



## Digue partielle à profil optimisé : Système BYBOP.

C. Colmard

*Docteur Ingénieur, Société Bouygues Offshore 3 rue Stephenson Montigny le Bretonneux 78884 St Quentin Yvelines Cedex. France.*

P. Roger

*Directeur Technique, Société Bouygues Offshore.*

M. Bélorgey

*Professeur, Laboratoire de Mécanique, Université de Caen, Groupe Mécanique des Fluides et Génie Côtier .*

### 1. Résumé

Pour protéger les sites en grandes profondeurs les nouveaux types d'ouvrages que sont les digues partielles sont actuellement en développement. L'article que nous proposons a pour objet de démontrer qu'il est possible d'optimiser leur rendement à partir de considérations basées sur le champ des vitesses mesuré aux alentours de l'ouvrage.

La société Bouygues Offshore a mis au point un système qui pour un ouvrage **deux fois moins large** qu'un caisson parallélépipédique (type « Mur d'Eau Fixe ») présente une efficacité une à trois fois supérieure (suivant la période de la houle). Ce type d'ouvrage appelé BYBOP [4] (BouYgues Breakwater Optimised Profil) permet également de traiter efficacement le phénomène de résonance pouvant apparaître dans le port.

Le profil a été dessiné à partir des champs de vitesses obtenus expérimentalement par vélocimétrie laser et numériquement par un code Navier-Stokes 2D dans le cas d'un caisson parallélépipédique [2].

L'article a pour objet principal de montrer les améliorations liées au couplage des profils optima aval et amont.

### 2. Présentation

Dans les années soixante, d'importantes études ont été menées en vue de résoudre le problème de la protection des sites en eaux profondes ( $h > 30\text{m}$ ). Les systèmes de digues partielles sont alors apparus. Ces digues présentent de nombreux avantages, notamment la faible quantité de matériaux à pourvoir pour leur construction. De par leur dénomination les digues partielles ne coupent pas complètement la masse d'eau du port de celle du large. Il y a continuité entre ces deux masses et donc possibilités d'un transfert d'énergie de la mer vers le port. Celui ci est différent suivant le type d'ouvrage. Concernant les dalles immergées (système « Mur d'Eau Oscillant »), il s'agit d'un transfert « passe bande ». Les caissons immergés

(système « Mur d'Eau Fixe »[1], système « ACRIPÉL », système « ARION », système « ASB500 »...) agissent, eux, comme des atténuateurs « passe bas ». La société BOUYGUES OFFSHORE, dans le souci de proposer des solutions efficaces pour protéger les sites où il se pose des problèmes de grande profondeur, a développé un système compact capable de limiter fortement la houle transmise dans le port sur une large gamme de périodes, de limiter les problèmes liés à l'interaction du site avec l'amortisseur, cela tout en supportant des efforts dus à la houle acceptables.

### 3. Fonctionnement d'un caisson parallélépipédique

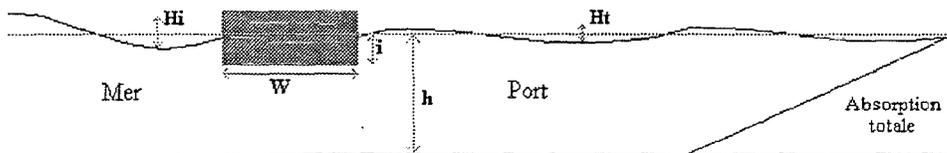


Fig. 1 : Système « Mur d'Eau Fixe ».

Le phénomène instantané est décrit ici lorsque le site à protéger ne réfléchit pas dans le port la houle, celle-ci est alors monochromatique.

L'ouvrage étant immergé et présentant à la houle incidente une face verticale, il se crée naturellement un phénomène de clapotis partiel en amont du caisson dont le coefficient de réflexion est essentiellement fonction de l'immersion de la structure et de la période de la houle.

Au niveau du mur amont de par la géométrie du caisson, le fluide est animé d'un mouvement globalement vertical de va et vient. Nous sommes en présence d'un ventre du clapotis. Lors du retrait de la vague au niveau du caisson, une partie de ces vitesses verticales descendantes se recombine sous le caisson en vitesses horizontales dirigées vers le port (voir figure 2).

