

Processus de développement d'un débarcadère auto protégé contre la houle par un brise-lames pneumatique

Jean-Marc Beynet¹ et Jean Bougis²

¹BRL Ingénierie, 1105 Avenue P. Mendès France, 30001 Nîmes Cedex, France

jean-marc.beynet@brl.fr

²Ingénieur Conseil, 34 Chemin du Moulin, 06650 OPIO, France

jean.bougis@wanadoo.fr

Résumé : Les développements de la croisière, de la grande plaisance et du trafic de navettes maritimes à passagers, concernent essentiellement des bateaux en escales courtes et nécessitent de nouvelles infrastructures côtières pour débarquer les passagers. Or, en méditerranée, les extensions de ports et d'ouvrages de protection sont limitées par la présence d'herbiers protégés. Il a donc paru intéressant de concevoir un nouveau type de débarcadère : une estacade sur pieux munie d'un brise-lames pneumatique, ayant peu d'emprise sur le fond, permettant l'accostage, l'amarrage ainsi que l'auto protection contre l'agitation à poste. Les pages qui suivent présentent le processus d'innovation, de conception et d'optimisation d'un tel ouvrage, ainsi que l'utilisation de modélisations en canal à houle pour établir et valider un modèle de prédiction et de dimensionnement du brise-lames.

Abstract: Cruise and yacht markets experience a sustainable growth. The traffic of maritime passengers boats is destined to expand in order to serve islands or to substitute for road transport. As these uses mainly concern boats during short calls, they require new coastal infrastructure to land passengers. Though, in the Mediterranean Sea, extension of ports and sea defence works are strongly restricted because of the existence of posidonia meadows. For these reasons it has appeared interesting to design a new type of wharf: an on-pile boom that is combined with an integrated pneumatic breakwater and that has very few impact on the sea bottom, which thus allows berthing and auto-protection against swell when mooring alongside the quay. This paper presents the innovation, design and optimisation concept of such a work, as well as the use of modelization in a swell canal to determine and validate a prediction and gauging model of the breakwater.

Mots clés : appontement, brise-lames, pneumatique, bulles d'air, houle, courant.

1. Processus d'innovation

Le marché de la croisière est en pleine expansion et souvent les croisiéristes débarquent par chaloupe dans les ports. Le transport de passagers par navettes maritimes se développe également, soit par nécessité (desserte d'îles...), soit par substitution au transport terrestre, lorsque le trafic routier est saturé (saison touristique...) et que les sites s'y prêtent (rade, baie, golfe...). Les ports de plaisance eux-mêmes sont saturés et il y a une forte demande d'anneaux en liste d'attente, surtout en région Paca où la grande plaisance est en croissance rapide. De ce fait, les ports existants ne peuvent pas accueillir tous ces bateaux. Il est par ailleurs très difficile de créer de nouveaux ports et même d'agrandir les ports existants (fortes contraintes environnementales et administratives).

Dans certains cas, il peut être intéressant de créer volontairement des débarcadères en dehors des ports, pour amener les passagers au plus près des sites touristiques ou dans des zones moins urbanisées que les ports existants, près desquelles il sera possible d'implanter à terre des parkings relais.

Puisqu'il n'y a plus de places dans les ports et qu'il est difficile d'étendre les ports existants ou de créer de nouveaux ports, il peut être intéressant de concevoir un ouvrage fonctionnel pour accueillir les vedettes à passagers, les chaloupes de croisiéristes ainsi que certains rassemblements événementiels de grande plaisance à l'extérieur des ports existants, en fonction des conditions d'agitation.

Un tel ouvrage doit avoir le plus faible impact possible sur le fond pour respecter les herbiers de posidonies et de cymodocées qui sont protégés par la loi. Il est donc souhaitable de ne pas retenir des solutions qui mettraient en œuvre des ouvrages classiques de protection (digues à talus) qui ont une emprise importante.

En saison estivale, cet ouvrage doit pouvoir accueillir des bateaux et débarquer des passagers (fonctions d'accostage et d'amarrage) et être capable de s'auto protéger contre les houles courtes de la mer du vent (fonction protection).

En saison hivernale, l'ouvrage n'accueillera pas de bateaux et doit être le plus transparent possible vis-à-vis de l'hydrodynamique (houles) pour ne pas être endommagé pendant les épisodes de tempêtes.

