

# Transmission et réflexion de la houle par une digue formée de planches verticales

PAR

**T. Sawaragi**

Professeur

**K. Iwata**

Professeur auxiliaire

**J.-C. Pena**

Étudiant boursier

Département de Génie Civil; Université d'Osaka  
Osaka 565, Yamadakami, Suita, Japon.

## 1. Introduction

Il est bien connu que de plus en plus on recherche pour les digues, brise-lames et quais, des structures non seulement efficaces pour réduire la houle (mission principale) et durables, mais aussi d'un entretien facile.

Du point de vue de la durabilité, le béton a été le matériau le plus utilisé pour ce genre de structures jusqu'à présent, mais ces dernières années l'augmentation de la durabilité de l'acier, la rapidité d'exécution et la facilité d'entretien ont rendu possible son utilisation pour construire certains brise-lames et digues de transmission non nulle.

Cet article est consacré à l'étude théorique et expérimentale des caractéristiques hydrauliques d'une digue formée de planches ou poutres horizontales à section rectangulaire et dont l'axe principal est placé perpendiculairement à la direction d'avancement des lames.

## 2. Analyse théorique

### 2a) Coefficients de réflexion et transmission dans le cas d'une seule digue

Nous partons des hypothèses suivantes :

- 1) La houle est de petite amplitude.
- 2) Les houles ne font pas vibrer les planches ou poutres.
- 3) La différence de phase entre la houle transmise, la houle réfléchie et la houle incidente est suffisamment petite pour pouvoir la supposer nulle.
- 4) La largeur des poutres ou l'épaisseur des planches est petite comparée avec la longueur d'onde de la houle.

La figure 1 précise les notations employées

$\eta_i$  : houle incidente,  $\eta_R$  : houle réfléchie,  $\eta_T$  : houle transmise,

$\Phi_1$  : fonction potentielle de la houle composée par  $\eta_i$  et  $\eta_R$ ,

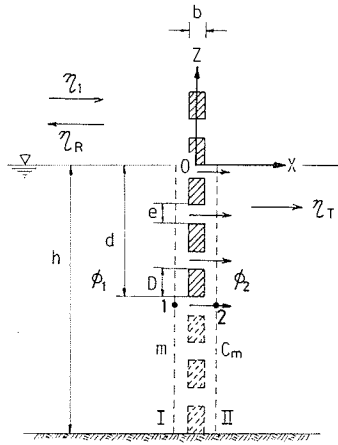
$\Phi_2$  : id. de la houle transmise,

$x, z$  : abscisse et ordonnée d'un point ; l'origine des coordonnées est à la surface de l'eau,

$\rho$  : masse volumique de l'eau,

$C_m$  : coefficient de débit (expérimental),

$h$  : profondeur d'eau au repos.



**1/ Notations employées**

On peut écrire pour les houles incidente, réfléchie et transmise les équations (1) :

$$\begin{aligned} \eta_i &= a \sin (kx - \sigma t) \\ \eta_R &= a \gamma_R \sin (kx + \sigma t + \hat{\gamma}_R) \\ \eta_T &= a \gamma_T \sin (kx - \sigma t + \hat{\gamma}_T) \end{aligned} \quad (1)$$

Avec  $\sigma = 2\pi/T$ ,  $a = H/2$  et  $k = 2\pi/L$  où  $T$  est la période des lames ;  $H$ , la hauteur et  $L$  la longueur d'onde à la profondeur  $h$ ,  $\gamma_R$  et  $\gamma_T$  sont les coefficients de réflexion et de transmission tandis que  $\hat{\gamma}_R$  et  $\hat{\gamma}_T$  sont les différences de phase que l'on peut supposer nulles d'après l'hypothèse 3), les fonctions potentielles sont par conséquent :

$$\phi_1 = \frac{a \sigma}{k} \frac{\cosh (kz + kh)}{\sinh kh} \cos (kx - \sigma t) - \frac{a \gamma_R \sigma}{k} \frac{\cosh (kh + kz)}{\sinh kh} \cos (kx + \sigma t) \quad (2)$$

$$\phi_2 = \frac{a \gamma_T \sigma}{k} \frac{\cosh (kz + kh)}{\sinh kh} \cos (kx - \sigma t) \quad (2')$$

On peut écrire aussi l'équation (3) (conservation de l'énergie)

$$\frac{P_1}{\rho g} + \frac{1}{2g} \left( - \frac{\partial \phi_1}{\partial x} \right)^2 + \frac{1}{g} \left( - \frac{\partial \phi_1}{\partial t} \right) = \frac{P_2}{\rho g} + \frac{1}{2g} \left( - \frac{\partial \phi_2}{\partial x} \right)^2 + \frac{1}{g} \left( \frac{\partial \phi_2}{\partial t} \right) + h_f \quad (3)$$

et l'équation (4) (conservation de la masse)

$$\int_{-h}^0 \left( - \frac{\partial \phi_1}{\partial x} \right)_{x=0} dz = \int_{-h}^0 \left( - \frac{\partial \phi_2}{\partial x} \right)_{x=0} dz \quad (4)$$

$$\text{où} \quad P_1 - P_2 = (\eta_i + \eta_R - \eta_T) \rho g \quad (5)$$

$$h_f \approx \epsilon_1 \frac{V^2}{2g} \quad (5')$$

$\epsilon_1$  : coefficient de perte d'énergie,

$V$  : vitesse de l'eau en traversant la digue.

Par ailleurs :

$$\cosh (kz + kh) \approx 1 + \frac{1}{2} (kz + kh)^2 + \frac{1}{4} (kz + kh)^4 \quad (6)$$

Si on introduit les valeurs des équations (5), (5') et (6) dans (3) et (4), on obtient l'expression (7) pour  $V$  (vitesse de l'eau en traversant la digue) :

$$V = \frac{1}{\epsilon_1} \sqrt{2g + \frac{2\sigma^2}{k} \frac{\cosh(kz + kh)}{\sinh kh} (\eta_i + \eta_R - \eta_T)} \quad (7)$$

La conservation de la masse exige aussi :

$$\int_{-d}^0 m C_m V dz + \int_{-h}^{-d} C V dz = \int_{-h}^0 \left( -\frac{\partial \Phi_2}{\partial x} \right) dz \quad (8) *$$

Si on introduit les équations (2') et (7) dans (8) on obtient finalement les coefficients de transmission et de réflexion.

$C_m$  et  $C$  sont des coefficients de débit qu'il faut déterminer expérimentalement. Nous avons fait l'hypothèse  $C = C_m$  pour simplifier le calcul.

