

Les moyens de lutte contre la houle et le clapot

Eléments tirés du cours de Jean Bougis
à l'Institut des Sciences de l'Ingénieur de Toulon et du Var (ISITV)
(3^{ème} année, option marine)

1. Notion de brise-lames

L'objectif principal d'un brise-lames est de protéger une zone côtière (une portion de la côte, un port, un mouillage forain,...) de l'agitation excessive du plan d'eau sur lequel il est situé.

En première approximation, les brise-lames peuvent être globalement classés en fonction de deux familles de critères.

D'abord en fonction de leur nature mécanique :

- les ouvrages fixes qui s'appuient sur le sol marin (digues et jetées à parois verticales ou à talus, digues discontinues, murs perforés, ...),
- les ouvrages mobiles flottants ou immergés.

Enfin selon leur principal mode d'action :

- les systèmes réflecteurs,
- les systèmes dissipateurs d'énergie,
- les systèmes dynamiques.

Cette classification présente une part d'arbitraire puisque la plupart des dispositifs fonctionnent partiellement selon plusieurs principes d'action.

2. Critères d'efficacité des brise-lames

Pour pouvoir comparer les performances des différents concepts de brise-lames, il est nécessaire de quantifier leur capacité à s'opposer au passage de la houle. Pour cela, il est d'usage de définir deux coefficients de transmission et deux coefficients de réflexion issus de l'analyse bidimensionnelle.

A l'infini amont, du côté d'où vient la houle incidente, la perturbation de la surface libre résulte de la superposition de l'onde incidente de hauteur crête à creux H_I et de l'onde réfléchiée par le brise-lames de hauteur H_R .

A l'infini aval, du côté vers lequel se dirige la houle incidente, la houle résulte seulement de l'onde transmise de hauteur H_T .

Dans ces conditions, et compte tenu que l'énergie totale véhiculée par la houle est proportionnelle au carré de sa hauteur, les coefficients de transmission et de réflexion sont les suivants :

- **Un coefficient de transmission d'amplitude** du système, noté C_T , qui est le quotient de la hauteur H_T de la houle transmise par la hauteur H_I de la houle incidente :

$$(1) \quad C_T = \frac{H_T}{H_I}$$

- **Un coefficient de réflexion d'amplitude** du système, noté C_R , qui est le quotient de la hauteur H_R de la houle réfléchie par la hauteur H_I de la houle incidente :

$$(2) \quad C_R = \frac{H_R}{H_I}$$

- **Un coefficient de transmission d'énergie** du système, noté C'_T , qui est le quotient du carré de la hauteur H_T de la houle transmise par le carré de la hauteur H_I de la houle incidente :

$$(3) \quad C'_T = \frac{H_T^2}{H_I^2}$$

- **Un coefficient de réflexion d'énergie** du système, noté C'_R , qui est le quotient du carré de la hauteur H_R de la houle réfléchie par le carré de la hauteur H_I de la houle incidente :

$$(4) \quad C'_R = \frac{H_R^2}{H_I^2}$$

Naturellement, en l'absence de dissipation visqueuse ou turbulente d'une partie de l'énergie, la conservation de l'énergie impose que la somme des coefficients C'_T et C'_R soit égale à l'unité ou encore :

$$(5) \quad H_I^2 = H_T^2 + H_R^2$$

Par contre, lorsqu'il y a dissipation visqueuse ou turbulente d'une partie de l'énergie, la conservation de l'énergie impose que la somme des coefficients C'_T et C'_R soit inférieure à l'unité ou encore :

$$(6) \quad H_I^2 = H_T^2 + H_R^2 + H_D^2$$

expression dans laquelle H_D désigne la hauteur de la houle de même période que l'onde incidente et qui véhiculerait une énergie égale à l'énergie dissipée.

Ces définitions appellent trois observations qui montrent que leur utilisation dans le cas d'effets tridimensionnels importants devient délicate :

- Lorsque la houle incidente attaque obliquement le brise-lames, ces différents coefficients dépendent de l'angle d'incidence β .
- Lorsque les effets du brise-lames induisent une houle dont les caractéristiques sont tridimensionnelles, ces différents coefficients dépendent de l'angle d'incidence β et du point M considéré.

