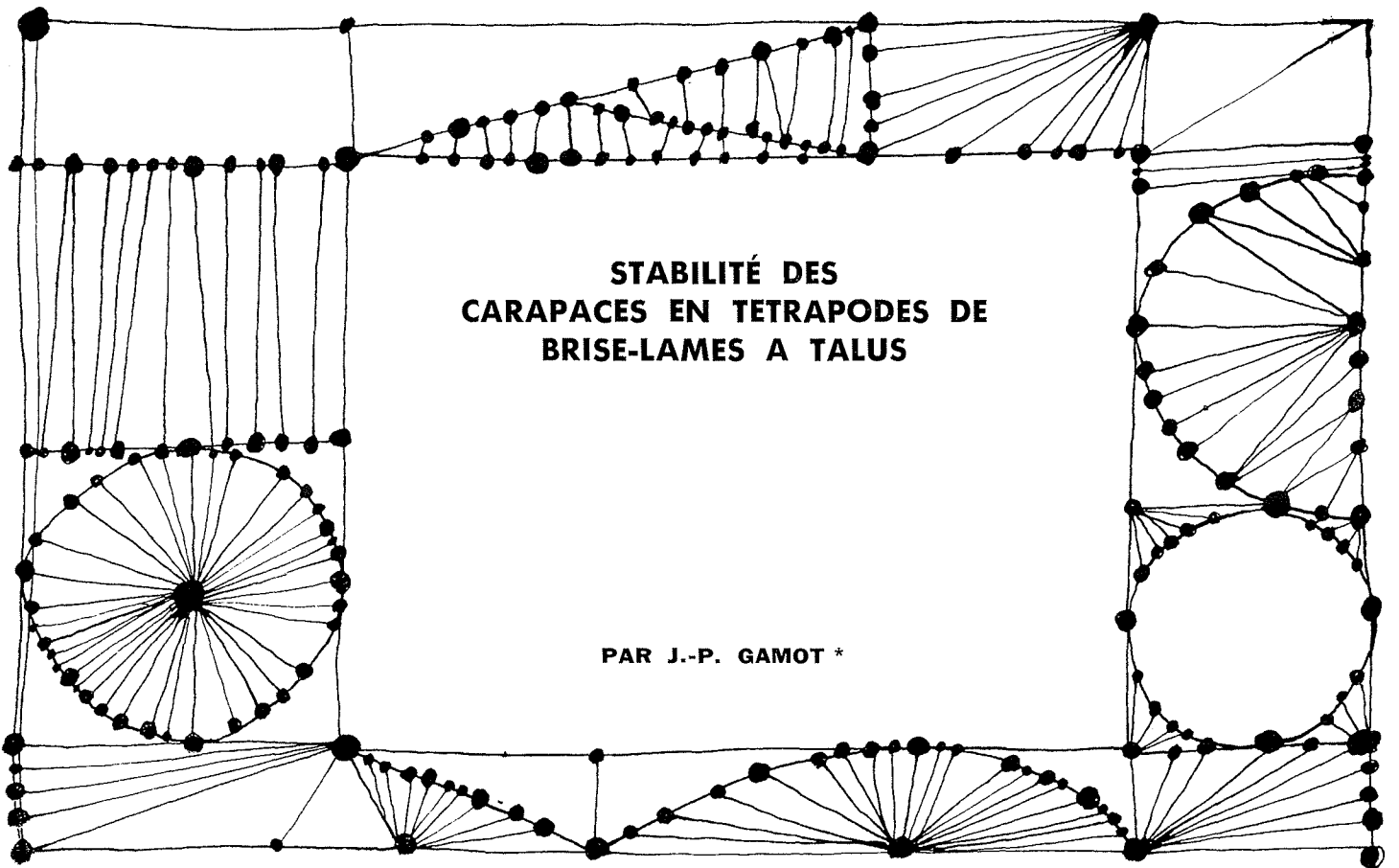


STABILITÉ DES CARAPACES EN TETRAPODES DE BRISE-LAMES A TALUS

PAR J.-P. GAMOT *



Lors de récents congrès internationaux (XXI^e Congrès International de Navigation à Stockholm en juillet 1965 et, plus récemment, la « XI^e Conférence on Coastal Engineering » à Londres en septembre 1968), de nombreux participants ont manifesté leur intérêt pour les questions traitant de la conception et de la réalisation des brise-lames à talus.