On obtient  $\gamma_T$  et  $\gamma_R$  à partir d'une équation de second degré dont le coefficient de  $\gamma_T^2$  est  $a \sin \sigma t$ , et par conséquent dépend du temps. On peut adopter différentes définitions de  $\gamma_T$ , et le résultat sera un peu différent. Nous allons définir ce coefficient comme correspondant au moment où la crête de la lame traverse la digue, c'est-à-dire, quand  $\sin \sigma t = 1$ . On obtient ainsi les expressions (9) et (10) :

$$\gamma_T = \frac{2}{a} \left( -\epsilon_0^2 C_m^2 \xi^2 K + \sqrt{(\epsilon_0^2 C_m^2 \xi^2 K)^2 + a \epsilon_0^2 C_m^2 \xi^2 K} \right) \quad (9)$$

$$|\gamma_R| = 1 - \gamma_T \quad (10)$$

Les valeurs des variables de cette équation sont :

$$K = \left( \frac{k h}{\sigma} \right)^2 \left( g + \frac{\sigma^2}{k \sinh kh} + \frac{\sigma^2 (kh)^2 \zeta}{6k \sinh kh} \right) \quad ,$$

$$\xi = 1 + (d/h) (m - 1) \quad ,$$

$$\zeta = \frac{m (d/h)^3 - (1 - m) (1 - d/h)^3}{1 + (d/h) (m - 1)} \quad ,$$

$$\epsilon_0^2 = 1/\epsilon_1 \quad , \quad k = 2\pi/L \quad , \quad \sigma = 2\pi/T \quad .$$

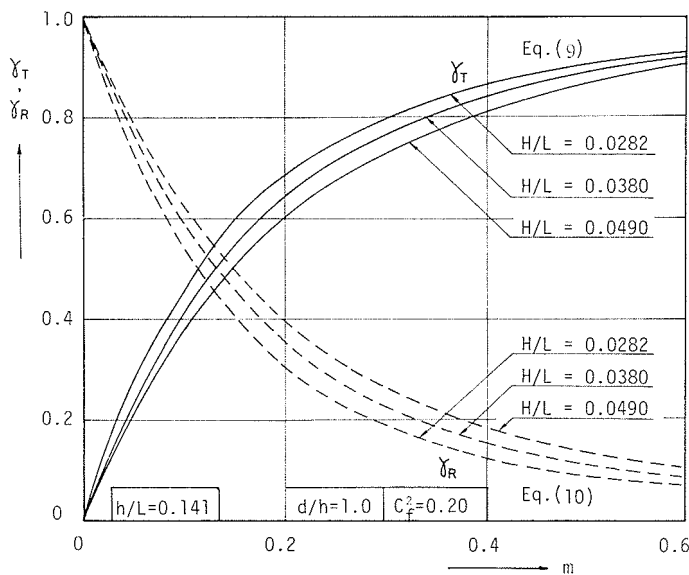
$\epsilon_0$  et  $C_m$  sont fonction de  $d/h$ ,  $m$ ,  $h/L$ , etc et leur expression est probablement très compliquée. Dans ce rapport, on a supposé pour  $\epsilon_0 C_m$  l'expression suivante :

$$\epsilon_0 C_m \approx C_f \left( 1 + 2\left(\frac{d}{h}\right) + 3\left(\frac{d}{h}\right)^2 \right)^{1/2} \quad ,$$

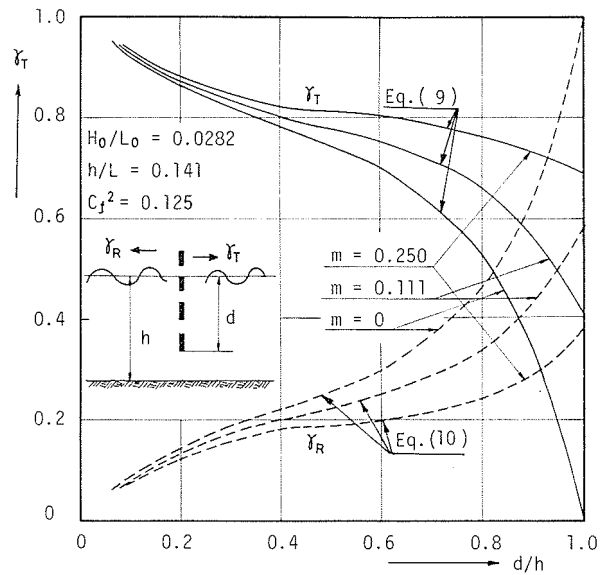
où le coefficient  $C_f$  doit être déterminé expérimentalement.

Dans les figures 2 et 3 on montre des exemples de calcul des équations (9) et (10).

(\*) Le cas  $m = 1$  équivaut à ne mettre aucune planche, c'est-à-dire à l'absence de digue.



2/ Relation entre  $m$ ,  $H/L$  et  $\gamma_T, \gamma_R$



3/ Relation entre  $m$ ,  $d/h$  et  $\gamma_T, \gamma_R$ .

## 2b) Coefficients de transmission et de réflexion dans le cas de deux digues

Nous allons étudier maintenant l'effet d'une seconde digue, formée comme la précédente de planches ou poutres horizontales, sur la transmission et la réflexion. Entre les deux rideaux a lieu un phénomène de résonance qui a une influence considérable spécialement sur la réflexion.

Nous emploierons pour représenter les houles la méthode du nombre complexe [1], une houle en un certain point est représentée par un nombre complexe dont le module est le maximum de la hauteur et dont l'argument est la différence de phase avec un autre point considéré comme origine et dont l'argument est nul.

On a par conséquent :

$$\text{houle incidente: } \vec{H}_I = H_I \exp(i\theta_I) \quad ,$$

$$\text{houle réfléchie: } \vec{H}_R = H_R \exp(i\theta_R) \quad ,$$

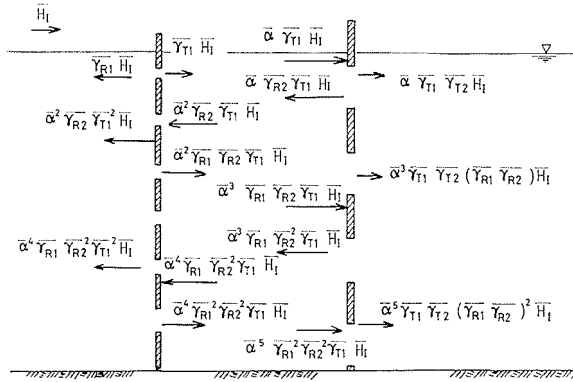
$$\text{houle transmise: } \vec{H}_T = H_T \exp(i\theta_T) \quad ,$$

$$\text{coefficient d'atténuation : } \vec{\alpha} = \alpha \exp\left(-i \frac{2\pi x}{L}\right) \quad ,$$

$$\alpha = \exp(-\epsilon x/L) \quad , \quad (\epsilon : \text{coefficient de frottement})$$

La houle incidente  $\vec{H}_I$  produit une première réflexion  $\vec{H}_I \vec{\gamma}_{R1}$ , et une transmission  $\vec{H}_I \vec{\gamma}_{T1}$ , cette houle arrive à la seconde digue transformée en  $\vec{H}_I \vec{\gamma}_{T1} \vec{\alpha}$ , où l'on obtient une première houle transmise  $\vec{H}_I \vec{\gamma}_{T1} \vec{\alpha} \vec{\gamma}_{T2}$ ; la réflexion de cette seconde digue produit la houle  $\vec{H}_I \vec{\gamma}_{T1} \vec{\alpha} \vec{\gamma}_{R2}$  qui arrive à la première multipliée par  $\vec{\alpha}$ , la transmission de cette houle à travers la première digue produit la seconde houle réfléchie  $\vec{H}_I \vec{\gamma}_{T1} \vec{\alpha}^2 \vec{\gamma}_{R2}$ , et ce processus continue à l'infini. Pour obtenir la réflexion totale, il faut composer toutes les réflexions partielles (fig. 4) :

