

C.7.2. L'ASB-5000 : Un nouveau concept d'atténuateur de houles.

Jean BOUGIS
Ingénieur Conseil
34, Chemin du Moulin - 06650 Opio
FRANCE

ALEX DEGAIE
Société Degaie
97, Route de Bavay - 59138 Pont sur Sambre
FRANCE

Résumé

L'ASB-5000 est un atténuateur de houles semi-submersible de faible encombrement, spécialement conçu pour avoir de bonnes performances dans une gamme de périodes allant jusqu'à 7 ou 8 secondes et pour pouvoir suivre les marées.

Pour obtenir ces caractéristiques, l'ASB-5000 a été conçu pour exploiter, comme le font certains types de générateurs de houles, les propriétés ondulatoires de la houle en s'affranchissant le mieux possible de la contrainte qu'impose le rapport entre la longueur d'onde et ses dimensions transversales,

Il doit permettre de réaliser, de manière réversible (à usage permanent, saisonnier ou provisoire), dans des mers avec ou sans marées, et à moindres coûts des améliorations d'abris naturels ou d'abris artificiels (existants ou non) et de contribuer ainsi à la possibilité de création de ports artificiels et marinas.

Une première installation sera sans doute réalisée en 1995.

Introduction

La houle qui se propage à la surface de la mer représente un obstacle majeur au développement de nombreuses activités maritimes à vocation militaire, industrielle, touristique, sportive ou récréative.

Afin de limiter ses effets néfastes, de nombreux dispositifs de protection contre la houle ont déjà été proposés, en particulier depuis le développement rapide de la navigation de plaisance.

Ils consistent généralement soit à opposer à la houle des obstacles imperméables (digues, murs, voiles verticaux), soit à transformer l'énergie ondulatoire de la houle sous forme de turbulence en exploitant des effets d'amortissements visqueux. Plus récemment, des procédés cherchant à exploiter directement les caractéristiques ondulatoires de la houle ont été proposés. Toutefois, bien que souvent efficaces, ces dispositifs, généralement fixes, présentent pratiquement toujours de grandes dimensions transversales, ce qui en rend souvent les coûts prohibitifs et en limite donc considérablement l'usage pratique.

C'est pour répondre à la demande de protection de nombreux sites marins que l'ASB-5000 a été imaginé et mis au point, en considérant toujours comme une priorité d'en limiter l'encombrement et le coût tout en cherchant à étendre ses performances à une gamme de périodes la plus large possible.

Les études théoriques, numériques et expérimentales (canal à houle) qui ont été réalisées depuis un an ont montré que l'ASB-5000 présente une grande efficacité pour des périodes pouvant atteindre 7 à 8 secondes.

Caractéristiques recherchées

Afin d'obtenir un produit réellement utilisable, l'ASB-5000 a été spécialement conçu pour réunir les caractéristiques suivantes :

- Des performances particulièrement attractives pour les petites et moyennes périodes (inférieures à 7 ou 8 secondes) et des performances non négligeables pour des périodes plus grandes.
- Un faible encombrement dans la direction de propagation de la houle : le barrage contre la houle doit être aussi étroit que possible. L'ASB-5000 a 5 mètres de large et 3.35 mètres de tirant d'eau.

C.7.2. ASB-5000 : A new concept of a wave attenuation device.

Jean BOUGIS
Ingénieur Conseil
34, Chemin du Moulin - 06650 Opio
FRANCE

ALEX DEGAIE
Société Degaie
97, Route de Bavay - 59138 Pont sur Sambre
FRANCE

Abstract

The ASB-5000 is a semisubmersible wave attenuation device of small cross-sizes, specially designed to have good performances in a large range of periods as far as 7 or 8 seconds and to have the capacity for following the sea level imposed by the tides.

In order to obtain these characteristics, the ASB-5000 has been designed to take advantage, as some pattern of wavemaker, of undulatory properties of the wave and frees himself to the best of one's ability from the constraint imposed by the ratio between the wave length and its cross-wides.

The ASB-5000 must permit to realize, in a reversible way (for a permanent, seasonal or temporary use), in a sea with or without tides, and with low costs some improvements in natural shelters or in artificial shelters (existent or not) and thus to contribute to the possibility to create artificial harbours and marinas.

A first installation will be doubtless realized in 1995.

— Un faible tirant d'air afin de respecter l'esthétique du site. L'ASB-5000 a 1.50 mètres de tirant d'air.

— La possibilité de suivre le niveau de la mer et en particulier celui imposé par les marées.

— Une position horizontale fixe ne dépendant ni de la houle ni du niveau de l'eau : le barrage doit rester à un emplacement fixe.

— La possibilité de laisser passer les courants marins permettant ainsi de respecter les équilibres écologiques et sédimentologiques, l'évacuation des matières polluantes rejetées dans le plan d'eau protégé et l'intégrité du milieu marin.

— Un faible coût de construction, d'installation et de maintenance sur le site.

— La possibilité d'être retiré pour un faible coût et sans dommage pour le site et son environnement.

Il devient alors possible de réaliser, de manière réversible (à usage permanent, saisonnier ou provisoire), dans des mers avec ou sans marées, et à moindres coûts :

— L'amélioration d'abris artificiels existants (ports, darses, ...).

— L'amélioration d'abris naturels (anses, baies, ...),

— Des ports artificiels et des marinas,

— La protection d'ouvrages fragiles existants,

— La protection d'installations off-shores,

— La protection de chantiers maritimes,

— La protection d'opérations marines.

