

6e JOURNÉES DE L'HYDRODYNAMIQUE

24, 25, 26 février 1997 - Nantes

INJECTION D'AIR SOUS UNE CARENE ET REDUCTION DE LA TRAINÉE

F. LARRARTE *, T. TAKAHASHI, H. KAWASHIMA

Ship Research Institute
Ship Performance Division
6-38-1 Shinkawa
Mitaka, Tokyo 181
Japon
Tél : (+81)-422-41-3445
Fax : (+81)-422-41-3053

* Actuellement :
3, rue des Armoises 44300 Nantes

Résumé

En terme d'économies d'énergie, la réduction de la traînée visqueuse présente un intérêt indéniable. De nombreuses références font état de réduction du frottement pariétal quand des microbulles d'air sont injectées dans la couche limite d'une plaque plane. D'autres mentionnent la réduction de la traînée de la barge sous laquelle une poche d'air est créée.

Afin de déterminer dans quelle mesure l'injection d'air pourrait permettre de réduire la résistance visqueuse des navires marchants, une barge et deux maquettes d'un porte-containeurs ont été remorquées en bassin des carènes et leur résistance totale mesurée. Le comportement de l'air après injection (bulles ou poches) a été étudié. Ces résultats ont été comparés à ceux issus d'une étude bibliographique et la possibilité de réduire la traînée en utilisant l'injection d'air est discutée.

Summary

The reduction of viscous drag is of great interest for energy conservation. Many references report skin friction or total drag reduction when microbubbles are injected into the boundary layer of a flat plate. Some others mention drag reduction of a flat bottom ship when a air sheet is generated under the hull.

In order to see if air injection could reduce the viscous drag of merchant ships, a flat bottom ship and two geosims models of a container ship were towed in a towing tank and the total drag resistance was measured. The behaviour of the air after injection (sheet or bubbles) was investigated. The results were compared with those obtained from a bibliographic study and the possibility to reduce the drag using air injection is discussed.

Introduction

La maîtrise de la consommation d'énergie est une préoccupation croissante et le Ship Research Institute (SRI) mène un grand programme sur 5 ans dont le but est de réduire la traînée visqueuse des navires de 10%. Ceci représenterait une économie de l'ordre de 50 tonnes de fuel sur le trajet Le Havre - Baltimore.

Parmi les nombreuses méthodes qu'il est possible de mettre en oeuvre, l'injection d'air sous la carène est celle va être discutée ici sachant que notre but est de connaître dans quelle mesure l'injection d'air peut permettre de réduire la traînée des navires marchants.

Les premières mises en application datent du siècle dernier avec les travaux de Laval (cité par Edstrand (1949)) mais il observait une augmentation de la résistance attribuée aux interactions entre l'air et l'eau et aussi entre les bulles formées autour de la maquette. Plus récemment Edstrand (1949) et Courouble (1971) obtenaient une réduction de la traînée visqueuse en injectant des poches d'air sous des navires à fond plat mais d'une part ils rencontraient des problèmes de stabilité de la maquette, et d'autre part l'augmentation de la résistance de vagues, notamment en profondeur finie, se traduisait par un gain négatif. Kostilainen (1968), (1972) a montré que la ventilation diminue le frottement mais également augmente l'efficacité d'une propulsion diphasique et ses résultats sont prometteurs pour les navires tels que les barges et les pétroliers. Par ailleurs Madavan (1984), Merkle (1989), Kato (1995) obtiennent une réduction du frottement pariétal pouvant atteindre 20% quand des microbulles d'air sont injectées dans la couche limite d'une plaque plane. Ces résultats correspondent à des écoulements bien canalisés en tunnel à circulation d'eau.

Les travaux en similitude de Froude, Edstrand (1949) et Courouble (1971), ne permettent pas une bonne maîtrise des paramètres visqueux ou physico-chimiques tels que la tension superficielle. Une étude bibliographique a été menée afin d'identifier les paramètres clé (taille des bulles, vitesse de l'écoulement, débit d'air,...) régissant la réduction de la résistance. Afin de pouvoir d'une part comparer les résultats du SRI à ceux de la bibliographie, et d'autre part de disposer de données sur l'effet d'échelle, une maquette de barge à fond plat et deux maquettes géométriquement similaires d'un porte-conteneurs ont été tractées en bassins des carènes et leur résistance totale mesurée. Par ailleurs le comportement de l'air après injection (formation de poches ou de bulles, trajectoire) a été étudié. Après une description des dispositifs expérimentaux, les résultats sont présentés. La question de la viabilité de l'injection d'air comme moyen de réduire la traînée visqueuse est discutée.

Essais effectués au SRI.

Une maquette de 3 m de long d'une barge fluviale à fond plat a été remorquée en eau calme dans un bassin de 150 m. Le bau est de 0,7 m et le tirant d'eau de 0,13 m (Figure 1). Une plaque poreuse de surface $S_i = 0,07 \times 0,54m^2$ était située à la station SS8 (Figure 1). La barge était équipée de deux quilles latérales de 0,2 m de tirant d'eau (donc 7 cm plus profondes que la carène) afin de canaliser l'air. Les bulles suivaient le fond plat de la maquette avant de remonter vers la surface libre une fois le sillage atteint. Le comportement et la morphologie des bulles ou poches ont été observés au moyen d'une prise de vue plongeante à la verticale des fenêtres pratiquées sur le fond (Figure 2a).

Deux maquettes d'un porte-conteneurs (noté P.C. dans les Tables 1 et 2) de 240 m de long ont été tractées en eau calme dans un bassin de 400 m. La maquette au 1/60ème a une longueur de 4 m pour un bau de 0,49 m et un tirant d'eau de 0,25 m. Celle au 1/34ème a une longueur de 7 m pour un bau de 0,87 m et un tirant d'eau de 0,44 m (Figure 1). Chaque maquette était équipée d'une plaque poreuse située à la station SS6 et dont la surface était $S_i = 0,02 \times 0,36m^2$ pour la maquette de 7 m. Afin d'observer le comportement et la morphologie des bulles ou

poches, l'écoulement sous la maquette de 7 m a été filmé de dessous avec une caméra sous-marine (Figure 2b) pour une zone limitée par les stations SS6 et SS5. L'action de l'air ne se limite bien évidemment pas à la section d'injection mais continue tant que les bulles interagissent avec l'écoulement. Il est donc intéressant de connaître leur trajectoire le long de la carène et jusque dans le plan de l'hélice puisque les bulles pourraient modifier le champ de pression local et entraîner des pertes de performances de l'hélice. Les deux maquettes ont donc été filmées depuis le côté afin de suivre la trajectoire des bulles dont seul le lieu d'injection était imposé.

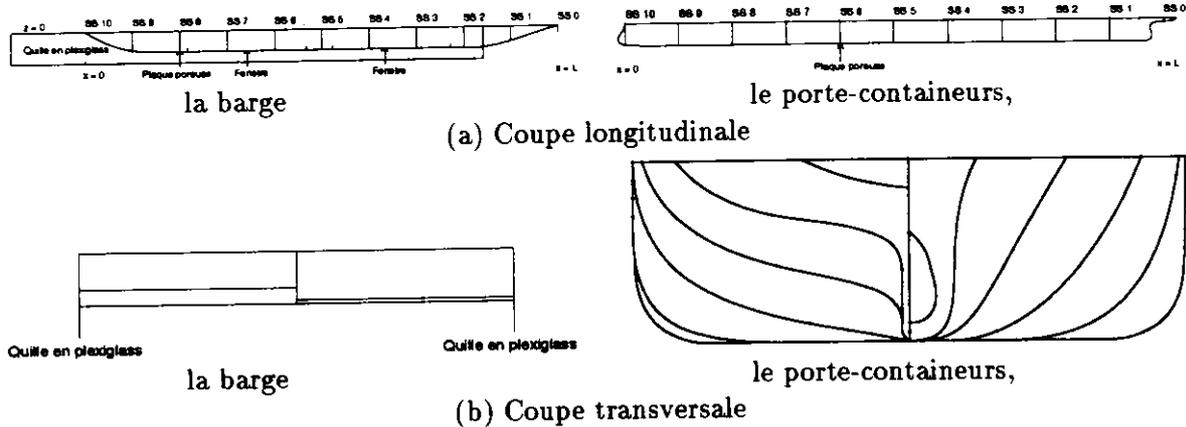


Figure 1 : Géométrie des maquettes.

