

# La digue partielle à profil optimisé Le système BYBOP

Christophe Colmard  
André Tosello  
Jean Marie d'Ettoire  
Bouygues Offshore

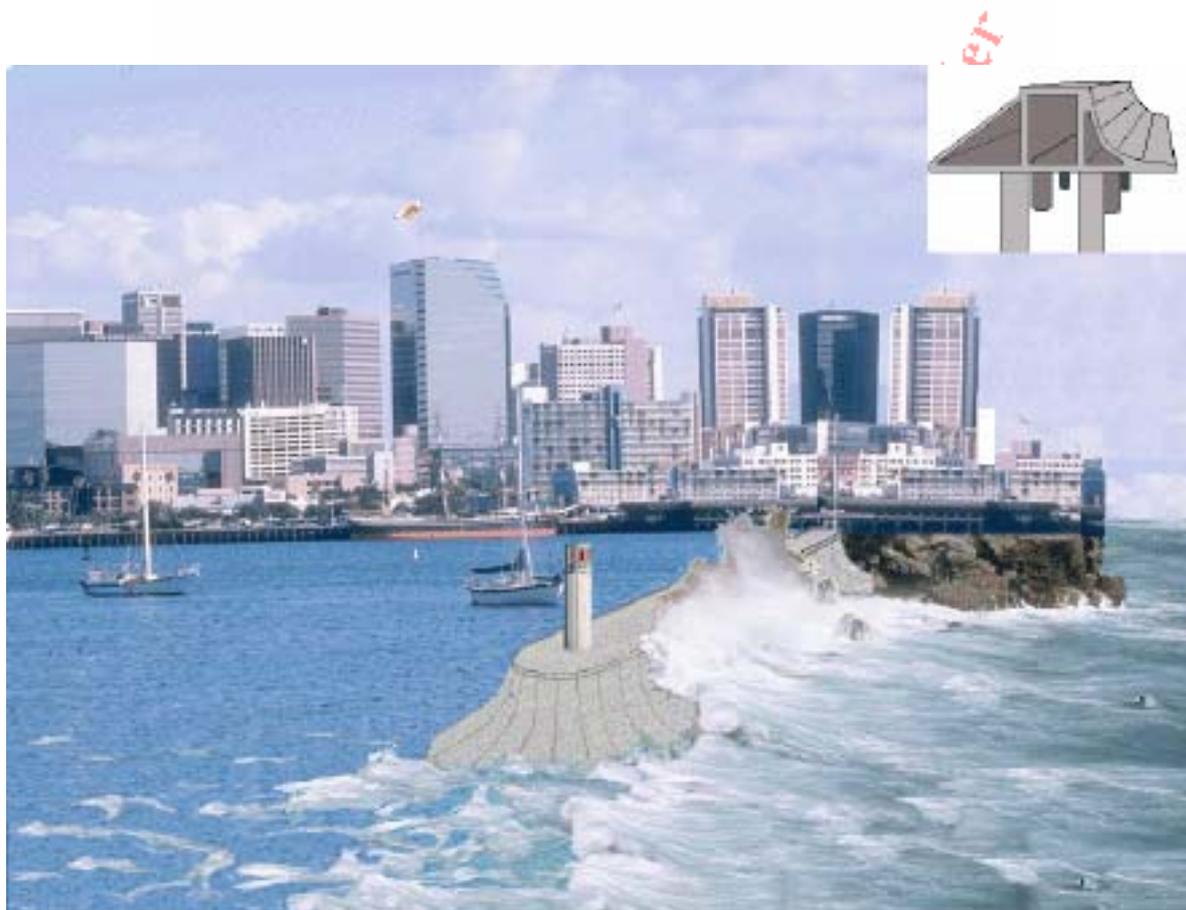


Fig. 1 Les digues ne reposent pas toujours sur le fond...

Pour protéger les sites où la profondeur d'eau est importante (>30m) les nouveaux types d'ouvrages brise-lames que sont les digues partielles, sont actuellement en développement. Ces digues sont soit fondées sur pieux, soit flottantes. Elles présentent un intérêt écologique incontestable. Elles ont en effet l'avantage de ne pas perturber fondamentalement l'écosystème marin, les courants n'étant pas perturbés.