- Lorsque les brise-lames sont implantés sur un site dont la bathymétrie et le trait de côte engendrent un phénomène d'agitation confuse et/ou des résonances de bassin, ces coefficients qui gardent leur intérêt théorique, ne suffisent plus à définir la houle résiduelle, il est alors nécessaire d'effectuer des analyses d'agitation comparatives avec et sans atténuateurs.

3. Efforts moyens subis par un brise-lames

Une houle régulière à la période T exerce sur un brise-lames des efforts alternatifs à la même période. Toutefois, l'existence d'un terme proportionnel au carré de la vitesse dans l'expression de la pression engendre un effort constant et des harmoniques à des périodes T/n .

Pour que le brise-lames reste sur place, l'effort moyen qu'il subit doit être repris par ses ancrages.

H. Maruo /1960/ a établi une expression générale de cet effort sur un brise-lames bidimensionnel en grande profondeur pour une incidence normale. M.S. Longuet-Higgins /1977/ l'a complété pour la profondeur finie toujours en incidence normale :

$$(7) \quad \bar{F}_y = \frac{1}{16} \rho g [H_I^2 + H_R^2 - H_T^2] \left[1 + \frac{2kh}{\text{sh } 2kh} \right] \sin^2 \beta$$

Expression dans laquelle β désigne l'angle d'incidence, h la profondeur et k le nombre d'onde.

En supposant qu'il puisse y avoir dissipation d'énergie mais pas fourniture d'énergie (système passif), cette expression devient :

$$(8) \quad \bar{F}_y = \frac{1}{8} \rho g \left[H_R^2 + \frac{1}{2} H_D^2 \right] \left[1 + \frac{2kh}{\text{sh } 2kh} \right] \sin^2 \beta$$

Et, en supposant qu'il n'y ait pas de perte d'énergie :

$$(9) \quad \bar{F}_y = \frac{1}{8} \rho g H_R^2 \left[1 + \frac{2kh}{\text{sh } 2kh} \right] \sin^2 \beta$$

Ce résultat montre que les efforts moyens repris par l'ancrage sont directement proportionnels à l'énergie de la houle qui est arrêtée.

4. Différents brise-lames

Il existe de nombreux types de brise-lames dont les performances sont très variables d'un procédé à l'autre. Les caractéristiques et performances

des différents procédés sont rassemblées dans les tableaux suivants qui sont classés en fonction de leur mode d'action principal.

4.1. Les brise-lames fixes

La méthode la plus ancienne utilisée par les hommes pour protéger un plan d'eau contre les agressions de la houle et des lames consiste à ériger une digue ou une jetée qui s'oppose complètement au passage de l'eau. Le seul chemin qui reste alors possible pour le fluide, réside dans le contournement du musoir de l'ouvrage.

Au cours des âges, les concepts de brise-lames fixes ont évolué ouvrant un choix entre plusieurs gammes d'ouvrages. Ils peuvent globalement être classés en plusieurs catégories en fonction de leurs caractéristiques géométriques et hydrodynamiques :

- Les digues et jetées non franchissables qui représentent pour l'eau un obstacle infranchissable autrement que par contournement du musoir.
- Les digues et jetées franchissables qui sont arasées à des cotes suffisamment basses pour qu'elles puissent être franchies par l'eau dans certaines conditions de marées et de houles.
- Les murs perforés permettant de laisser passer l'eau avec des pertes de charges plus ou moins importantes.
- Les caissons arc qui piègent la houle dans des cellules pour dissiper son énergie dans des tourbillons.
- Les brise-lames discontinus offrant un passage libre à l'eau en dessous d'une certaine cote.
- Les nouveaux concepts de digues partielles.