Chaque maquette était munie d'une chambre alimentée en air par le dessus et dont le fond était constitué par la plaque poreuse. En passant à travers cette plaque (Figure 2) l'air prenait la forme de bulles ou de poches sous la coque. La section d'injections est située à la partie avant du fond plat. Il a été possible d'observer l'aspect général pris par l'air et les enregistrements vidéo ont permis, au moyen d'un échantillonnage d'images numérisées, de déterminer le rayon moyen des bulles observées dans chacune des configurations d'essais (sur une population de 30 à 80 bulles).

Afin d'étudier l'influence de la vitesse, chaque maquette a été remorquée à trois vitesses U correspondant à des nombres de Froude $Fn = U/\sqrt{gL}$ compris entre 0,1 et 0,3 (g est l'accélération de la pesanteur, L la longueur entre perpendiculaires). Pour chaque configuration d'essai (Table 1) l'air a été injecté avec des débits d'air Q_a tels que le coefficient de débit $C_q = Q_a/US_i$ soit au plus deux fois plus élevé que ceux utilisés par Merkle (1989). Avec les dispositifs expérimentaux utilisés, ni la vitesse d'injection ni la taille des bulles ne pouvaient être contrôlées, seuls les débits d'air et les vitesses de remorquage étaient imposés. Les maquettes n'ayant pu être appareillées pour mesurer le frottement pariétal, la traînée totale a été mesurée.

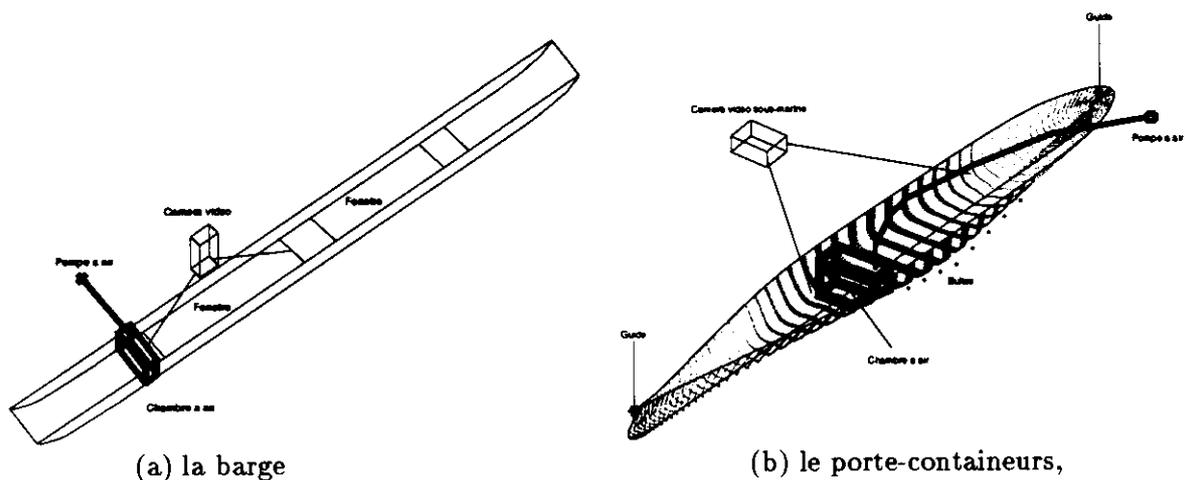


Figure 2 : Dispositifs expérimentaux.

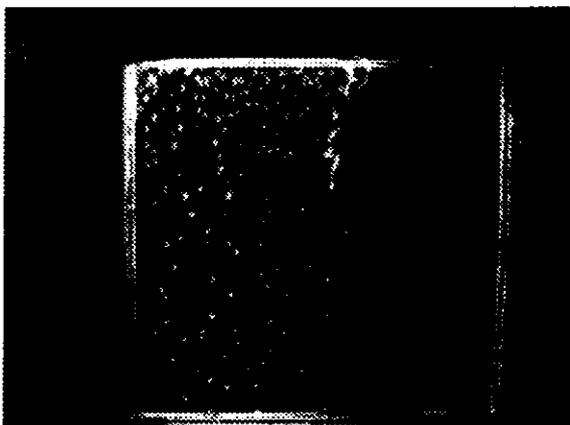
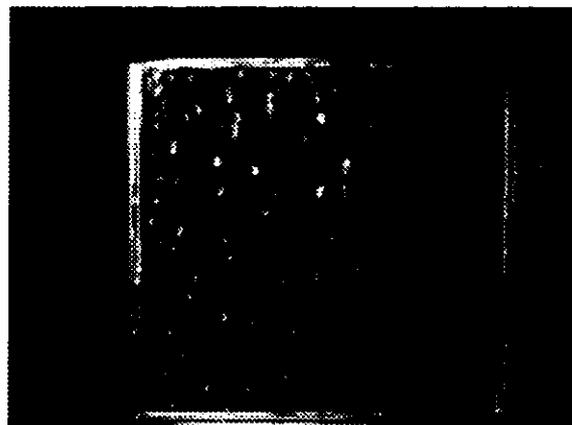
Table 1 : Conditions expérimentales.

type	L (m)	U (m/s)	Fn	Q_a (l/mn)	$C_q = Q_a/US_i$
barge	3	0,542	0,1	15, 30, 50, 70	0,012, 0,024, 0,041, 0,057
	3	1,084	0,2	15, 30, 50, 70	0,006, 0,012, 0,020, 0,028
	3	1,627	0,3	15, 30, 50, 70	0,004, 0,008, 0,014, 0,019
P.C.	4	0.626	0,1	3, 5, 8,3, 16,6	0,034, 0,057, 0,094, 0,188
	4	1.252	0,2	3, 5, 8,3, 16,6, 24,9	0,017, 0,028, 0,047, 0,094, 0,141
	4	1.706	0,2725	3, 5, 8,3, 16,6, 24,9	0,012, 0,021, 0,035, 0,069, 0,104
	7	0.828	0,1	12, 20, 40	0,033, 0,056, 0,112
	7	1.657	0,2	12, 20, 40	0,016, 0,028, 0,056
	7	2.257	0,2725	12, 20, 40	0,012, 0,021, 0,041

Dans le cas du porte-conteneurs, les bulles étant transparentes et la zone à filmer très large, il a été difficile, d'obtenir un bon éclairage et des images bien contrastées. De plus, la caméra sous-marine n'étant pas télécommandée, les paramètres devaient être contrôlés manuellement. Pour obtenir les trajectoires des bulles, 5 à 10 images de chaque configuration expérimentale (même carène, même nombre de Froude, même débit d'air) ont été numérisées avec une résolution de 320×240 pixels et une incertitude sur la position des bulles évaluée entre 1 et 2 cm après conversion pixel-cm. L'utilisation d'un logiciel d'analyse d'images a permis de relever les coordonnées des bulles visibles. La compilation des positions donne les trajectoires expérimentales.

