

Chapter 7

ETUDE DU COEFFICIENT DE REFLEXION D'UNE HOULE SUR UN OBSTACLE CONSTITUE PAR UN PLAN INCLINE

L. Greslou et Y. Mahe

Ingénieurs au Laboratoire Dauphinois d'Hydraulique

INTRODUCTION -

Parmi les nombreux facteurs qui participent à l'érosion des rivages, la houle est sans conteste l'agent destructeur le plus dangereux ; aussi la protection d'une côte se ramène-t-elle le plus souvent à la construction d'un dispositif permettant de dissiper l'énergie des vagues.

Il est universellement connu que pour atteindre ce but, la solution la plus efficace consiste à faire déferler la houle. Mais la turbulence engendrée par ce déferlement risque elle-même de provoquer une érosion importante dans la zone où se produit le phénomène. L'idéal est donc, en principe, d'obtenir une dissipation d'énergie aussi progressive que possible ; ce résultat peut être obtenu lorsque les vagues viennent mourir sur un plan incliné de pente très douce.

Sur la plage ainsi constituée, une partie de l'énergie incidente est alors réfléchiée par l'obstacle, mais l'interférence des ondes réfléchies et incidentes occasionne au voisinage immédiat une agitation d'autant plus importante que la plage a une pente plus raide.

On sait en effet qu'une houle attaquant normalement une paroi verticale s'y réfléchit théoriquement en totalité et crée devant ce mur un clapotis dont l'amplitude peut être alors double de l'amplitude de la houle incidente.

Si par contre, en raison en général de la pente des fonds au voisinage immédiat de cette paroi, la houle atteint précisément sa cambrure limite en attaquant l'obstacle, celui-ci peut encaisser des efforts très importants dus au déferlement brutal des lames en arrivant à son contact, phénomène appelé couramment "gifle".

Il peut donc paraître intéressant de se faire une idée précise de la fraction d'énergie que peut perdre la houle en se propageant sur un plan incliné.

Or, on peut considérer que lorsque la houle rencontre un obstacle, paroi verticale, talus ou plage, l'énergie qu'elle transporte se fractionne de la façon suivante :

- 1) une partie se dissipe par turbulence à l'intérieur de l'eau et tout spécialement dans le déferlement ;
- 2) une partie se dissipe par frottement au contact de la paroi en raison de la rugosité de celle-ci ;
- 3) une autre partie se dissipe également par frottement à travers le massif dans le cas d'un ouvrage perméable ;
- 4) une partie se transmet soit à travers l'obstacle s'il est perméable, soit au-dessus de lui s'il peut être franchi ;
- 5) une dernière partie enfin est réfléchiée par l'obstacle et se propage en sens inverse de la houle incidente en se superposant à celle-ci. La rencontre de ces deux houles de sens contraire participe d'ailleurs à la dissipation interne signalée ci-dessus au premier paragraphe.

Nous nous occuperons ici essentiellement de cette fraction de l'énergie pouvant être réfléchiée par l'obstacle.

Malgré l'appellation courante de "*pouvoir réfléchissant d'un ouvrage maritime*" nous verrons que le coefficient de réflexion de la houle sur un obstacle déterminé n'est pas un invariant, mais que sa valeur peut, au contraire, varier dans de larges proportions avec les caractéristiques de la houle.

Ce problème qui est lié à la conception des ouvrages maritimes a déjà donné lieu à de nombreuses études et publications. Parmi celles-ci, nous mentionnerons tout spécialement l'article de M. MICHE, dans lequel l'auteur expose un mode de calcul du pouvoir réfléchissant d'un ouvrage maritime.

C'est l'exposé de quelques essais effectués sur cette question au Laboratoire Dauphinois d'Hydraulique qui fait l'objet de cette communication.

DESCRIPTION DES ESSAIS -

L'étude dont nous allons donner les résultats a porté essentiellement sur la mesure du coefficient de réflexion d'une houle de caractéristiques variables, attaquant normalement un plan incliné lisse dont on a fait varier la pente au cours des essais.

Ceux-ci furent effectués dans un canal vitré de 30 m de long et de 0,60 m de large, équipé d'un générateur à houle constitué par un volet battu oscillant autour de sa génératrice horizontale inférieure

(figure 1). Des jeux de filtre (système breveté) permettaient de régulariser la houle et d'absorber les réflexions provoquées par l'obstacle qui revenant sur le batteur auraient produit au bout de peu de temps, dans le canal, une agitation très désordonnée.

Les plans inclinés étaient constitués par une chape lisse en ciment, de pente uniforme. Au cours des essais furent réalisées les pentes 30/1, 20/1, 10/1, 5/1, 4/1, 3/1, 2/1, 3/2, 1/1, 1/2 et la paroi verticale.

La profondeur d'eau a été maintenue à 0,60 m pendant toute l'étude.

Les houles reproduites avaient des périodes comprises entre 0,8 sec. et 1,6 sec. et pour chacune des périodes étudiées, toute une gamme d'amplitude fut réalisée de manière à explorer des cambrures variant de 0 à 5 %.

Il n'a pas été possible de donner des résultats valables pour des cambrures supérieures, car on observait alors des phénomènes d'instabilité ou de balancement dans le canal rendant ces mesures trop imprécises.

DETERMINATION DU COEFFICIENT DE REFLEXION -

La mesure de l'agitation était effectuée grâce à un enregistreur graphique de houle construit et mis au point au Laboratoire. L'organe détecteur était une sonde à capacité constituée par un certain nombre de spires de fil de cuivre émaillé, l'émail jouant le rôle du diélectrique, le cuivre et l'eau réalisant les deux plaques du condensateur.

Etant donné les difficultés rencontrées dans certains cas pour repérer exactement les noeuds et les ventres du clapotis partiel, la mesure fut effectuée de façon continue sur une certaine longueur du canal en déplaçant le capteur le long d'un rail selon l'axe longitudinal du canal (figure 1).

