine must be closely regulated and this for periods of considerable duration. Alone this is a difficult problem, but the difficulty does not end there. It is also necessary to regulate the depth of the water, for the length of the wave produced does not depend solely on the frequency, but as well on the depth of the water in the basin. This close regulation required practically forbids the use of movable bed models or models with a variable water level.

Also the reasoning above requires that the reflected wave be not distorted. Since this is so rarely the case, the perhaps most interesting studies are eliminated. Even in the case of a dike with a smooth vertical face and with a fixed horizontal bottomed flume, this ideal condition is not perfectly realized. The study of this last case offers the least interest, as the equations of movement are known about to the second and third order. On the other hand, each time that the shape of the model is changed from that of a vertical wall, each time the bottom has irregularities (rip-rap, erosion, etc.), secondary effects will be produced and the reflected wave will be more or less irregular, that is to say, more or less effected by harmonics for which no manner of regulation of the wave machine can compensate. The feeble but continual production of these harmonics in a limited volume of water can build up to a reinforcement of disturbance so great as to make any serious study impossible.

Finally another inconvenience of this method is that the regulation is practically impossible to foresee. It is necessary to determine this regulation experimentally, all of which naturally, causes a loss of time. In effect, even in the simplest cases (that is, besides, the least interesting), this methods still substitutes inexactitudes of a few percent on the most theoretically correct formulae, that is those that give the length of the wave in constant depth in terms of its period.

THE WAVE FILTER.

The Wave Filter as devised by Mr. BIESEL of NEYRPIC, which is presented below, gives a satisfactory solution to these difficulties. It has, besides, an other advantage in its ability to select the waves that traverse it.

Its principle follows :

The filter is constructed in such a way to absorb a sensible fraction of the wave energy that crosses it without causing a noticeable reflection itself.

Such a filter can be constructed by example, by a series of thin vertical plates placed equidistant apart and parallel to the walls of the flume (fig. 2) (1).

The functioning of such a filter for a particular case will be shown as an example. The case chosen, for clarity, is at the same time the simplest theoretically and the most unfavorable from the point of view of multiple reflections, that is the case where the transmission of the wave in the flume and its reflection from the model or the wave machine causes no loss of energy (that is no amplitude).

It is evident that such rigorous conditions are never realized. Even in the case of a smooth vertical faced model, the loss of energy in traversing the flume is very great, and further as has already been indicated apropos of the distortion of the reflected wave, the structures which require model studies are those in which the movement of the water is very complicated, and where, in consequence, the ondulatory movement of the wave undergoes a partial destruction.

Therefore in order to develop our schematic example, it is necessary to consider a filter with a capacity much greater than required for almost all real studies. In this example, it will be supposed that waves traversing the filter lose two-thirds of their amplitude. It is convenient to note, besides, that such a filter should be easily realizable.

Suppose for instance, that with due regard to the scale of the model, the experiment is to be made with a wave of 9 cm. amplitude. In such a case, the wave machine is regulated so that it will produce a wave of 27 cm. amplitude. This wave, then, would be 9 cm. when it arrives at the model after having made one pass through the filter.

(1) However the means of realizing this are very numerous, first, in using parallel plates it is necessary to roughen the surface of the plates by perforations, by rough coating or by some other means. One method which is altogether different, consists in using a wire screen folded many times. In the laboratory, filters of this last type have met with success, but they have only been used for wave adjustments; for they do not give the water surface the same smoothness that the plate filters do. In a very general way, the Neyrpic Wave Filter consists of obstacles placed in the water, in such a way that the total frontal surface that is presented to the wave or its reflection is very small as compared to the total cross-sectional area - of the order of 1 to 10 for example - in this way a dampening filter that is practically non reflecting itself is obtained.

The model being perfectly reflecting, returns this wave of 9 cm. amplitude toward the wave machine. In so doing it again passes through the filter and is reduced to 3 cm. before it reaches the wave machine. So we see that though both the model and wave machine are perfectly reflecting, the reflection cannot affect the experiments without a third crossing of the filter, that is to say with an amplitude reduced to 1 cm. Thus one can reduce the harmful effects of these multiple reflections by employing a filter that can easily be calibrated.

For brevity, in the fore-going reasoning, the principle of the superposition of a train of waves has been used, that is it has been assumed that the different reflected waves could move in the flume without mutually affecting each other.

One knows that this hypothesis conforms both to the laws of empirical evidence and theory of the first order, which theory permits the satisfactory calculation of most of the properties of moderately steep waves.