Résultats

Pour la barge, à $Fn = 0,1$ et aux faibles coefficients de débits, l'air n'est pas équi-réparti et forme une poche sur tribord alors que des bulles bien différenciées et de 3 mm de rayon sont présentes à babord. Ceci peut venir d'une inégalité de porosité de la plaque, d'un écart de positionnement de la maquette ou plus vraisemblablement du fait que l'injection d'air dans la chambre était à tribord et non dans l'axe de la maquette. Aux forts débits, l'air était en quantité suffisante pour former une poche bloquée latéralement par les quilles et qui occupait tout le dessous du fond plat. A $Fn = 0,2$ et aux faibles coefficients de débits, l'air forme des trains de bulles alors que pour $C_q = 0,028$ on observe des bulles sur les vingt premiers centimètres en aval de la plaque poreuse puis l'air forme une poche bloquée latéralement par les quilles. A $Fn = 0,3$ on distingue difficilement les trains les uns des autres. En fait il n'est pas possible de dire si ce sont des trains de bulles de rayon supérieur à 1 mm ou de fin tuyau d'air, il semble qu'il y ait sous la coque un matelas de bulles d'air.

(a) $C_q=0,012$ at $Fn = 0,1$  $C_q=0,024$ at $Fn = 0,1$

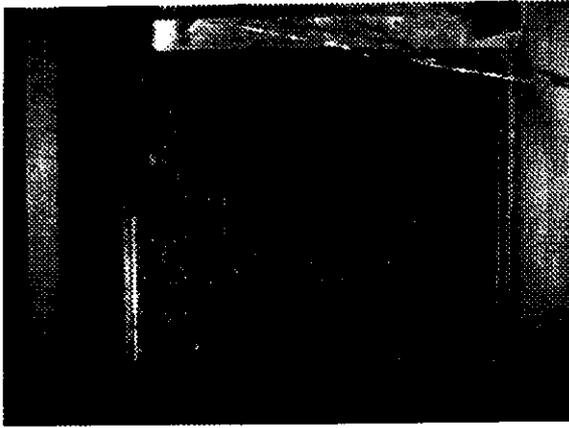
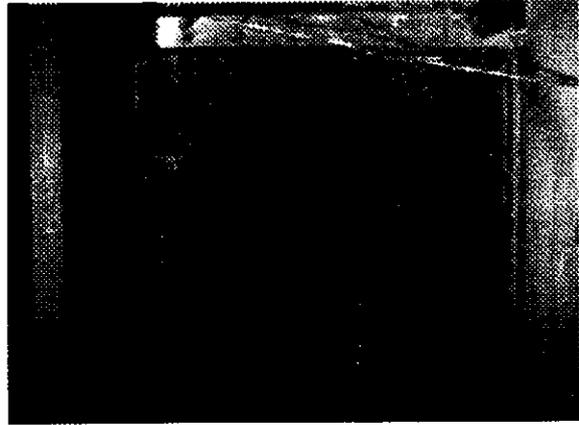
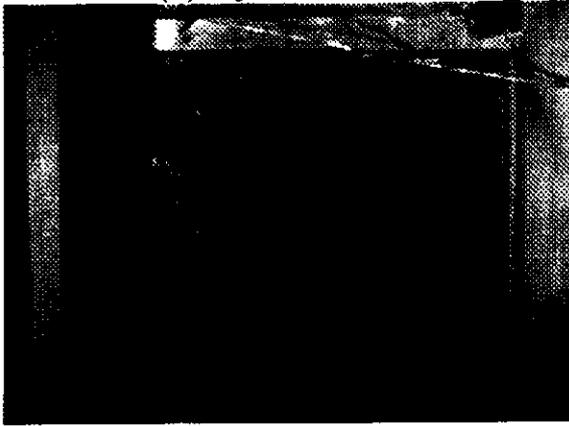
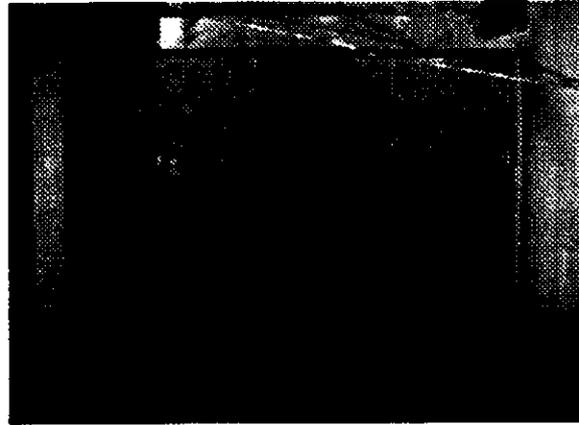
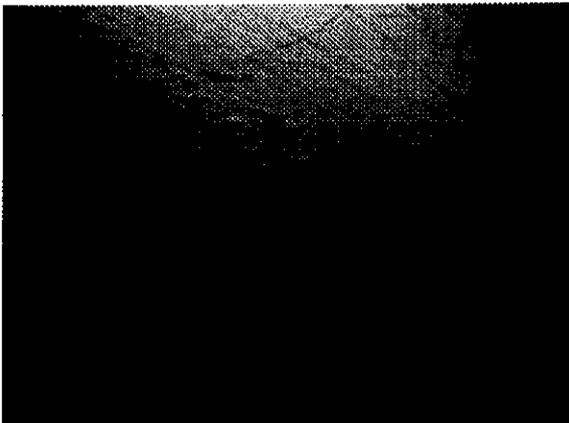
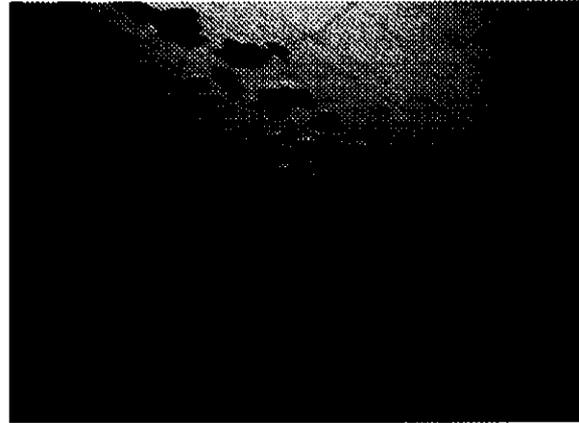
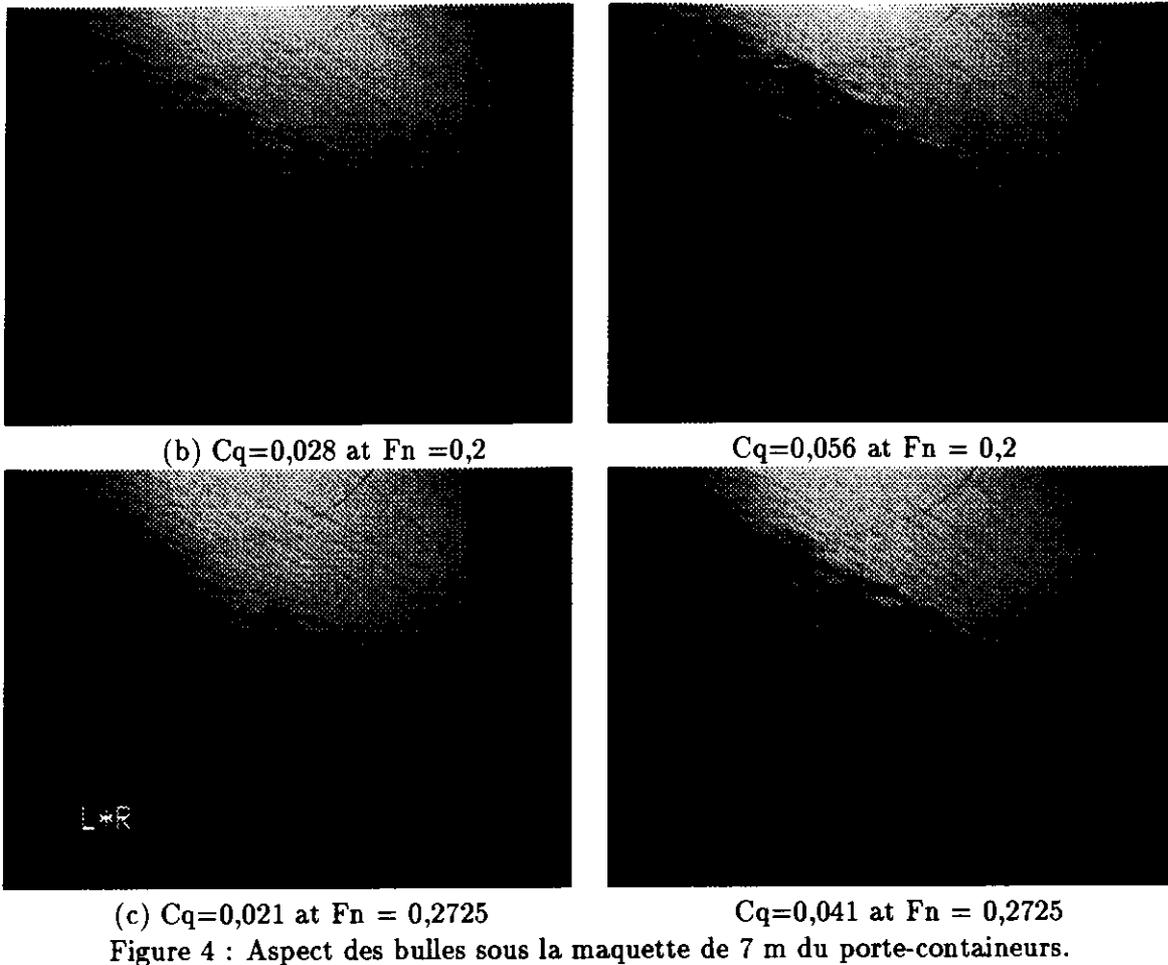
(b) $C_q=0,012$ at $Fn = 0,2$  $C_q=0,020$ at $Fn = 0,2$ (c) $C_q=0,014$ at $Fn = 0,3$  $C_q=0,019$ at $Fn = 0,3$,