2. Processus de conception

L'appontement temporairement auto protégé (ATAP) a été conçu pour répondre à ces exigences en regroupant les différentes fonctions. C'est une estacade sur pieux capable de s'auto protéger contre la houle (lorsque cela est nécessaire) par mise en route (automatique ou commandée) d'un brise-lames pneumatique intégré à l'ouvrage (rideau de fines bulles). ATAP est un ouvrage fonctionnel avec peu

d'impacts environnementaux, transparent aux sollicitations hydrodynamiques qui nécessite un investissement limité (faible volume de matériaux). Il présente en contrepartie un coût de fonctionnement (énergie pour faire fonctionner le brise-lames pneumatique), et nécessite une maintenance et un entretien.

Il résulte de la conjonction entre ces points forts et leurs contreparties que ce procédé est surtout intéressant pour des bateaux en escale courte (transport de passagers) ou la grande plaisance (coût énergétique faible devant le prix de la place). Le même principe peut être adopté pour faciliter le transfert de croisiéristes entre un navire au mouillage dans une baie et une chaloupe de débarquement ; d'où le DAHET : dispositif atténuateur de houle embarqué pour transfert de passagers.

Ces deux innovations DAHET et ATAP¹, apportent un service complet aux organisateurs de croisières, pour débarquer les passagers dans des conditions de sécurité améliorées, au plus près des sites touristiques, sans encombrer les ports existants et sans créer de nouveaux ports ou de nouveaux linéaires de quais.

Le brise-lames pneumatique consiste à créer un rideau de bulles d'air à partir d'une certaine profondeur. Ces bulles génèrent alors un courant horizontal qui amortit la houle incidente et crée une zone plus calme à l'arrière du dispositif. C'est un ouvrage fonctionnel, capable de s'auto protéger contre la houle, réduisant ainsi les mouvements de la navette amarrée à l'estacade. Dans le concept ATAP, l'air est produit par un compresseur, qui n'est pas situé sur l'ouvrage, mais sur le terre-plein, dans un local insonorisé à l'enracinement de l'estacade sur pieux à la côte. En raison de son impact réduit sur le fond (emprises et ombrages) il est généralement possible d'implanter un tel appontement, même sur des sites sensibles.

La possibilité de protéger un plan d'eau contre l'agitation au moyen d'un rideau de bulles ascendant est connue depuis 1907 (Brasher²). Ce phénomène a d'abord été utilisé d'une manière empirique, en partie fondée sur de fausses croyances, avec des résultats parfois heureux mais le plus souvent décevants.

Aux cours des travaux qu'il a menés pour la préparation du débarquement en Normandie, Taylor⁷ a établi que c'est le courant généré par le rideau de bulles qui s'oppose en totalité ou en partie à la propagation de la houle. De nombreuses autres recherches et études théoriques ont été menées sur ce sujet. Ce procédé a été utilisé après avec d'avantage de bonheur, essentiellement pour la protection temporaire de zones de travaux, sans pour autant que les paramètres du problème soient tous suffisamment bien cernés pour en maîtriser les conditions économiques. Hormis quelques applications spécifiques, le concept n'a pas été vraiment exploité à ce jour car le coût énergétique est trop important pour une utilisation prolongée surtout avec un dimensionnement non optimisé.

Actuellement, dans les applications visées (escales courtes et faible emprise à protéger), il s'agit de protéger un plan d'eau que pendant de courtes périodes correspondant au temps nécessaire pour transférer des passagers entre un paquebot et une chaloupe (DAHET) ou entre une navette maritime et un débarcadère implanté à l'extérieur des digues des ports existants (ATAP).

Dans le concept ATAP, le fonctionnement est limité à quelques minutes par heure d'exploitation des navettes maritimes. Hors saison touristique, l'appontement ne sera généralement pas utilisé. L'ouvrage est assez transparent sur le plan hydrodynamique, il n'aura pas à subir de gros efforts, surtout si les platelages supérieurs sont démontés et que seule la structure porteuse (pieux et poutres) reste exposée. Il pourra résister aux tempêtes, sans mise en route du brise-lames pneumatique. En faible profondeur, si les pertes de charge sont faibles, la consommation d'énergie peut être réduite en substituant un surpresseur au compresseur.