Le dépouillement de l'enregistrement dont une reproduction est portée sur la figure 2 était effectué en déterminant l'amplitude aux ventres A et l'amplitude aux noeuds B, en prenant la moyenne entre les valeurs mesurées au trois ou quatre premiers ventres et premiers noeuds à partir de l'ouvrage.

Dans de nombreux cas, on pouvait en déduire directement la valeur du coefficient de réflexion, qui est par définition le rapport entre l'amplitude de l'onde réfléchie et celle de l'onde incidente $2a'/2a$ en considérant que ce rapport était égal à $\frac{A - B}{A + B}$. Cependant une étude

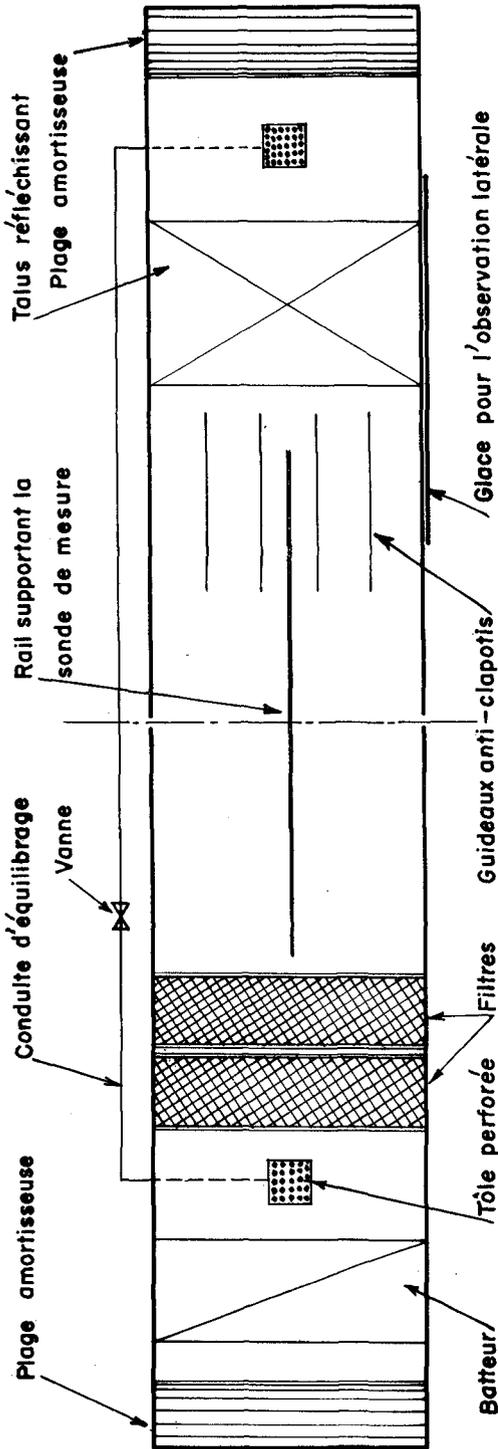


Fig. 1. Schéma de l'installation d'essais

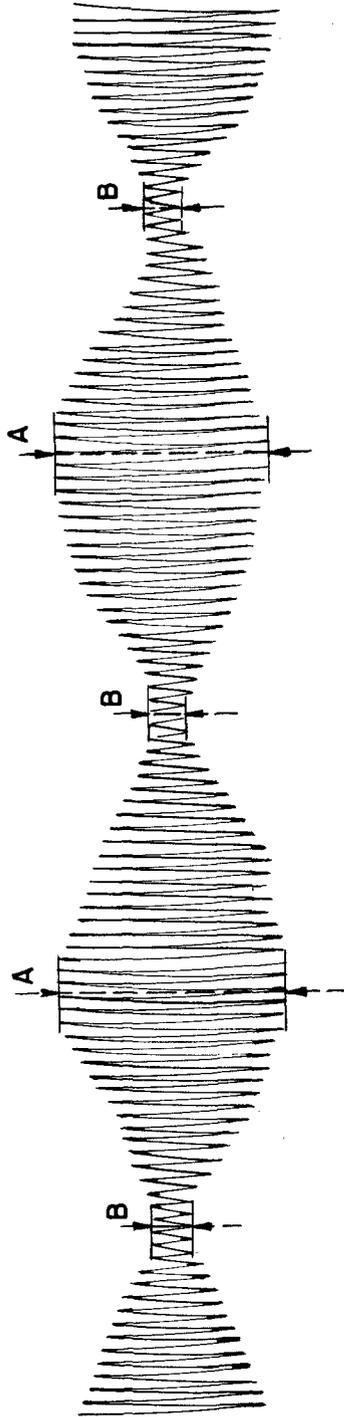


Fig. 2. Exemple d'enregistrement obtenu

de M. CARRY sur le clapotis partiel, dans laquelle l'auteur pousse le calcul jusqu'au deuxième ordre, montre la nécessité de tenir compte des termes de deuxième ordre lorsque l'énergie réfléchie devient importante. Nous avons donc déterminé dans ce cas les valeurs du rapport $\frac{2a'}{2a}$ en utilisant l'abaque établi par M. CARRY.

RESULTATS EXPERIMENTAUX -

Pour chacune des pentes étudiées, les points expérimentaux obtenus ont été reportés sur un graphique donnant le pouvoir réfléchissant de ce plan incliné, en fonction de la cambrure de la houle incidente.

Celle-ci étant mesurée pour une profondeur de 0,60 m, la cambrure correspondante $\gamma = \frac{2a}{L}$ n'était donc égale à la cambrure en profondeur infinie γ_0 que pour les faibles périodes étudiées. Nous avons, de ce fait, procédé à la correction nécessaire pour les périodes plus longues de manière à rapporter toutes les valeurs du coefficient de réflexion aux caractéristiques de la houle en profondeur infinie.

