

# PREMIERS RÉSULTATS DE RECHERCHES SUR DES PROFILS D'OUVRAGES EN ENROCHEMENTS, ÉCONOMIQUES, STABLES ET NON FRANCHIS PAR UNE HOULE DE CARACTÉRISTIQUES DONNÉES

par C. TZIMOPOULOS  
Docteur-Ingénieur

## Introduction

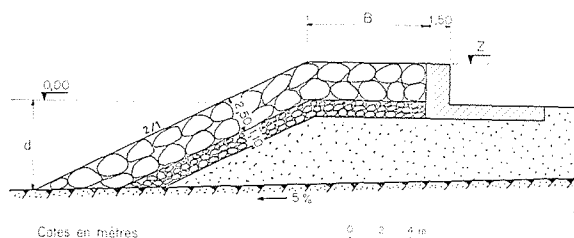
Une série d'essais sur modèle réduit a débuté en mars 1971 au Laboratoire National d'Hydraulique à Chatou (Division Hydraulique Maritime), afin de déterminer un profil d'ouvrage économique stable et non franchi, sous l'action d'une houle régulière de caractéristiques données; il était admis que le profil puisse être sculpté (sans gros dommages) par la houle de creux maximal sur le site.

Le modèle (fig. 1) était celui d'une digue classique en enrochements, de carapace composée de blocs de 3 à 5 t et de 2 à 4 t (catégorie économique), de pente 2/1. Sur ce profil a été examinée l'influence des caractéristiques de la houle d'une part et des caractéristiques géométriques de l'ouvrage d'autre part. Au cours de l'étude a également été mesurée la hauteur maximale d'ascension de la houle sur l'ouvrage.

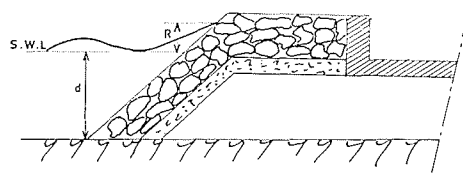
L'article ci-après présente quelques conclusions établies à partir des 83 premiers essais effectués.

## Équipement du canal

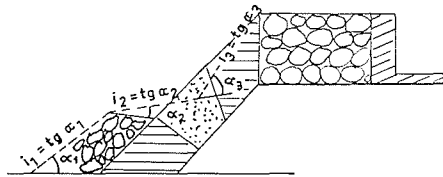
Les mesures ont été effectuées dans un canal à houle régulière de 51 m de long, 40 cm de large et 63 cm de profondeur, équipé d'un générateur de houle fonctionnant en piston batteur. Les amplitudes de la houle étaient mesurées par un capteur à résistance variable, étalonné avant et après chaque essai. Devant le batteur était disposé un filtre métallique en éléments perforés.



1/ Profil type étudié.



2/



3/

### Similitude

Bien que l'étude entreprise ne nécessite pas *a priori* le choix d'une échelle donnée, des transpositions étant toujours possibles, l'échelle géométrique du 1/40 fut adoptée pour faciliter la présentation des résultats :

$$\frac{L_m}{L_r} = \frac{1}{40}$$

(l'indice *r* correspondant à la nature et *m* en modèle) d'où pour le temps :

$$\frac{T_m}{T_r} = \frac{1}{\sqrt{40}} = \frac{1}{6,32}$$

et pour les poids :

$$\frac{W_m}{W_r} = \frac{1}{40^3}$$

ainsi au poids d'une tonne en nature correspond 15,625 g en modèle. Les cailloux utilisés pour la construction des couches de la carapace avaient en moyenne une masse volumique de 2 600 kg/m<sup>3</sup>.

### Essais

Le tableau 1 rassemble les différentes caractéristiques géométriques de l'ouvrage, et les périodes exprimées en valeurs-nature. Le choix des périodes utilisées tient compte des possibilités techniques du canal, ainsi que des caractéristiques des houles dans le bassin de la Méditerranée.