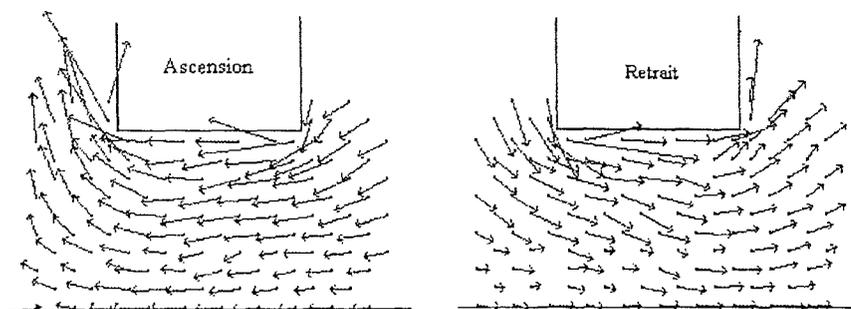


Fig. 2 : Vitesses globales générées pendant l'ascension et le retrait de la vague sur le caisson.

$T=1.76s$ ,  $H_i=0.065m$ ,  $i=0.1m$ ,  $W=0.5m$ ,  $h=0.6m$ ,  $K_t=0.69$ ,  $K_r=0.53$   $W/L=0.13$  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 recombinaient dans le port en vitesses verticales ascendantes le long de la paroi aval du caisson et créent le flux générateur de la houle dans le port. Lors de la phase d'ascension, la cinématique du clapotis partiel induit devant le

sommet de la vague des vitesses dirigées à l'inverse du sens de 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 3. 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.**

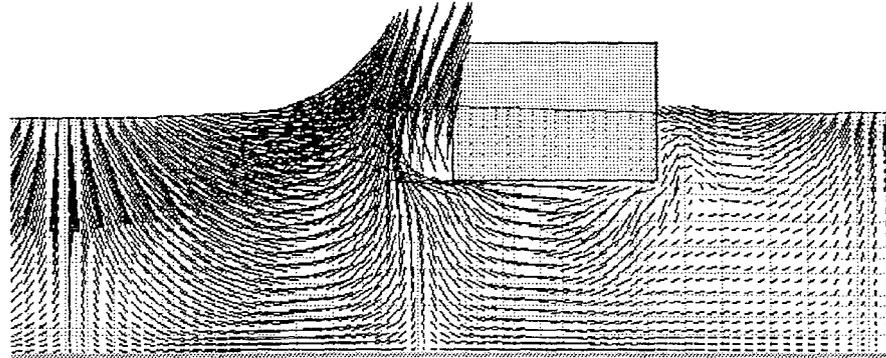


Fig. 3 : Interaction du port avec la vague ascendante pour  $T=1s$ ,  $h=0.6m$ ,  $i=0.2m$ ,  $W=0.5m$ ,  $H_i=0.04m$ ,  $W/L=0.33$ ,  $h/L=0.4$ .

#### 4. Problème de résonance

Lorsqu'une digue partielle protège un site fortement réfléchissant, le problème de l'interaction entre la masse d'eau du port et celle du large devient différent. Pour appréhender le phénomène, il faut décomposer la zone où est implanté l'ouvrage en trois parties.

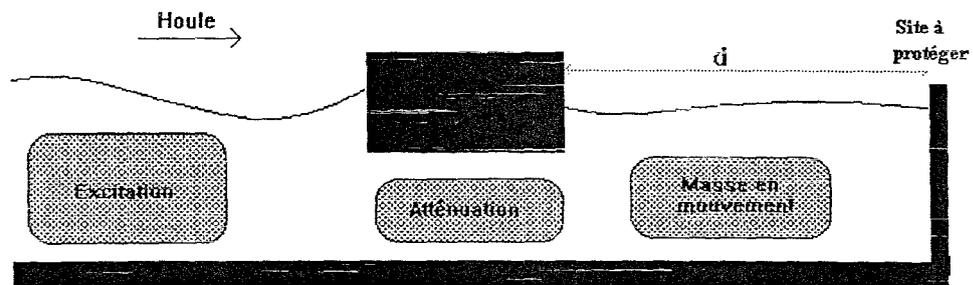


Fig. 4 : Modélisation des systèmes « digue partielle »

La partie côté port peut être considérée comme une masse d'eau excitée (oscillateur).