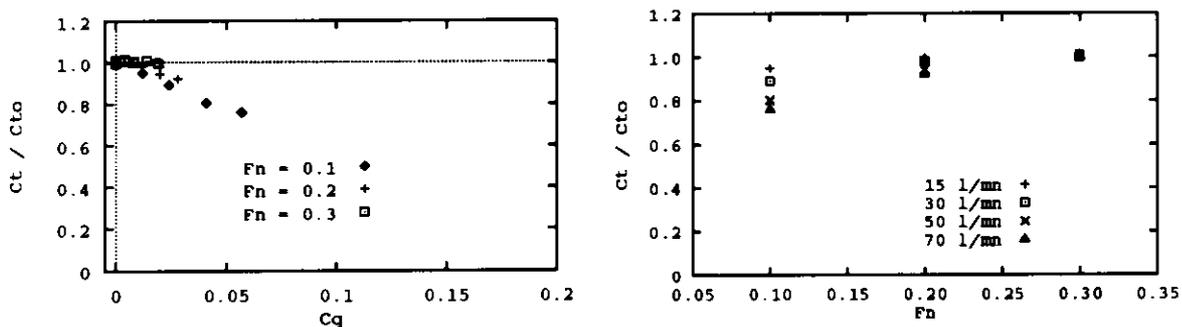
Figure 3 : Aspect des bulles sous la barge.

Par comparaison avec les lignes tracées sous la coque du porte-containeur (Figure 4) on a mesuré le rayon des bulles. Celui-ci est supérieur au centimètre pour un nombre de Froude de 0,1. Par ailleurs des bulles remontent très rapidement sur le côté de la coque depuis l'extrémité de la plaque poreuse, certaines ont un rayon supérieur à deux centimètres. Pour des nombres de Froude supérieurs, l'air forme des trains de bulles dont le rayon est compris entre 2,5 et 5 mm.

(a) $C_q=0,033$ at $Fn 0,1$  $C_q=0,056$ at $Fn = 0,1$



La Figure 5a représente l'évolution de la résistance totale de la barge en fonction du coefficient de débit d'air C_q (C_{t0} est la moyenne des mesures effectuées sans injection d'air). Pour des nombres de Froude de 0,1 et 0,2, la traînée diminue quasi linéairement et atteint 10% pour un coefficient de débit de 0,024 à $Fn = 0,1$. Cette diminution semble pouvoir être atteinte à $Fn = 0,2$ pour un coefficient de débit de 0,035. La Figure 5b montre que la réduction atteint 20% pour un nombre de Froude de 0,1 et un débit d'air de 70 l/mn, ce qui correspond à une situation de poche, et 10% avec 30 l/mn ce qui correspond à une poche d'un côté et des bulles de l'autre. Lorsque la vitesse croît, ce qui correspond à des bulles, la réduction de traînée diminue pour s'annuler à $Fn = 0,3$ où des trains de bulles ont été observés.



Pour le porte-containeur, la résistance totale reste constante pour des coefficients de débit inférieurs à 0,01 puis croît linéairement jusqu'à atteindre une augmentation de 8% pour un coefficient de débit d'air de 0,18 dans le cas de la maquette de 4 m et de 5% pour un coefficient de débit de 0,11 pour celle de 7 m (Figure 6a). Contrairement aux résultats obtenus avec la

berge, l'augmentation de la résistance est maximale à faible vitesse, cas des grosses bulles, pour diminuer ensuite et s'annuler à grand nombre de Froude alors que des trains de bulles ont été observés. Quelque soit la maquette, l'influence du débit d'air est faible. Il semble que la forme prise par l'air est une grande importance puisque la résistance augmente avec de grosses bulles, ne change pas avec des trains de bulles et diminue avec des millibulles ou des poches.