On sait que pour une période déterminée T , la longueur d'onde L de la houle est donnée en fonction de la profondeur h par la formule :

$$L = \frac{g T^2}{2\pi} \operatorname{th} \frac{2\pi h}{L}$$

ce qui se réduit pour la profondeur infinie à :

$$L_0 = \frac{g T^2}{2\pi}$$

Quant à l'amplitude $2a_0$ en profondeur infinie, pour une houle de période T , elle peut être obtenue à partir de l'amplitude mesurée en un point de profondeur donnée à l'aide de la "théorie énergétique" suffisamment approchée, qui suppose que le débit d'énergie à travers un plan vertical est constant. On obtient alors la formule :

$$\left(\frac{2a}{2a_0}\right)^2 = \frac{1}{\operatorname{th} m h \left(1 + \frac{2 m h}{S h 2 m h}\right)}$$

avec :

$$m = \frac{2\pi}{L}$$

Les valeurs ainsi obtenues pour les différentes périodes reproduites sur le modèle, c'est-à-dire comprises entre 0,8 sec. et 1,6 sec.

ETUDE DU COEFFICIENT DE REFLEXION D'UNE HOULE SUR UN OBSTACLE CONSTITUE PAR UN PLAN INCLINE

73

étaient en général assez groupées comme le montre la figure 3 reproduisant le nuage de points expérimentaux correspondant au plan incliné de pente 3/1 .

Pour les pentes plus raides, la dispersion était un peu plus prononcée, mais il fut toujours possible de tracer avec une approximation suffisante une courbe moyenne au milieu des points expérimentaux.

Les valeurs du coefficient de réflexion obtenues pour les différentes périodes ne permirent pas de mettre en évidence pour la gamme des périodes essayées, une influence sensible de ce paramètre, M. HEALY arrive du reste à la même conclusion après avoir effectué récemment des essais limités, il est vrai, à une cambrure de 1 %. Il semble donc que la houle puisse être très correctement caractérisée dans ce cas par sa cambrure.

Nous avons donc porté sur le même graphique les courbes donnant pour chacune des pentes étudiées le pouvoir réfléchissant de celles-ci en fonction de la cambrure de la houle (figure 4).

Il nous a paru intéressant de présenter finalement les résultats sous la forme d'un graphique donnant la réflexion de la houle en fonction de la pente pour chaque cambrure, c'est-à-dire de couper par les plans d'égale cambrure la surface gauche donnant les variations du coefficient de réflexion en fonction de la pente et de la cambrure (figure 5).

INTERPRETATION DES RESULTATS -

On peut tout d'abord dégager de ces graphiques les deux lois suivantes :

1) pour une pente de talus donnée, le pouvoir réfléchissant de ce talus diminue lorsque la cambrure augmente ;

2) une houle de cambrure donnée se réfléchit d'autant plus sur un plan incliné que la pente de celui-ci est plus raide.

La première loi exprime qu'une houle très plate peut encore se réfléchir de façon importante sur une plage en pente douce, alors que pour une houle plus cambrée dissipant la majeure partie de son énergie dans le déferlement, la quote part de l'énergie incidente donnant lieu à réflexion est plus réduite.

Pour les pentes très douces cependant, telles que 10/1 , 20/1 , 30/1 , analogues à celles que présentent fréquemment les plages naturelles, le pouvoir réfléchissant de celles-ci est sensiblement constant dès que la cambrure de la houle devient supérieure à 1 % . Sa valeur n'est cependant pas nulle, mais en général inférieure à 5 % .

D'autre part, pour les pentes très raides, les houles très cambrées elles-mêmes ne déferlent pas. Cependant une réflexion presque totale n'est observée qu'avec des houles très plates et le coefficient de réflexion, quoique toujours très élevé, décroît cependant quand la cambrure augmente. Ce phénomène a été observé de même dans le cas de la paroi verticale et peut s'expliquer par la plus grande turbulence engendrée lorsque la houle arrive au contact de la paroi.

Enfin, pour les pentes intermédiaires comprises entre 5/1 et 1/1, correspondant aux pentes des talus des ouvrages maritimes, le pouvoir réfléchissant varie de façon très importante avec la cambrure et on observe un passage sensiblement continu du phénomène de clapotis pour les houles plates au phénomène de déferlement pour les houles plus cambrées.

La deuxième loi, telle qu'elle a été énoncée est évidemment bien connue, mais il est intéressant de noter que pour les cambrures faibles, la variation du coefficient de réflexion est très rapide pour des variations de pente faibles dans la zone des talus de pentes assez douces. Pour une cambrure de 0,5 % par exemple, le coefficient de réflexion qu'on a trouvé égal à 14 % pour une pente de 10/1, atteint la valeur 90 % pour une pente intermédiaire entre 4/1 et 3/1. L'allure des courbes d'égale cambrure dans cette zone est de ce fait très peu inclinée par rapport à la verticale, ce qui se traduit par une certaine imprécision dans leur tracé. Le phénomène physique correspondant est en effet très turbulent, et occasionne en conséquence une plus grande dispersion des points expérimentaux dans cette zone.

INFLUENCE DE LA RUGOSITE -

Le cas d'un plan incliné lisse est évidemment assez schématique et si les graphiques établis précédemment présentent l'intérêt de préciser les lois de variations du coefficient de réflexion de la houle en fonction des caractéristiques de celle-ci et de la pente de l'obstacle, ils sont cependant insuffisants pour permettre de déterminer a priori le pouvoir réfléchissant d'une plage ou d'un talus naturel.

En effet, qu'il s'agisse d'une plage ou du parement d'un ouvrage maritime, la surface en contact avec la houle peut très rarement être considérée comme lisse et imperméable. Dans sa propagation sur l'obstacle, la lame perd donc une partie de son énergie d'une part par frottement, d'autre part par transmission, à travers le massif. La fraction d'énergie qui se réfléchit en est de ce fait diminuée.