In the above it has been implied that the coefficient of dampening of the waves passing through the filter was independent of the amplitude. This assumption requires further discussion, but before proceeding, it is felt best that the experimental set-up used in the Neyrpic Laboratory be shown (fig. 3).

A wave flume was equipped with the filter as shown, a simple vane type wave machine, and at the other end of the flume an efficient aspossible wave amortisseur or damper (sloping beach).

The amplitude of the wave was measured both before and after passing through the filter. In such a way, it has been ascertained that the amount of reduction depends on the absolute size of the amplitude. The relative or percentage of reduction becomes greater as the absolute amplitude becomes greater.

This phenomena can be easily explained when the theory of turbulence is considered.

In effect, if the flow were strictly laminary, the relative dampening of the waves would depend entirely on their absolute amplitude.

In reality, the movement of the water is turbulent. Hence in the equations of laminary flow, it is necessary to replace the viscosity factor by a fictitious factor which considers the turbulence and gives the absolute velocity.

The loss of energy is not then proportional to

velocity that is to say to amplitude, put probably to the square or to a similar function of velocity.

We were right in believing however, that in the case of normal use of the filter, the dampening effect is independent of the amplitude of the wave (27,9 and 3 cm. in the above example). In effect ; all these waves pass simultaneously in the filter, in the same state of turbulence. As a consequence, in the equations of laminary movement of **these three waves**, it is necessary to replace the true viscosity, by the total turbulence induced by the simultaneous action of all the waves passing through the filter.

INCONVENIENCE OF THE FILTER.

The use of such a filter is not completely without inconvenience. The principal of these are :

a) The necessity of having a wave machine powerful enough to produce waves two or even three times as great as those needed for the study.

b) The impossibility of studying waves at their limiting amplitude (crest at 120°). In effect, in this case, it would be necessary to produce waves of greater amplitude than their limiting amplitude which, of course, is impossible.

The first of these inconveniences, increases the price of the wave machine, it is fortunate however that in flume experiments of the usual scales, the wave machine rarely represents a considerable financial investment. (Besides, as will be shown below, the filter permits the use of a very economical type of wave machine).

The second of the above inconveniences is more serious. It can be noted that in practical studies, such a problem is but rarely analyzed, because it is rare that in the vicinity of the coasts that the ocean waves would reach their limiting steepness, and also, perfectly reflecting coasts, or structures are rare at sea, especially in regard to storm waves.

In all cases, this difficulty is not insurmountable. For, it is possible to build up the waves as they leave the filter, without changing the efficiency of the filter. This can be accomplished by having the walls of the flume downstream from the filter converge at a gentle angle. This artifice, studied and put into practice at Neyrpic, requires a long, large cross-sectional flume.

THE REGULATING ACTION OF THE FILTER.

Experience and theory join together to show that the relative diminution of amplitude of waves in passing the filter is greater as the wave length is shorter - varies inversely with the wave length. In more precise fashion, if a wave of length L is reduced in amount from 1 to n , then

a wave of length $\frac{L}{K}$ is reduced in amplitude from 1 to $n^{K^{3/4}}$.

For a wave machine, even of very rudimentary design, satisfying only the condition of having a periodic movement of period T , sends out a train of waves of period :

$$T, \frac{T}{2}, \frac{T}{3}, \dots, \frac{T}{p}$$

that is with wave length of :

$$L, \frac{L}{4}, \frac{L}{9}, \dots, \frac{L}{p^2}$$

(for sufficient depths and beyond the range of the capillary ripple effect).

The presence of these harmonics gives the wave a very irregular appearance (1) making difficult the precise measurement of its characteristics. It equally forbids the precise verification of theoretical equations.

The filter almost eliminates totally these parasites. Formula 1 easily permits their calculation.

It is seen in effect from this formula, that if

the amount of reduction $\frac{1}{n}$ is $\frac{1}{2}$ for the fundamental wave, it will be :

(1) The fact that the parasitic harmonics are harmonics of time ($\frac{T}{2}, \frac{T}{3}$ etc...) and not these of space ($\frac{L}{2}, \frac{L}{3}$ etc...) just about shows in the point of view of the given theory, that the only element of periodicity imposed on the system is the period of the wave machine.