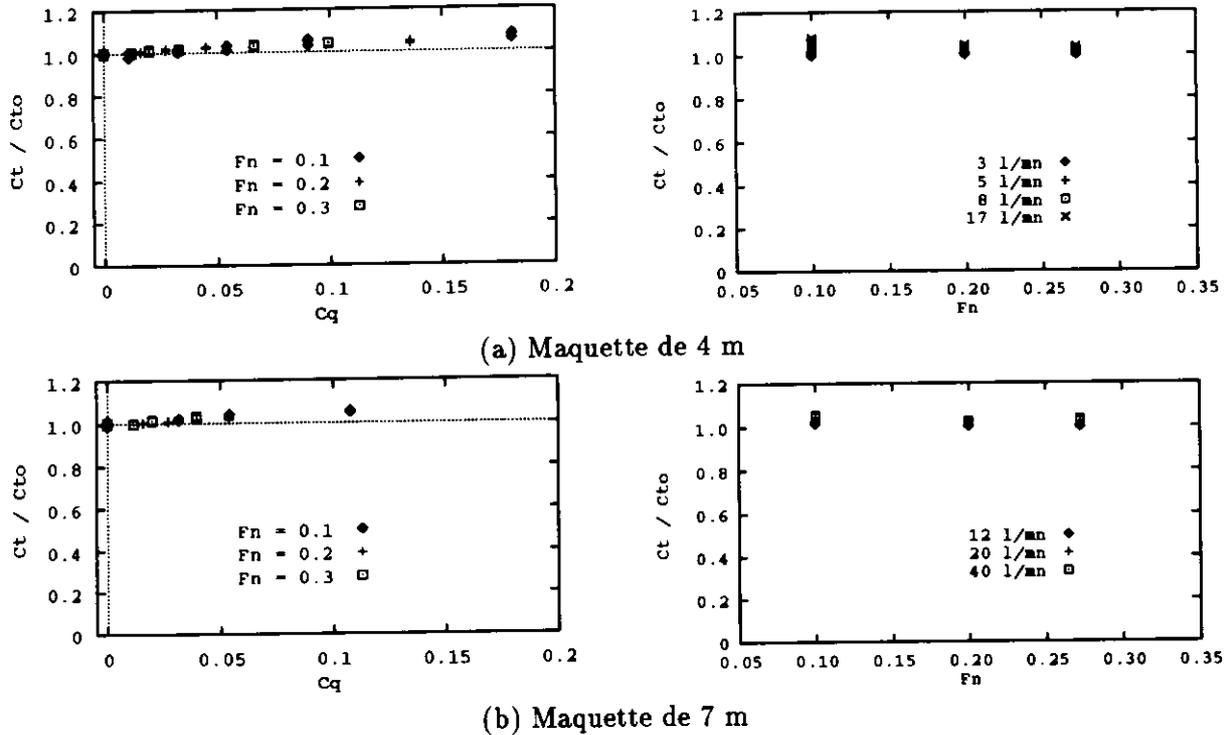


Figure 6 : Résistance totale du porte-containeurs

Etude bibliographique

De nombreux résultats expérimentaux concernant l'injection de microbulles dans la couche limite d'une plaque plane existent. De nombreux paramètres ont été étudiés. Madavan (1984b) et Kato (1995) montrent que la taille moyenne des pores de la plaque poreuse n'a qu'une faible influence sur la taille des bulles et la réduction du frottement pariétal (Figure 7). Par contre le coefficient de frottement diminue quand la vitesse de l'écoulement augmente.

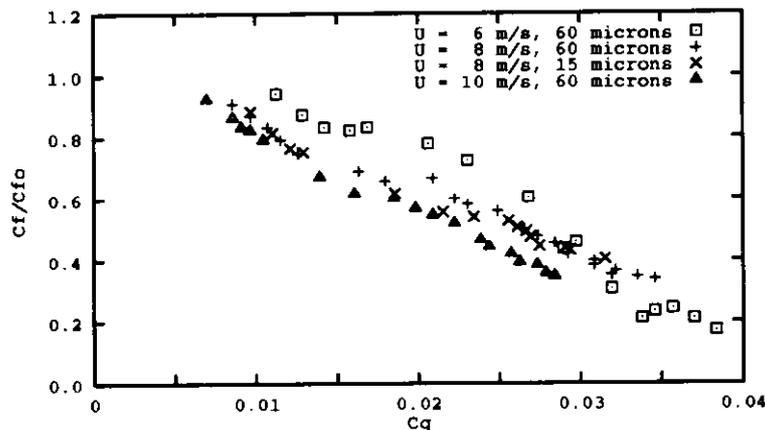
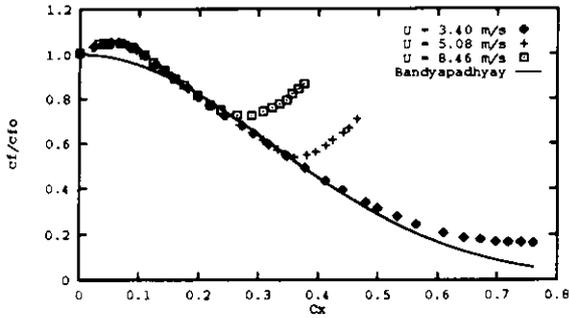
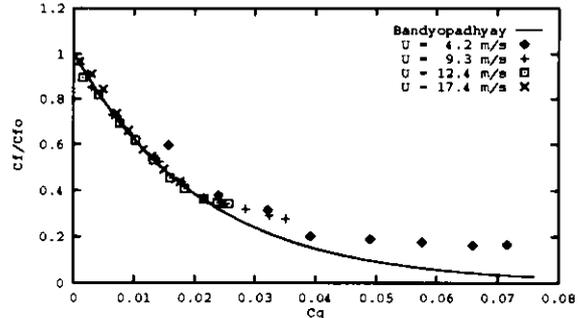


Figure 7 : Influence de la vitesse et de la taille moyenne des pores (extrait de Kato (1995)).

A partir des travaux de Madavan (1984a) et de Bogdevich (1977), Bandyopadhyay (1986) a trouvé deux relations empiriques donnant la réduction du coefficient de friction local et global. Mais les courbes ainsi obtenues ne suivent que grossièrement les résultats expérimentaux. En particulier le débit optimal mis en évidence par les résultats de Bogdevich, et qui est très nettement dépendant de la vitesse de l'écoulement, est complètement ignoré (Figure 8).



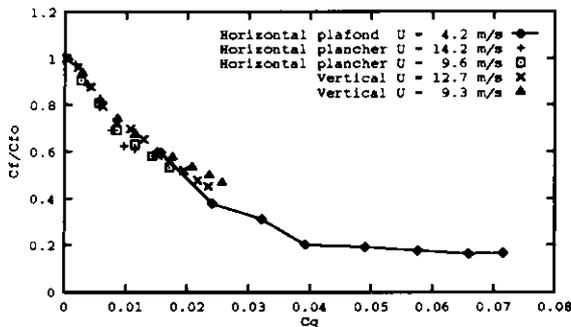
(a) Résultats de Bogdevich (Fig. 6)



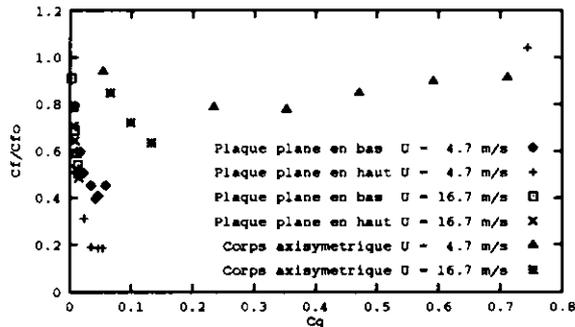
(b) Résultats de Madavan (Fig. 8)

Figure 8 : Résultats expérimentaux et relations empiriques de Bandyopadhyay.

La Figure 9a montre que les résultats de Madavan sont cohérents entre eux quelque soit l'orientation de l'écoulement et que les bulles soient au dessus (cas notés plancher), au dessous (cas notés plafond) de la plaque ou encore que l'écoulement soit vertical. Il est possible de trouver une loi empirique qui donne la réduction du coefficient intégral de frottement en fonction du coefficient de débit d'air et Merkle (1989) propose même une loi donnant la réduction du frottement en fonction des débits. Cependant cette loi n'est pas universelle puisque la Figure 9b montre qu'avec un corps axisymétrique et une surface d'injection 10 fois moindre, Deutsch observe une moindre réduction du frottement et l'existence d'un débit optimal.



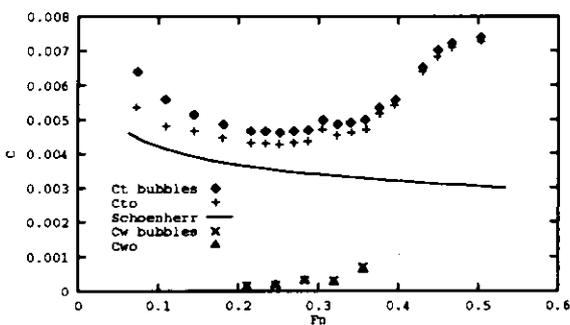
(a) Madavan (1984)



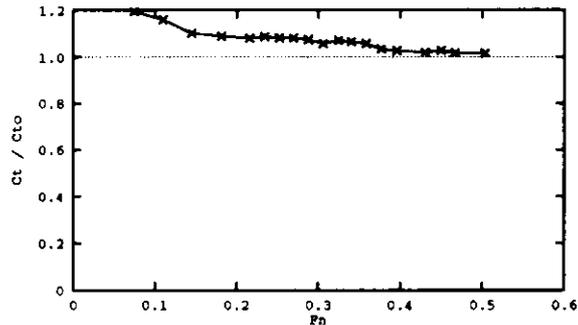
(b) Madavan et Deutsch

Figure 9 : Comparaison des résultats Madavan et Deutsch.