Le modèle de la figure 1 comporte deux couches d'enrochements : la couche extérieure constituée de cailloux de 48,40 à 80,65 g (3 à 5 t en nature) de poids moyen 61,30 g,

la sous-couche de cailloux de 0,80 à 12 g (50 à 750 kg en nature) de poids moyen 3,5 g. Ces deux couches ont été retenues pour les huit premiers essais. Ensuite fut adoptée une catégorie de cailloux plus légers (l'ouvrage n'étant pas suffisamment endommagé au cours des essais précédents) : pour la couche extérieure des cailloux de 32,26 à 64,52 g (2 à 4 t en nature) de poids moyen 52,50 g et pour la couche intérieure des cailloux de 0,40 à 10,80 g (25 à 670 kg en nature, de poids moyen 2,75 g.

L'épaisseur de la couche extérieure étant égale à 6,75 cm (2,70 m en nature) dans le premier cas et 6,25 cm (2,50 m en nature) dans le second cas. L'épaisseur de la sous-couche étant 3,75 cm (1,10 m en nature) dans les deux cas.

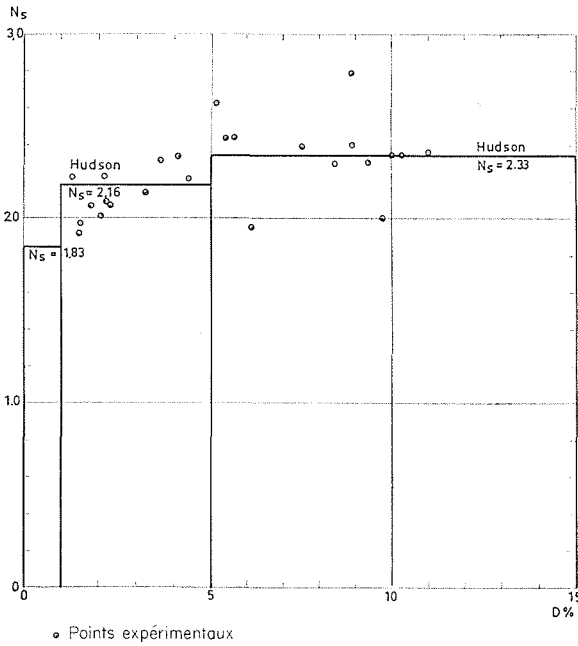
Devant l'ouvrage, le fond de pente 5 % était constitué en sable, recouvert d'une mince couche de ciment rugueux.

Le déroulement de l'essai était le suivant : étalonnage du capteur de houle, puis réglage de la période du batteur, puis réglage du creux de la houle ( $H_i$ ) et mesure de la hauteur maximale d'ascension *R* sur le talus (fig. 2) par des procédés usuels.

Après augmentation d'amplitude de la houle étaient à nouveau mesurées les nouvelles valeurs de *R* et  $H_i$  jusqu'à ce que le creux atteigne la valeur  $H_f$  correspondant à la houle franchissant l'ouvrage. Après avoir mesuré le creux  $H_f$ , l'essai était arrêté pour le reprendre ensuite avec une autre période de houle.

L'essai était terminé quand la houle commençait à déferler devant l'ouvrage, ou en cas d'instabilité, même si  $H_f$  n'était pas atteint.

Pour estimer la stabilité partielle de l'ouvrage (légers dommages) les cailloux de la carapace étaient peints de différentes couleurs, il était alors facile de compter le nombre de cailloux déplacés jusqu'au pied de l'ouvrage et de déterminer un pourcentage par rapport au nombre de cailloux constituant la couche extérieure initiale du talus. Il n'était pas tenu compte des cailloux de la risberme restés stables pendant tous les essais.