Principe de fonctionnement

Naturellement, pour satisfaire l'ensemble des conditions recherchées, un barrage de protection contre la houle ne peut flotter que sur un procédé fondé sur des modules d'atténuateurs flottants de petites dimensions transversales.

Pour cela, il convient d'exploiter les propriétés ondulatoires de la houle en s'affranchissant le mieux possible de la contrainte qu'impose le rapport entre la longueur d'onde et les dimensions transversales de l'atténuateur de houle. En effet, l'efficacité de la quasi totalité des dispositifs connus est fonction de ce rapport : leurs performances chutent très rapidement lorsque ce dernier croît, les limitant généralement à l'usage de brise-clapots (atténuation de 0.5 jusqu'à 3 ou 4 secondes, et un effet négligeable au delà).

L'ASB-5000 a donc été spécialement conçu pour exploiter les principes hydrodynamiques qui sont mis en œuvre lors de la génération de la houle dans un bassin.

En effet, pour peu que les formes et la cinématique du générateur soient favorables, il devient possible de faire naître une houle dont la longueur d'onde, liée essentiellement à la période d'oscillation du batteur, ne dépend plus que de manière indirecte, par le biais de la fonction de transfert, des dimensions géométriques du générateur.

Il est ainsi théoriquement possible de créer un atténuateur de houle passif qui engendre un clapot pur en amont et le calme plat en aval, à condition qu'il soit possible :

- d'une part, de prélever, sur l'énergie véhiculée par la houle incidente, l'énergie nécessaire au fonctionnement d'un générateur de houle,

- et d'autre part, que ce générateur engendre vers l'aval une houle de même amplitude en opposition de phase avec la houle incidente.

Heureusement, même si la satisfaction totale et simultanée de ces deux conditions paraît relever de l'utopie, il reste possible de s'en approcher suffisamment pour permettre d'obtenir, sur une gamme de périodes assez large, un coefficient de transmission assez faible pour présenter un intérêt digne d'applications industrielles.

L'énergie essentiellement ondulatoire de la houle incidente amont est alors partiellement transmise en aval, partiellement réfléchie vers l'amont et partiellement dissipée en tourbillons et effets visqueux.

Conception de l'ASB-5000

Choix des degrés de liberté

L'ASB-5000 a été conçu et dimensionné pour s'opposer à des houles dont les périodes sont inférieures à 8 à 9 secondes et dont la hauteur crête à creux significative est de l'ordre de 2 mètres, sur des sites dont la profondeur d'eau reste comprise entre 4. et 20. mètres.

Afin qu'il puisse suivre librement le niveau de la surface libre imposé par la marée, le mouvement vertical doit rester le plus libre possible. Il en résulte que le mouvement d'oscillation vertical de pilonnement a été choisi pour générer la houle cherchée.

Par ailleurs, comme il convient de limiter les débitements horizontaux qui engendrent une augmentation sensible de l'encombrement de la protection anti-houle (surtout lorsqu'il existe de fortes variations du niveau en fonction de la marée), il a été choisi d'ancrer les modules atténuateurs sur des pieux.

Enfin, les études ont montré que, dans ces conditions, les meilleurs résultats sont obtenus lorsque toutes les rotations sont bloquées, ce qui a été confirmé par l'expérience.

En raison de la qualité de sa fonction de transfert de diffraction radiation en pilonnement et de sa simplicité, le dispositif qui a été retenu pour remplir le double office de récepteur d'énergie et de générateur de houle est une plaque plane horizontale légèrement immergée. En effet un bon récepteur d'énergie (susceptible d'osciller avec la plus grande amplitude possible lorsqu'il est excité par une houle de faible amplitude), comme un bon batteur (susceptible de générer une houle de la plus grande amplitude possible lorsqu'il oscille avec une faible amplitude) doivent avoir des formes propices à un échange efficace d'énergie avec le milieu fluide et en particulier avec son interface liquide-atmosphère.

Constitution de l'ASB-5000

L'ASB-5000 est donc composé d'une plaque plane horizontale immergée à une profondeur égale à l'ordre de grandeur de l'amplitude (demi crête à creux) de la houle nominale, et glissant verticalement le long de pieux, les cinq autres mouvements (cavement, embardée, roulis, tangage et lacet) étant bridés.

Il se complète d'une superstructure et de voiles en forme de quilles qui sont destinés à lui assurer un ensemble de caractéristiques géométriques, cinématiques et dynamiques lui permettant d'osciller en générant une houle qui soit, dans la gamme de périodes choisie, le plus possible en opposition de phase et ait une amplitude la plus comparable possible avec la houle incidente.

Enfin, certaines dispositions ont dû être adoptées pour des raisons purement mécaniques afin de pouvoir reprendre dans la structure les efforts de liaison avec les pieux.

Caractéristiques de l'ASB-5000

L'allure générale de l'ASB-5000 est montrée sur la figure 1. Ses principales caractéristiques géométriques et inertielles sont :

longueur	12.00 m
largeur	5.00 m
tirant d'eau	3.35 m
tirant d'air	1.50 m
masse	72 000 kg

La longueur de 12 mètres a été définie en fonction de plusieurs critères afin de pouvoir :

- Installer chaque élément sur deux pieux, et deux pieux seulement, tout en ayant à reprendre des efforts raisonnables, et sans multiplier inutilement le nombre des pieux.

- Obtenir un effet hydrodynamique tridimensionnel par un déphasage suffisant des mouvements des différents modules soumis à une houle en incidence.

- Assurer le transport des modules par route.