La partie côté mer est la partie qui procure l'énergie au mouvement de la masse du port (excitation).

La partie sous la structure est un filtre plus ou moins actif en fonction de la période de la houle (atténuateur).

La masse d'eau dans le port est mise en mouvement par l'excitation du large amortie en partie par l'ouvrage.

L'onde incidente amortie chemine vers le mur vertical et est réfléchi par celui-ci. L'onde est ensuite renvoyée vers l'ouvrage. Une partie de l'onde passe sous la structure et l'autre est de nouveau réfléchi par la surface verticale immergée de l'ouvrage.

Les réflexions sont ainsi multiples et constituent un système d'onde qui anime la surface libre.

Lorsque la distance  $2d$  (distance parcourue par une onde pour qu'elle soit de nouveau réfléchi par l'ouvrage) est un multiple de la longueur d'onde  $L$ , les ondes réfléchies par la partie immergée de l'ouvrage sont réémises en phase avec celle émise sous l'ouvrage. C'est dans cette configuration que les amplitudes maximales apparaissent dans le port. Les différences de hauteur maximale dans le port divisées par la hauteur incidente nous donne un coefficient que nous appelons  $K_{pm}$ . Lorsque le site est totalement absorbant (plage d'amortissement) on a  $K_{pm} = K_t$ . Sur les figures 5 et 6 les résultats tant expérimentaux que numériques montrent que le système développé par les caissons à profil aval vertical devient en condition de résonance un amplificateur de houle particulièrement « performant ».

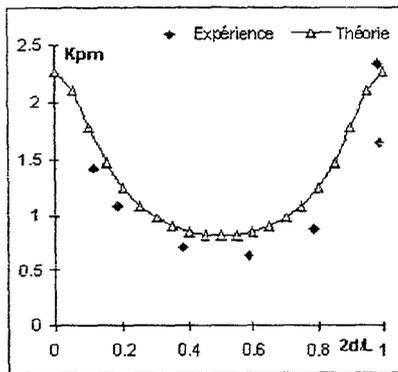


Fig. 5 : Résultats expérimentaux et théoriques d'un caisson en mode de résonance pour  $T=1.5$  s

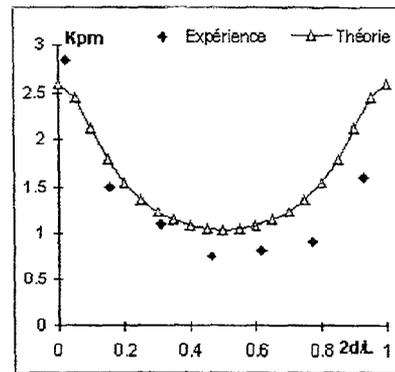


Fig. 6 : Comparaison des expériences avec la théorie pour  $T=1.82$  s

## 5. Optimisation du système

### 5.1 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 largement dépasser les 15 secondes.

--- Les problèmes de résonance doivent être limités au maximum.

--- Enfin pour limiter les efforts horizontaux à la structure, le système doit limiter les effets de claqué par un aménagement 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.

## 5.2 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) Adoucir les formes de la paroi amont du caisson de façon à limiter les efforts dans la structure.
- 3) Modifier le mur vertical aval du caisson responsable du phénomène de résonance.
- 4) **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 coté port** en opposition de phase afin de contrarier la génération de la houle dans le port.

## 5.3 Solutions étudiées :

### 5.3.1 Traitement des problèmes par modification de la face amont du caisson:

Pour limiter considérablement l'effet des vitesses verticales importantes responsables de l'excitation du système, une première approche consiste à supprimer le mur vertical amont en le reculant de façon à faire apparaître une avancée plane. 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. Lors de la phase d'ascension la vague est ainsi stockée sous forme d'énergie potentielle sur le béquet puis restituée en un flux horizontal lors de la phase de retrait. 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).