Les travaux de Doi (1991) sont intéressants car ils concernent l'injection de bulles d'air sur une carène de Wigley. La plaque poreuse est située en arrière de l'étrave et les bulles ne sont pas canalisées. La Figure 10a montre que la résistance totale augmente alors que la résistance de vagues ne varie pas, contrairement à ce qu'observe Edstrand avec une barge. L'augmentation de la traînée atteint 20% aux faibles nombres de Froude pour décroître ensuite par paliers.



(a)



(b)

Figure 10 : Résistance totale et résistance de vague pour une carène de Wigley (Doi, 1991).

Doi explique l'augmentation de la résistance par une forte augmentation du frottement au niveau de la plaque poreuse. La Figure 10b montre que, comme pour le porte-conteneurs,

l'augmentation de résistance est maximale à faible vitesse et diminue ensuite pour tendre vers zéro.

Discussion

L'idée initiale est d'injecter de l'air dans la couche limite dont l'épaisseur est fonction de la vitesse, de la viscosité et de la coordonnée longitudinale x . Définissons la couche limite turbulente (CLT) par : $\delta = \frac{0,37x}{Re_x^{1/5}}$ et la sous-couche visqueuse (SCV) par : $y^+ = \frac{yu_\tau}{\nu} \leq 10$, où $Re_x = \frac{Ux}{\nu}$ est le nombre de Reynolds local et $u_\tau = U\sqrt{0,5C_f}$ la vitesse de frottement, Cebeci-Smith (1974). On peut alors calculer le rayon maximum des bulles injectées dans la couche limite turbulente et la sous-couche visqueuse à la verticale de la plaque poreuse située en $x/L = 0,2$ pour la barge et $x/L = 0,4$ pour le porte-containeurs. La dernière colonne de la Table 2 résume les résultats expérimentaux. Dans tous les cas les bulles observées sont trop grosses pour être dans la sous-couche visqueuse mais suffisamment petites pour être dans la couche limite turbulente.

Les résultats en présence de poche sont comparables à ceux de Courouble (1971) et d'Edstrand (1949) en profondeur infinie. Les réductions ou augmentations de traînée obtenues avec des bulles dont le diamètre est inférieur à l'épaisseur de la couche limite (Table 2) ne correspondent pas aux résultats de Kato (1995) et Merkle (1989). Ils observent des diminutions du frottement pariétal avec des bulles situées dans la couche limite mais les vitesses d'écoulement sont nettement supérieures à celles utilisées ici. Dans le cas de la barge et à plus grande vitesse, nos résultats sont en accord avec ceux de Bogdevich (1977) et Marié (1996) qui observent une augmentation du frottement quand le diamètre des bulles est supérieur à 3 mm. A basse vitesse il n'est pas possible de répondre du fait de la présence d'une poche. Pour le porte-containeur nos résultats diffèrent également mais nous sommes en présence de trains de bulles et non de bulles bien différenciées. Il convient de noter qu'aucun des auteurs cités ne donnent d'information sur la traînée totale ni sur les évolutions du champ de pression en présence de bulles.

Table 2 : Résultats expérimentaux et rayons maximum théoriques des bulles.

Carène	Re	R (mm) CLT	R (mm) SCV	Expériences
Barge	$1,61 \times 10^6$	8,8	0,30	bulles à $R \geq 3$ mm ou poche trains à $R \geq 1$ mm ou poche trains de bulles à $R \geq 1$ mm
	$3,22 \times 10^6$	7,6	0,17	
	$4,83 \times 10^6$	7,1	0,12	
P.C.	$5,74 \times 10^6$	27,7	0,25	bulles à $R \geq 10$ mm trains de bulles à $R \geq 2,5$ mm trains de bulles à $R \geq 2,5$ mm
	$11,5 \times 10^6$	24,0	0,14	
	$17,2 \times 10^6$	22,2	0,10	

Marié (1987a) explique que les deux effets les plus probables des bulles sont une réduction de densité et une augmentation de la viscosité dynamique là où les bulles sont concentrées. Par leur énergie cinétique les bulles modifient les structures turbulentes et il est probable que l'échelle intégrale de la turbulence soit plus petite que celle du fluide monophasique (Marié (1987b)). Ces résultats sont corroborés par ceux de Gore (1989) qui, en se basant sur une étude bibliographique dans les cas d'écoulements en conduite ou en jet, a montré que l'intensité de la turbulence décroît quand le ratio $2R/l_e$ du diamètre de la particule sur l'échelle intégrale de la turbulence est inférieur à 0,1. Si nous supposons que la résistance va décroître avec l'intensité de la turbulence, alors ce ratio peut être un paramètre important. Nous n'avons pas trouvé de résultats concernant ni les plaques planes ni les écoulements autour de navires. Le champ des vitesses dans la couche limite n'a pas été mesuré lors des essais au SRI, aussi n'a-t-il pas été possible de vérifier cette donnée.

Un autre paramètre a retenu notre attention, c'est le ratio de la surface couverte par l'air

sur la surface mouillée totale. Les poches affectent toute la surface des plaques planes et tout le fond plat de la barge (soit 45% de la surface mouillée si on ne tient pas compte des quilles et 34% si on en tient compte) et une réduction de la traînée a été observée. Pour le porte-containers ce ratio n'a pas été mesuré mais la Figure 11 montre qu'il est, en première approximation, inférieur à 20% et on a vu que la résistance augmentait.