3. Processus d'optimisation

L'optimisation a été fondée sur une analyse bibliographique systématique réalisée en 2005. Pour sérier les difficultés, nous avons abordé séparément :

- la génération d'un courant par des moyens pneumatiques,
- la capacité d'un courant uniforme ou cisailé à atténuer la houle.

La littérature scientifique, abondante sur ces sujets, fournit la plupart des éléments théoriques nécessaires à la compréhension des phénomènes physiques. Elle laisse cependant dans l'ombre, le doute ou la contradiction certains points essentiels à l'évaluation du domaine de validité des théories en fonction des technologies utilisées et de leurs paramètres. Ce qui empêche de maîtriser les conditions économiques de l'exploitation des brise-lames pneumatiques. C'est pour préciser ces points, difficilement accessibles, voire inaccessibles, à l'analyse théorique ou numérique, que nous avons eu recours à des essais sur modèle physique.



Figure 1. Modélisations en canal à houle (clichés BRLi)

Ces essais ont été menés en 2006 dans le canal (longueur $L=31$ m, largeur $B=1.8$ m, hauteur $C=1.8$ m) du laboratoire d'ACRI-IN qui permet de générer des houles cambrées et des courants dans les deux sens. Conçus pour fournir les paramètres nécessaires à l'établissement et à la validation d'un modèle de prédiction, ces essais étaient motivés par des questions précises au sujet :

- des lois de similitude permettant l'extrapolation au réel,
- des différents régimes de génération d'un courant par un rideau de bulles,
- de l'impact de la présence d'un courant sur les conditions de déferlement,
- de la durée du transitoire nécessaire à l'établissement d'un courant.

Les réponses n'étant pas connues a priori, les essais ont été réalisés en deux phases séparées de deux semaines pour tirer les premiers enseignements et préparer les essais complémentaires à la lumière des résultats des premiers essais.

4. Courant engendré par un rideau de bulles

Sous l'effet de la gravité, les bulles remontent en entraînant le liquide voisin par deux mécanismes distincts et d'efficacités très différentes.

S'il est suffisamment homogène, le mélange air eau s'élève comme un nuage en créant un courant de densité, modélisable en intégrant les équations de la mécanique des fluides, sous réserve de préciser certaines hypothèses.

Sinon, les bulles d'air s'élèvent séparément comme des corps étrangers en appliquant à l'eau une force ascendante. Il est possible de modéliser le mouvement d'une bulle isolée, puis de tenir compte des interactions entre bulles par un facteur d'entrave comme Richardson l'a fait pour la chute des sédiments.

Ces deux modèles théoriques existent et sont assez bien maîtrisés pour notre besoin, sous réserve du comportement thermodynamique des bulles d'air et de ses conséquences sur les conditions de similitude des essais.

Pour pouvoir prédire l'efficacité de la génération d'un courant au moyen de bulles, il faut identifier les paramètres qui séparent ces régimes d'écoulements diphasiques. C'est sans doute l'un des points les plus importants qui peut expliquer le plus ou moins de bonheur des installations réalisées de manière trop empirique.

4.1. Lois de similitude

La propagation d'ondes de gravité impose le recours à la similitude de Froude. Il en résulte pour des écoulements monophasiques non décollés :

Similitude de Reynolds : Les efforts visqueux sont essentiellement dus aux pertes de charges liées aux frottements pariétaux. Une distorsion de la rugosité des parois suffit à conserver le même régime d'écoulement (laminaire ou turbulent).

Similitude d'Euler : La pression n'intervient que par son gradient. En retenant la surface libre comme origine des pressions, le nombre d'Euler relatif à la pression atmosphérique est conservé à la distorsion de la similitude de Reynolds près.

Similitude de Weber : Les efforts de tension superficielle sont très faibles devant les efforts de gravité. Ils sont donc négligeables pour des modèles pas trop petits.