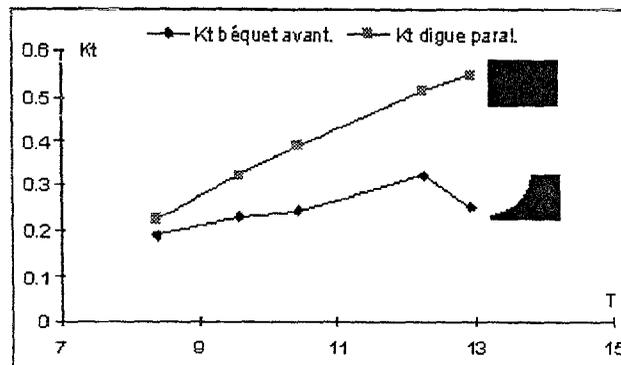


Fig. 7 : Evolution de  $K_t$  pour  $W=47m$ ,  $h=32.4m$ ,  $i=6.48m$ .

En figure 7 les résultats concernant ce type de béquet montrent une évolution continue du coefficient de transmission en fonction de la période. On constate également que ce système améliore considérablement l'atténuation de la houle même pour les longues périodes.

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

#### 5.3.2.1 Présentation

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 ( $\alpha \leq 35^\circ$  par rapport à l'horizontale) comme le montre la figure 8. L'inclinaison de cette paroi crée une **nouvelle masse d'eau** qui va permettre le découplage du port avec la mer. La **zone de découplage** s'étendant approximativement sur dix pour-cent de la longueur d'onde moyenne est montrée sur la figure 8.

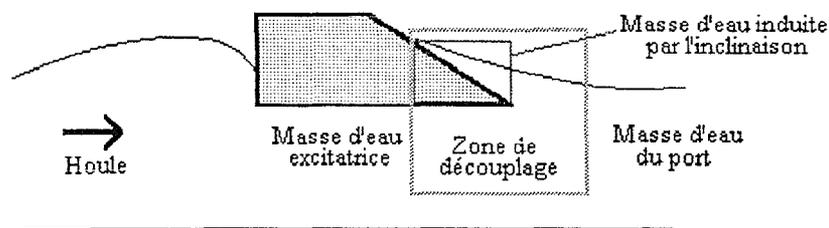


Fig. 8 : Amélioration par ajout d'une zone de découplage.

En configuration où le plan d'eau est infini, 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.
- 2) Déviation du courant de retour qui alimente la vague amont et qui élargi 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 en effet que le plan incliné aval agit comme un **stockeur d'énergie potentiel**. Lors du retrait de la vague coté mer, il y a surélévation du niveau d'eau sur la paroi supérieure aval. Cette surélévation est fonction de l'angle d'inclinaison de la paroi et des vitesses horizontales générées sous le caisson. Ce flux est ensuite restitué (voir la figure 9 et 10) lorsque les vitesses sous le caisson s'inversent et sont dirigées vers le large.

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.

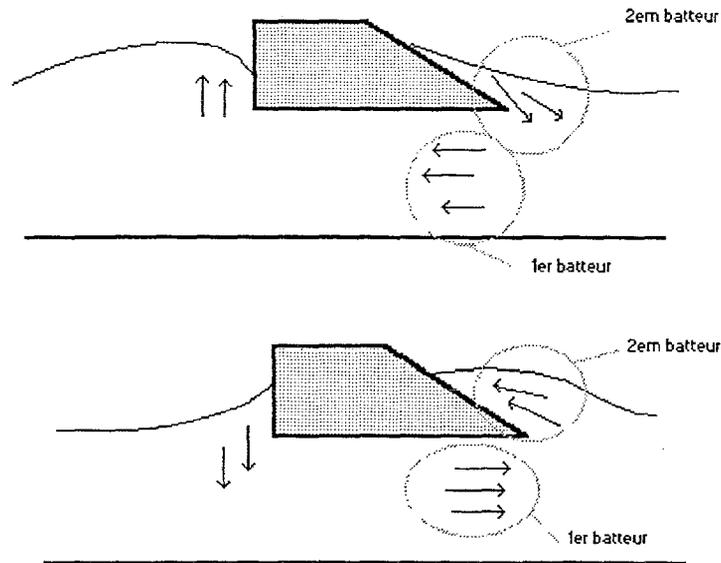


Fig. 9 et 10 Fonctionnement du plan incliné aval.