4/

Le rapport suivant a été ainsi défini :

$$D = \frac{\text{Nombre de cailloux déplacés}}{\text{Nombre total de cailloux de la carapace}}$$

### Premiers résultats

#### Stabilité.

Le talus de l'ouvrage pour certains essais prenait une forme d'équilibre caractérisée par trois pentes  $i_1, i_2, i_3$  (fig. 3). Les résultats obtenus sont en accord avec les observations de Bonnefille - Germain [1].

Ils sont de même en accord avec ceux de Hudson [3]. En effet considérons le nombre de stabilité de Hudson [3].

$$N_s = \frac{\gamma_r^{1/3} H_D}{W_r^{1/3} (S_r - 1)}$$

nombre sans dimension caractérisant la stabilité d'un enrochement de poids  $W_r$  en équilibre sous l'action des diverses forces s'exerçant sur cet enrochement soumis au creux  $H_D$ .

$N_s$  est relié au coefficient  $K_D$  (coefficient sans dimension de la formule de stabilité de Hudson et caractérisant le type de blocs : enrochement, bloc artificiel, tetrapode, etc.) par la formule :

$$N_s = (K_D \cotg \alpha)^{1/3}$$

où  $\cotg \alpha$  est la pente du profil. Dans notre cas la formule de Hudson devient avec :

$$\gamma_r = 2,6 \text{ t/m}^3, W_r (\text{moyen}) = 3,26 \text{ t}, S_r = 2,6, \cotg \alpha = 2 :$$

$$N_s = 0,58 H_D$$

Cette relation est représentée sur la figure 4 où sont portés les points correspondant aux 33 essais ayant donné lieu à des dommages de 1 à 15 % définis au tableau 2.

Caractéristiques des essais

Tableau 1

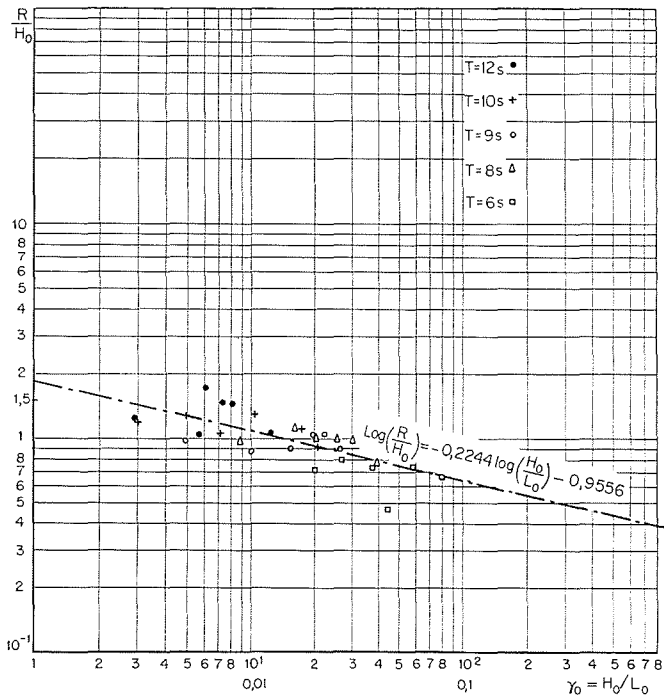
(L'essai n° 4 qui correspond à une période  $T = 15$  s n'apparaît pas dans ce tableau)

N° d'essai	Nbre d'essais	$T_1$	$T_2$	$T_3$	$T_4$	$T_5$	$B_1$	$B_2$	$B_3$	$B_4$	$Z_1$	$Z_2$	$Z_3$	$Z_4$	$d_1$	$d_2$	$d_3$	$d_4$
		(s)	(s)	(s)	(s)	(s)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(s)	(s)	(s)
1-3	3		x		x	x	x				x				x			
5-8	4		x	x	x	x		x			x				x			-
9-13	5	x	x	x	x	x		x			x				x			
14-18	5	x	x	x	x	x	x				x							x
19-23	5	x	x	x	x	x		x			x							x
24-28	5	x	x	x	x	x			x		x							x
29-33	5	x	x	x	x	x			x		x							x
34-38	5	x	x	x	x	x	x				x							x
174-178	5	x	x	x	x	x	x					x						x
39-43	5	x	x	x	x	x		x			x							x
179-183	5	x	x	x	x	x		x				x						x
44-48	5	x	x	x	x	x			x		x							x
184-188	5	x	x	x	x	x			x			x						x
49-53	5	x	x	x	x	x				x	x							x
189-193	5	x	x	x	x	x				x		x						x
54-58	5	x	x	x	x	x	x				x							x
194-198	5	x	x	x	x	x	x					x						x
	82																	