Les conséquences sont bien plus importantes pour les écoulements diphasiques liquide-gaz, où c'est la pression absolue qui intervient dans l'équation d'état thermodynamique des gaz. Le choix de l'origine des pressions n'est plus arbitraire. La non conservation du nombre d'Euler absolu entraîne un effet d'échelle sur l'évolution du volume des bulles au cours de leur remontée. Pour un site de 10 m de profondeur et un modèle au 1/10^{ème}, les variations de volume de la bulle seront de 7% sur le modèle et de 64% sur le prototype. Cette distorsion de similitude a des conséquences sur la vitesse de remontée des bulles. Pour un débit massique d'air en similitude de Froude, le débit volumique d'air variera d'avantage sur le prototype que sur le modèle. La similitude d'Euler ne pourra alors être respectée qu'en atmosphère dépressurisée ; ce qui est d'autant plus irréalisable que l'échelle du modèle diminue.

Devant l'impossibilité d'assurer une similitude complète, nous avons assumé la similitude restreinte de Froude dont l'extrapolation doit être corrigée pour les autres similitudes (Reynolds, Euler et Weber). Ces corrections étant très difficiles à établir sur le plan théorique, nous avons préféré recourir à une évaluation empirique des effets d'échelle, dans la gamme de paramètres qui nous intéresse, en procédant à des essais à deux échelles pas trop éloignées des dimensions du prototype. En retenant les profondeurs de 1.50 m et de 0.75 m (échelle de l'ordre de 1/3^{ème} à 1/13^{ème} pour un prototype en profondeur de 5 à 10 m), nous avons substitué une extrapolation empirique, restreinte à des variations limitées des paramètres, à l'extrapolation théorique générale mais trop complexe.

4.2. Influence du diamètre des trous

Comme le débit initial de quantité de mouvement de l'air est négligeable, il est généralement admis que l'efficacité d'un rideau de bulles dépend du débit d'air mais pas du diamètre des trous. Reste à préciser l'influence du diamètre des trous sur la dimension des bulles, leur vitesse limite ascensionnelle, l'ouverture de leur dièdre, et donc sur le régime d'écoulement diphasique.

D'après Maxworthy⁵ *et al.*, la vitesse terminale $U_{T\infty}$ d'une bulle d'air en milieu infini dépend de son diamètre d et du nombre de Morton (1) : où g est la constante de gravité, ρ la masse volumique, ν la viscosité cinématique du liquide et σ la tension superficielle liquide-gaz ; où encore $We = \rho U_{T\infty} d / \sigma$ le nombre de Weber,

$Fr = U_{T_{\infty}} / \sqrt{gd}$ le nombre de Froude et $Re = U_{T_{\infty}} d / \nu$ le nombre de Reynolds. Elle varie de quelques mm/s lorsque $d < 0.5$ mm de diamètre avec $Mo > 10^{-6}$, à plus de 200 mm/s lorsque $d > 1.5$ mm de diamètre avec $Mo < 10^{-7}$. Elle croît indépendamment du nombre de Morton lorsque le diamètre des bulles dépasse 6 mm.

$$Mo = \frac{gV^4 \rho^3}{\sigma^4} = \frac{We^3}{Fr^2 Re^4} \quad (1)$$

Il en résulte une grande variabilité (1 à 20) entre la vitesse ascensionnelle limite des bulles et celle du fluide ambiant qui s'accompagne d'une variation inverse encore plus grande du débit du courant (1 à 100). Ce phénomène se retrouve chez de nombreux auteurs, mais sans que les conclusions ne soient tirées quant à la taille des bulles. La concurrence entre les deux régimes d'écoulements doit expliquer une partie des écarts entre la théorie de Taylor et les expériences d'Evans : les grosses bulles montent plus vite et entraînent moins d'eau que les petites.

Des essais ont donc été réalisés avec des tuyaux en PVC $\varnothing 60$ mm munis de 11, 21, 84 et 845 trous $\varnothing 0.5$ mm, de 8 et 16 trous $\varnothing 0.8$ mm puis de 7 et 15 trous $\varnothing 1.2$ mm, pour des débits d'air de : 40, 75, 210, 1600 et 3333 lpm (voir figure 2). Les premiers résultats ayant confirmé l'intérêt des trous très fins, des essais ont été réalisés avec des bulleurs à oxygénation de stations d'épuration. Il est par contre très difficile d'établir une relation entre le débit d'eau et le diamètre des bulles car la relation entre le diamètre des bulles et celui des trous n'est pas évidente, en particulier pour les bulleurs.