### 5.3.2.2 Résultats obtenus

On a réuni sur la figure 11, l'évolution du coefficient de transmission fonction de la période pour le cas théorique à  $90^\circ$  (modèle de base) obtenu grâce à la méthode de Bouchet [1] et les cas expérimentaux à  $35^\circ$  et  $90^\circ$ .

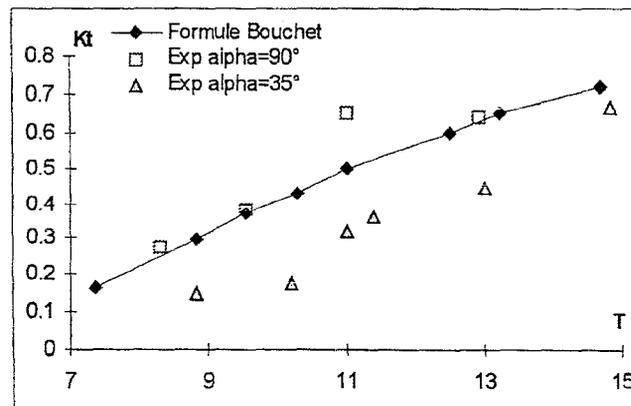


Fig. 11 : Evolution de  $K_t$  en fonction de la période.  
pour un bassin infini ( $W=0.86m$   $i=0.11m$   $h=0.65m$ ).

Si on regarde l'évolution du phénomène en fonction de l'angle d'inclinaison de la paroi aval, on aperçoit une amélioration significative due au dispositif aval à partir du moment où la paroi est inclinée d'un angle inférieur à  $60^\circ$  (voir figure 12).

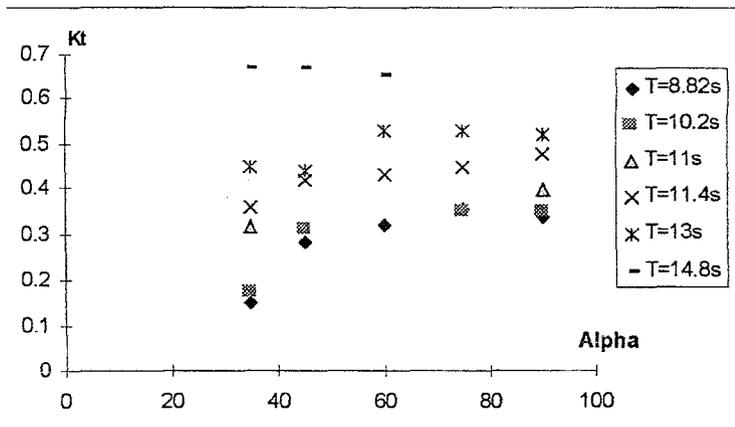


Fig. 12 : Evolution de  $K_t$  en fonction de l'angle d'inclinaison du mur aval ( $W=0.86m$   $i=0.11m$   $h=0.65m$ ).

### 5.3.2.3 Champ des vitesses obtenu par vélocimétrie laser :

Une campagne de vélocimétrie laser a été réalisée de façon à comparer le champ des vitesses obtenu pour un caisson parallélépipédique avec celui obtenu avec le plan aval incliné de  $35^\circ$ . L'expérience a été réalisée pour les deux configurations de caisson avec la même houle incidente,  $T=1.4s$  ( $T$  réelle= $10.2s$ )  $H_i=0.085m$  ( $H_i$  réelle= $4.6m$ )  $h=0.65m$  ( $h$  réelle =  $35m$ )  $i=0.11$  ( $i$  réelle =  $5.90m$ ). La largeur de l'ouvrage est égale à  $0.86m$  ( $44.7m$  réelle).

#### Phénomène moyen

On constate sur la figure 13 les deux circulations moyennes générées sous le caisson parallélépipédique, ainsi que l'importance des paires de tourbillons observées aux arêtes du caisson rectangulaire.

Concernant le système à paroi aval inclinée, les vitesses moyennes dans la zone de découplage sont beaucoup plus importantes. De plus on voit que les circulations moyennes sous l'ouvrage sont plus actives.