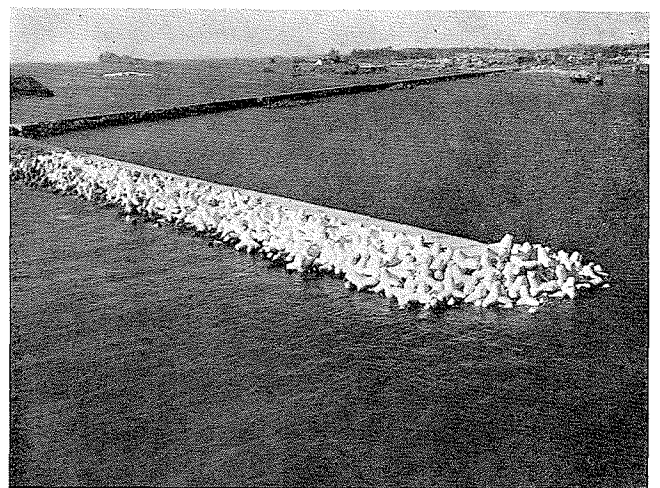
Le problème de la stabilité des blocs de carapace a été évoqué à ces congrès, dans plusieurs communications qui présentaient des résultats observés dans la nature lors de tempêtes exceptionnelles ou obtenus en laboratoires lors d'études sur modèles réduits.

Il paraît intéressant de faire une rapide synthèse des résultats obtenus avec les tétrapodes; en effet, de très nombreux essais ont été effectués dans divers laboratoires, tant en France qu'à l'étranger. Par ailleurs, plus de 300 brise-lames et ouvrages maritimes divers, répartis sur le bord de presque tous les océans et mers du monde, ont été protégés à l'aide de ces blocs, certains depuis près de vingt ans.

1. — Les formules simplifiées du genre de celle mise au point aux Etats-Unis par R. Y. Hudson, permettent effectivement de préparer un avant-projet, mais elles ne peuvent rendre compte dans le détail de la complexité du problème de la stabilité des blocs de carapace.

En effet, ces formules admettent comme seules variables l'amplitude des vagues, la masse spécifique des blocs ainsi que celle de l'eau dans laquelle

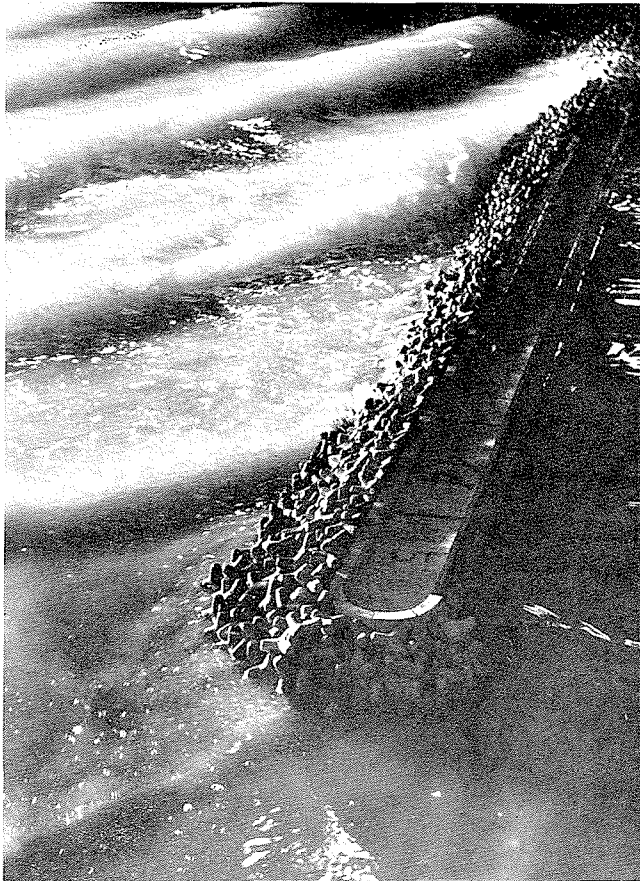
l'ouvrage est construit, et la pente de la carapace; elles ne prennent en compte que par quatre valeurs d'un coefficient K_D , l'influence du déferlement des vagues et les problèmes particuliers posés par les musoirs.



1/ Crescent City, Californie, Etats-Unis. — Vue du brise-lames protégé à l'aide de 1 800 tétrapodes de 10 m³ (25 t). Les études expérimentales ont été effectuées en 1955 notamment par U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station, à Vicksburg, Mississippi. Les travaux furent terminés en 1957.

Crescent City, California, U.S.A. — View of the breakwater with an armour of 1 800 Tetrapods of 10 cubic metres (25 tons). The experimental tests for this structure were carried out in 1955, notably by the U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station, Vicksburg, Mississippi. The structure was completed in 1957.

* Gérant de SOTRAMER (Société d'exploitation de brevets pour travaux à la mer).