Soient $\tilde{V} = V / \sqrt{gh}$ et $\tilde{Q} = Q / Bh\sqrt{gh}$ la vitesse et le débit adimensionnels, indicés par a pour l'air et par c pour le courant. Les résultats obtenus montrent que :

- Les bulleurs ont le comportement de tubes à trous de diamètre quasiment nul.
- Pour un débit d'air donné, le débit du courant décroît lorsque le diamètre des trous grossit, jusqu'à atteindre quelques millimètres. Il reste sensiblement constant au-delà (voir figure 2). Les essais rapportés dans la littérature ont souvent été réalisés avec des trous trop gros pour déceler ce phénomène.
- Pour un soufflage subsonique, \tilde{Q}_c ne dépend que de \tilde{Q}_a et pas de la section de soufflage ; ce qui impose un nombre minimal de trous pour \tilde{Q}_a donné.
- Pour des trous fins et des débits d'air adimensionnels inférieurs à $\tilde{Q}_a < 500$, le débit du courant \tilde{Q}_c , la vitesse maximale du courant $\tilde{V}_{c,max}$ et l'épaisseur minimale du courant $e_{c,min}$ sont des fonctions du débit d'air respectivement sous les formes : $\tilde{Q}_c = \tilde{Q}_a^{1/3} (a_1 + b_1 \tilde{Q}_a)^{1/3}$, $\tilde{V}_{c,max} = a_2 (\tilde{Q}_a h)^{1/3}$ et $e_{c,min} = h (a_3 + b_3 \tilde{Q}_a)$; les a_i et b_i déterminés sont validés pour les gammes de paramètres des essais.

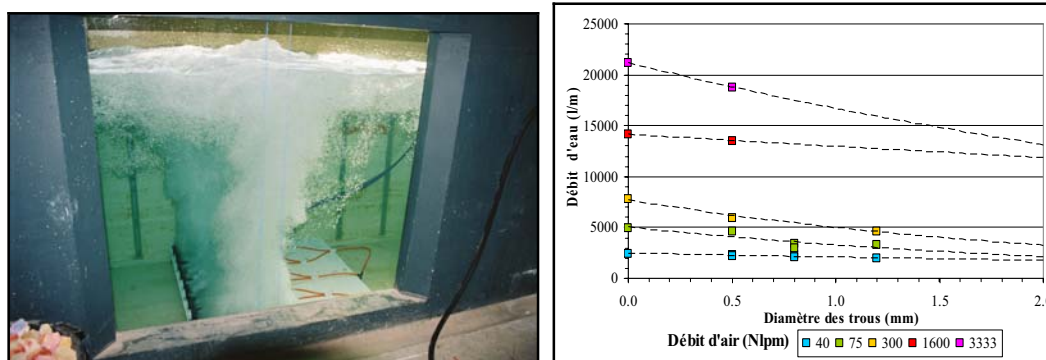


Figure 2. Soufflage par bulles et débit d'eau fonction du diamètre des trous

5. Atténuation de la houle par un courant

Il existe plusieurs régimes d'interactions entre la houle et le courant :

- Si la vitesse du courant est supérieure à la vitesse de groupe, la houle ne peut pas remonter le courant : elle est complètement stoppée. C'est un phénomène purement cinématique qui relève entièrement de l'analyse mathématique.
- Lorsque la vitesse du courant est très inférieure à la vitesse de groupe, la houle n'est plus altérée par la présence du courant : elle est complètement transmise.
- Entre les deux, la transmission dépend des interactions et du déferlement. La complexité du phénomène impose le recours à des lois empiriques.

De nombreux résultats d'essais ont été publiés sur le déferlement de la houle sans courant ou avec un courant uniforme sur la profondeur. Nous avons utilisé certains d'entre eux pour déterminer une expression analytique maniable.

Pour les faibles profondeurs relatives (h/λ_0), la cambrure limite croît linéairement avec elles, indépendamment de la vitesse du courant : c'est la seule profondeur d'eau qui gouverne la hauteur maximale au déferlement et les résultats obtenus sans courant s'appliquent, sans modification, en toute généralité.