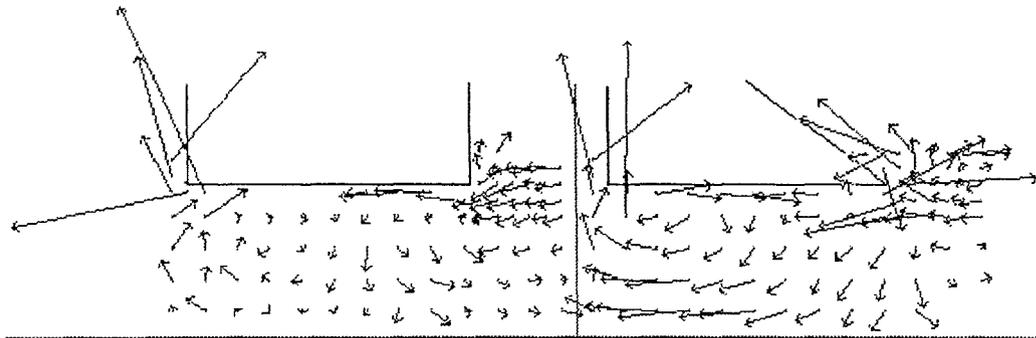


Fig. 13 : Phénomène moyen pour une digue parallélépipédique et une structure munie d'une paroi aval inclinée à  $35^\circ$ .

*Phénomène instantané :*

Les vitesses instantanées sont beaucoup plus importantes dans la zone de découplage que dans le cas d'un caisson parallélépipédique. On constate que les deux tourbillons générés aux arêtes sont aussi beaucoup plus actifs. De plus, l'orientation des vitesses côté port est vraiment très différente de celle obtenue à  $90^\circ$ . Ainsi, lors de l'ascension de la vague coté mer (cf. figure 14), les vitesses en aval de la structure prennent l'orientation de la paroi inclinée. Cela permet d'avoir une recirculation beaucoup plus importante en profondeur et d'avoir des vitesses horizontales sous le caisson sur un volume plus étendu. On peut donc, de cette façon, générer les effets d'un caisson beaucoup plus grand, ce qui expliquerait en partie la meilleure efficacité.

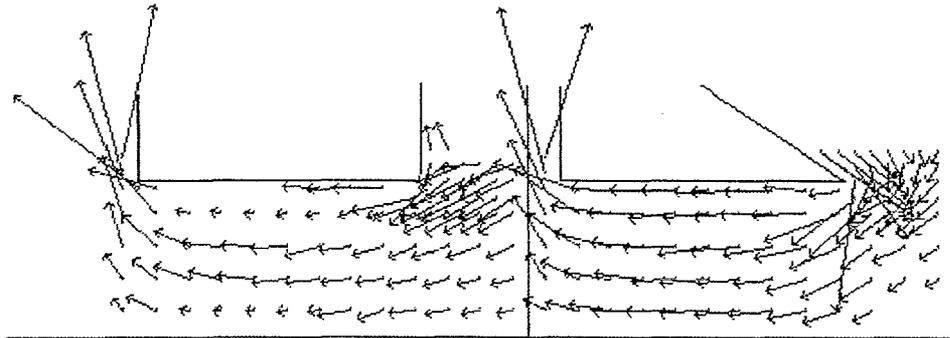


Fig. 14 : Ascension de la vague sur le caisson coté mer pour les deux configurations.

La figure 15 montre lors du retrait de la vague coté mer pour un caisson de forme parallélépipédique, que les vitesses derrière le caisson nourrissent la vague en formation coté port. Par contre, à  $35^\circ$ , cet effet est partagé entre l'alimentation de cette même vague et un stockage sous forme d'énergie potentielle de la masse d'eau sur la paroi inclinée. **Ce système découple donc partiellement la masse d'eau du port de celle sous le caisson qui est l'excitateur du processus de génération de houle dans le port.**