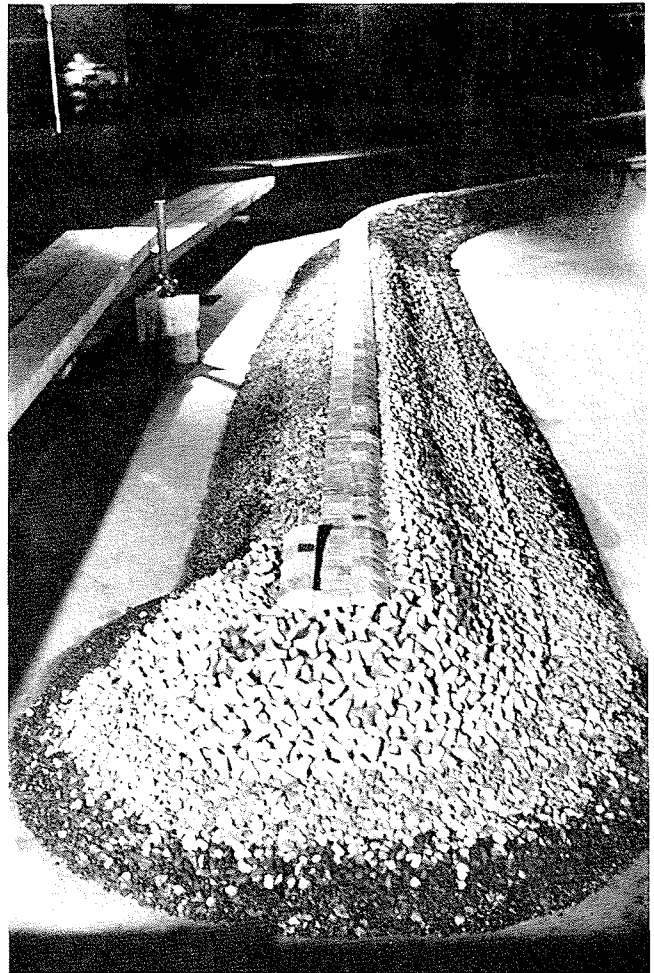
2/ Tamatave, Madagascar. — Etude de stabilité du rechargement du brise-lames existant, effectuée en 1960 par la Société Grenobloise d'Etudes et d'Applications Hydrauliques à Grenoble, France. Les travaux furent terminés en 1964. Plus de 1 500 tétrapodes de 10 m³ (25 t) ont été utilisés.

Tamatave, Madagascar. — Stability tests on the reinforced existing breakwater in 1960 by Société Grenobloise d'Etudes et d'Applications Hydrauliques in Grenoble, France. The structure was completed in 1964, with over 1 500 Tetrapods of 10 cubic metres (25 tons).



4/ Casablanca, Maroc. — Etude en cuve à houle effectuée par le Laboratoire Central d'Hydraulique de France à Maisons-Alfort en septembre 1965. Construction d'une nouvelle jetée transversale protégée à l'aide de tétrapodes de 6,3 m³.

Casablanca, Morocco. — Wave tank tests at the Laboratoire Central d'Hydraulique de France, Maisons-Alfort in September 1965. Construction of a new cross-jetty with an armour of 6.3 cubic metre Tetrapods.



3/ Arzew, Algérie. — Etude en bassin à houle de la stabilité du prolongement du brise-lames (échelle 1/75^e), effectuée par le Laboratoire National d'Hydraulique de France à Chatou, France, en 1963. Les travaux, comportant l'emploi de 4 000 tétrapodes de 16 m³ (40 t), furent achevés en 1966.

Arzew, Algeria. — Wave tank tests with a 1:75 scale model on the stability of a breakwater extension at the Laboratoire National d'Hydraulique de France, Chatou, France, in 1963. Work involving the use of some 4 000 Tetrapods of 16 cubic metres (40 tons) was completed in 1966.

L'expérience conduit à penser que si ces paramètres sont parmi les principaux, d'autres interviennent aussi et peuvent avoir une importance notable; on peut citer par exemple la pente des fonds marins devant l'ouvrage, la période et l'incidence des vagues, la hauteur de l'ouvrage, la disposition de la superstructure, la porosité des diverses couches de matériaux utilisés, l'importance des franchissements, le rayon du musoir, etc.

Il n'est donc pas étonnant que les valeurs de K_D , calculées à partir d'observations faites sur des ouvrages existants où les paramètres cités ci-dessus ont nécessairement des valeurs très différentes d'une structure à l'autre, soient assez dispersées.