Lorsque la profondeur relative h/λ_0 tend vers l'infini, la cambrure tend vers une limite qui ne dépend que du rapport entre la vitesse du courant u_0 et la célérité C_0 . Nous avons déterminé une fonction d'approximation du rapport $C_A(u_0/C_0)$ de la cambrure limite avec courant à celle sans courant, à partir des données publiées par Dalrymple & Dean³ et par Susbielles & Bratu⁶ (cf. figure 3.1) :

$$C_A\left(\frac{u_0}{C_0}\right) = \frac{H(u_0/C_0)}{H(0)} \approx \sqrt{1 + 3.5 \frac{u_0}{C_0} + \left(\frac{u_0}{C_0}\right)^2} \quad (2)$$

A partir du critère de Miche-Battjes (3) ($\gamma_0 = 0.887$ et $\gamma = 0.806$) optimisé par Hamm⁴, puis en déterminant une fonction d'approximation (4) du rapport λ/λ_0 d'après les données de Yamada et Shiotani (Hamm⁴) :

$$\frac{H}{\lambda} = \frac{\gamma_0}{2\pi} \operatorname{th}\left(2\pi \frac{\gamma}{\gamma_0} \frac{h}{\lambda}\right) \quad (3)$$

$$\frac{\lambda}{\lambda_0} \approx f\left(\frac{h}{\lambda_0}\right) = 1.193 \operatorname{th} \sqrt{5.9 \frac{h}{\lambda_0} + 8.1 \left(\frac{h}{\lambda_0}\right)^2} \quad (4)$$

Nous obtenons la cambrure maximale avec un courant uniforme (figure 3.2) :

$$\frac{H}{\lambda_0} = \frac{\gamma_0}{2\pi} f\left(\frac{h}{\lambda_0}\right) C_A \left(\frac{u_0}{C_0}\right) \operatorname{th} \left[\left[\frac{\gamma_0}{2\pi} f\left(\frac{h}{\lambda_0}\right) C_A \left(\frac{u_0}{C_0}\right) \right]^{-1} \gamma \frac{h}{\lambda_0} \right] \quad (5)$$

Un courant uniforme opposé à la houle en réduit la hauteur au déferlement ; ce qui est favorable à notre application. Toutefois, des essais réalisés avec un courant cisailé variant linéairement avec la profondeur, semblent montrer que cet effet peut être inversé dans certains cas. Ce point reste donc à préciser.

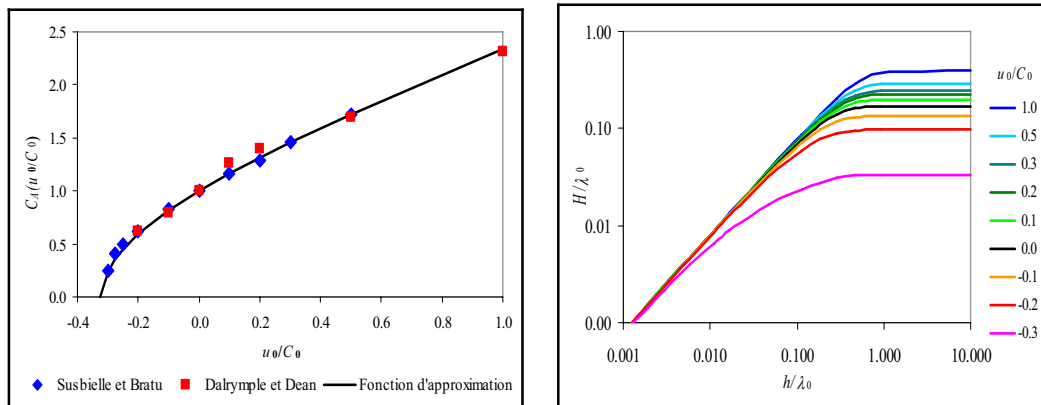


Figure 3. Cambrure maximale et critère de déferlement avec courant uniforme

Des essais ont ensuite été réalisés qui ont montré que le critère de déferlement convient pour la houle contre courant. Il doit cependant être validé avec de plus grandes hauteurs pour les houles co-linéaires au courant.

6. Amortissement de la houle en fonction du débit d'air

Des essais de synthèse ont été réalisés avec un tuyaux en PVC \varnothing 60 mm muni de trous de diamètre \varnothing 0.5 mm et avec des bulleurs, pour des débits d'air de 210, 1600 et 3333 lpm et dans les profondeurs d'eau de 1.50 m et de 0.75 m. Deux groupes de trois sondes ont été disposés entre le batteur et le rideau de bulles et entre le rideau de bulles et l'amortisseur de houle pour analyser la houle incidente, et l'onde transmise et définir ainsi le coefficient de transmission C_t .