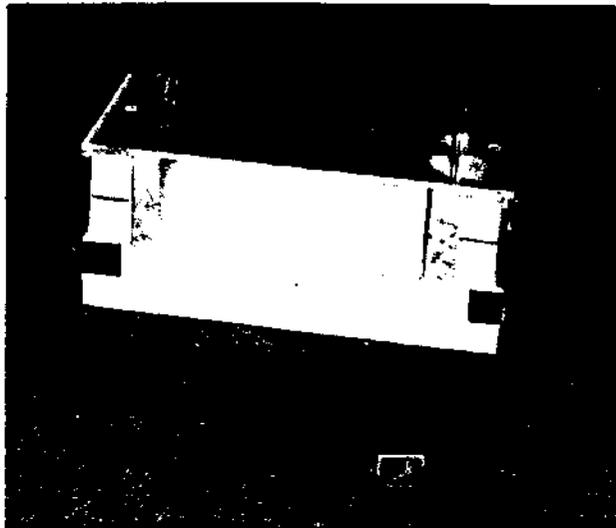


Figure 1 : maquette d'essais au 1/20ème de l'ASB-5000

Equations du mouvement de l'ASB-5000

Bilan des efforts exercés sur l'atténuateur

Une structure marine subit un certain nombre d'efforts qui contribuent à l'animer de divers mouvements. Le théorème de Newton stipule qu'il y a, à chaque instant, équilibre entre le torseur des efforts d'inertie propre à la structure et les efforts extérieurs qui lui sont appliqués.

Les efforts extérieurs qui s'appliquent à la structure peuvent être classés en quatre groupes :

- Les efforts volumiques de pesanteur,
- Les efforts surfaciques de pression dus à l'eau,
- Les efforts surfaciques de pression dus au vent,
- Les efforts ponctuels de liaison.

Pour l'étude du fonctionnement de l'atténuateur, les efforts dus au vent sont négligeables. Ils ne présentent un intérêt que pour l'estimation des efforts de frottement sur les pieux et pour le calcul des efforts de liaison ultimes à prendre en compte pour le dimensionnement des pieux.

Les efforts que le fluide engendre sur les structures, se calculent par intégration du champ de pression. Dans le cadre de la théorie du potentiel ($\nabla = \text{grad } \phi$), la pression est donnée par la formule de Bernoulli—Lagrange (1) qui se compose de trois termes :

- Un terme hydrostatique.
- Un terme hydrodynamique instationnaire faisant intervenir la dérivée temporelle de la fonction potentiel des vitesses qui caractérise des efforts liés à un mouvement non permanent.
- Un terme hydrodynamique stationnaire faisant intervenir le carré de la vitesse qui caractérise des efforts liés à un mouvement permanent.

$$p = -\rho g z - \rho \frac{\partial \phi}{\partial t} - \frac{1}{2} \rho v^2 \quad (1)$$

Le ternie hydrodynamique instationnaire engendre des efforts qui se présentent sous la forme de trois termes :

— Un terme proportionnel à l'accélération ; le quotient de cette force par l'accélération a la grandeur d'une masse (ou d'une inertie) et s'appelle "niasse d'eau ajoutée"(ou "inertie d'eau ajoutée"). Contrairement à une masse ou à une inertie, ces termes ne sont pas nécessairement positifs !

— Un terme proportionnel à la vitesse ; le quotient de cette force par la vitesse a la grandeur d'un amortissement et s'appelle "amortissement d'eau ajoutée". Ces termes, toujours positifs, prennent en compte l'énergie que la structure communique au fluide dans le phénomène de radiation.

— Un terme indépendant de l'accélération et de la vitesse ; cette force s'appelle "force d'excitation".

Le terme hydrodynamique stationnaire engendre des efforts du second ordre par rapport à l'amplitude de la houle. Ses effets sur les mouvements au premier ordre sont regroupés avec les effets visqueux et tourbillonnaires (dont la théorie du potentiel ne rend pas compte) et sont inclus (après linéarisation) dans le terme de dissipation A_v . Les autres effets du second ordre n'interviennent que lors du dimensionnement des pieux.

Equation de Newton

Dans la pratique, le module atténuateur de houle se comporte comme un système masse—ressort amorti en régime forcé à un degré de liberté où, en vertu de ce qui précède :

— Le terme de masse est composé de la masse propre du module de l'atténuateur M et de sa masse d'eau ajoutée en pilonnement due au phénomène de radiation M_a .

— Le terme de raideur est composé de la raideur hydrostatique en pilonnement incluant le poids du module de l'atténuateur de houle H , et de la raideur verticale du système d'ancrage K .

— Le terme d'amortissement est composé de l'amortissement tourbillonnaire et visqueux en pilonnement A_v , de l'amortissement dû aux frottements verticaux solides et/ou fluides du système d'ancrage A_k , et de l'amortissement d'onde de gravité en pilonnement dû à la radiation correspondant à l'énergie fournie à la houle ainsi générée A_r .

— Le terme d'excitation F est produit par les efforts qu'exercerait la houle si l'atténuateur restait fixe ces efforts sont donc dus à la houle incidente et à sa diffraction.

L'équation de Newton (2) est ainsi obtenue, après linéarisation des différents termes qui dépendent, bien sûr, de la période T de la houle incidente ou de sa pulsation ω . Expression dans laquelle $z(t)$ désigne la position verticale, du module atténuateur, $\dot{z}(t)$ sa vitesse et $\ddot{z}(t)$ son accélération.

$$(M + M_a)\ddot{z}(t) + (A_v + A_k + A_r)\dot{z}(t) + (H + K)z(t) = F(t) \quad (2)$$

Les réponses en régime forcé correspondant à une excitation harmonique de la forme $F(t) = \Re\{F_0 e^{-i\omega t}\}$ sont obtenues en écrivant $z(t)$ sous la même forme : $z(t) = \Re\{z_0 e^{-i\omega t}\}$. Le mouvement vertical de l'atténuateur est alors gouverné par l'équation suivante :

$$\{-\omega^2(M + M_a) - i\omega(A_v + A_k + A_r) + (H + K)\} z = F \quad (3)$$

dont la solution générale en fonction de ω est la fonction de transfert.