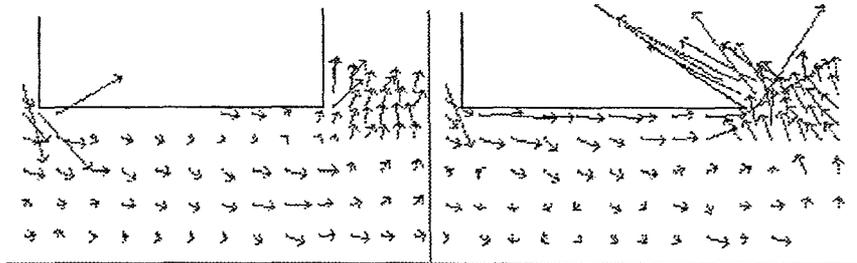


Fig. 15 : Retrait de la vague sur le caisson coté mer pour les deux configurations.

## 6. Le système Bybop

Le système Bybop [4] est la somme des deux améliorations aval et amont. Le phénomène caractérisant ce type d'ouvrage (fig. 16) est résumé ci après.

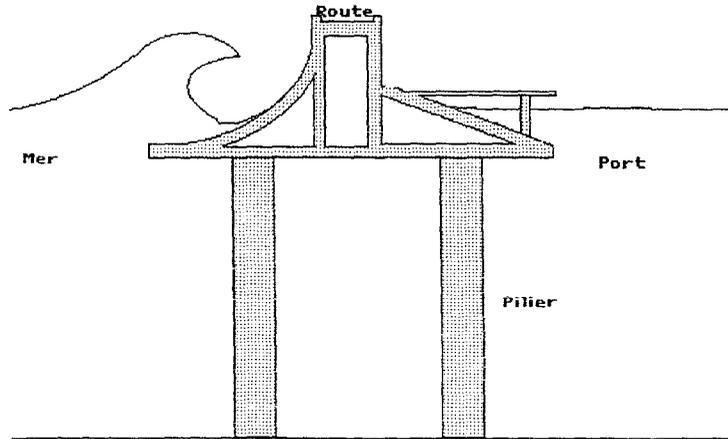


Fig. 16 Bybop

### 6.1 Fonctionnement

Lorsque la vague incidente frappe le profil amont, la cambrure de celle-ci augmente fortement sur la paroi horizontale du fait de la faible profondeur d'immersion et la vague est déformée jusqu'à se découper en deux ondulations diminuant ainsi fortement la hauteur de fluctuation du niveau d'eau à l'extrémité de la structure. (voir figures 17 et 18).

La vague canalisée sur la paroi parabolique est stockée sous forme d'énergie potentielle, puis 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 (voir la figure 3 et 17).

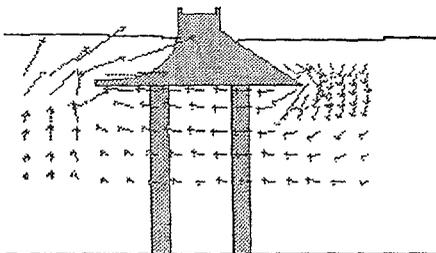


Fig. 17 : Champ des vitesses lors de l'ascension de la vague

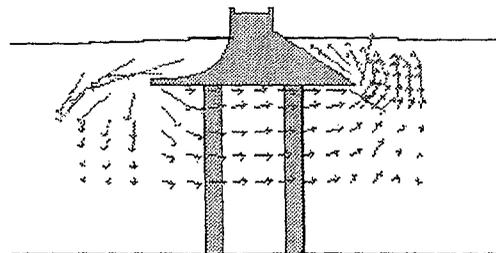


Fig. 18 : Champ des vitesses lors du retrait de la vague.

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 permet une très bonne atténuation de ce phénomène. Ce profil

fonctionne comme un stockeur d'énergie potentiel 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 coté port qui sont générés lorsque la digue est associée à un port dont les quais où les talus sont réfléchissants (par exemple le port de plaisance de la principauté de Monaco).

## 6.2 Résultats au niveau de la transmission de la houle

### 6.2.1 Transmission de la houle lorsque l'ouvrage protège un site peu réfléchissant

La figure 19 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. La courbe sur la figure 20 montre 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.