Par conséquent, les essais précédents demanderaient à être complétés par toute une série d'expériences au cours desquelles on ferait varier systématiquement, d'une part la rugosité de la paroi en la réalisant cependant imperméable, d'autre part sa perméabilité pour une rugosité donnée. On voit qu'une telle étude risque d'être très longue et très délicate.

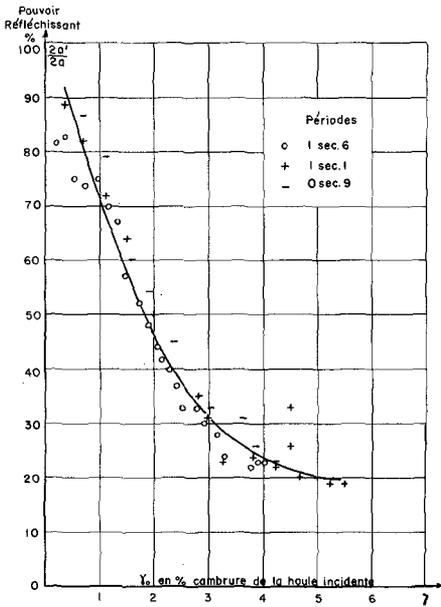


Fig. 3. Pouvoir réfléchissant d'un talus de pente 3/1.

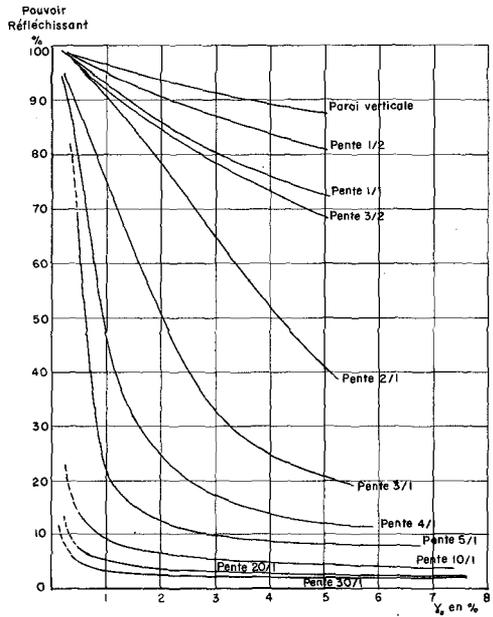


Fig. 4. Pouvoir réfléchissant de plans inclinés lisses de diverses pentes en fonction de la cambrure de la houle en profondeur infinie.

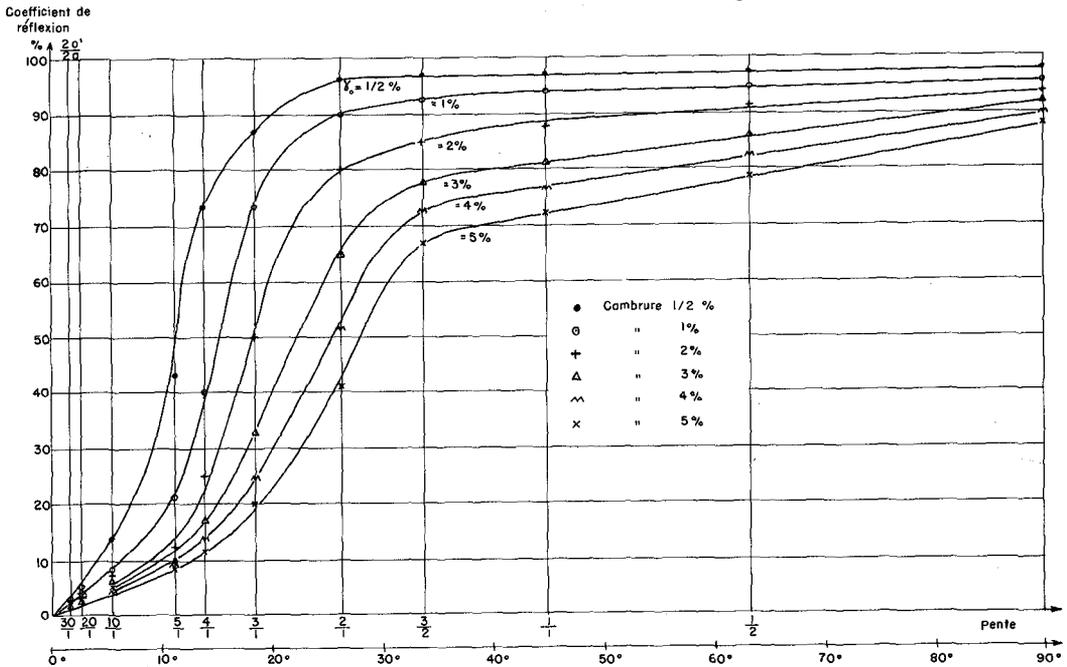


Fig. 5. Pouvoir réfléchissant d'un plan incliné lisse pour diverses cambrures de houles en profondeur infinie en fonction de la pente de l'obstacle

Au cours des très nombreux essais de stabilité effectués dans notre Laboratoire pour des ouvrages de profils très divers, nous avons été amenés à plusieurs reprises à effectuer des mesures de coefficient de réflexion. Malheureusement, les carapaces des ouvrages considérés n'avaient pas la plupart du temps les caractéristiques simples que nécessiterait une étude systématique. Dans la partie active de cette carapace, telle que la définit M. MICHE, c'est-à-dire celle obtenue en portant de part et d'autre du niveau moyen la valeur de l'amplitude de la houle (ce qui correspond approximativement au double de la zone comprise entre le creux et la crête), il existe souvent plusieurs pentes différentes de talus, la rugosité et la porosité elles non plus ne sont pas toujours homogènes, (le parement étant constitué par des blocs artificiels dans la partie supérieure et des enrochements à la partie inférieure). Enfin, pour des houles de tempête, l'ouvrage peut être franchi, ce qui augmente la fraction d'énergie transmise.