Analyse du comportement de l'atténuateur

L'atténuateur ne peut fonctionner efficacement, et en particulier pour les grandes périodes de la houle qu'à différentes conditions qu'il convient d'analyser.

Influence de la masse

Pour que l'atténuateur oscille avec la plus grande amplitude possible, il est nécessaire que la solution générale de l'équation de Newton homogène (équation (2) sans second membre) corresponde au régime de fonctionnement oscillatoire et non aux régimes critique ou super-critique. La condition mathématique pour qu'il en soit ainsi, est que l'équation caractéristique de l'équation différentielle linéaire (2) admette des racines complexes. Cette condition est alors fixée par le signe de son discriminant. Elle s'écrit :

$$(M + M_a) \geq \frac{(A_v + A_k + A_r)^2}{4(H + K)} \quad (4)$$

Comme l'amortissement de radiation doit être le plus grand possible puisqu'il rend compte de l'énergie de la houle générée, tandis que la raideur ne peut pas être arbitrairement grande pour que la période propre ne soit pas trop petite ni la période d'extinction trop grande, il en résulte que la somme $M + M_a$ est nécessairement assez grande. Ainsi, pour que les oscillations soient possibles, le module atténuateur doit être assez lourd et/ou posséder une masse d'eau ajoutée assez grande.

Bien sur la masse de l'atténuateur peut être augmentée par le remplissage total ou partiel de ballasts, mais en prenant soin d'éviter les effets de carènes liquides qui seraient ici indésirables. Par ailleurs, le module atténuateur est équipé de quilles latérales destinées à augmenter les effets de masse d'eau ajoutée en pilonnement et, accessoirement à augmenter la surface qu'il oppose au passage de la houle.

Influence des amortissements

L'inéquation (4) montre clairement que l'amortissement A_v , dû aux effets tourbillonnaires et visqueux en pilonnement, et l'amortissement A_k dû aux frottements verticaux du système d'ancrage sont particulièrement indésirables et que leur minimisation est de nature à limiter le déplacement de l'atténuateur et donc son coût.

Influence de la période propre

Le rapport entre les termes de masse et de raideur fixe la période propre T_p suivant la relation (5) dans laquelle il a été fait abstraction de l'amortissement.

$$T_p = 2\pi \sqrt{\frac{M + M_a}{H + K}} \quad (5)$$

Ainsi, une fois les formes, la masse et la période propre choisies, la raideur est également définie. Par ailleurs, il convient assez naturellement de retenir une période propre de pilonnement voisine de la borne supérieure de l'intervalle de périodes de référence $[T_{min}, T_{max}]$ pour lequel une bonne efficacité est recherchée. Pour que T_{max} puisse être assez grand, la raideur d'amarrage verticale K doit, si possible être nulle, tandis que la raideur hydrostatique de pilonnement doit être maîtrisée et fixée à une valeur généralement inférieure à celle correspondant à la surface de l'élément actif récepteur-batteur.

Il en résulte que le module atténuateur doit pouvoir intercepter la surface libre suivant une section dont l'aire est inférieure à celle de la projection de sa carène sur le plan de la surface libre, et prendre ainsi les caractéristiques hydrodynamiques d'une structure semi-submersible.

Influence de période d'extinction

La structure étant donc, a priori, du type semi-submersible, il existe une période d'extinction T_e pour laquelle les efforts d'excitation s'annulent quasiment. En effet la pression dynamique de la houle étant décroissante avec la profondeur, il existe une période pour laquelle le produit de la surface inférieure S_2 (la plus grande) par la pression à sa cote d'immersion Z_2 (la plus petite) est égale au produit de la surface supérieure S_1 (la plus petite) par la pression à sa cote d'immersion Z_1 (la plus grande). Pour fixer les idées, en faisant abstraction de la diffraction et en ne considérant donc que le terme de Froude—Krylov dû à la houle incidente, la force qui s'exerce sur un caisson parallélépipédique de surface inférieure S_2 à la cote Z_2 et de surface supérieure S_1 à la cote Z_1 s'annule pour :

$$S_1 e^{kZ_1} = S_2 e^{kZ_2} \quad (6)$$

Expression dans laquelle k désigne le nombre d'onde de la houle relié à la longueur d'onde de la houle λ par la relation $k\lambda = 2\pi$. Ainsi, en profondeur infinie, la période T_e est voisine de :

$$T_e = 2\pi \sqrt{\frac{Z_1 - Z_2}{g \ln \frac{S_2}{S_1}}} \quad (7)$$

Pour obtenir de bonnes performances sur l'intervalle de périodes $[T_{min}, T_{max}]$, il est, a priori, avantageux de fixer cette période d'extinction en pilonnement au voisinage de T_{min} . Toutefois, d'autres réglages peuvent permettre d'obtenir des performances particulièrement intéressantes dans certaines applications.

La partie de la structure qui intercepte la surface libre peut être à section horizontale constante (rappel hydrostatique constant) ou non (recherche d'effets hydrostatiques non—linéaires avec des parois inclinées ou incurvées).