$$\begin{aligned} \vec{H}_R &= \vec{H}_I \vec{\gamma}_{R1} + \vec{H}_I \vec{\gamma}_{T1}^2 \vec{\alpha}^2 \vec{\gamma}_{R2} + \vec{H}_I \vec{\gamma}_{T1}^2 \vec{\alpha}^4 \vec{\gamma}_{R2} \vec{\gamma}_{R1} + \vec{H}_I \vec{\gamma}_{T1}^2 \vec{\alpha}^6 \vec{\gamma}_{R2}^3 \vec{\gamma}_{R1} + \dots = \\ &= \vec{H}_I \vec{\gamma}_{R1} + \vec{H}_I \vec{\gamma}_{T1}^2 \vec{\alpha}^2 \vec{\gamma}_{R2} \left( 1 + \vec{\alpha}^2 \vec{\gamma}_{R1} \vec{\gamma}_{R2} + (\vec{\alpha}^2 \vec{\gamma}_{R1} \vec{\gamma}_{R2})^2 + \dots \right) = \\ &= \vec{H}_I \vec{\gamma}_{R1} + \vec{H}_I \vec{\gamma}_{T1}^2 \vec{\alpha}^2 \vec{\gamma}_{R2} \frac{1}{1 - \vec{\alpha}^2 \vec{\gamma}_{R1} \vec{\gamma}_{R2}} \end{aligned}$$



4/ Schéma de la transmission et de la réflexion.

et l'on obtient le coefficient de réflexion de l'ensemble :

$$\vec{\gamma}_R^* = \frac{\vec{H}_R}{\vec{H}_I} = \vec{\gamma}_{R1} + \frac{\vec{\gamma}_{T1}^2 \alpha^2 \vec{\gamma}_{R2}}{1 - \alpha^2 \vec{\gamma}_{R2} \vec{\gamma}_{R1}} \quad (11)$$

Le module de ce nombre complexe dépend de  $\epsilon, x/L, \gamma_{R1}, \theta_{R1}, \gamma_{T1}, \theta_{T1}, \gamma_{R2}, \theta_{R2}, \gamma_{T2}, \theta_{T2}$ . Dans ce cas d'un rideau de poutres horizontales, nous allons supposer, d'après l'hypothèse IV)  $\theta_{R1} = \theta_{R2} = \theta_{T1} = \theta_{T2} = 0$  ; par conséquent, les houles réfléchi et transmise ont la même phase que la houle incidente, mais la hauteur est multipliée par les coefficients de transmission ou de réflexion,  $\gamma_R$  ou  $\gamma_T$ , et l'équation (11) se simplifie en :

$$\vec{\gamma}_R^* = \gamma_{R1} + \frac{\gamma_{T1}^2 \gamma_{R2} \alpha^2 (\cos \frac{4\pi x}{L} + i \sin \frac{4\pi x}{L})}{1 - \gamma_{R1} \gamma_{R2} \alpha^2 (\cos \frac{4\pi x}{L} + i \sin \frac{4\pi x}{L})} \quad (12)$$

Le module de ce nombre complexe est :

$$\gamma_R^* = |\vec{\gamma}_R^*| = \sqrt{\frac{\gamma_{R1}^2 + \gamma_{R2}^2 \alpha^4 (\gamma_{R1}^2 - \gamma_{T1}^2)^2 - 2 \gamma_{R1} \gamma_{R2} \alpha^2 (\gamma_{R1}^2 - \gamma_{T1}^2) \cos \frac{4\pi x}{L}}{1 + \gamma_{R1}^2 \gamma_{R2}^2 \alpha^4 - 2 \gamma_{R1} \gamma_{R2} \alpha^2 \cos \frac{4\pi x}{L}}} \quad (13)$$

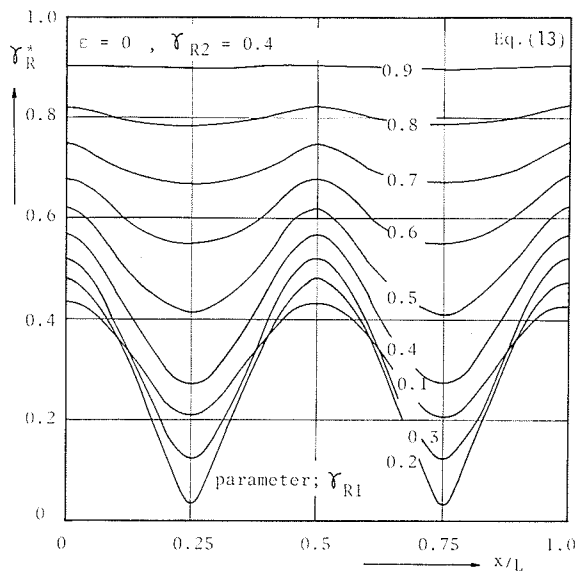
De la même façon, on obtient le coefficient de transmission :

$$\vec{\gamma}_T^* = \frac{\alpha \vec{\gamma}_{T1} \vec{\gamma}_{T2}}{1 - \alpha^2 \vec{\gamma}_{R1} \vec{\gamma}_{R2}} \quad (14)$$

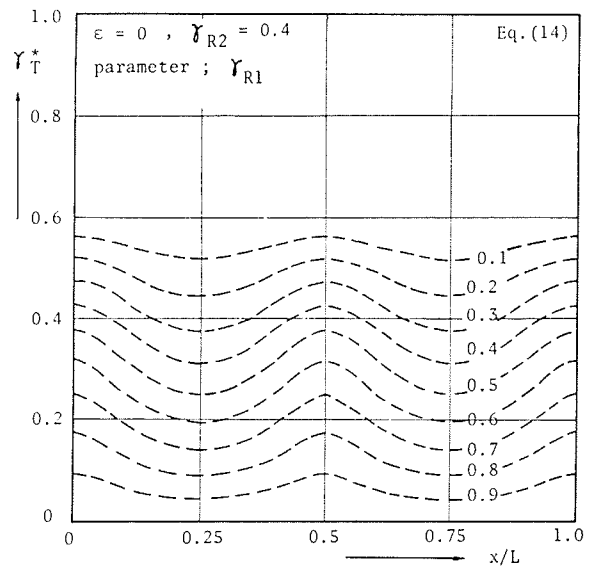
dont le module est :

$$\gamma_T^* = \frac{\alpha \gamma_{T1} \gamma_{T2}}{\sqrt{1 - 2\alpha^2 \gamma_{R1} \gamma_{R2} \cos \frac{4\pi x}{L} + \alpha^4 \gamma_{R1}^2 \gamma_{R2}^2}} \quad (15)$$

Les figures 5a et 5b donnent les valeurs théoriques de  $\gamma_T^*$  et  $\gamma_R^*$  en fonction de  $x/L$  et avec  $\gamma_{R1} = 0.4 \gamma_{T1} = 0.6 \alpha = \exp(-\epsilon x/L) = 1.0$  c'est-à-dire,  $\epsilon = 0.0$ . On a supposé aussi toujours  $\gamma_{R2} + \gamma_{T2} = 1.0$ . On voit un maximum pour  $x/L = n/2$  ( $n = 1, 2, 3, \dots$ ), c'est-à-dire  $x/L = 0.5, 1.0$ , etc ; le minimum a lieu pour  $x/L = (2n-1)/4$  ( $n = 1, 2, 3, \dots$ ), c'est-à-dire  $x/L = 0.25, 0.75$ , etc. Dans le premier cas, toutes les houles partielles ont une différence de phase nulle avec la première ; c'est pourquoi on obtient le maximum ; tandis que si  $x/L = 0.25$  la différence de phase entre la première houle et la troisième, la cinquième, etc, est nulle, mais vaut  $180^\circ$  entre ces houles et la seconde, la quatrième, etc.