Système	Brevet	Niveau d'eau	Type de filtre	Longueur d'onde / largeur
Digues non franchissables	-	variable	Total	[0 - ∞[
Digues franchissables	-	variable	Peigne	peigne
Brise-lames discontinus	-	fixe haut	coupe HF	< 2
Mur perforé Jarlan	Jarlan	variable	coupe bande	3 - 8
Caisson Arc Sogreah	Sograh	variable	coupe bande	selon accord
Mur d'eau oscillant	Principia	fixe haut	coupe bande	3 - 6
Mur d'eau fixe	Monaco	fixe haut	coupe HF	< 5
Digue partielle	Bouygues OS	fixe haut	coupe HF	

Tableau 1 : Brise-lames fixes

4.2. Les brise-lames flottants réflecteurs

Les principaux systèmes de brise-lames réflecteurs sont constitués par des pontons ancrés soit par des lignes caténaïres ou tendues attachées à des corps-morts, soit par des pieux.

Les performances des autres types de brise-lames réflecteurs sont souvent supérieures à celles des pontons, mais ce gain est obtenu au détriment de la simplicité des formes et du coût.

Système	Brevet	Largeur (m)	Tirant d'eau (m)	Masse (t/m)	Période (s)	Hauteur houle (m)	Longueur d'onde / largeur
Pontons lourds	-	3.0	0.7	2.1	< 2.5	< 1.0	< 3.3
"	-	3.5	0.8	2.8	< 2.7	< 1.0	< 3.3
"	-	4.0	0.9	3.6	< 2.9	< 1.0	< 3.3
Ponton	Carver	3.7	1.1	4.0	< 3.0	< 0.9	< 4.0
Ponton	DHI	3.0	0.6	1.5	< 2.9	< 0.6	< 4.0
Ponton	Ofuya	7.1	1.0	6.6	< 3.5	< 1.3	< 2.6
Alaska	Carver	6.4	1.4	4.7	< 3.5	< 0.9	< 3.0
Catamaran	Davidson	3.0	1.5	-	< 3.4	< 0.9	< 6.0
Ponton	Equiport	7.6	1.8	0.6	< 4.0	< 1.3	< 3.3
Cadre en A	Ofuya	6.3	3.9	-	< 3.5		< 3.0
	Chen et Wiegel	13.0	3.2	-	< 3.5	< 1.4	< 1.5
Ponton	Lasalle	6.6	2.5	-	< 4.0	< 1.5	< 3.8
BS 107 C		10.0	1.4	-	< 4.0	< 1.5	< 2.5

Tableau 2 : Brise-lames flottants réflecteurs

4.3. **Les systèmes flottants dissipateurs d'énergie**

Les premiers systèmes flottants dissipateurs sont des nappes flottantes formées avec des pneus usagés, dont le montage artisanal est souvent assuré par les utilisateurs.

Les autres types de brise-lames dissipateurs d'énergie sont disparates :

- Le système à flotteurs captifs est formé de flotteurs rangés en lignes et colonnes et attachés à une plaque immergée ne reposant pas sur le fond ;
- Le système Harris, qui a connu le plus de réalisations, est constitué de caissons à claires-voies ;
- Le système mis au point par les Chantiers et Ateliers de La Perrière est formé d'éléments en aluminium à claires-voies de 12 mètres de long et de 3 mètres de large.

Système	Brevet	Largeur (m)	Tirant d'eau (m)	Masse (t/m)	Période (s)	Hauteur houle (m)	Longueur d'onde / largeur
Nappe de pneus	Goodyear	12.8	-	-	< 2.7	< 0.8	< 0.9
Nappe de pneus	Pipe-Tire	12.2	-	-	< 3.6	< 0.8	< 1.5
Nappe de pneus	Wave-Maze	21.3	-	-	< 4.5	< 1.0	< 1.2
Flotteurs captifs	?	13.2	-	-	< 3.3	< 1.1	< 0.7
Ponton	Harris	14.0	-	-	< 3.0	< 1.0	< 1.4
Ponton	LCHF	7.0	-	-	< 3.3	< 1.0	-
Ponton	La Perrière	5.0	-	-	< 2.6	< 1.0	< 1.4

Tableau 3 : Brise-lames flottants dissipateurs d'énergie

4.4. Les systèmes flottants dynamiques

Les brise-lames dynamiques utilisent l'énergie de la houle incidente pour osciller en générant, sur l'arrière, une houle en opposition de phase.

Il existe très peu de systèmes dynamiques utilisant les mouvements de l'ouvrage pour atténuer la houle. En fait, ce type de procédé a surtout été étudié comme suite aux recherches pour la récupération de l'énergie des vagues et de la tenue à la mer des structures.