Influence de la surface de flottaison

Si, comme le montrent les équations (6) et (7), l'effet semi-submersible est essentiellement gouverné par le rapport des surfaces S_2 et S_1 , il convient de noter que la répartition de cette surface doit être réalisée en fonction de critères de différentes natures :

— Hydrostatiques : pour des raisons de sécurité, de maniabilité et de maintenance, il convient d'assurer au module atténuateur une stabilité de forme minimale.

— Hydrodynamiques : la répartition de la surface de flottaison qui engendre la disposition de voiles permet de réaliser certains effets complémentaires particulièrement intéressants tels que des effets de barrage pour les houles courtes, des effets de caisson ou de cavité, le création de chambres amont et/ou aval, l'optimisation des effets de bords aux extrémités des modules qui sont séparés par des intervalles destinés soit à laisser la place aux pieux, soit à empêcher les chocs entre les modules contigus, ...

— Mécaniques et structurelles : pour des raisons de rigidité de la structure, de sa tenue mécanique et de son aptitude à reprendre les efforts de liaison, il est intéressant de disposer de voiles transversaux.

Par ailleurs, la structure peut être recouverte d'un pont supérieur permettant, de limiter les effets des gerbes d'eau engendrées par les chocs hydrodynamiques de vagues sur les parois verticales situées sous lui. Il peut également permettre, sous réserve que la stabilité statique et dynamique du module atténuateur soit assurée, son utilisation comme ponton d'accueil par beau temps lorsque la houle incidente est négligeable, et sous réserve de ne pas être trop exposé aux ondes de batillage.

Essais en canal à houle

Conditions expérimentales

La mise au point de l'ASB-5000 a été effectuée au moyen d'essais en canal à houle. La campagne d'essais, d'une durée de quatre semaines s'est déroulée en Janvier et Février 1995 au Laboratoire National d'Hydraulique de la Direction des Etudes et Recherches d'Electricité de France à Chatou.

Les essais de l'ASB-5000 ont été réalisés à deux échelles différentes assez grandes : le quinzième et le vingtième, pour deux profondeurs d'eau : 10 mètres et 14 mètres.

Les liaisons étaient représentées par des tubes verticaux en aluminium, encastrés dans l'atténuateur, et assujettis à n'avoir qu'un mouvement vertical en passant chacun dans deux anneaux montés sur des capteurs d'efforts en traction et compression. Deux raideurs de pieux ont été testées (tubes de diamètre et d'épaisseur respectifs 18.mm/1.5mm et 25.mm/2.mm).

Afin d'évaluer l'influence des frottements de liaison, deux types d'anneaux ont été testés, des anneaux métalliques toriques graissés et des anneaux à roulement à billes également graissés. Au cours des essais, différentes variantes du module atténuateur ont été testées. La figure 2 présente le montage expérimental, avec l'ASB-5000 sans les jupes ni les retours latéraux.

Les essais ont été réalisés sur houle régulière (fonctions <:le transfert) pour des amplitudes moyennes et grandes, et sur houle irrégulière (spectres de JONSWAP) pour trois périodes de pic. Pour la houle régulière, la durée d'enregistrement sur le modèle était de 71.8 secondes (de l'ordre de 5 minutes au réel) à la fréquence d'échantillonnage de 25 Hz. tandis que pour la houle régulière, elle était de 640 secondes (plus de 40 minutes au réel) à la fréquence d'échantillonnage de 10 Hz.

Les dénivelées ont été mesurés au moyen de trois sondes en amont et de trois sondes en aval toutes situées assez loin de l'atténuateur.

Méthode d'analyse des essais

Les résultats de dénivelées ont été ~~déterminés~~, par la méthode des trois sondes au sens des moindres carrés.

L'analyse des essais comprend deux parties :

— L'analyse harmonique destinée à déterminer le contenu fréquentiel des différents signaux, elle inclut la décomposition en séries de Fourier et l'analyse par transformation de Fourier discrète. Pour permettre la meilleure recherche possible des harmoniques basse fréquence, la transformation de Fourier a été réalisée sur un nombre entier de périodes ce qui exclut l'utilisation d'un algorithme de transformation rapide.

— La détermination des fonctions de transfert qui sont destinées à connaître la réponse et les performances du système d'atténuation de la houle en fonction de la période de la houle. Elle concerne les termes suivants :

- les coefficients de transmission de la houle,
- les coefficients de réflexion,
- les coefficients de dissipation,
- les efforts et les moments de liaison.