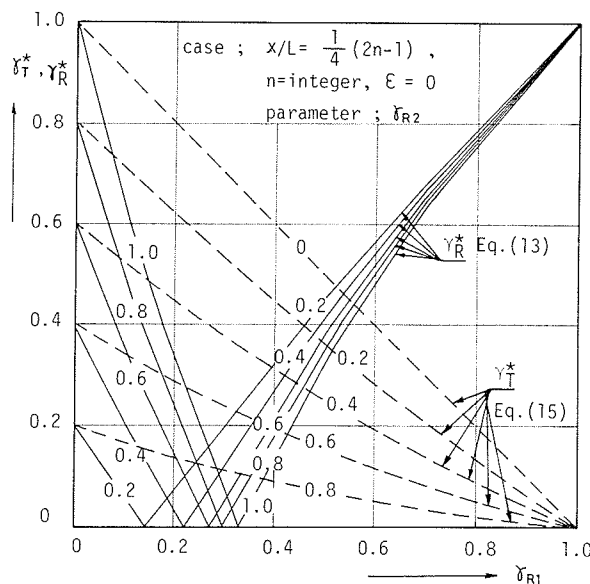
5a/ Relation entre  $\gamma_R^*$  et  $x/L$  (théorique).



5b/ Relation entre  $\gamma_T^*$  et  $x/L$  (théorique)

La figure 6 donne les valeurs de  $\gamma_R^*$  et  $\gamma_T^*$  en fonction de  $\gamma_{R1}$  et  $\gamma_{R2}$ , (en supposant toujours  $\gamma_{R1} + \gamma_{T1} = 1.0$ ,  $\gamma_{R2} + \gamma_{T2} = 1.0$  et  $\epsilon = 0$ ) quand  $x/L = 0.25$ , etc. Il est intéressant de noter que pour certaines valeurs de  $\gamma_{R1}$  et  $\gamma_{R2}$ ,  $\gamma_R$  devient nul. Les valeurs de  $\gamma_{R1}$  et  $\gamma_{R2}$  pour lesquelles on obtient une réflexion nulle sont celles qui vérifient l'équation :

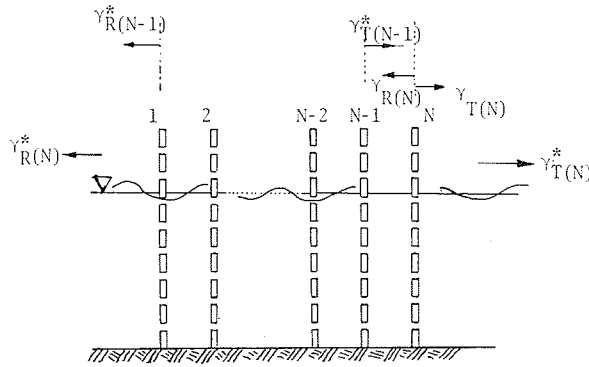
$$\gamma_{R1} = \gamma_{R2} / (1 + 2\gamma_{R2}) \quad (16)$$



6/ Effet de  $\gamma_{R1}$  sur  $\gamma_T^*$  et  $\gamma_R^*$  quand  $x/L = (2n - 1)/4$ .  
(Minimum théorique)

## 2c) Coefficients de transmission et de réflexion dans le cas de plus de deux digues

Nous avons étudié aussi, bien qu'uniquement du point de vue théorique, le cas de plus de deux digues placées en parallèle, toujours perpendiculairement à la direction d'avancement des houles. Pour le calcul, on doit employer les expressions (11) et (14), mais il faut faire attention au fait que, dans ce cas, il faut remplacer  $\gamma_{R1}$  et  $\gamma_{T1}$  par les coefficients de réflexion et de transmission de  $(N - 1)$  digues et par conséquent ses angles de phase ne sont pas nuls ;  $\gamma_{R(N)}$  et  $\gamma_{T(N)}$  sont toujours les coefficients d'une seule digue, la  $N^{\text{ème}}$ , et par conséquent sont des nombres réels, c'est-à-dire que la phase est nulle. Les expressions à employer sont les suivantes (17) et (18), (fig. 7)



7/ Notation employée au cas de plus de deux digues.

$$\gamma_{R(N)}^* = \left| \vec{\gamma}_{R(N)}^* \right| = \left| \gamma_{R(N)} + \frac{\vec{\alpha}^2 \vec{\gamma}_{R(N-1)}^* \gamma_{T(N)}^2}{1 - \vec{\alpha}^2 \gamma_{R(N)} \vec{\gamma}_{R(N-1)}^*} \right| \quad (17)$$

$$\gamma_{T(N)}^* = \left| \vec{\gamma}_{T(N)}^* \right| = \left| \frac{\vec{\alpha} \gamma_{T(N)} \vec{\gamma}_{T(N-1)}^*}{1 - \vec{\alpha}^2 \gamma_{R(N)} \vec{\gamma}_{R(N-1)}^*} \right| \quad (18)$$

Dans ces équations :

$\gamma_{T(N)}$  = coefficient de transmission de la N<sup>ème</sup> digue,

$\gamma_{R(N)}$  = " réflexion " " " " "

$\gamma_{T(N-1)}^*$  = coefficient de transmission de l'ensemble des N - 1 premières digues,

$\gamma_{R(N-1)}^*$  = " réflexion " " " " " " "

### 3. Etude expérimentale

#### 3a) Equipement et procédure d'essais :

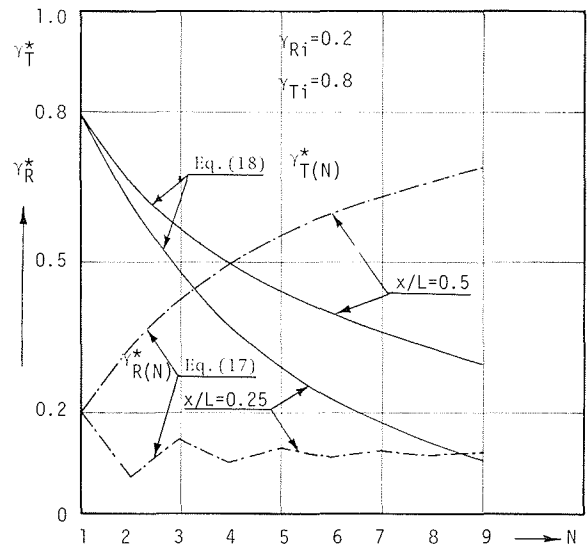
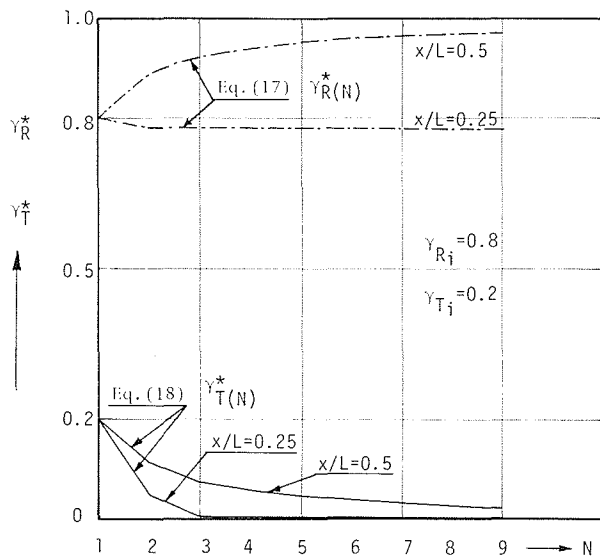
Nous avons réalisé cette expérience pour vérifier les caractéristiques hydrodynamiques de ce genre de digue en employant un canal large de 0.65 m, long de 30 m, et dont la hauteur utile est 0.90 m. A un bout du canal se trouve un générateur de houle. A l'autre extrémité, on a installé un amortisseur composé de tétrapodes et de matériau spongieux pour réduire au minimum la réflexion.