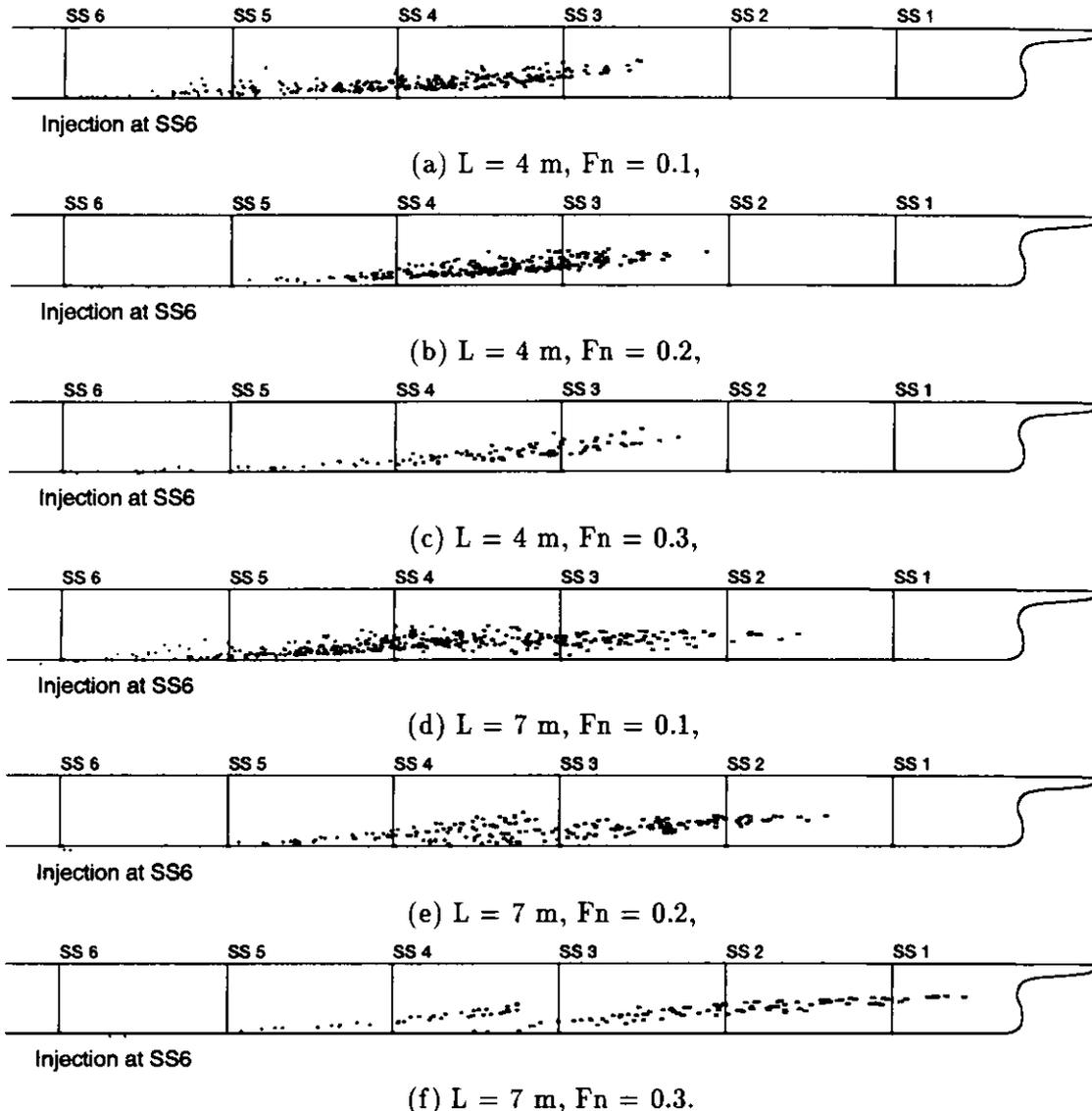


Figure 11 : Trajectoire expérimentale des bulles sous le porte-containers.

Doi attribue l'augmentation de traînée à de forts frottements au niveau de la plaque poreuse et indique que sans cela la résistance diminuerait. On peut mesurer sur la Figure 12 que le ratio de la surface couverte par l'air sur la surface mouillée totale est supérieur à 25%. Du fait du peu de données disponibles, il est difficile de conclure sur l'influence de ce paramètre mais il paraît logique que plus que le volume d'air dans la couche limite, c'est le volume d'air en contact de la paroi qui doit être pris en compte. En effet Bogdevich (1977), Madavan (1984), Marié (1996) montrent qu'une injection par plaque poreuse induit un taux de vide à la paroi très faible et Guin (1996) montre que la réduction du frottement dépend du taux de vide à la paroi.

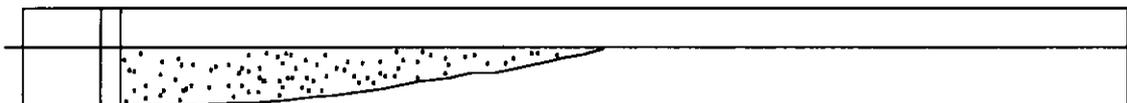


Figure 12 : Trajectoire des bulles pour une carène de Wigley (Doi, 1991).

Ces trajectoires répondent à une autre question qui est celle de l'interaction avec l'hélice d'un navire dont le fond n'est pas plat. Les Figures 11 et 12 montrent nettement que les bulles suivent la forme de la coque et ne viennent pas dans le plan de l'hélice. On a par ailleurs vérifié numériquement, Larrarte-Kodama (1996), que ceci est également vrai pour le navire à l'échelle un. Par contre, pour ce qui est des navires à fond plat, les interactions sont probables et c'est pour cela que Edstrand a pris en compte une barge destinée à être remorquée.

Un autre point que nous allons aborder est l'aspect énergétique. En effet le gain énergétique sera négatif si la réduction de la traînée visqueuse est inférieure à l'énergie nécessaire à l'injection d'air. Merkle (1989) a proposé une loi donnant le gain énergétique net. Kodama (1995) a montré que le gain ne peut être obtenu que dans certaines configurations et notamment à grande vitesse. L'application de la loi proposée par Merkle (1989) montre qu'un gain net peut être obtenu pour un nombre de Froude de 0,5 et avec des débits d'air inférieurs à 0,07 pour la maquette de la barge (Figure 13a) et inférieurs à 0,04 pour une barge de 60 m (Figure 13b). Pour le porte-conteneurs, un gain net peut être obtenu à grande vitesse quelque soit le débit (Figure 14).

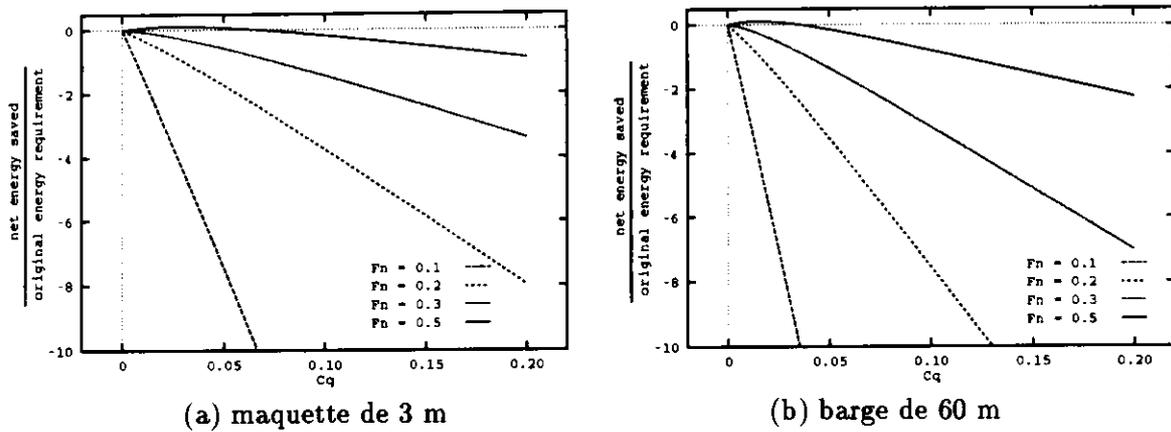


Figure 13 : Aspect énergétique pour la barge

L'autre solution pronée par Kodama (1995) est une diminution du volume d'air injecté. ceci nécessite d'utiliser de manière optimale l'air disponible en l'injectant non plus dans la couche limite mais tangentiellement à la paroi au moyen d'une fente orientée ou d'un dispositif similaire.

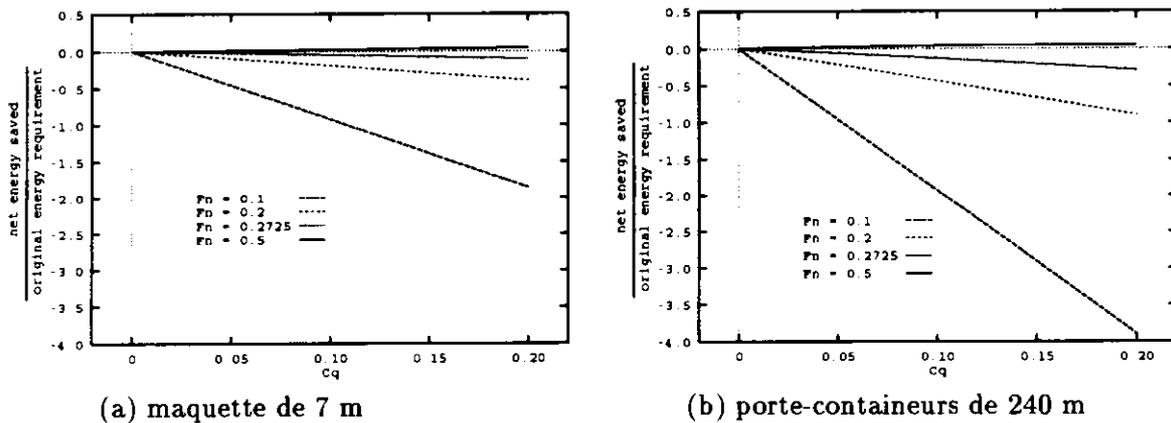


Figure 14 : Aspect énergétique pour le porte-conteneurs

Le dernier point qui doit être souligné concerne l'état de la mer. Tous les essais ont été effectués en eau calme mais il est bien évident qu'un état de mer réel viendra interférer tant avec les poches ou bulles qu'avec l'écoulement autour du navire. Il serait intéressant de mener une étude systématique sur cette question.