Besides, this conclusion seems well verified by observation. It takes into account in particular the characteristic aspects of the waves produced by the poorer type of wave machine or by good wave machines badly used. It is known that such waves seem to have **two crests**. This impression arises from the fact that at each fundamental wave of length L there is room for two waves with length $\frac{L}{4}$. Now this parasitic wave, however feeble its relative amplitude considering its feeble wave length, gives relatively important steepness (for an amplitude four times less, for example, the steepness of the wave of a length of $\frac{L}{4}$ is still four times stronger than for the fundamental wave). It is this great steepness that make short harmonics so apparent.

$$\frac{1}{7,1} \text{ for the first harmonic,}$$

$$\frac{1}{36,8} \text{ for the second,}$$

and if the total reduction $\frac{1}{n}$ is $\frac{1}{3}$ for the fundamental wave, it will be :

$$\frac{1}{22,4} \text{ for the first harmonic,}$$

$$\text{and } \frac{1}{302} \text{ for the second, etc...}$$

It is seen that even though a mediocre wave is sent from the wave machine, an excellent wave is achieved. This circumstance permits the use of very rustic wave machines. A financial saving here compensates very largely for the extra power needed because of the use of the filter.

There is an analogy between the functioning of the filter in regulating the wave, and the natural regulation storm waves are subjected to. These waves in crossing hundreds and even thousands of kilometers, lose their short harmonics (those most vulnerable to dying out). They become, then, the long smooth swell so well known to mariners. The few meters of filter play in a condensed form, the same role as the immense spaces of the sea.

APPLICATION TO MODELS OF 3 DIMENSIONS (models of ports, etc...).

In the experiments in three dimensions, the danger of parasitic reflection is most often less serious than in a flume. In effect, the spreading out of the waves bring about, in general, an appreciable loss of reflected energy. When the models being studied are not extremely reflecting, it is sufficient in almost all cases to take the precaution of placing dampeners along all the walls of the model basin which do not correspond to the natural limits of the water, or for which it is not necessary to keep a reflecting ability. This last device permits even the study of very reflective models, providing for the con-

considerable spreading out of reflected waves (see fig. 4).

This solution is rather onerous for it requires the construction of basins much larger than the model. On the other hand, the use of the filter permits the reduction of the dimensions of the basin to the strict minimum.

The disposition of a reflecting model is given in fig. 5.

It is seen that the combined employment of filter and dampeners along the wall permits a well defined wave exempt from all parasitic agitation being sent towards the model. For three dimensional models more than for flume models, it would seem useless, even harmful, to cling to a very regular wave. In effect nature is far from showing such regularity, and one is tempted to find more conformity to the real more or less chaotic state which results from the free play of the reflections. In effect, this is not the case although this chaotic state can appear to the eye a good imitation of nature, it has in reality two redhibitory faults.

First, it would be almost impossible to make comparable studies between them and to define, with some precision, to which wave corresponds the study being made.

Next, this resemblance between the tormented appearance of the sea and that of the model where the water would be agitated in a disorderly fashion, only exists for a superficial observer. In effect, the disorder of nature is not produced to scale but is replaced by another disorder (very often uncontrolled and incontrollable) in which the effects can be extremely different.

Finally, such a irregularity would be desirable only if it reproduced to scale the condition of the sea. To realize this is very difficult if not impossible.

But fortunately, the study of real waves permits a considerable simplification. In effect, except for very rare cases, that of waves due uniquely to a local wind (they are then of minimum amplitude) and that of the superposition of different, original waves (then the effect can be studied separately on the model) the wave has a well defined direction of propagation. There, like in so many other domains, nature masks, under an irregularity more apparent than real, an organized will. In a positive way, it can be said that the real wave which properly speaking

doesn't have a unique rigorously defined direction of propagation, can be considered as the result of a group of waves whose direction of propagation comprises a very narrow angle (1). Whatever the error caused by assembling all three composites into a simple direction - that is replacing the real wave with a rigorously cylindrical wave, it is practically negligible. Besides, this artifice allows mastery of the phenomena and gives precise characteristics to the wave under study.

In order, to be complete it will be underlined again that the irregular appearance of the sea is accentuated by the presence of superficial disturbances caused by local winds. These disturbances are not reproduced in the model, but

even if they are important to the spectator, their dangerous or destructive effect is negligible.

CONCLUSION.

In resume, it is seen that the Neyrpic Filter presents two essential advantages.

Firstly, it permits the suppression or reduction of the troublesome effect of the successive reflections which do not exist in nature.

Finally, it permits the production of very regular waves with rustic equipment.

Having such waves is indispensable when they concern theoretical studies, and even in practical studies, it has the very considerable advantage of allowing the exact reproduction of the tests time and again, and allows the measurement of the wave under the most favorable condition.

(1) This can be shown from aerial photos.