On a employé la méthode de Healy [2] pour mesurer la réflexion ; les hauteurs des lames ont été mesurées à intervalles de 1 cm à partir du brise-lames et tout le long d'une longueur d'onde à l'aide de jauges électriques à résistance.

Les hauteurs de la lame transmise ont été mesurée aussi tous les 10 cm. le long d'une longueur d'onde.

Le tableau 1 est le programme de l'expérience.

Tableau 1	
SYM.	Values
h (cm)	12.0, 22.5, 30.0, 45.0
H <sub>0</sub> (cm)	2.48, 4.6, 6.0
T <sub>0</sub> (sec)	1.2
D (cm)	2.0, 4.0, 6.0
b (cm)	0.5, 1.0, 1.5, 2.0
m	0.015 ~ 0.50
d/h	0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0
h/L	0.097, 0.141, 0.1427, 0.170, 0.223
x/L	0 ~ 0.75



8/ et 9/ Transmission et réflexion (maximum et minimum) d'un nombre variable de digues.

### 3b) Discussion du résultat

#### 1) Cas d'une seule digue

Bien que pour obtenir les valeurs théoriques, on ait laissé de côté  $b$  et  $D$ , en employant l'analyse dimensionnelle, on peut exprimer  $\gamma_R$  et  $\gamma_T$  de la façon suivante :

$$\gamma_R = f_R(H/L, b/D, D/H, m, h/L, d/H),$$

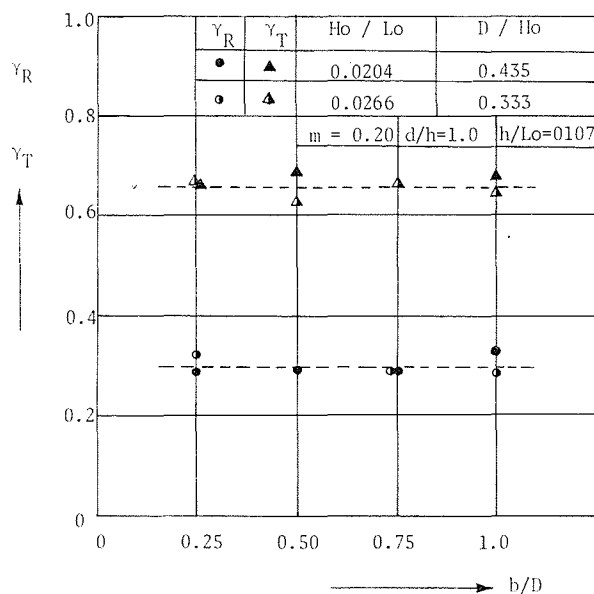
$$\gamma_T = f_T(H/L, b/D, D/H, m, h/L, d/H),$$

où  $D$  est la hauteur et  $b$  la largeur des poutres ou planches employées. (Voir fig. 1).

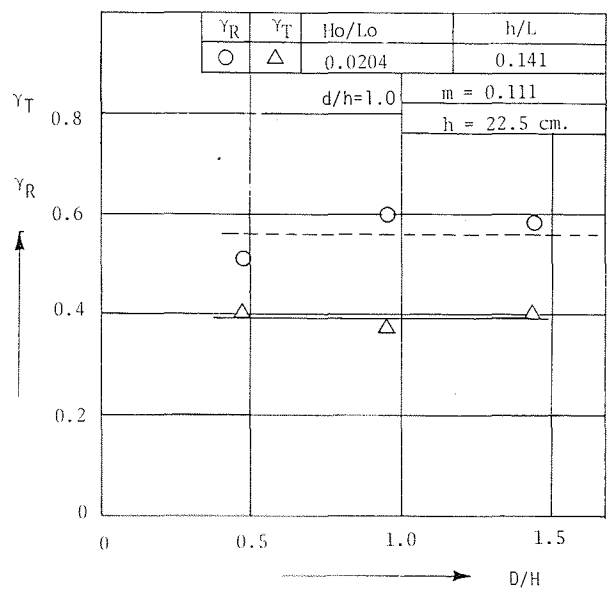
Nous allons examiner maintenant l'effet de chacun de ces facteurs :

#### i) Effet de $b/D$ et $D/H$

Dans la figure 10, on montre un exemple de l'effet de  $b/D$  sur  $\gamma_R$  et  $\gamma_T$ , avec plusieurs valeurs des autres variables et toujours avec  $d/h = 1.0$ . On peut voir que cet effet est pratiquement nul. Dans la figure 11 on voit que l'effet de  $D/H$  est aussi presque nul. Ceci prouve que la théorie développée est correcte sur ce point.



10/ Effet de  $b/D$  sur  $\gamma_R$  et  $\gamma_T$  (expérimental).



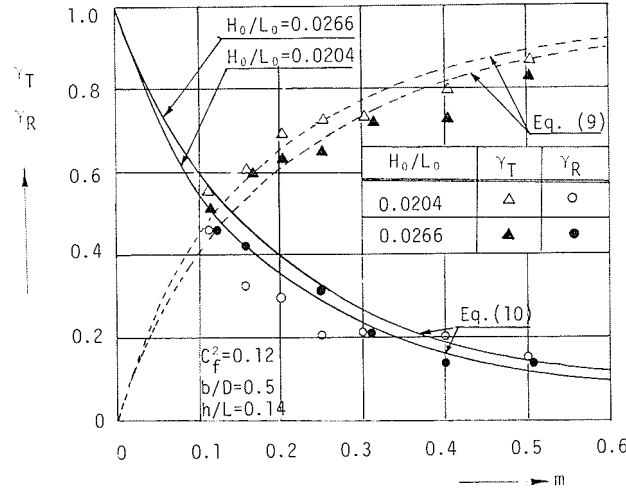
11/ Effet de  $D/H$  sur  $\gamma_R$  et  $\gamma_T$  (expérimental)



ii) Effet de  $m$  et  $H/L$

La figure 12 montre l'effet de  $m$  et  $H/L$  sur  $\gamma_R$  et  $\gamma_T$ . Les lignes discontinues correspondent aux valeurs de l'équation (9) et les lignes continues aux valeurs de l'équation (10), toujours avec  $d/h = 1$ . La porosité  $m$  est :

$$m = \frac{e}{e + D} \text{ avec la notation employée dans la figure 1.}$$



12/ Effet de  $m$  sur  $\gamma_R$  et  $\gamma_T$  (expérimental)

On voit que, comme on pouvait l'espérer, l'influence de  $m$  est très grande ; plus  $m$  devient grand, plus  $\gamma_R$  devient petit et  $\gamma_T$  grand, résultat parfaitement d'accord avec la théorie.