Malgré ces difficultés, nous avons essayé d'utiliser quelques-uns de ces résultats. Nous avons choisi évidemment ceux pour lesquels la détermination du coefficient de réflexion avait été faite de la façon la plus systématique et qui correspondaient aux études portant sur le réglage du pouvoir réfléchissant des ouvrages lors de leur reproduction par éléments monoblocs à très petite échelle. La réalisation d'un modèle d'ensemble pour l'étude de l'agitation dans un port oblige en effet à adopter des échelles comprises entre le 1/100 et le 1/200. A des échelles aussi petites, il n'est pratiquement plus possible de réaliser les ouvrages conformément à la réalité en reproduisant en similitude les différentes couches de blocs. On a alors recours à des éléments monoblocs moulés qui de ce fait sont totalement imperméables. La fraction d'énergie transmise à travers le massif se trouve donc annulée et on peut craindre dans certains cas que le pouvoir réfléchissant de l'ouvrage en soit de ce fait augmenté par rapport à celui de l'ouvrage réel.

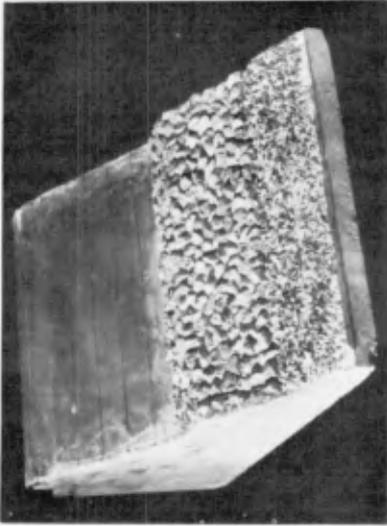
De plus, l'effet propre à l'influence de l'échelle est également susceptible d'intervenir pour modifier ce facteur. Ceci peut donc conduire dans certains cas à corriger cette erreur en augmentant artificiellement la rugosité de la carapace de l'ouvrage.

Des études effectuées à ce sujet dans notre Laboratoire, nous avons extrait les résultats d'essais correspondant, d'une part à trois profils de rugosités très différentes parmi ceux envisagés pour les jetées de la Base Navale de MERS EL KEBIR près d'ORAN en Algérie, et d'autre part le profil de la jetée MUSTAPHA du port d'ALGER.

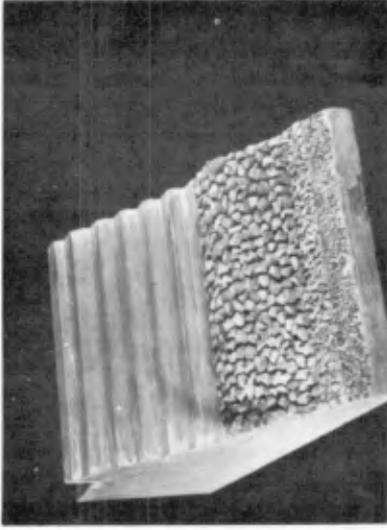
Les essais ont porté d'une part sur des maquettes d'ouvrages réalisés à l'échelle du 1/50 en respectant la similitude des différentes catégories de blocs, d'autre part à l'échelle du 1/200 pour les ouvrages de MERS EL KEBIR et du 1/150 pour celui d'ALGER, les maquettes étant alors constituées par un élément monobloc.

Nous ne retiendrons pour notre exposé que les résultats correspondant à ces maquettes monoblocs car elles présentent l'avantage

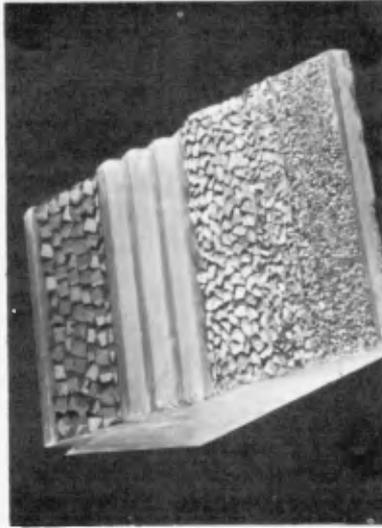
....



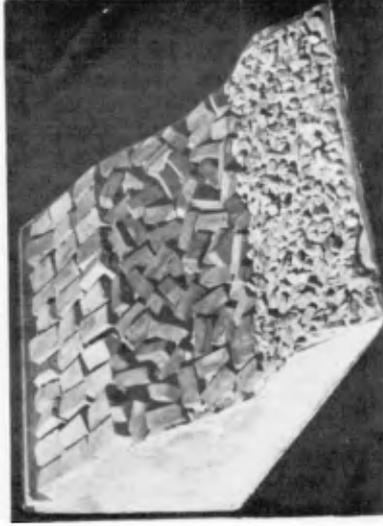
a. Mers-el-Kebir
Projet de brise - lames Nord



b. Mers-el-Kebir
Projet pour la jetée Est



c. Mers-el-Kebir
Jetée Est, profil peu réfléchissant



d. Alger
Jetée de Mustapha

Fig. 6. Maquettes d'ouvrages maritimes dont le pouvoir réfléchissant a été étudié

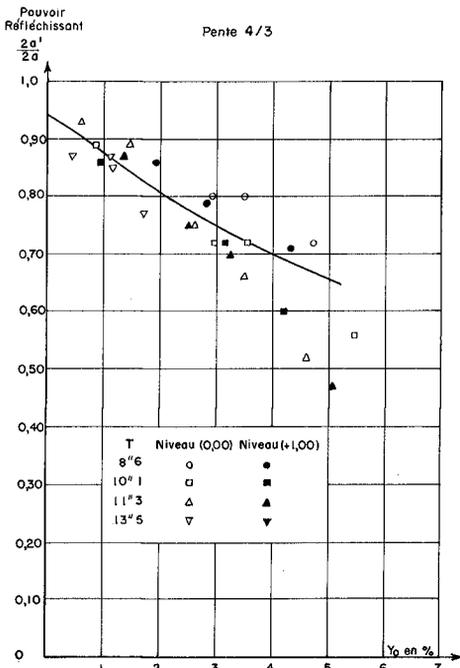


Fig. 7. Pouvoir réfléchissant d'une maquette d'un profil projeté pour le brise-lames Nord de la Base Navale de Mers-el-Kebir.