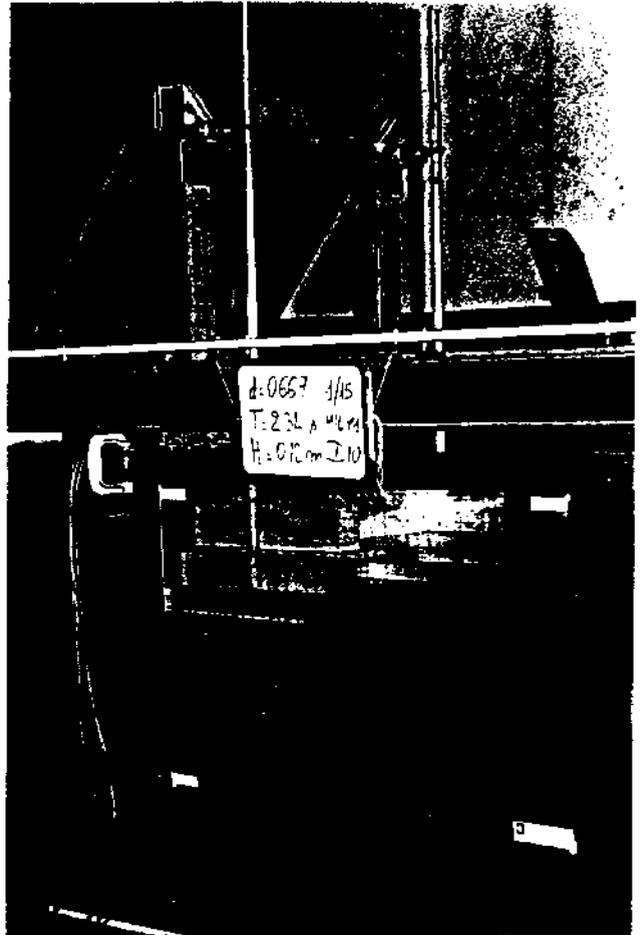


Figure 2 : vue du montage expérimental de l'ASB-5000 sans les jupes ni les retours latéraux

Influence de l'échelle des essais

Deux séries d'essais ont été réalisées avec le même module atténuateur dans des conditions semblables : même profondeur de 10. mètres d'eau et même système de liaison. Seule l'échelle du modèle était différente : 1/15ème pour la première série et 1/20ème pour la seconde série.

Il ressort de la comparaison des résultats entre ces deux séries d'essais que l'extrapolation à partir de l'échelle 1/20ème est plus pessimiste que celle faite à partir de l'échelle 1/15ème.

Cette différence sur les efforts et moments provient sans doute essentiellement du fait que les tiges de liaison étant les mêmes, elles sont relativement plus raides à l'échelle du 1/20ème.

En conclusion il semble raisonnable de considérer que les résultats au 1/20ème donnent par rapport, à ceux au 1/15ème :

- des coefficients de transmission légèrement sous-estimés (de l'ordre de 5%) .
- des efforts horizontaux sur—estimés de l'ordre de 40% ,
- des moments maximaux mesurés sous-estimés de l'ordre de 10% .

Influence de la profondeur d'eau

Deux séries d'essais ont été réalisées avec le même module atténuateur à la même échelle (1/20ème) et avec le même système de liaison. Seule la profondeur d'eau était différente : 14. mètres d'eau pour la première série et 10. mètres d'eau pour la seconde série.

Il ressort de la comparaison entre ces deux séries d'essais que les efforts dans 14. mètres de profondeur sont inférieurs à ceux qui s'exercent dans 10. mètres de profondeur.

Il convient toutefois de noter que la position du châssis d'essai ne pouvant bouger, c'est le niveau de l'eau qui a été diminué : 0.70 mètre pour 14. mètres de profondeur (contre 0.67 mètre pour 10. mètres d'eau au 1/15ème) et 0.50 mètres pour 10. mètres de profondeur. Dans ces conditions, l'ancrage était légèrement plus souple pour les essais dans 10. mètres d'eau que pour les essais dans 14. mètres d'eau.

Ceci confirme donc que les efforts dans une profondeur de 14. mètres d'eau sont sensiblement plus faibles que ceux dans 10. mètres de profondeur qu'il est légitime d'estimer les efforts dans 14. mètres de profondeur en tenant compte du ratio donné par les essais dans 10. mètres de profondeur avec les deux échelles différentes.

En conclusion il semble donc raisonnable de considérer que les résultats dans 14. mètres d'eau conduisent, par rapport à ceux dans une profondeur de 10. mètres d'eau, à :

- des coefficients de transmission sensiblement identiques (légèrement plus faibles pour les petites périodes et légèrement plus importants pour les grandes périodes),
- des efforts horizontaux maximaux un peu inférieurs, de l'ordre de 15%,
- des moments maximaux plus importants pour les petites périodes et plus faibles pour les grandes périodes.

Influence de la rigidité des liaisons

Deux séries d'essais ont été réalisées avec le même module atténuateur dans des conditions semblables : même échelle (1/15ème) et même profondeur de 10 mètres d'eau. Seul le système de liaison était différent : tubes de diamètre 18.mm pour la première série et de diamètre 25.mm avec roulements à billes pour la seconde série.

Il ressort de la comparaison entre ces deux séries d'essais que les efforts avec les tubes de grand diamètre et roulements à billes sont supérieurs à ceux qui s'exercent avec les tubes de petit diamètre sans roulement à billes.

Il apparaît toutefois que pour tous les essais, les écarts restent relativement dispersés. Cette dispersion sur les efforts et moments peut être partiellement imputée à l'écart entre les hauteurs significatives pour lesquelles les essais ont été réalisés. En effet, les essais de la première série ont été réalisés pour des hauteurs significatives plus petites que ceux de la seconde série. Par ailleurs, le changement de tubes a engendré deux phénomènes différents qui se contrarient :

- D'une part le glissement a été amélioré puisque les frottements ont été diminués par les roulements à billes. Ce premier phénomène tend à diminuer l'importance des à coups.
- D'autre part la liaison entre l'atténuateur et le châssis d'essai a été sensiblement raidie par l'augmentation du diamètre des tubes et donc de leur inertie de section. Ce second phénomène tend à augmenter l'importance des à coups.

En conclusion il semble donc raisonnable de considérer que les résultats avec les tubes de grand diamètre et roulements à billes conduisent, par rapport à ceux obtenus avec les tubes de petit diamètre sans roulements à billes, à :

- des coefficients de transmission sensiblement identiques (légèrement plus faibles pour les petites périodes et légèrement plus importantes pour les grandes périodes),
- des efforts horizontaux maximaux sensiblement supérieurs, de l'ordre de 25% à 50%,
- des moments maximaux plus importants pour les petites périodes et plus faibles pour les grandes périodes.