D'ailleurs, il faut signaler que pour obtenir un coefficient de transmission  $\gamma_T < 0,5$ , il faut faire  $m < 0,10$ . Dans certaines constructions, on a parfois besoin d'obtenir  $\gamma_T < 0,3$  ; dans ce cas, il faut noter que, d'après la figure 12 et bien que  $\gamma_T$  varie un peu avec  $h/L$  et  $H/L$ , il faut faire  $m < 0,05$  ;

$\gamma_R$  et  $\gamma_T$  varient aussi avec  $H/L$ . On voit dans la même figure 12 que, comme on l'observe dans les brise-lames existants,  $\gamma_T$  diminue et  $\gamma_R$  augmente quand  $H/L$  augmente ; de toute façon, cette influence n'est pas aussi grande que celle de  $m$ .

On voit que les résultats expérimentaux et théoriques sont aussi d'accord sur ce point.

iii) Effet de  $d/h$  et  $h/L$

Jusqu'ici, tout le travail expérimental a été fait avec la digue submergée jusqu'au fond, c'est-à-dire  $d/h = 1$ . Nous allons voir maintenant l'effet de la diminution de cette profondeur submergée  $d$ .

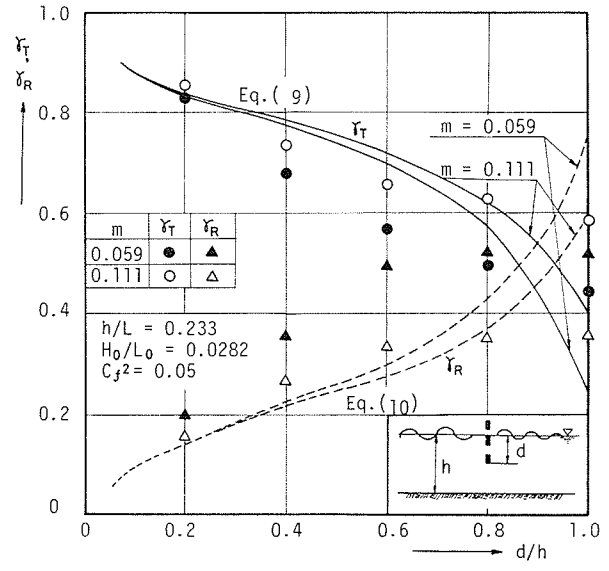
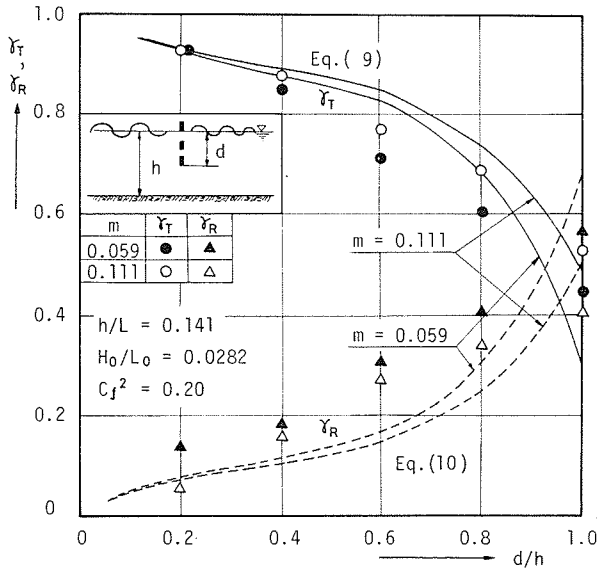
Comme on l'a déjà dit, il faut faire  $m < 0,111$  pour obtenir  $\gamma_T < 0,5$ . Par conséquent, on a réalisé cette partie de l'expérience toujours avec  $m < 0,111$ .

Dans les figurés 13 et 14 on montre les résultats expérimentaux et les valeurs théoriques des équations (9) et (10). On s'aperçoit que ce facteur est aussi important que  $m$  et que si  $d/h < 0,5$  l'effet d'une diminution de  $m$  est très petit et un peu plus important si  $d/h > 0,5$ .

D'ailleurs, si la profondeur est petite ( $h/L = 0,141$ , fig. 13), l'effet d'une augmentation de la profondeur submergée de  $d/h = 0,6$  à  $d/h = 1,0$  est important, tandis qu'en eaux profondes cet effet est presque nul, comme on pouvait le prévoir en considérant la distribution d'énergie en profondeur.

La distribution verticale d'énergie devient de plus en plus constante quand  $h/L$  diminue. C'est pourquoi, dans l'intervalle  $0,6 < d/h < 1,0$ , le facteur  $d/h$  est plus efficace pour réduire la transmission dans le cas de la figure 13 ( $h/L = 0,141$ ) que dans le cas de la figure 14 ( $h/L = 0,233$ ).

Les valeurs théoriques des équations (9) et (10) s'ajustent assez bien aux valeurs expérimentales dans la figure 13, mais dans le cas de la figure 14 ces équations ne montrent pas l'effet que nous venons de discuter au paragraphe antérieur ; bien au contraire, l'inclinaison augmente au lieu de diminuer quand  $d/h$  augmente. Nous pensons que ce résultat théorique est dû au fait que l'équation (6) ne peut être employée que dans  $k(z + h) < 1,0$ , et puisque  $k = 2\pi/L$  et que l'on a toujours  $1 + \frac{z}{h} < 1,0$ , cette condition devient  $\frac{2\pi h}{L} < 1,0$  ; c'est-à-dire,  $h/L < 0,159$ . Par conséquent la simplification de l'expression (6) contient une erreur considérable.



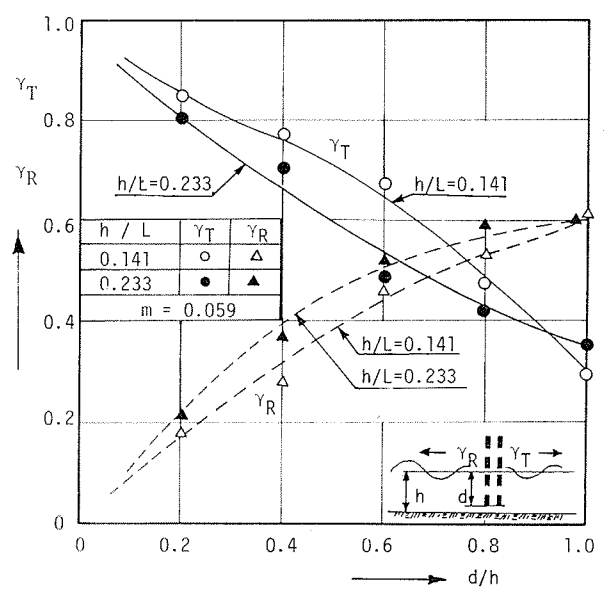
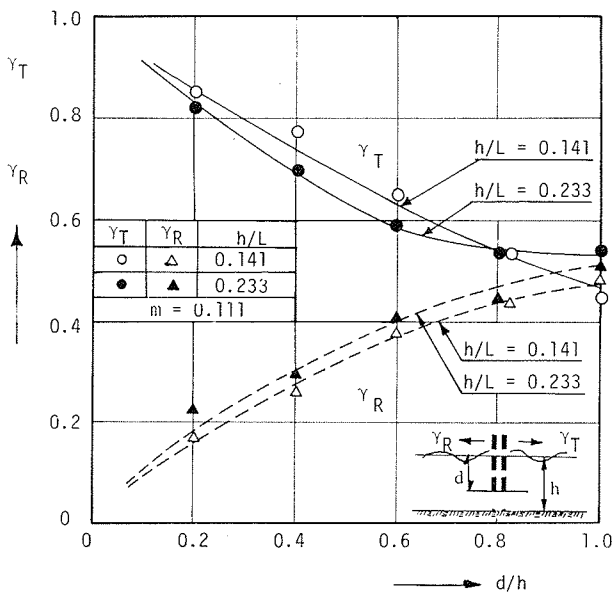
13/ et 14/ Effet de  $d/h$  sur  $\gamma_R$  et  $\gamma_T$  (expérimental)