2. — Le calcul du coefficient K_D à partir d'observations faites dans la nature, se heurte à de multiples difficultés :

a) Il est rare de disposer sur place d'un poste d'observation, ou mieux d'un enregistreur sûr et précis permettant l'analyse (amplitudes, périodes, direction de propagation des vagues) des tempêtes les plus fortes.

b) L'analyse des observations et enregistrements est délicate; elle doit permettre de déterminer la valeur à introduire dans la formule — le plus souvent l' « amplitude significative ».

Il faut noter qu'une incertitude de $\pm 10\%$ sur l'amplitude entraîne une incertitude de $\pm 33\%$ sur la valeur de K_D .

c) Il faut fixer la limite de stabilité correspondant au critère de « non-dommage ».

Or, dans la plupart des cas, les ouvrages résistent parfaitement aux tempêtes sans qu'il soit possible d'apprécier avec quelle marge de sécurité : les valeurs de K_D , calculées sont alors inférieures aux valeurs de « non-dommage ».

Sur modèle réduit, par contre, la détermination de K_D est plus facile et plus précise puisqu'on est maître de la variation du paramètre essentiel, à savoir l'amplitude des vagues.

Il faut noter qu'actuellement, les essais de stabilité sur modèles sont très généralement effectués avec des houles d'amplitudes constantes. La définition de K_D est alors différente de celle obtenue par l'analyse des tempêtes *in situ* où les houles sont irrégulières.

Il faudrait déterminer avec précision quelle houle d'amplitude régulière aurait exactement les mêmes effets sur la stabilité de l'ouvrage et notamment de la carapace, qu'une tempête donnée observée dans la nature.

3. — Les valeurs de K_D , présentées dans le tableau ci-après, ont été calculées de la manière suivante :

a) Résultats de tempêtes observées dans la nature :

Crescent City (Etats-Unis) :

Les valeurs de l'amplitude sont déduites de données fournies par le Corps of Engineers et mentionnées dans la communication présentée par MM. P. Danel et L. Greslou à la « VIII^e Conférence on Coastal Engineering » à Mexico en novembre 1962.

Cet ouvrage a été soumis au cours de la tempête exceptionnelle du 9 février 1960 à des houles dont l'amplitude significative atteignait 9,10 à 9,75 m.

Les valeurs indiquées correspondent à des amplitudes significatives de 7,90 et 9,10 m.

Depuis lors, cet ouvrage a résisté sans dommage au raz-de-marée (tsunami des 28 et 29 mars 1964) qui a suivi le tremblement de terre de l'Alaska.

Berlevaag (Norvège) :

La hauteur des vagues enregistrées a été publiée par M. Sverre Kjelstrup, Ingénieur en Chef du V^e District de l'Administration des ports norvégiens, dans son article intitulé « Des tétrapodes au nord du cercle Arctique », revue *Travaux* (février 1964).

Elle a atteint 9,30 m au cours de la tempête du 22 novembre 1963.

Les valeurs indiquées correspondent à une amplitude significative de 7,20 m.

Mehdia (Maroc) :

Ce musoir, situé par fonds faibles, est soumis très fréquemment, chaque année, à l'action des houles déferlantes, susceptibles de se propager sur ces fonds.

L'amplitude de ces vagues peut dépasser 7 m.

La valeur indiquée correspond à une amplitude de 6,50 m.

Le calcul de K_D est ici assez facile, mais on obtient une valeur par défaut puisque la stabilité est excellente.

Safi (Maroc) :

Le calcul a été effectué à partir des estimations et observations des spécialistes locaux; en effet, la dure houle de l'Atlantique a fait l'objet d'études statistiques importantes au Maroc.

Son amplitude atteint fréquemment 7 à 8 m, valeurs retenues pour le calcul de K_D , et qui sont sans doute dépassées au cours des tempêtes exceptionnelles.

	Valeurs du coefficient K_D			
	PROFIL COURANT		MUSOIR	
	Vagues déferlantes	Vagues non déferlantes	Vagues déferlantes	Vagues non déferlantes
<i>Observations lors de tempêtes :</i>				
Crescent City.....	13-25		13-25	
Berlevaag.		18		12
Mehdia.			> 8,5	
Safi.		13-19		13-19
<i>Résultats d'essais</i> (100 cas analysés) — valeur moyenne.	15	16	9	10
NORMES SOTRAMER.	8,5	10,5	5,5	7
<i>Manuel américain</i> TR 4/1966 « Shore Protection, Planning and Design » (U.S. Corps of Engineers).	7,5	8,5	5	6,5

b) Analyse d'essais de stabilité sur modèles réduits :

Une centaine de valeurs de K_D ont été déterminées pour des cas pris au hasard parmi les nombreux essais réalisés sur des projets particuliers.