Dommages et nombre de stabilité  $N_s$

Tableau 2

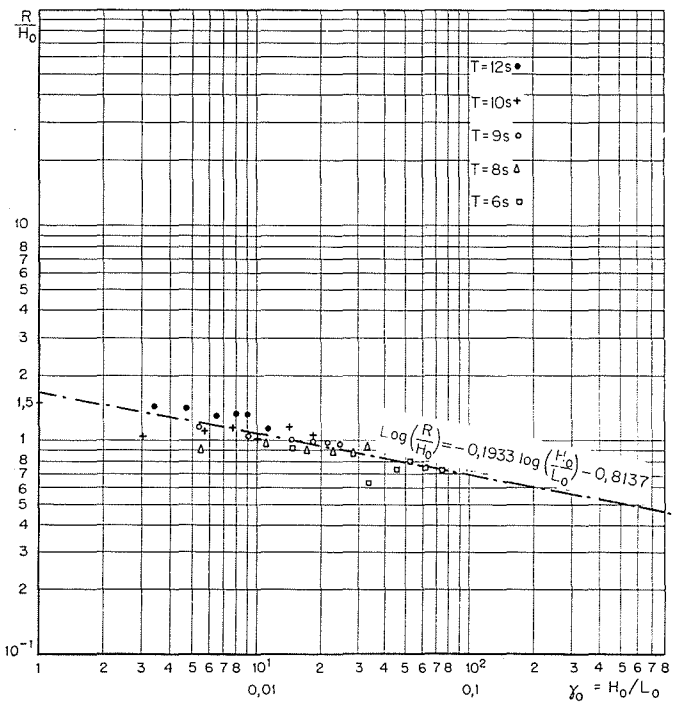
N° d'essai	Houle		$N_s$	Dommage %	N° d'essai	Houle		$N_s$	Dommage %
	Période T (s)	Creux moyen $H_i$ (m)				Période T (s)	Creux moyen $H_i$ (m)		
186	9	3,95	2,28	1,30	44	6	4,00	2,32	3,60
182	10	3,30	1,92	1,50	34	6	3,80	2,20	4,30
179	6	3,40	1,97	1,50	174	6	4,05	2,35	4,05
187	10	3,55	2,06	1,80	39	6	4,60	2,66	5,10
181	9	3,46	2,00	2,05	194	6	4,30	2,48	5,40
15	8	3,60	2,08	2,15	191	9	4,25	2,46	5,60
196	9	3,85	2,23	2,20	178	12	3,38	1,96	6,10
45	8	3,58	2,07	2,30	30	8	4,06	2,35	7,5
193	12	3,80	2,22	2,30	25	8	4,15	2,40	8,90
183	12	3,42	1,98	2,25	195	8	3,55	2,28	8,40
35	8	2,90	1,68	2,80	190	8	4,85	2,80	8,90
14	6	4,10	2,38	2,85	181	9	3,90	2,26	9,40
184	6	4,25	2,46	3,05	177	10	3,42	1,98	9,70
179	6	4,00	2,32	3,05	175	8	4,05	2,35	10,00
26	9	3,68	2,13	3,20	176	9	3,95	2,30	10,20
32	10	3,18	1,85	3,20	180	8	4,10	2,38	11,00
					185	8	4,50	2,60	15,30