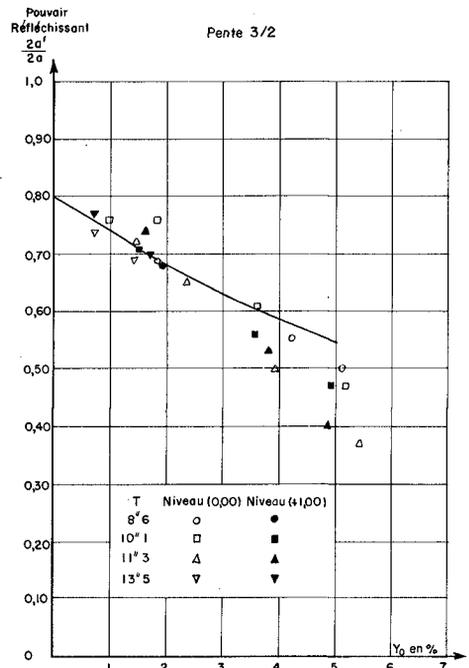


Fig. 8. Pouvoir réfléchissant d'une maquette du profil projeté pour la jetée Est de la Base Navale de Mers-el-Kebir

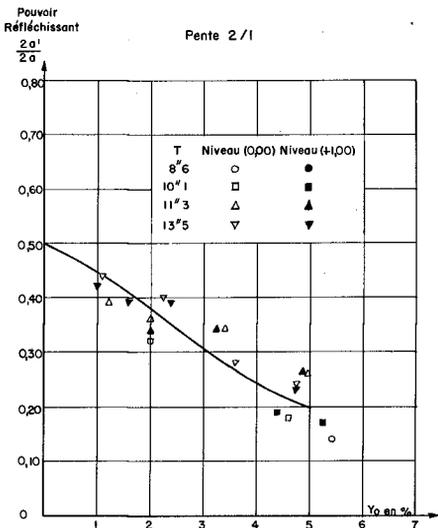


Fig. 9. Pouvoir réfléchissant d'une maquette du profil dit "peu réfléchissant" de la jetée Est de la Base Navale de Mers-el-Kebir

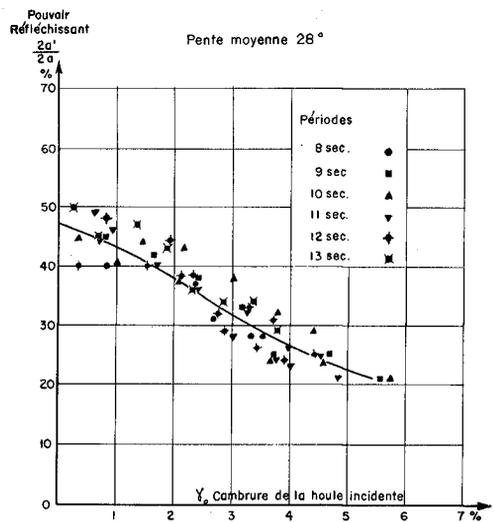


Fig. 10. Pouvoir réfléchissant d'une maquette de la jetée de Mustapha du port d'Alger.

d'éliminer le facteur perméabilité, ceci peut donner des idées fausses sur la valeur du coefficient de reflexion de l'ouvrage considéré mais ces maquettes présentent cependant l'intérêt de fournir des résultats sur l'influence propre de la rugosité sur le coefficient de réflexion d'une paroi inclinée. On trouvera sur la figure 6 les photographies des maquettes ayant été réalisées pour ces essais à petite échelle.

Nous avons donc porté sur les graphiques des figures 7, 8, 9 et 10 analogues à celui de la figure 3 les points expérimentaux obtenus pour ces quatre profils. La courbe tracée sur chacun de ces graphiques n'est pas une courbe moyenne mais la courbe obtenue à partir des graphiques précédemment tracés pour les plans inclinés lisses. On a en effet déduit de ceux-ci la courbe correspondant à la pente moyenne de la partie active de l'ouvrage et on a cherché par quel coefficient il fallait multiplier les ordonnées pour la faire coïncider avec la courbe moyenne passant au milieu des points expérimentaux. Les coefficients obtenus sont :

- pour la maquette du profil projeté pour le brise-lames Nord de MERS EL KÉBIR, à parement assez lisse (pl.7).... 0,94
- pour la maquette du profil projeté pour la jetée Est de MERS EL KEBIR, à parement en escalier, donc assez rugueux (pl. 8) 0,80
- pour la maquette du profil de la jetée Est de MERS EL KEBIR, avec blocs en vrac à la partie supérieure (pl.9). 0,50
- pour la maquette du profil du port d'ALGER, avec blocs en vrac sur la majorité de la partie active (pl. 10) ... 0,47

Notons que les deux premiers profils de MERS EL KEBIR sont franchis pour des cambrures dépassant 2 à 3 %, ce qui explique la diminution du pouvoir réfléchissant pour les fortes cambrures. On constate en effet que les points expérimentaux correspondants aux cambrures supérieures à 3 % se trouvent en moyenne en-dessous de la courbe tracée.