Système	Brevet	Installation	Niveau d'eau	Type de filtre	Hauteur houle (m)	onde / largeur
Bouée	Bowley	non	variable	coupe bande		< 2.8
Ponton	Sogreah	oui	variable	coupe bande	< 1.0	< 4.5
Acripel	Acri	non	fixe	coupe HF		< 8.0
ASB	Degaie	oui	variable	coupe HF	< 1.7	< 13.5

Tableau 4 : Brise-lames flottants dynamiques

4.5. Les brise-lames hydrauliques et pneumatiques

Les brise-lames hydrauliques et pneumatiques ne sont pas à proprement parlé des brise-lames flottants, mais ils font parti des procédés de protection transportables par opposition aux ouvrages fixes, et leurs performances sont plutôt à rapprocher de celles des flotteurs.

Le principe de fonctionnement de ces systèmes repose sur le fait qu'un courant de sens opposé à une houle peut, sous certaines conditions, empêcher partiellement ou complètement sa propagation.

Les brise-lames hydrauliques consistent à créer un courant d'eau en surface par injection d'eau sous pression.

Les brise-lames pneumatiques consistent à créer un rideau de bulles d'air à partir du fond. Ces bulles créent alors un courant horizontal au niveau de la surface libre.

5. Choix de procédés de protection

La figure 1 montre les performances d'un ponton lourd d'un mètre de tirant d'eau dans une profondeur de 4 mètres. Ces résultats sont issus de la compilation de résultats de la littérature, de résultats d'essais et de calculs numériques effectués par nos soins en bidimensionnel.

Il apparaît clairement sur la figure 1 que les performances du ponton sont meilleures avec un ancrage sur pieux susceptible de bloquer les mouvements horizontaux en particulier l'embardée. Toutefois, les performances obtenues avec un ancrage sur corps-morts peuvent parfois donner satisfaction.

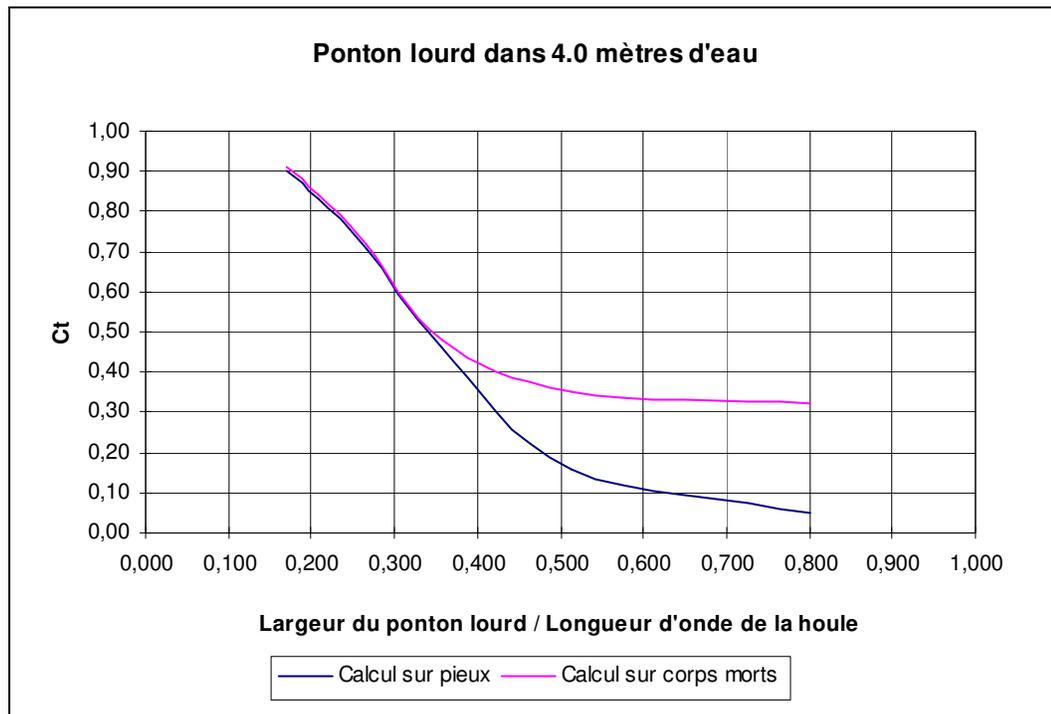


Figure 1 : Ponton lourd dans une profondeur de 4 mètres.