ESSAIS 14 à 18

Z = +3m      B = 4m      d = -6m

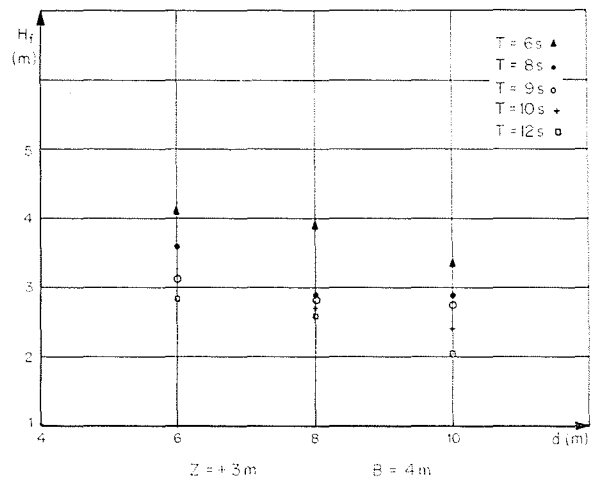
5/



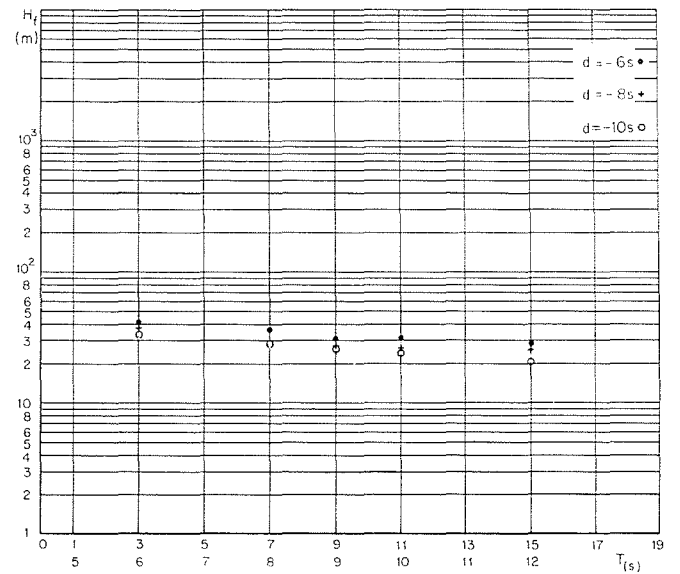
ESSAIS 34 à 38

Z = +3m      B = 4m      d = -8m

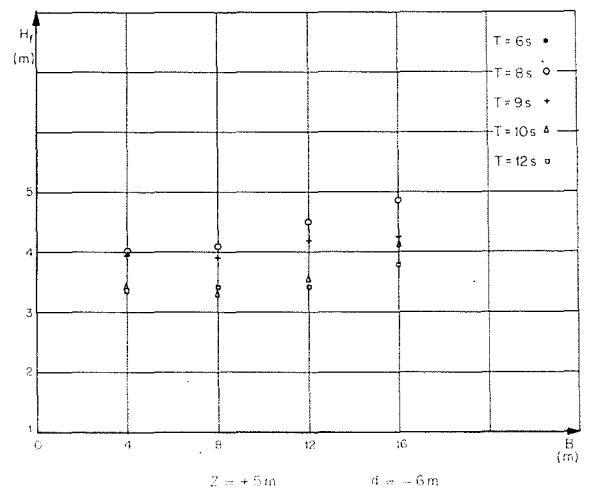
6/



7/



8/



9/

**Hauteur maximale d'ascension de la houle.**

Les essais 14-18 et 34-38 (fig. 5 et 6) nous suggèrent la formule générale :

$$\frac{R}{H_0} = K(d) \left( \frac{H_0}{L_0} \right)^{M'(d)}$$

où :

$$K'(d) = 0,3844; M'(d) = -0,2244 \text{ pour la profondeur } d = 6,00 \text{ m}$$

$$K'(d) = 0,4433; M'(d) = -0,1933 \text{ pour la profondeur } d = 8,00 \text{ m}$$

soit puisque :