iv) Coefficient  $C_f$

Les valeurs du coefficient  $C_f$  sont calculées expérimentalement pour  $m = 0.059 \sim 0.111$ ,  $b/D \leq 1.0$  et  $0.048 \leq D/H \leq 1.500$ , et elles sont montrées dans le Tableau 2. On voit que le coefficient  $C_f$  augmente, quand  $h/L$  diminue et quand  $H/L$  augmente.

Valeurs du coefficient $C_f$		Tableau 2			
$h/L$	$H/L$	0.078	0.100	0.141	0.155
0.010		0.450	0.390	0.280	0.268
0.020		0.500	0.500	0.390	0.345
0.030		0.635	0.635	0.450	0.390

( $m = 0.059 \sim 0.111$ ,  $b/D \leq 1.0$ ,  $0.48 \leq D/H \leq 1.5$ )



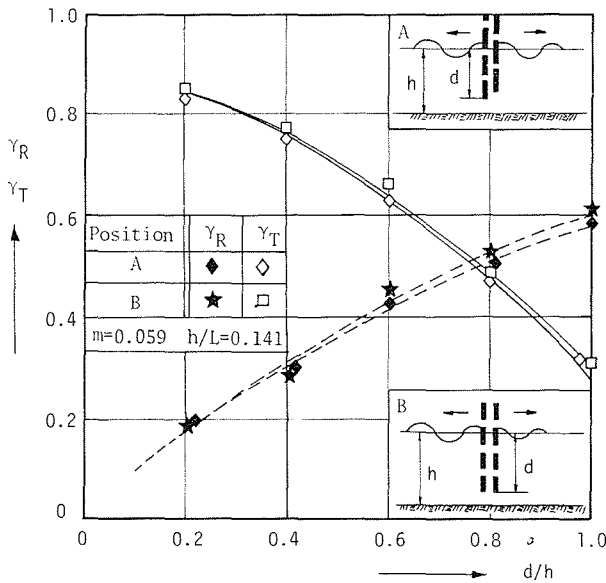
15a/ et 15b/ Effet de  $d/h$  sur  $\gamma_R$  et  $\gamma_T$  au cas de deux digues très proches (expérimental)

II) Influence d'une second digue très proche de la première.

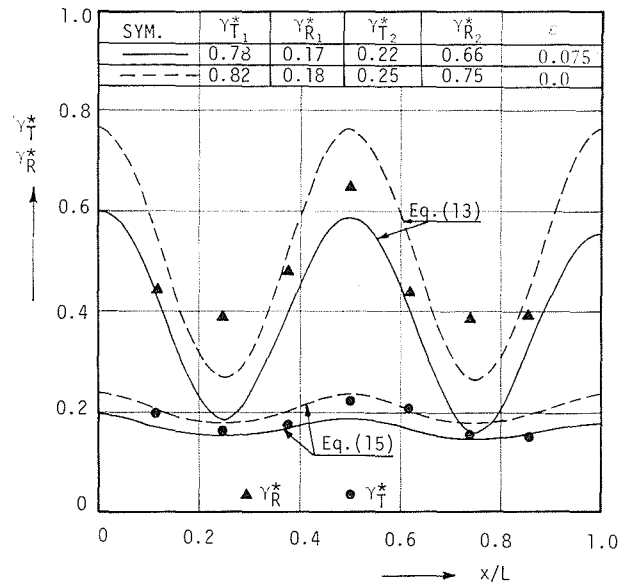
Les figures 15a et 15b correspondent à deux digues distantes de  $x = 4$  cm, c'est-à-dire  $x/L = 0.025$  quand  $h/L = 0.141$ , et  $x/L = 0.020$  quand  $h/L = 0.233$  ; la longueur d'onde était  $L = 1.60$  m et les dimensions des poutres ou éléments employés étaient toujours  $2 \times 1$  cm.

On voit que le coefficient de transmission de l'ensemble n'est pas le produit des coefficients de deux digues, mais devient seulement 10 % plus petit, avec les deux digues égaux.

La figure 16 montre la différence entre deux positions des planches de la seconde digue par rapport à la première. Dans la position B, les planches sont placées à la même hauteur dans les deux digues, et dans la position A, le point central de chaque planche est placé à la hauteur de l'espace libre laissé par les planches de l'autre digue. La différence, comme on peut le voir, est presque nulle.



16/ Idem avec deux positions relatives des planches



17/ Effet de  $x/L$  sur  $\gamma_R^*$  et  $\gamma_T^*$

III) Influence d'une seconde digue plus éloignée

Cette partie de l'expérience a été réalisée toujours avec les deux digues submergées jusqu'au fond ( $d/h = 1.0$ ).

On a commencé en vérifiant les figures 5a et 5b et le résultat est donné dans la figure 17. Les lignes continues ont été calculées avec les valeurs suivantes des variables des équations (13) et (15) mesurées d'avance expérimentalement :

$$\epsilon = 0.075, \gamma_{R1} = 0.17, \gamma_{T1} = 0.78, \gamma_{R2} = 0.66, \gamma_{T2} = 0.22,$$

et les lignes discontinues ont été calculées avec  $\epsilon = 0.0$  et les autres variables un peu augmentées pour arriver à l'expression théorique (10). On a pris :

$$\gamma_{R1} = 0.18, \gamma_{T1} = 0.82, \gamma_{R2} = 0.75, \gamma_{T2} = 0.25.$$

On voit que les résultats expérimentaux et théoriques s'ajustent parfaitement. Il n'y a que deux points qui diffèrent de la valeur prévue ; ces deux points sont les deux minima de la réflexion ; c'est-à-dire avec une distance entre les deux digues telle que  $x/L = 0.25$  et  $x/L = 0.75$ . Comme nous pourrions le voir dans les figures suivantes, les minima de la réflexion sont toujours difficiles à atteindre.

Dans la figure 18 on voit le résultat sur le minimum de la réflexion ( $x/L = 0.25$  et  $x/L = 0.75$ ) quand la transmission de la seconde digue est nulle. La valeur mesurée de  $\gamma_{R2}$  est 0.95. La courbe continue correspond aux valeurs théoriques  $\epsilon = 0$  et  $\gamma_{R1} + \gamma_{T1} = 1.0$  mais en moyenne, les vraies valeurs mesurées sont telles que  $\gamma_{R1} + \gamma_{T1} = 0.91$ , c'est pourquoi on a dessiné aussi la courbe discontinue qui correspond à  $\epsilon = 0$  et  $\gamma_{R1} + \gamma_{T1} = 0.91$ . Dans la figure 18, cette dernière courbe s'approche davantage des valeurs expérimentales, mais la différence est plutôt petite. Dans les figures suivantes les courbes théoriques ont été calculées toujours avec  $\gamma_{R1} + \gamma_{T1} = 1.0$ .