Ces quelques résultats nous permettent de conclure, malgré l'hétérogénéité de certaines de ces carapaces, que l'allure des courbes obtenues précédemment pour des surfaces lisses n'est pas modifiée par le facteur rugosité, mais qu'il faut affecter aux valeurs du coefficient de réflexion données par les graphiques des plans inclinés lisses, un coefficient de réduction variant de façon très importante avec l'état de rugosité de la surface.

Cette influence de la rugosité avait déjà été étudiée à notre Laboratoire par le Colonel DIXON du Corps of Engineer sur des plans inclinés imperméables de rugosités superficielles variables et une houle de cambrure 2 % .

Au cours de ces essais avait été mis en lumière l'importance considérable de ce facteur pour réduire le coefficient de réflexion.

....

INFLUENCE DE LA PERMEABILITE DE L'OBSTACLE -

Il est encore prématuré dans l'état actuel de nos expériences de tirer des conclusions sur l'influence de ce paramètre. Les résultats des mesures effectuées à l'échelle du 1/50 avec les quatre profils que nous venons d'examiner permettent de penser qu'elle est en général faible pour les ouvrages maritimes courants, comportant une carapace en blocs artificiels arrimés ou semi-arrimés, donc assez imperméable dans sa partie active.

La légère augmentation du coefficient de réflexion constatée en passant de l'échelle 1/50 à l'échelle plus petite, n'est sans doute pas due uniquement à ce facteur mais également à l'effet d'échelle qui influe vraisemblablement dans le même sens.

Par contre, nous procédons actuellement à une étude très détaillée sur l'énergie transmise par les ondes à travers un ouvrage. Nos essais ont été effectués jusqu'à présent pour établir les lois de ce phénomène, avec un massif en enrochements de granulométrie homogène, et de largeur constante, (ces enrochements étant emmagasinés entre deux tamis verticaux).

Des mesures concomitantes du coefficient de réflexion nous conduisent à penser que la largeur du massif ainsi constituée n'a qu'une influence très secondaire sur la valeur du coefficient de réflexion tant que cette largeur n'est pas trop petite.

Nous avons observé en effet dans la gamme de nos expériences, qu'en première approximation, le coefficient de réflexion d'un massif de largeur constante varie très peu lorsqu'on augmente cette largeur. L'énergie transmise mesurée à l'aval est évidemment plus faible mais par contre l'énergie dissipée par frottement à l'intérieur du massif augmente, de sorte que la somme de ces deux dernières fractions de l'énergie incidente reste apparemment assez constante.

COMPARAISON ENTRE CES RESULTATS ET LES COURBES DE M. MICHE -

Il nous a paru intéressant en terminant cet exposé de comparer les courbes que nos essais nous ont permis de tracer avec les courbes théoriques de M. MICHE.

Rappelons brièvement que celles-ci ont été tracées en considérant que la quote part théoriquement réfléchie R' , autrement dit le coefficient de réflexion d'une houle de cambrure γ_0 au large est donné par la formule :

$$R' = \frac{\gamma_{\max}}{\gamma_0}$$

γ_{\max} représente la valeur maximum de la cambrure au large d'une houle pouvant être, théoriquement, réfléchié totalement par le plan incliné considéré. Si nous appelons α l'angle que fait celui-ci avec l'horizontale γ_{\max} est donnée par la formule :

$$\gamma_{\max} = \sqrt{\frac{2\alpha}{\pi} \frac{\sin^2 \alpha}{\pi}}$$

Par conséquent, pour toutes les valeurs de γ_0 inférieures à γ_{\max} , on aurait théoriquement un coefficient de réflexion de 100 %. Les courbes équicambures obtenues dans le graphique donnant R' en fonction de α , ou de la pente $\cotg \alpha$ présentent donc un point anguleux pour $R' = 100\%$.

M. MICHE indique que pour obtenir le pouvoir réfléchissant effectif R d'un talus, il faut affecter la valeur précédente R' d'un certain coefficient ρ tenant compte de la nature de ce talus, coefficient apparemment indépendant de sa pente, et que M. MICHE estime de l'ordre de 0,8 à 0,9 pour des talus lisses.

$$R = \rho R'$$

La comparaison des courbes expérimentales que nous avons obtenues avec celles de M. MICHE nous conduit donc à formuler les remarques suivantes :

1) comme le supposait M. MICHE, le point anguleux n'a pas à proprement parler une existence physique, il se traduit cependant par un accroissement très net de la courbure d'autant plus marqué que la cambrure est plus faible ;

2) la valeur 100 % est également théorique car la dissipation d'énergie interne dans la houle et au contact avec la paroi réduit plus ou moins cette valeur, même dans le cas d'une paroi verticale. On observe cependant une quasi linéarité des courbes pour des pentes comprises entre 45° et 90°, les droites ascendantes obtenues étant d'autant plus voisines de l'horizontale que la cambrure est plus faible ;

3) en cherchant à faire coïncider les courbes théoriques avec nos courbes expérimentales, nous avons obtenu une concordance très acceptable pour les pentes comprises entre 5/1 et 2/1, en prenant pour ρ la valeur 0,65, ce qui est plus faible que la valeur avancée par M. MICHE, mais, quoique nos plans inclinés fussent constitués par des chapes en ciment lissé, il est vraisemblable que cela soit dû à la perte d'énergie par frottement à la paroi ;

4) pour les pentes plus raides, les courbes de M. MICHE se réduisent à l'horizontale 100 % pour la gamme des cambrures que nous avons

étudiées. Nous venons de voir que les courbes expérimentales présentent dans cette zone une partie sensiblement rectiligne mais qui n'est horizontale que pour des cambrures faibles. Il est donc impossible de déterminer dans ce cas une valeur de ρ .

5) enfin, pour les pentes plus faibles correspondant à la zone des plages, le coefficient de réflexion trouvé expérimentalement semble diminuer beaucoup plus lentement lorsque la cambrure augmente que ne l'indiquent les courbes de M. MICHE. L'allure des courbes diffère de façon trop sensible pour qu'on puisse envisager de trouver une valeur de ρ permettant une superposition suffisamment approchée.