Le principal inconvénient d'une digue partielle est qu'il y a continuité entre la masse d'eau du port et celle du large. Cette continuité permet en partie à l'énergie de la houle de se propager dans le port.

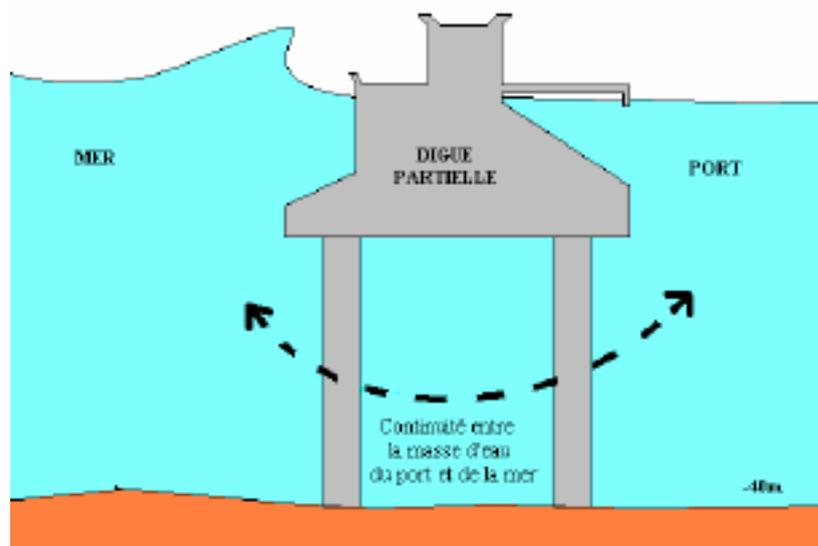


Fig. 2 L'énergie de la houle peut passer sous une digue partielle.

La société Bouygues Offshore a mis au point un système qui pour un ouvrage **deux fois moins large** qu'un caisson parallélépipédique (profil typique) présente une efficacité une à trois fois supérieure (suivant la période de la houle). **Ce type d'ouvrage est appelé BYBOP (Bouygues Breakwater Optimised Profile)** et il a été inventé par Christophe Colmard en 1997.

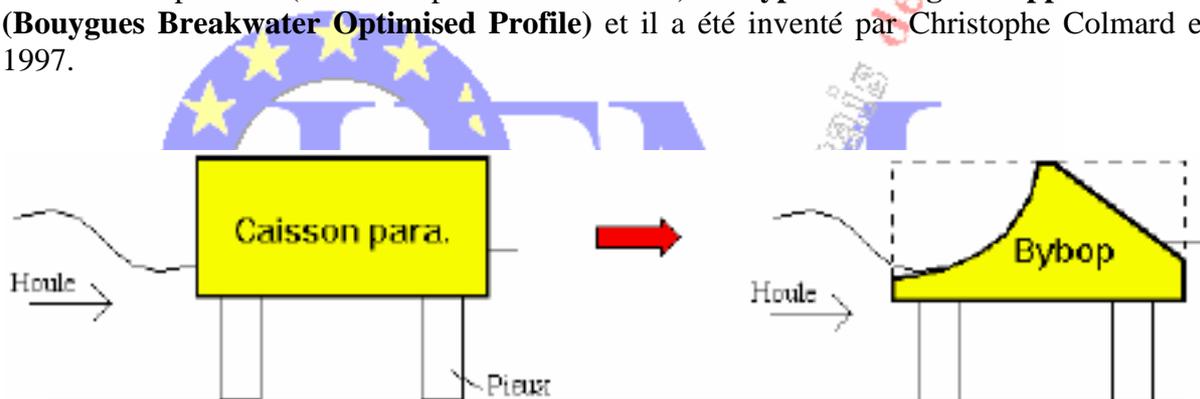


Fig. 3 Profil typique d'une digue partielle Profil BYBOP

Le profil du BYBOP a été dessiné à partir de l'étude des champs de vitesses de la masse liquide aux alentours d'un ouvrage parallélépipédique. Ces données sont obtenues expérimentalement par vélocimétrie laser et numériquement par un code Navier-Stokes 2D. Les travaux ont été réalisés au Laboratoire de Mécanique des Fluides et de Génie Civil du Havre. D'autres expériences ont été faites au laboratoire Océanide de Toulon pour optimiser le profil avant du BYBOP. Tous ces travaux nous ont permis d'inventer un nouveau type d'ouvrage de protection contre la houle, de déposer plusieurs brevets et donnent à l'entreprise Bouygues Offshore une avance technologique qui affermit sa place dans le monde de l'offshore. La principale innovation est de modifier la forme côté port de l'ouvrage pour améliorer ses facultés d'atténuer la houle venant du large.