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

$$\frac{R}{H_0} = K'(d) \left( \frac{2\pi}{g} \right)^{M'(d)} \left( \frac{H_0}{T^2} \right)^{M'(d)}$$

La hauteur maximale d'ascension relative à l'amplitude au large en eau profonde  $H_0$ , est une fonction qui décroît exponentiellement avec la cambrure et qui dépend également de la profondeur au pied de la digue.

**Franchissement.**

Les différentes valeurs de l'amplitude de franchissement sont portées sur les figures 7, 8, 9 en fonction de la période de la houle  $T$ , de la profondeur d'eau  $d$  et de la largeur de la risberme  $B$ .

La figure 7 montre que l'amplitude de franchissement  $H_f$  est une fonction croissante de  $B$  pour  $d$  et  $Z$  données; d'après la figure 8,  $H_f$  est une fonction de la période  $T$  décroissante pour une risberme  $B$  et une cote  $Z$  données; enfin d'après la figure 9,  $H_f$  est une fonction de la profondeur  $d$  décroissante pour une risberme  $B$  et une cote  $Z$  données.

**Conclusion**

Les résultats ci-dessus permettent d'énoncer quelques conclusions provisoires :

1. Les périodes les plus courtes sont les plus dangereuses pour la stabilité de l'ouvrage en enrochement et parmi celles-ci la période 8 s.

2. Les dommages mesurés sur modèle sont en accord avec la formule de stabilité de Hudson.

3. La hauteur maximale relative ( $R/H_0$ ) d'ascension de la houle est une fonction décroissante, de la cambrure au large dépendant également de la profondeur de l'eau au pied de l'ouvrage.

4. L'amplitude de franchissement  $H_f$  est fonction de la risberme  $B$ , de la période  $T$  et de la profondeur de l'eau  $d$  au pied de l'ouvrage.

**Bibliographie**

- [1] BONNEFILLE (R.) et GERMAIN (P.). — « Etude de la stabilité d'une jetée brise-lames type sculptée ». T 479, *D.H.M.*, Chatou (1966).
- [2] COMOLET (M. R.). — « Analyse dimensionnelle et similitude en dynamique des fluides ». *Memorial de l'Artillerie française* (1956).
- [3] HUDSON (R.). — « Laboratory investigation of Rubblemound breakwaters ». *Journal of the Waterways and Harbors Division, Proc. A.S.C.E.*, WW 3 (sept. 1959), p. 2171.
- [4] HUNT (Ira A.). — « Design of Seawalls and Breakwaters ». *Journal of the Waterways and Harbors Division, Proc. A.S.C.E.*, WW 3 (sept. 1959), p. 2172.
- [5] MICHE (M.). — « Le pouvoir réfléchissant des ouvrages maritimes ». *Annales des Ponts et Chaussées* (1951).

**Notations**

$B$  : risberme;  
 $g$  : accélération due à la pesanteur;  
 $H_D$  : amplitude de la houle qui provoque  $D$  dommages sur l'ouvrage;  
 $H_f$  : amplitude de la houle qui franchit l'ouvrage;  
 $H_0$  : amplitude de la houle au large en eau profonde;  
 $L_0$  : longueur d'onde au large en eau profonde;  
 $N_s$  : nombre de stabilité de Hudson;

$R$  : hauteur maximale d'ascension de la houle sur l'ouvrage;  
 $S_r$  :  $\gamma_r/\gamma_w$   
 $T$  : période de la houle;  
 $W$  : poids des blocs;  
 $Z$  : cote de l'ouvrage au-dessus du niveau moyen.  
 $\gamma_r$  : masse spécifique du bloc;  
 $\gamma_w$  : masse spécifique de l'eau;