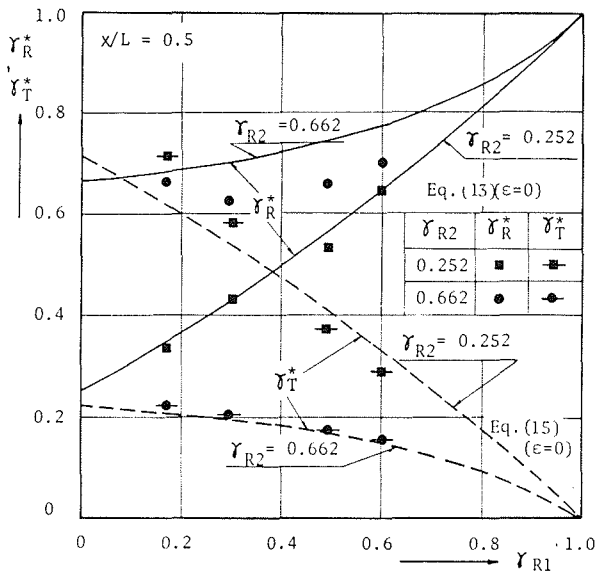
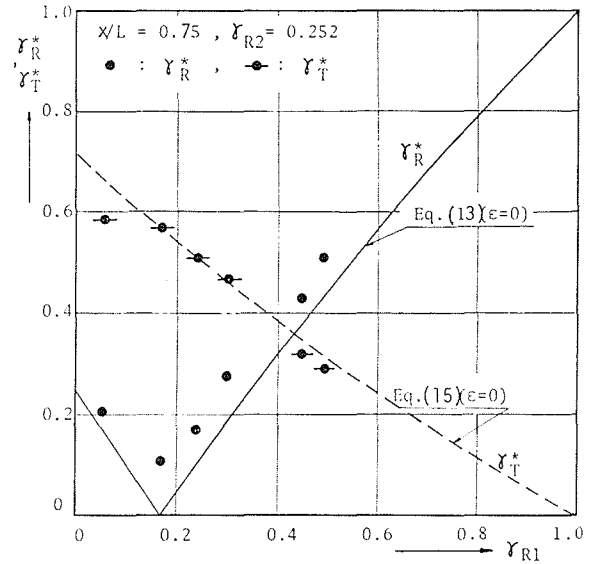
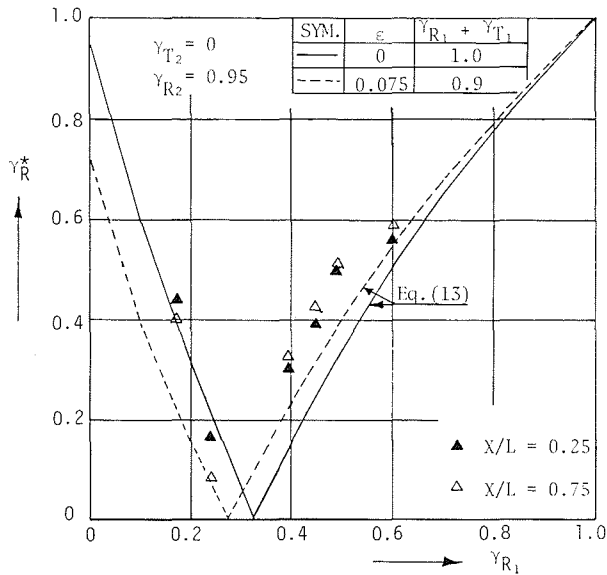
La figure 19 montre la transmission et la réflexion quand les caractéristiques de la seconde digue sont  $\gamma_{R2} = 0.252$ ,  $\gamma_{T2} = 0.713$  et la distance  $x/L = 0.75$  (minimum).

La figure 20 montre aussi  $\gamma_R^*$  et  $\gamma_T^*$  quand  $x/L = 0.50$  (maximum) et  $\gamma_{R2} = 0.662$ ,  $\gamma_{T2} = 0.222$  ; on y a dessiné aussi le cas  $x/L = 0.5$ ,  $\gamma_{R2} = 0.252$ ,  $\gamma_{T2} = 0.713$ . On voit que les valeurs expérimentales s'ajustent bien aux valeurs théoriques ;

et que  $x/L$  est un facteur important pour diminuer la transmission et la réflexion de l'ensemble. Pour

$$x/L = 0.25, 0.75, \dots, (2n-1)/4 \quad (n = 1, 2, \dots)$$

on obtient le minimum, mais on peut encore diminuer  $\gamma_R^*$  et  $\gamma_T^*$  en choisissant convenablement les valeurs de  $\gamma_{R1}$  et  $\gamma_{R2}$ .



18/ 19/ 20/ Maxima et minima des coefficients de transmission et réflexion

## 4. Conclusions

On peut résumer les résultats de la façon suivante :

- a) Dans le cas d'une seule digue, les valeurs des coefficients de réflexion et de transmission obtenues à partir des équations (9) et (10) sont qualitativement d'accord avec les résultats expérimentaux.
- b) Avec la digue submergée jusqu'au fond ( $d/h = 1.0$ ) et une porosité  $m = 0.111$ , on obtient  $\gamma_T = 0.51$  (pour  $h/L = 0.141$ ) ; et si l'on diminue la porosité jusqu'à  $m = 0.059$ ,  $\gamma_T$  devient 0.435.
- c) La profondeur submergée est un facteur très important. En eaux peu profondes, on diminue considérablement le coefficient de transmission en abaissant la digue jusqu'au fond, mais au fur et à mesure que  $h/L$  devient plus grand, l'effet de  $d/h$  diminue et si la profondeur de l'eau est telle que  $h/L = 0.223$ , l'effet d'une augmentation de  $d/h$  de 0.6 à 1.0 est très faible.

d) Si on ajoute une seconde digue très proche de la première ( $x/L = 0.02 \sim 0.025$ ), le coefficient de transmission ne devient pas le produit des coefficients des deux digues, mais est seulement diminué d'environ 10 % si les deux digues sont égales.

e) Si l'on écarte plus les deux digues, on voit que la distance entre elles est un facteur très important pour la transmission et la réflexion, dont les coefficients peuvent alors être approchés au moyen des équations (13) et (15). On obtient le maximum quand  $x/L = n/2$  et le minimum quand  $x/L = (2n - 1)/4$  ( $n = 1, 2, 3, \dots$ ).

f) On peut encore diminuer  $\gamma_T^*$  et  $\gamma_R^*$ , spécialement ce dernier, en choisissant convenablement les coefficients de chaque digue. Si on vérifie l'équation (16), la réflexion théorique est nulle.

## Références

---

- [1] IPPEN (A.T.). – *Estuary and Coastline Hydrodynamics*, McGraw-Hill ; New York, 1966, pp. 299 ~ 303.  
[2] HEALY (J.J.). – Wave Damping Effect of Beaches, *Proc. of Minnesota Intern. Hydraulics Conventio*, 1953, pp. 213 ~ 220.