Les états de mer qui présentent des hauteurs significatives de l'ordre de 1.0 m avec des périodes de 4.0 s à 4.5 s, dépassent les performances d'un ponton lourd raisonnable. En effet, en conservant un rapport de l'ordre de 3.3, les caractéristiques devraient être les suivantes :

- largeur 8.0 à 9.5 m,
- tirant d'eau 2.2 à 2.7 m,
- masse linéique 17.6 à 25.7 t/m,
- ancrage sur pieux.

Les solutions sur pontons lourds ne sont alors plus nécessairement les plus économiques et il convient d'analyser des solutions comprenant soit une digue fixe, soit des atténuateurs semi-submersibles de type ASB-3000 qui permettent d'obtenir une longueur d'onde relative de coupure de 13.5.

Les volumes mis en jeu dans d'une digue en terre ou en enrochements croissent avec le carré de la profondeur. Comme la dimension des enrochements de la carapace croît aussi avec la profondeur, le coût croît plus vite que le carré de la profondeur.

Les coûts d'une ligne d'atténuateurs se composent d'un coût fixe pour les appareils et d'un coût croissant avec la profondeur pour les pieux.

Dans ces conditions, les digues en enrochement sont moins chères que des atténuateurs pour des profondeurs inférieures à 4 à 6 mètres selon les circonstances. Au delà de cette profondeur, c'est le contraire qui se produit.

La figure 2 représente le coefficient de transmission de l'ASB-3000 dans une profondeur de 10 mètres d'eau.

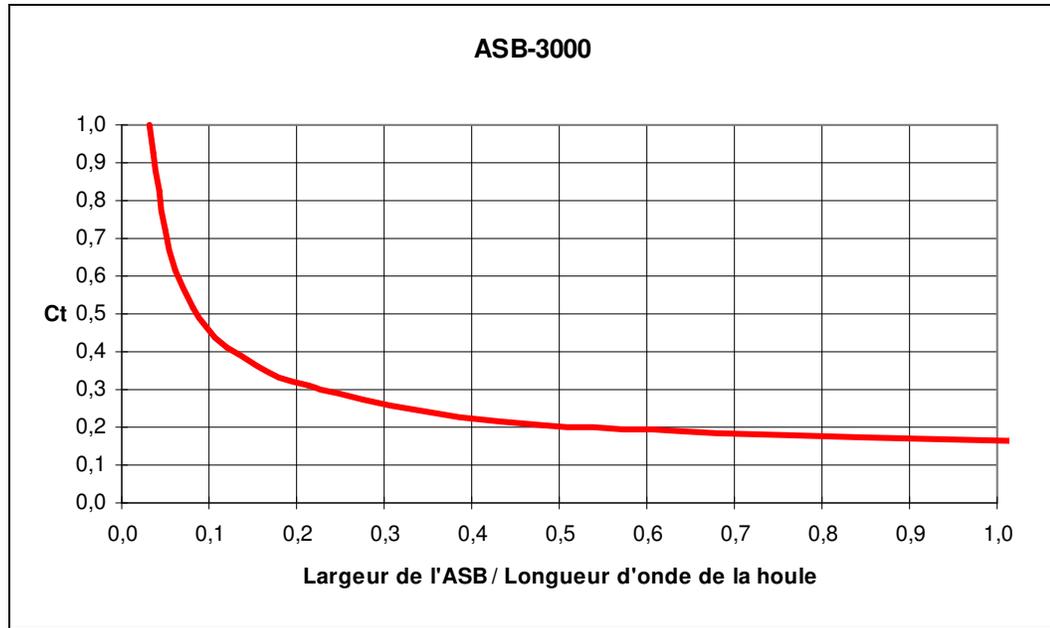


Figure 2 : Coefficient de transmission d'un ASB-3000 dans 10 mètres d'eau