Pour chaque série un polynôme de régression de degré 6 a été calculé sur l'ensemble des points (périodes et hauteurs de houle), puis tracé pour asseoir la courbe d'approximation (6). A , B et C sont des coefficients qui permettent d'ajuster la fonction analytique pour « envelopper » le polynôme de régression.

$$C_r \left(\frac{\lambda}{h} \right) = \frac{A}{2} \left\{ 1 + \operatorname{th} \left[B \left(\frac{\lambda}{h} - C \right) \right] \right\} \quad (6)$$

- Le coefficient d'amplitude A a été calé sur la valeur maximale de C_r .
- Le coefficient d'inclinaison B a été sur la pente pour $C_r=0.5$.
- Le coefficient de translation C a été calé pour que la courbe d'approximation soit une « enveloppe tangente » à régression polynomiale.

Ces courbes analytiques ont permis de déterminer les courbes λ/h en fonction du débit d'air adimensionnel \tilde{Q}_a et de la profondeur h pour différentes valeurs de C_r . Ces courbes ont ensuite été mises sous la forme (7) où la courbe f a été approximée par un polynôme du troisième degré $f(C_r) = a_3 C_r^3 + a_2 C_r^2 + a_1 C_r + a_0$, ce qui permet de retrouver les résultats d'essais avec une précision de $\pm 5\%$.

$$\frac{\lambda}{h}(C_r) = f(C_r) \sqrt{\tilde{Q}_a h} \quad (7)$$

7. Conclusion

De nombreuses séries d'essais en canal ont été réalisées, en faisant varier les paramètres (profondeur d'eau, hauteur, période et longueur d'onde de la houle, débit et pression de l'air, profondeur d'immersion du brise-lames, nombre et dimensions des perforations, etc.). Elles ont permis de cerner les limites d'utilisation, de dimensionner le système (débit d'air) et d'optimiser les coûts d'investissement et de fonctionnement des brise-lames pneumatiques dans les gammes de paramètres pertinentes pour les applications visées. Elles ont montré que :

- Tant que le soufflage est subsonique, le débit du courant est indépendant de la section totale de soufflage.
- Pour des trous très fins, le soufflage induit un courant de densité intense. Au-delà de quelques millimètres de diamètre, cet effet s'estompe au profit d'une action plus individualisée des bulles.
- Pour les trous fins, le débit d'eau adimensionnel évolue comme la racine cubique d'un polynôme du second degré du débit d'air adimensionnel.
- Pour les trous fins, l'épaisseur du courant est une fonction affine du débit d'air.
- Pour des débits d'air adimensionnels pas trop grands, la vitesse adimensionnelle maximale du courant varie comme la puissance 1/3 du produit du débit d'air adimensionnelle par la profondeur.

Ces essais ont également permis de valider une expression analytique d'un critère de déferlement de la houle contre le courant.

8. Remerciement

Les études et les essais ont été réalisés avec le soutien de OSEO-Innovation.

9. Références bibliographiques

- 1 Beynet J.-M. (2007) *Innovations pour sécuriser et développer les transferts de passagers par navettes maritimes*, Colloque SHF-CETMEF-AIPCN, Paris
- 2 Brasher P. (1915) *The Brasher air breakwater*, Compressed Air Magazine, n°20
- 3 Dalrymple R.A., Dean R.G. (1975) *Waves of maximum height on uniform currents*, J. Waterways Harbours and Coastal Engineering, Vol. 101, pp. 259-268
- 4 Hamm L. (1995) *Modélisation numérique bidimensionnelle de la propagation de la houle dans la zone de déferlement*, Thèse, Université de Grenoble I, 343 p.
- 5 Maxworthy T., Gnann C., Kurten M. & Durst F. (1996) *Experiments on the Rise of Air Bubbles in Clean Viscous Liquids*, J. Fluid Mech., Vol.321, pp.421-441.
- 6 Susbielles G., Bratu C. (1981) *Vagues et ouvrages pétroliers en mer*, Paris : Technip, 501 p.
- 7 Taylor G.I. (1955) *The action of a surface current used as a breakwater*, Proceedings of the Royal Society of London, Series A, Vol.231, n°1187, pp.466-478