Modélisation numérique de l'ASB—5000

Si les résultats d'essais obtenus sont directement utilisables, ils le sont également indirectement en fournissent les moyens de recalculer les modèles de calcul numérique qui sont nécessaires pour agrandir le champ des investigations et en particulier en tridimensionnel.

Modélisation numérique bidimensionnelle

La modélisation numérique bidimensionnelle consiste à réaliser des calculs de rendement hydrodynamique, d'efforts et de déplacements en faisant varier les différentes caractéristiques mécaniques des modules atténuateurs (amortissements, raideurs de liaison) ; les dimensions géométriques et le déplacement (masse) ayant été définis lors des essais.

L'objectif de ces calculs est de définir les caractéristiques qui correspondent le mieux aux essais, pour être ultérieurement utilisées dans la modélisation tridimensionnelle.

Ces calculs ont été réalisés en mettant en œuvre un modèle bidimensionnel de tenue à la mer des structures en théorie linéaire (écoulement dans le plan vertical), mais en tenant compte de non-linéarités dans l'équation de la mécanique en particulier en ce qui concerne les amortissements.

Les résultats numériques conduisent, par rapport aux résultats expérimentaux, à une bonne corrélation des efforts mais à une légère sous-estimation du coefficient de transmission de la houle. Cela est dû au fait que l'atténuateur dissipe une partie de l'énergie en turbulences et effets visqueux, et met en évidence la difficulté qu'il y a à prédire de manière fine le coefficient d'atténuation au moyen de programmes de calcul en fluides parfait fondés sur la théorie du fluide parfait en écoulements irrotationnels.

Modélisation numérique tridimensionnelle

Bien que la ligne d'atténuateurs ait des caractéristiques essentiellement bidimensionnelles, certains effets tridimensionnels doivent être regardés de près.

Ces effets concernent principalement :

- Le comportement hydromécanique et le rendement du procédé lorsqu'il est soumis à l'action de houles obliques, voire parallèles, et leurs conséquences sur les liaisons entre modules associés en parallèle (efforts et déplacements).
- Les effets de bord aux extrémités des rangées d'atténuateurs et leurs conséquences sur les ancrages.

Cette partie de la modélisation numérique a été réalisée en mettant en œuvre le module de tenue à la mer des structures tridimensionnelles en théorie linéaire du progiciel Diodore.

Pour cela, un modèle tridimensionnel du module d'atténuateur a été réalisé. Des calculs réalisés pour différents maillages allant de 234 éléments jusqu'à 1104 éléments ont permis de montrer qu'il faut, pour que les calculs convergent, au moins 500 éléments pour chaque module.

Performances de l'ASB-5000

Les études théoriques, numériques et expérimentales qui ont été réalisées depuis un an ont montré que l'ASB-5000 présente une grande efficacité pour une large gamme de périodes, comme le montre les courbes de la figure 3.

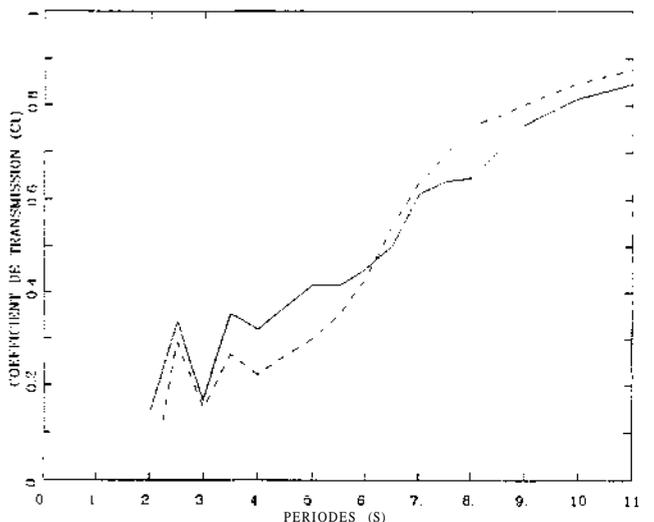


Figure 3 : coefficient de transmission de l'ASB—5000
 ————profondeur 10. mètres———profondeur 14. mètres

En première approximation, en considérant la droite de régression de tous les points d'essais, le coefficient de transmission peut s'écrire :

$$C_T = 0.08T = 0.08 \sqrt{\frac{2\pi\lambda}{g} \coth 2\pi \frac{h}{\lambda}} \quad (8)$$

Expression dans laquelle T désigne la période de la houle, λ sa longueur d'onde, et h la profondeur d'eau (le nombre 0.08 a la dimension inverse d'un temps).

Ainsi, en notant $\tilde{\lambda}$ et \tilde{h} ces longueurs adimensionnalisées par rapport à la largeur de l'atténuateur $L=5$. mètres, il vient :

$$C_t = 0.143 \sqrt{\tilde{\lambda} \coth 2\pi \frac{\tilde{h}}{\tilde{\lambda}}} \quad (9)$$

Ce qui montre que, lorsque le rapport entre la profondeur et la longueur d'onde est suffisamment grand, le coefficient de transmission peut s'écrire :

$$C_t = 0.143 \sqrt{\tilde{\lambda}} \quad (10)$$

Le tableau suivant indique les valeurs de $\tilde{\lambda}$ en fonction de C_t . Il montre clairement que le concept de l'ASB conduit à des performances spécifiques très supérieures aux autres procédés connus pour lesquels la valeur de $\tilde{\lambda}$ correspondant à un coefficient C_t de 0.5 est plutôt de l'ordre de 2 à 5.