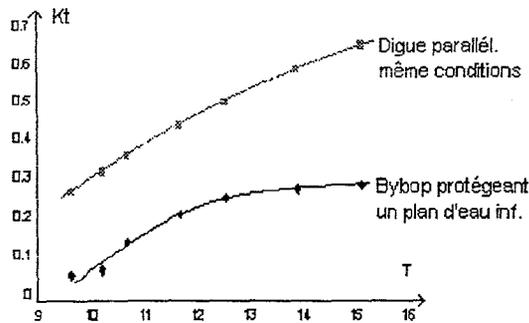


Fig. 19 : Amélioration du coefficient de transmission avec une structure BYBOP protégeant un plan d'eau infini.

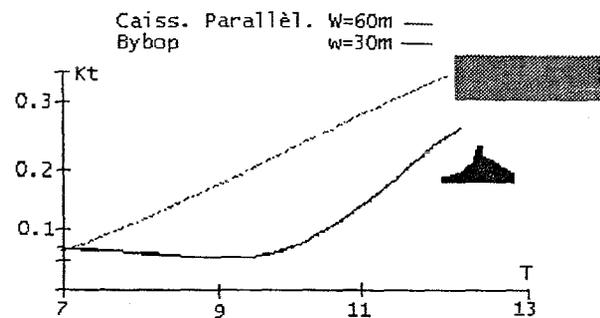


Fig. 21 : Comparaison de l'évolution de  $K_t$  entre un caisson parallélépipédique et une structure BYBOP deux fois moins large pour des sites peu réfléchissants.

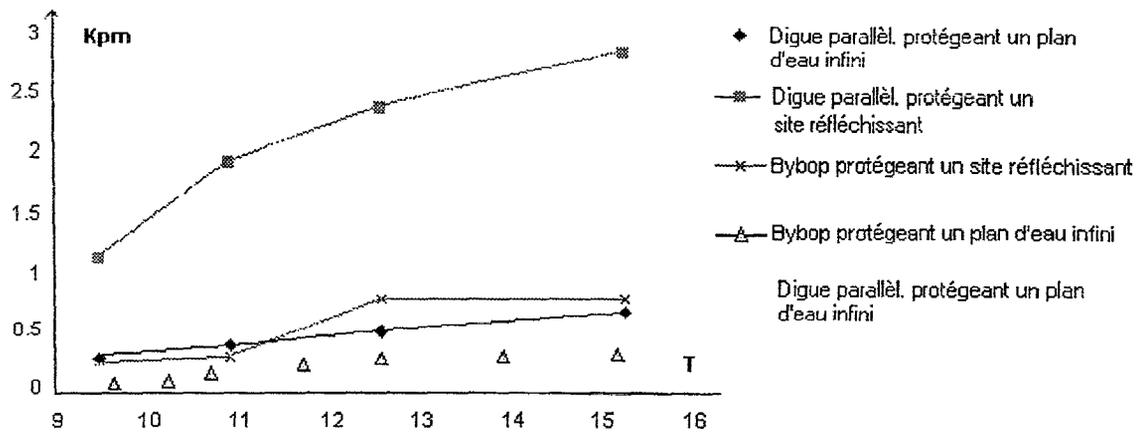


Fig. 22 : Comparaison des modes de résonances

### 6.2.2 Transmission de la houle lorsque le site est fortement réfléchissant

Grâce à la forme de la paroi arrière, le phénomène de résonance est fortement atténué, la courbe sur la figure 22 met en évidence cette amélioration sur un essai réalisé à l'échelle 1/70. On constate que l'agitation dans le port même dans le pire des cas reste inférieure à 0.75 fois la hauteur de houle incidente.

## **8. 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 même.

## **9. Bibliographie**

[1] René Bouchet et J. M. Manzone, 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.

[2] Christophe Colmard et Michel Bélorgey, Study of hydraulic functioning of break waters off « Fixed Water Wall » type, The proceedings of the sixth (1996) International OFFSHORE AND POLAR ENGINEERING CONFERENCE, Los Angeles, USA.

[3] Hugues Steven A. , Laboratory wave reflection analysis using co-located gages, Coastal Engineering, 20 (1993) 223-247

[4] Christophe Colmard, Etude des phénomènes induits par les digues partielles de type caissons fondées sur pieux., Thèse de l'université du Havre, 1996.