Les paramètres importants qui ne sont pas pris en compte par la formule de stabilité, tels que profondeur d'eau, période de la houle, hauteur et nature de la superstructure, etc., variaient très largement.

Dans ces conditions, comme cela est indiqué en I. ci-dessus, les résultats étaient relativement dispersés; leur moyenne arithmétique a été calculée.

c) Normes SOTRAMER :

En comparant toutes ces valeurs expérimentales aux normes actuellement recommandées, on notera que les valeurs de K_D proposées par SOTRAMER, lé-



5/ Leixoes (près de Porto), Portugal. — Surélévation du brise-lames principal. Les travaux exécutés en 1967 et 1968 ont comporté l'emploi de 2 600 tétrapodes de 16 m³ (40 t). Les études expérimentales furent effectuées en 1966 à Lisbonne par le L.N.E.C. (Laboratorio Nacional de Engenharia Civil).

Leixoes, Portugal. — Raising the height of the main harbour breakwater. Construction took place in 1967 and 1968, involving the use of 2 600 Tetrapods of 16 cubic metres (40 tons). The experimental investigations were carried out by the Laboratorio Nacional de Engenharia Civil, Lisbon, in 1966.

gèrement supérieures à celles fixées par le U.S. Corps of Engineers, présentent encore une très grande marge de sécurité.

Pour un avant-projet, les valeurs de K_D , recommandées par SOTRAMER, peuvent donc être adoptées en toute sécurité.

4. — Influence de l'incidence de la houle.

Une série d'essais systématiques en bassin à houle a donné les résultats présentés sur le graphique ci-joint : l'ouvrage présentait une carapace indéfinie vers le haut; il n'était donc pas franchi.

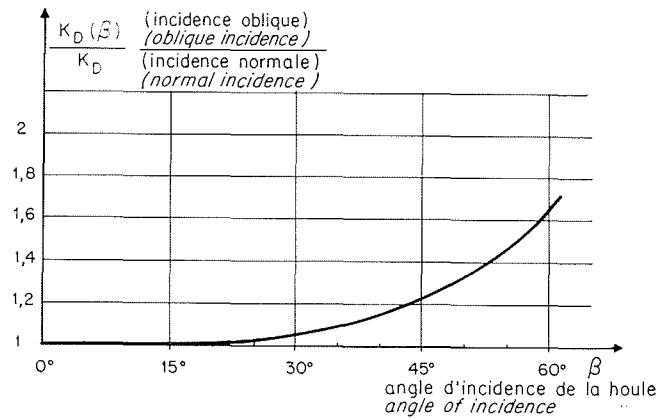
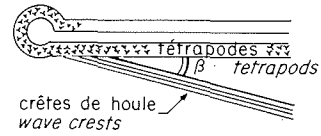
On notera que l'influence de l'angle d'incidence est favorable; K_D croît avec cet angle, mais cet effet ne devient vraiment sensible qu'au-delà de 40°.

En conséquence, toutes les structures qui peuvent recevoir des houles de toutes directions, doivent être calculées en utilisant les normes.

Cette influence bénéfique de l'incidence, qui s'accompagne aussi d'une diminution du « run-up », peut s'expliquer par le fait que la carapace offre, à une houle oblique, une pente « apparente » plus douce.

Formule d'Hudson
Hudson's formula
(incidence normale de la houle)
(normal wave incidence)

$$W = \frac{W_r H^3}{K_D (S_r - 1)^3 \cotg \alpha}$$



6/ Stabilité des tétrapodes en houle oblique.

Toutefois, pour les carapaces en tétrapodes, l'influence de la pente ne semble pas aussi nette qu'elle apparaît dans les formules — du moins pour le critère de « non-dommage » par suite, sans doute, d'une moins bonne imbrication des blocs entre eux lorsque la pente est plus faible.

On a également observé que lorsque l'amplitude de la houle dépasse la valeur « non-dommage », les mouvements des blocs sont amplifiés par l'obliquité des vagues; les blocs peuvent, en effet, être entraînés latéralement et tomber, alors qu'en houle normale, ils peuvent rester un temps sur la carapace. Ce phénomène, général pour tous les blocs quelle que soit leur forme, ainsi que pour les enrochements, pourrait expliquer pourquoi certains spécialistes estiment que l'obliquité des vagues rend plus précieuse la stabilité d'une carapace; en fait, ceci n'est vrai que pour les blocs de carapace de poids insuffisants.

L'obliquité de la houle améliore la stabilité, mais elle fait mieux apparaître les défauts éventuels si l'ouvrage a été mal calculé.