Pour mieux comprendre la manière dont influence la modification de l'arrière de la digue, il est nécessaire de connaître le fonctionnement d'une digue parallélépipédique typique.

## Comportement des digues partielles parallélépipédiques

La création du profil BYBOP est principalement fondée sur l'optimisation du système hydraulique appelé « Mur d'Eau Fixe » généré par les digues partielles de type parallélépipédique. Le système « Mur d'Eau Fixe » a été expliqué pour la première fois par monsieur René Bouchet et monsieur J. M. Manzone<sup>1</sup>. La principauté de Monaco a déposé le brevet en 1986 et la société Bouygues Offshore en détient la licence mondiale exclusive (hors principauté).

La société Bouygues Offshore est donc intéressée par ce concept et a entrepris de comprendre le phénomène, de façon à maîtriser la construction de ce type d'ouvrage. Voici une présentation succincte des résultats obtenus.



Fig. 4 : Système « Mur d'Eau Fixe ».

L'ouvrage étant immergé et présentant à la houle incidente une face verticale, il se crée naturellement une superposition de l'onde incidente et de sa réflexion sur la digue. Cette superposition appelée clapotis partiel, induit devant la digue un mouvement vertical de va et vient du fluide. Ce mouvement produit des vitesses verticales importantes devant l'ouvrage.

Lors du retrait de la vague au niveau de la face avant du caisson, une partie de ces vitesses verticales descendantes se recombine sous le caisson en vitesses horizontales dirigées vers le port.

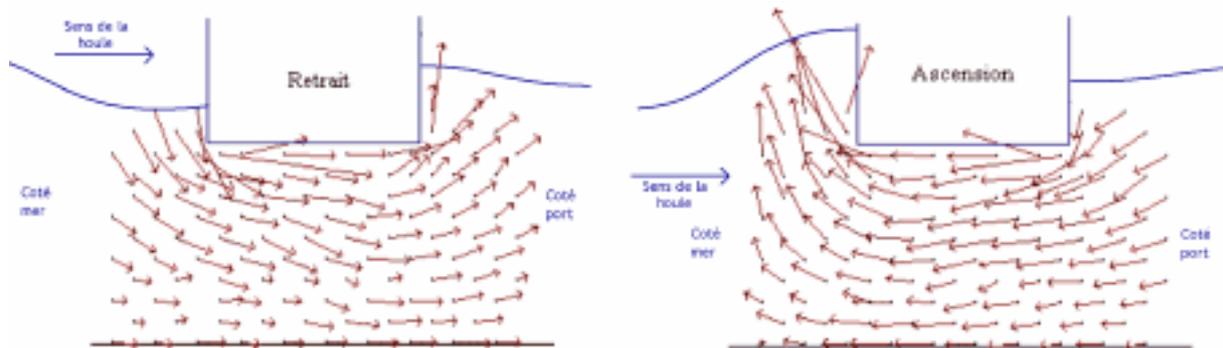


Fig. 5 : Vitesses globales générées pendant l'ascension et le retrait de la vague sur le caisson.  
 $T=1.76s$ ,  $H_i=0.065m$ ,  $i=0.1m$ ,  $W=0.5m$ ,  $h=0.6m$ ,  $K_t=0.69$ ,  $K_r=0.53$   $W/L=0.13$  et  $h/L=0.16$   
(mesures expérimentales).

C'est durant cette phase que transite l'énergie de la mer vers le port. Les vitesses horizontales se combinent ensuite dans le port en vitesses verticales ascendantes le long de la paroi côté port du caisson. Ce sont ces vitesses qui vont "exciter" la masse d'eau du port et créer la houle derrière la digue. Lors de la phase d'ascension, la cinématique du clapotis partiel induit sous la semelle de la digue des vitesses dirigées à l'inverse du sens de

<sup>1</sup> Le mur d'eau. Dispositif nouveau de brise houle en eau profonde, P.I.A.N.C. -A.I.P.C.N. - Bulletin 1986 - N° 52 pp 60-67

propagation de la houle. Dans le cas du système « Mur d'Eau fixe », on s'aperçoit que le port nourrit effectivement la vague. Les vitesses sont alors dirigées du port vers la mer comme le montrent les résultats numériques sur la figure 6. On s'aperçoit que la masse d'eau du port n'est pas seulement un récepteur passif d'énergie mais que de par sa cinématique, elle participe au fonctionnement du système.