En résumé, les courbes théoriques donneraient pour le cas particulier que nous avons étudié (plan incliné constitué d'une chape en ciment lisse) des valeurs du coefficient de réflexion très voisines de celles que nous avons trouvées expérimentalement pour la gamme des pentes comprises entre 5/1 et 2/1, en donnant au coefficient ρ de la formule de M. MICHE la valeur 0,65.

Par ailleurs, comme nous l'avons signalé précédemment, nos résultats expérimentaux pour des talus rugueux semblent bien confirmer les conclusions de M. MICHE, à savoir que la loi de variation du coefficient de réflexion R en fonction de la cambrure γ_0 , pour une pente donnée est représentée par la fonction :

$$R = \rho f(\gamma_0)$$

dans laquelle ρ est un coefficient ne dépendant que de l'état de rugosité de la surface du talus et $f(\gamma_0)$ la fonction obtenue pour les talus parfaitement lisses.

CONCLUSIONS -

L'étude expérimentale qui a été présentée dans cette communication a donc permis de définir la loi de variation du pouvoir réfléchissant d'un plan incliné pour toutes les cambrures couramment observées dans la nature.

Les graphiques présentés explorent toute la gamme des pentes depuis celles correspondant aux plages naturelles, jusqu'aux parements très inclinés de nombreux murs de défense en passant par les talus des ouvrages maritimes.

Evidemment ces résultats n'ont pas la prétention de fournir directement la valeur du pouvoir réfléchissant d'un ouvrage ou d'une plage pour une houle de caractéristiques données, car l'état de rugosité de la surface en particulier, peut le modifier dans de très fortes proportions. Il est cependant très intéressant de constater que la loi de variation de ce coefficient de réflexion semble rester la même à un facteur près caractérisant cette rugosité.

Dans le cas d'un obstacle lisse imperméable et non franchi pour lequel l'étude permet d'avoir une valeur de la fraction d'énergie réfléchie, on peut en déduire en première approximation par différence, la fraction d'énergie dissipée par turbulence interne, puisqu'il n'y a pas d'énergie transmise, et que le coefficient de rugosité est alors voisin de 1.

L'examen de ces graphiques met en outre en évidence qu'un rivage en pente douce qui constitue un très bon amortisseur de houle peut être cependant très réfléchissant pour des ondes longues et très plates qui sont souvent à l'origine des phénomènes de seiches dans les baies.

BIBLIOGRAPHIE

- M. MICHE -- *Le pouvoir réfléchissant des ouvrages maritimes exposés à l'action de la houle* - Annales des Ponts et Chaussées - Paris - Mai-Juin 1951
- M. J.SCHOEMAKER - J.TH. THUISSE - *Investigations of the reflexion of waves* International Association for Hydraulic structures Research (IAH SR) - Third meeting - Grenoble 1949
- J.LAURENT - W.DEVIMEUX - *Etude expérimentale de la réflexion de la houle sur les obstacles accorés* - Revue Générale de l'Hydraulique - Septembre-Octobre 1951 - n° 65
- G.F. DIXON - Thèse - *Contribution du modèle réduit à l'étude des aménagements portuaires - Influence de l'échelle sur l'amortissement, la réflexion et la diffraction de la houle* - Université de Grenoble 1949
- R.IRIBARREN CAVANILLES - G. NOGALES Y OLANO - *Protection des ports - Pénétration de l'agitation dans les ports ; moyens de la prévoir et de la combattre - Essais de Laboratoire* - XVII^e Congrès International de Navigation - Lisbonne 1949 - Section II - Communication 4
- R. IRRIBARREN CAVANILLES - C. NOGALES Y OLANO - *Talud limite entre la rotura y la reflexion de las holas* - Revista de Obras Publicas n° 2816 - Février 1950
- H. EPSTEIN - F.C. TYRRELL - *Design of rubble-mound breakwaters* - XVII^e Congrès International de Navigation - Lisbonne 1949 - Section II - Communication 4
- J.J. HEALY - *Wave damping effect of beaches. Proceedings* - Minnesota International Hydraulics convention - Minneapolis 1953
- C. CARRY - *Clapotis partiel* - La Houille Blanche Août-Septembre 1953

- M. MICHE - *Mouvements ondulatoires de la mer en profondeur constante ou décroissante* - Annales des Ponts et Chaussées - Paris 1944
- R. I. B. COOPER - M. S. LONGUET-HIGGINS - *An experimental study of the pressure variations in standing water waves* - Proceedings of the Royal Society - A. volume 206 - 1951

RESUME

STUDY OF THE REFLECTION COEFFICIENT OF A WAVE ON AN INCLINED PLANE

L. Greslou and Y. Mahe

This paper is intended to make a further contribution, based on laboratory experiments, to the many tests carried out to date on the problems of the reflecting capacity of an obstacle attacked by waves.

Systematic measurements made in a wave flume at the Laboratoire Dauphinois d'Hydraulique, with obstacles formed by plane surfaces inclined between 0 and 90 degrees, have made it possible to plot a graph showing the variation of the reflection coefficient for a wave approaching these obstacles in a normal direction, in relation to the slope of the latter and the shape of the wave.

It has also been possible to ascertain the effect of the wall roughness, because some tests were made with rock-filled breakwaters.

A comparison has been made between the experimental curves obtained in this way and Miche's theoretical curves. This has shown that the latter appear satisfactory, and it has made it possible to investigate some points with Miche himself thought should be clarified by tests in a laboratory.

A graph of this kind can be of great value for estimating the reinforcement of disturbance near sea structures. This disturbance often makes navigation and berthing difficult. But the full understanding of these curves can lead to the knowledge of whether a talus or a beach has a sufficiently gentle slope to efficiently protect a coastline by distributing the energy of waves before they reach the area which must be protected.