C_t	$\tilde{\lambda} = \frac{\lambda}{L}$
0.50	12.2
0.60	17.6
0.70	24.0
0.80	31.3
0.90	39.6

Efforts de liaison

Il convient tout d'abord de rappeler que les attaches des modules sur les pieux ne reprennent que les efforts horizontaux et le moment de roulis, les déplacements verticaux restant libres. Par ailleurs, pour être efficace, un système atténuateur de houle doit changer considérablement la quantité de mouvement du fluide. En contre partie, il doit nécessairement subir des efforts très importants.

Efforts alternés dus à la houle

D'après l'ensemble des résultats obtenus bien expérimentalement que numériquement (en bidimensionnel et en tridimensionnel), les efforts alternés dus à la houle qui doivent être considérés pour le dimensionnement des attaches et ancrages sont les suivants :

Hauteur de la houle (crête à creux)	1.20 m	1.50 m
	Cavalement à $\beta=0^\circ$	22. kdaN
Embardée à $\beta=90^\circ$	79. kdaN	98. kdaN
Roulis à $\beta=90^\circ$ /CdG	168. m.kdaN	210. m.kdaN
Tangage à $\beta=0^\circ$ /CdG	39. m.kdaN	49. m.kdaN
Lacet à $\beta=45^\circ$ /CdG	69. m.kdaN	86. m.kdaN

Efforts moyens dus à la houle

En dehors des efforts alternés, la houle engendre des efforts moyens non nuls. Ce sont les efforts de dérive sur houle.

D'après l'ensemble des résultats obtenus aussi bien expérimentalement que numériquement (en bidimensionnel et en tridimensionnel), les efforts de dérive dus à la houle qui doivent être considérés pour le dimensionnement des attaches et ancrages sont les suivants :

Hauteur de la houle (crête à creux)	1.20 m	1.50 m
	Cavalement à $\beta=0^\circ$	2.2 kdaN
Embardée à $\beta=90^\circ$	3.5 kdaN	5.4 kdaN
Roulis à $\beta=90^\circ$ /CdG	4.9 m.kdaN	7.6 m.kdaN
Tangage à $\beta=0^\circ$ /CdG	17.5 m.kdaN	27.3 m.kdaN
Lacet à $\beta=45^\circ$ /CdG	6.3 m.kdaN	9.9 m.kdaN

Effort dû au courant

L'effort engendré par un courant de vitesse V perpendiculaire à une surface S est donné par la formule de Morison :

$$F = \frac{1}{2} \rho_e S C_d V^2 \quad (11)$$

expression dans laquelle $\rho_e = 1025. \text{kg/m}^3$ désigne la masse volumique de l'eau de mer.

Ainsi, en considérant la plus grande surface que l'atténuateur puisse opposer au courant (12. mètres X 3.33 mètres), une vitesse V de 0.5 mètre par seconde et un coefficient de traînée C_d égal à 2.1, l'effort maximal dû au courant est de 1.08 kdaN, c'est à dire un effort maximal linéique de 0.09 kdaN/m.

Effort dû au vent

L'effort engendré par un vent de vitesse V perpendiculaire à une surface S est donné par la formule de Morison :

$$F = \frac{1}{2} \rho_a S C_d V^2 \quad (12)$$

expression dans laquelle $\rho_a = 1.026 \text{kg/m}^3$ désigne la masse volumique de l'air.

Ainsi, en considérant la plus grande surface que l'atténuateur puisse opposer au vent (12. mètres X 1.50 mètres), une vitesse V de 50. mètres par seconde (180. km/h) et un coefficient de traînée C_d égal à 2.1, l'effort maximal dû au vent est de 4.85 kdaN, c'est à dire un effort maximal linéique de 0.40 kdaN/m.

Développements en cours et à venir

Les développements en cours et à venir portent sur plusieurs points :

- La déclinaison d'une gamme de modules d'atténuateurs de largeurs variables en similitude de Froude par rapport à l'ASB-5000.
- L'extension des possibilités de l'ASB-5000 à des houles de plus grandes hauteurs jusqu'à 4 ou 5 mètres de crête à creux.
- L'opportunité de construire les atténuateurs de houle dans d'autres matériaux que l'acier, comme le béton par exemple.
- L'optimisation des différents paramètres géométriques.
- L'extension du procédé à d'autres moyens d'ancrages mieux adaptés à des profondeurs plus importantes.

Conclusion

Les études théoriques, numériques et expérimentales qui ont été réalisées depuis un an ont montré que l'ASB-5000 présente une grande efficacité pour une large gamme de périodes.

L'ASB-5000 permet d'obtenir pour une houle de travers un coefficient de transmission inférieur à 0.5 jusqu'à une période comprise entre 6 et 7 secondes tout en ne présentant qu'un faible encombrement transversal de 5 mètres.

Enfin, il est possible de repousser cette période de coupure en augmentant les dimensions de l'atténuateur dans les proportions qu'impose la similitude de Froude.

Références

- [1] P. Guevel & al., 'La récupération de l'énergie des vagues', Sciences et Techniques de l'Armement, Tome 60, fascicule 1, 1986.
- [2] D. Delouis, 'Conception des brise-clapots flottants'. Service Technique Central des Ports Maritimes et Voies Navigables, Notice SIC PM n°91.04, Septembre 1991.
- [3] J. Bougis, Analyse des essais en canal d'atténuateurs de houle. Rapport n°94.011.05.01, Février 1995.