**Nous nous apercevons qu'en modifiant la cinématique à l'arrière de l'ouvrage nous allons modifier le comportement global de l'atténuateur.**

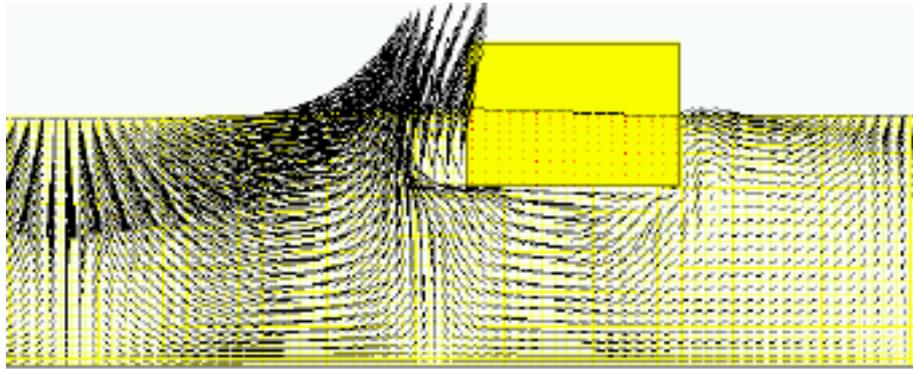


Fig. 6 : Interaction du port avec la vague ascendante pour  $T=1s$ ,  $h=0.6m$ ,  $i=0.2m$ ,  $W=0.5m$ ,  $H_i=0.04m$ ,  $W/L=0.33$ ,  $h/L=0.4$ .

### *Optimisation du système*

À partir de la compréhension du système "Mur d'eau Fixe", il a donc été possible d'imaginer une nouvelle forme d'ouvrage optimisant les qualités du caisson parallélépipédique et minimisant ses défauts.

#### *Buts recherchés*

Il convient tout d'abord d'obtenir un bon comportement du dispositif pour les ondes de grandes périodes. C'est dans les grandes tempêtes qu'elles apparaissent et l'amplitude des houles est souvent importante. Les houles centennales peuvent dépasser les 12 secondes en Méditerranée.

Il faut minimiser le pouvoir réfléchissant de la digue de manière à ce que les bateaux ne rencontrent pas une mer trop agitée lorsqu'ils croisent au large de la digue.

Enfin pour limiter les efforts horizontaux à la structure, le système doit limiter les effets de claqué de vague par une modification de la paroi amont.

C'est donc avec ces impératifs que nous avons travaillé, tout en gardant le dimensionnement de base qui est une structure de largeur  $W$ , d'immersion  $i$  et fondée sur pieux.

### *Lignes conductrices de cette optimisation*

Pour optimiser le phénomène il faut :

- 1) Favoriser la dissipation de l'énergie de la houle par effets tourbillonnaires, c'est-à-dire créer une géométrie de structure provoquant ce phénomène.
- 2) Modifier les formes de la paroi amont du caisson de façon à limiter la réflexion de la houle.
- 3) **Ajouter** au principe de base "Mur d'Eau Fixe", qui est l'amortissement de la masse d'eau en mouvement sous le caisson, **une autre masse oscillante côté port** en opposition de phase afin de contrarier la génération de la houle dans le port.

## Solutions étudiées

### Traitement des problèmes par modification de la face aval du caisson

Le point important de l'invention consiste à **découpler** quasiment totalement la masse d'eau du port de la masse d'eau excitatrice incluse sous le caisson. Pour cela la face arrière de l'ouvrage est fortement inclinée ( $\leq 35^\circ$  par rapport à l'horizontale) comme le montre la figure 7. L'inclinaison de cette paroi crée une **nouvelle masse d'eau** qui va permettre le découplage du port avec la mer.