Conclusions

Une diminution de traînée a été observée pour la barge à faible nombre de Froude. Lorsque la vitesse augmente l'air forme des trains de bulles et la résistance varie peu. Ces résultats sont similaires à ceux de l'étude bibliographique où il a été montré que la création d'une poche d'air sous le fond plat d'une barge ou d'un tanker permet de réduire la traînée. Pour le porte-conteneur, des bulles et une augmentation de la résistance ont été observées.

Quelque soit la carène, les bulles restent bien dans la couche limite turbulente. Ce résultat est similaire à ceux de Bogdevich (1977), Kato (1995), Madavan (1984), Merkle (1989) qui eux observent une diminution du frottement pariétal. Il semble, qu'en fonction de la vitesse de l'écoulement, un débit optimal d'air existe en deça duquel le frottement diminue et au delà duquel il augmente.

Par ailleurs, bien qu'elles soient en nombre limité, les données disponibles montrent que d'autres paramètres sont en prendre en compte comme la ratio de la surface couverte par les bulles sur la surface mouillée. Il serait intéressant de mener une étude systématique sur ce problème et son corollaire qui est le taux de vide à la paroi.

L'étude énergétique confirme ces assertions car nous avons vu qu'une injection dans la couche limite ne permet que difficilement un gain énergétique net alors qu'une meilleure utilisation de cet air dans la zone pariétale permettrait d'obtenir un gain.

Cette étude se poursuit et les premiers résultats obtenus avec le nouveau tunnel à circulation d'eau du SRI montrent une diminution du frottement pariétal. Une recherche systématique va être menée sur les paramètres régissant la taille des bulles, leur influence sur le frottement ainsi que sur l'évolution vers l'aval de ces paramètres. L'influence de l'injection (normalement ou tangiellement à l'écoulement) devrait également être étudiée. Les aspects physico-chimiques devraient également être pris en compte au moyen d'essais en eau de mer. Ensuite des essais devraient être menés avec un plaque plane sur le bassin de 400 m afin d'étudier les effets d'échelles et de comparer ces résultats à ceux déjà disponibles. Enfin de nouveaux essais en bassin avec des carènes devraient être effectués.

Remerciements

Les travaux présentés ici ont été effectués pendant le séjour de recherche du premier auteur comme boursière de la Science and Technology Agency. Elle tient à remercier le Dr. Kodama qui l'a accueillie dans son équipe ainsi que le personnel du SRI et en particulier les Drs. M. Yamaguchi, T. Fuwa, M. Hinatsu.

... / ...

Nomenclature

C_f	Coefficient de résistance de frottement
$C_q = Q_a/US_i$	Coefficient d'injection d'air
C_t	Coefficient de résistance totale.
C_w	Coefficient de résistance de vague
$Fn = U/\sqrt{gL}$	Nombre de Froude de la carène.
g	Accélération de la pesanteur
l_e	échelle intégrale de la turbulence
L	Longueur entre perpendiculaires
Q_a	Débit d'injection d'air
R	Rayon de la bulle
$Re = U.L/\nu$	Nombre de Reynolds
$Re_x = U.x_r/\nu$	Nombre de Reynolds local.
S_i	Surface de la plaque poreuse
U	Vitesse de la maquette ou de l'écoulement.
$u_\tau = U\sqrt{0.5C_f}$	Vitesse de frottement.
x, y, z	Coordonnées cartésiennes
$x_r = x + 0.5L$	Coordonnée relative.
ν	Viscosité cinématique de l'eau
δ	Epaisseur de couche limite turbulente.
o (en suffixe)	Indique qu'il s'agit des résultats en l'absence d'injection d'air

Références

- P.R. Bandyopadhyay - 1986, " Mean flow in turbulent boundary layers disturbed to alter skin friction.", JFE, Vol. 108.
- V.G. Bogdevich, A.R. Evseev, A.G. Malyuga, G.S. Mirigenko - 1977, "Gas saturation effect on Near Wall Turbulence Characteristics." 2nd Int. Conf. on Drag Reduction.
- T. Cebeci, A.M.O. Smith - 1974, " Analysis of turbulent boundary layers." Academic Press.
- M. Courouble - 1971, " Recherches sur une technique de réduction de la résistance à la marche des navires lents par lames d'air.", Association Technique Maritime et Aéronautique.
- S. Deutsch, J. Castano - 1986, " Microbubble skin friction reduction on an axisymmetric body.", Physics of Fluids No. 29.
- Y. Doi, K-H. Mori, T. Hotta - 1991, " Frictional drag reduction by microbubbles.", SNAJ Meeting (en Japonais).
- H. Edstrand, R. Rodstrom - 1949, " The resistance of a barge with bottom air lubricated.", Meddelande fran SSPA, No 12.
- R.A. Gore, C.T. Crowe - 1989, " Effect of particle size on modulating turbulent intensity.", Int. Journal of Multiphase Flow, Vol. 15, No 2, pp.279 - 285.
- M.M. Guin, H. Kato, H. Yamaguchi, M. Miyanaga, M. Maeda - 1996, " Direct skin friction measurements and observation of drag reduction in a two- phase air-water channel.", ASME Symposium, San Diego
- H. Kato, M. Miyanaga, Y. Haramoto, M.M. Guin - 1995, " Frictional drag reduction by injecting bubbly water into turbulent boundary layer and the effect of plate orientation.", Advances in Multiphase Flow
- Y. Kodama - 1995, " Research on the reduction in ship resistance by means of CFD at next generation.", 66th General Meeting of Ship Research Institute (en Japonais).
- V. Kostilainen - 1968, " Two-phase air-water propulsion system based on the gravity effects.", International Shipbuilding Progress, Vol. 15, No 169.
- V. Kostilainen, P. Salmi - 1972, " Experiments on the combined use of two-phase propulsion and ventilated bottom.", International Shipbuilding Progress, Vol. 19, No 216
- F. Larrarte, Y. Kodama - 1996, "Trajectory of bubbles under a ship hull and scale effects.",

- Joint Meeting of the Three Societies of Naval Architects of Japan, Hiroshima, November.
- N.K. Madavan, S. Deutsch, C.L. Merkle - 1984a, "Reduction of turbulent skin friction by microbubbles.", *Phys. of Fluids* No. 27.
- N.K. Madavan, S. Deutsch, C.L. Merkle - 1984b, , "The effects of porous material on microbubble skin friction reduction.", AIAA-84-0348, AIAA 22nd Aerospace Sciences Meeting, Reno.
- J.L. Marié - 1987a, "A simple analytical formulation for microbubble drag reduction.", *J. of Physico-Chemical Hydrodynamic*, Vol. 13.
- J.L. Marié - 1987b, "Modelling of the skin friction and heat transfer in turbulent two-component bubbly flows in pipes.", *Int. Journal of Multiphase Flow*, Vol. 13, No.3, pp. 309-325
- J.L. Marié - 1996, Communication personnelle.
- C.L. Merkle, S. Deutsch - 1989, "Drag reduction in liquid boundary layers by gas injection.", *Progress in Astronautics and Aeronautics*.