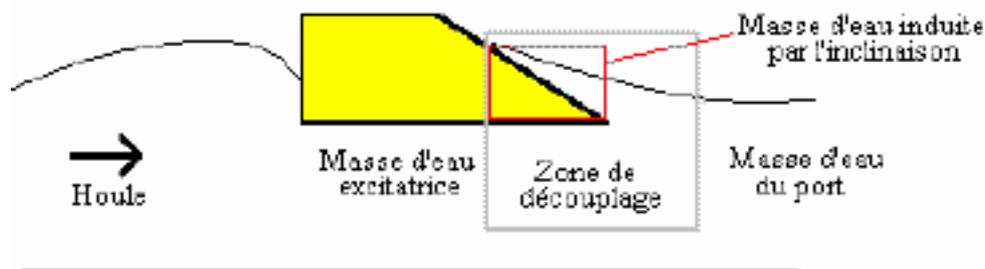


Fig. 7 : Amélioration par ajout d'une zone de découplage

Nous constatons que ce plan incliné a un effet très positif sur le fonctionnement du système amortisseur. L'intérêt de modifier ainsi l'arrière du caisson est triple :

- 1) Augmentation des effets tourbillonnaires dans la zone de découplage et par voie de conséquence augmentation de la dissipation énergétique.
- 2) Déviation du courant de retour qui alimente la vague amont ce qui élargit ainsi artificiellement le fond du caisson.
- 3) Création d'une zone liquide où les vitesses verticales aval vont se recombinaison dans le sens inverse de la propagation de la houle.

On constate que le plan incliné aval agit comme un **stockeur d'énergie potentielle**. Lors du retrait de la vague côté mer, il y a surélévation du niveau d'eau sur la paroi supérieure côté port. Ce flux est ensuite restitué (voir la figure 13) lorsque les vitesses sous le caisson s'inversent et sont dirigées vers le large.

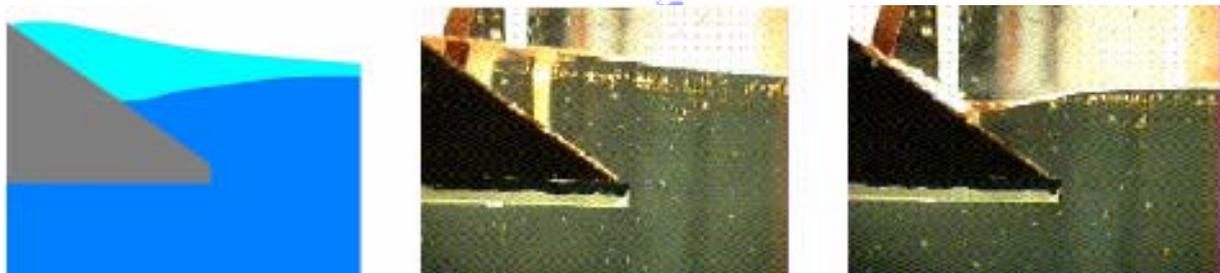


Fig. 8 Fonctionnement du plan incliné aval : L'énergie transmise dans le port est concentrée sur le béquet.

Nous sommes donc en présence de **deux générateurs de houle**. En effet, on peut assimiler le mouvement de va et vient sous le caisson à un générateur de houle et il en est de même pour celui sur la face aval supérieure de la digue. Ces deux générateurs agissent avec un certain décalage de phase qui est fonction de la largeur du caisson et de la période de la houle et ils se compensent pour une grande gamme de périodes.

## Améliorations par modification de la face amont du caisson

Les vitesses verticales développées devant la digue sont responsables de l'excitation du système. Il faut donc limiter la hauteur de la houle juste devant l'ouvrage et briser le mouvement vertical. Une première approche consiste à supprimer le mur vertical amont en le reculant de façon à faire apparaître une avancée plane (cas 2 de la figure 9). Le béquet avant-plan ainsi formé va, de par sa géométrie, générer des vitesses horizontales importantes notamment lors du retrait de la vague. Le problème de ce type de solution est que des effets de claques apparaissent lors de l'ascension de la vague sur l'ouvrage. De manière à limiter les efforts horizontaux induits par ce phénomène et à augmenter l'effet de chasse dû au reflux, l'avancée plane est reliée au mur amont vertical par un plan de forme parabolique (cas 3 de la figure 9 bis). Lors de la phase d'ascension de la vague, l'eau est ainsi stockée sous forme d'énergie potentielle sur le béquet puis restituée en un flux horizontal lors de la phase de retrait.

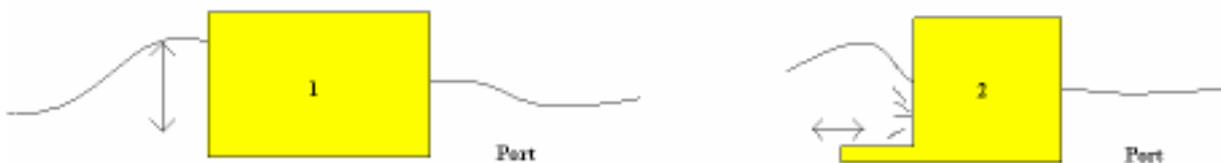


Fig. 9 Cas 1 Les vitesses verticales sont importantes  
très perturbées.

Cas 2 Les vitesses verticales sont

Et la paroi réfléchit beaucoup la houle. Les efforts sont très importants



Fig. 9bis Cas 3 Les vitesses verticales sont repoussées vers le large  
Les vitesses verticales sont très perturbées

Cas 4

Le plan d'eau devant l'ouvrage est très perturbé. La paroi perforée dissipe l'énergie de la vague

L'intérêt du béquet parabolique est triple : les effets d'impacts sont limités ; le flux horizontal prolonge artificiellement le fond du caisson ; le reflux de la vague génère un système d'ondes qui limite fortement les variations maximales de surface libre (ventres de la houle). Deux inconvénients apparaissent : il devient difficile de naviguer devant la digue car la mer est fortement perturbée (voir la figure 10) ; la forme du béquet parabolique est difficile à construire.

Les résultats montrent que le caisson à béquet parabolique laisse beaucoup moins passer la houle que le caisson parallélépipédique. La figure 10 montre l'effet de chasse durant la phase de retrait. On constate que cette géométrie perturbe fortement la naissance des vitesses verticales qui sont les responsables du phénomène de transmission. Cela explique les bons résultats obtenus.



Fig.10 : Béquet avant du BYBOP Essais réalisés au laboratoire de Géomorphologie de Caen.

L'autre méthode pour limiter l'effet des vitesses verticales est de dissiper l'énergie de la houle en brisant le mouvement de la vague à travers une paroi perforée (cas 4 de la figure 9bis).

Cette technique est aussi efficace que la technique précédente, mais génère davantage d'efforts dans la structure. C'est cette solution qui est retenue pour le projet de la contre-jetée de Monaco qui sera en fonction à l'été 2002. Cette méthode permet en effet de limiter fortement la réflexion de la houle et donc de ne pas gêner les bateaux croisant devant la digue.



Fig. 11 : Houle centennale sur la contre-jetée : essais pour le projet de l'extension de Monaco, réalisés au laboratoire Océanide de la Seine sur Mer

### *Le système Bybop*

Le système Bybop est la somme des deux améliorations aval et amont présentées précédemment. Le phénomène caractérisant ce type d'ouvrage est résumé ci-après.

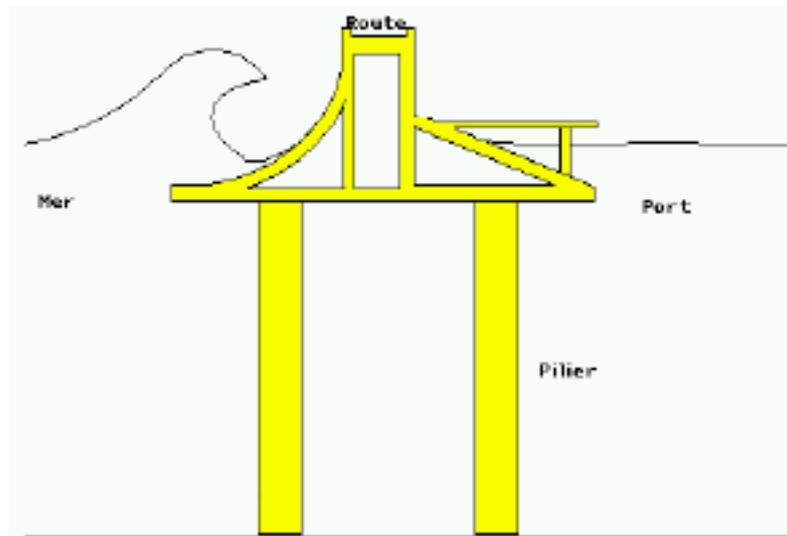


Fig. 12 Une coupe typique du système Bybop

### Fonctionnement

La vague incidente frappe le profil amont. Celle-ci est alors soit canalisée sur la paroi parabolique et stockée sous forme d'énergie potentielle si le Bybop est muni d'un béquet parabolique soit en partie détruite par la paroi perforée si le Bybop est muni d'un caisson Jarlan. La masse d'eau est ensuite restituée sous forme d'un fort courant horizontal déphasé, dirigé vers le large qui s'oppose à la nouvelle vague incidente. Cette opposition génère de fortes pertes énergétiques dues aux tourbillons ainsi créés. Pour une large gamme de périodes, un déferlement inversé vers le large peut se produire. Le phénomène d'appel d'eau généré par les vitesses verticales est ainsi fortement éloigné du caisson vers le large, limitant l'effet nourricier du port constaté sur les caissons parallélépipédiques.



Fig.13 : Champ des vitesses lors de l'ascension de la vague et lors du retrait de la vague

Malgré l'effet du profil avant, une partie de l'énergie de la houle passe sous la structure, sous la forme d'un mouvement alternatif de la masse d'eau. La paroi inclinée aval qui est l'innovation la plus importante du brevet permet une très bonne atténuation de ce phénomène. Ce profil fonctionne comme un stockeur d'énergie potentielle et crée une zone de découplage de la masse d'eau du port et de celle incluse sous le caisson.

La paroi inclinée aval a également un intérêt majeur qui est d'atténuer de façon très importante les phénomènes de résonance côté port qui sont générés lorsque la digue est associée à un port dont les quais ou les talus sont réfléchissants (par exemple le port de plaisance de la principauté de Monaco).

## Résultats au niveau de la transmission de la houle

La figure 14 montre pour un même encombrement de digue que cette nouvelle structure est radicalement plus efficace, notamment pour les grandes périodes de houle, qu'une structure parallélépipédique. Les résultats montrent également l'intérêt de ce type de structure au niveau quantité de matière de construction et au niveau encombrement. On constate que notre ouvrage est plus efficace qu'un caisson parallélépipédique de double largeur dans la gamme importante des périodes de tempête.

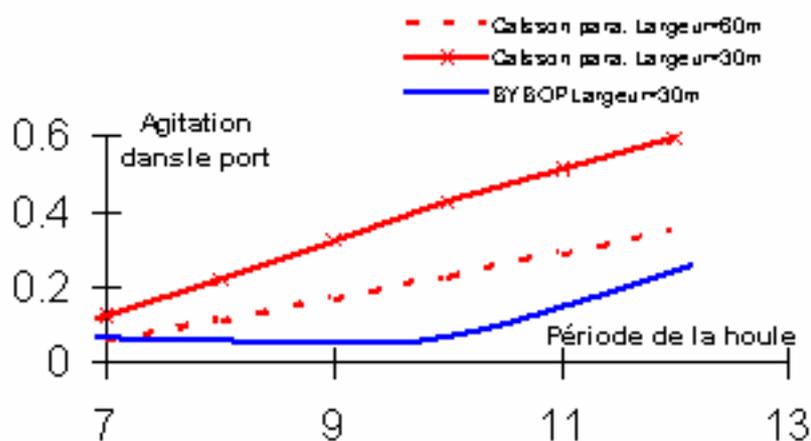


Fig. 14 : Performances comparées d'un caisson parallélépipédique et d'un caisson BYBOP

## Conclusion

La société Bouygues Offshore possède un nouveau concept de digue performant et novateur. Le système Bybop est un ouvrage intéressant tant au niveau de ces performances d'atténuation qu'au niveau des efforts qu'il supporte. Ce type de digue peut servir de protection pour les ports ou bien encore pour les îles artificielles lorsqu'il se pose des problèmes de profondeurs importantes. Son efficacité est importante même lorsque l'ouvrage protège un site fortement réfléchissant.

Le fonctionnement du caisson Bybop a été pensé non pas dans l'esprit de contrer la nature mais d'utiliser ses propriétés pour que les forces qu'elle développe s'annulent d'elles-mêmes.