



**ETUDE EXPERIMENTALE DU PHENOMENE  
D'ENTRAINEMENT DE BULLES A L'ETRAVE DES  
NAVIRES SCIENTIFIQUES**

***EXPERIMENTAL STUDY OF BUBBLE SWEEP-DOWN AT  
THE BOW OF SCIENTIFIC VESSELS***

**S. DELACROIX\*, G. GERMAIN\*, J.Y. BILLARD†  
B. GAURIER\*, J.V. FACQ\*, T. BACCHETTI\***

\* IFREMER, Laboratoire Comportement des Structures en Mer

150 Quai Gambetta, 62200 Boulogne sur mer

† IRENAV, Ecole Navale

CC 600 - Lanveoc F-29240 BREST Cedex 9

*gregory.germain@ifremer.fr*

**Résumé**

Le passage de bulles sous la coque des navires scientifiques peut provoquer une perturbation des ondes acoustiques émises par les sonars, et une perte de productivité lors des campagnes de mesure. Les outils numériques ou expérimentaux permettant d'étudier ce phénomène lors de la conception des navires montrent toujours des limites, notamment à cause des effets d'échelle agissant sur la génération et la dynamique des nuages de bulles. Une méthode d'essai innovante en bassin de circulation, couplant des calculs numériques et l'utilisation d'un générateur de mouvements, a été développée pour étudier ce phénomène. Deux mécanismes d'entraînement d'air ont ainsi pu être identifiés. Les effets de la houle et de la turbulence sur la génération des bulles ont également été étudiés.

**Summary**

The bubble sweep-down phenomenon around the hull of scientific vessels leads to a disruption of the acoustic waves emitted by the sonars, and a loss of productivity during the acoustic surveys. Numerical or experimental tools used to study this phenomenon still have limitations, mainly due to scale effects on bubbles generation. An innovative method in a circulating tank, using numerical simulations and a motions generator, has been developed. Two mechanisms of air entrainment have been described, as well as the influence of waves characteristics and turbulence on bubbles generation.

## I – Introduction

L’acoustique sous-marine est un outil extrêmement important de la flotte océanographique. Les différents types de sonars dont sont équipés les navires permettent d’étudier toute la colonne d’eau et de réaliser diverses études : topographie sous-marine, caractérisation des fonds marins, détection de gisement de gaz, évaluation de la biomasse, etc. Cependant les ondes émises par ce type d’équipement sont susceptibles d’être perturbées (réflexion et/ou absorption) par le passage de bulles sous la coque du navire, appelé également phénomène de "bubble sweep-down". Ce phénomène, apparaissant lorsque les conditions de navigation se dégradent, affecte les campagnes acoustiques depuis de nombreuses années [2, 9] et reste une contrainte très importante actuellement [11].

Rolland et Clark [10] ont comparé les solutions actuelles permettant de limiter le phénomène de bubble sweep-down. L’usage de gondole ou d’appendice de type déflecteur permet de réduire en général significativement le passage de bulles sous les transducteurs, malgré une augmentation de la résistance à l’avancement. Durant la conception des navires de recherches *Discovery* et *Sonne*, une attention particulière a été portée à ce phénomène [1],[13]. À partir de diverses expériences, des orientations générales ont été avancées comme l’intérêt d’un tirant d’eau important, ou le fait d’éviter les bulbes d’étrave. Cependant le fait de respecter tous ces éléments ne garantit pas une réduction du passage de bulles sous la coque.

Les outils permettant l’étude de ce phénomène sont limités. Les simulations numériques de ce type d’écoulement diphasique sont toujours en développement. Les principales difficultés venant des différences d’échelles entre la génération de bulles, gouvernée par les tensions de surface, et l’écoulement global autour du navire. Moraga et al. [8] ont développé un modèle permettant de localiser les régions de fort taux de vide, utilisant les distributions de bulles observées lors de déferlements de vague par Deane et Stokes [4]. Ma et al. [7] décrivent un modèle de sous-maillage couplé avec un modèle RANS (Reynolds Average Navier Stokes) diphasique permettant d’obtenir une prédiction numérique quantitative de la distribution du taux de vide autour de la carène d’un navire. Toutes ces recherches ont été réalisées par mer calme, sans houle ni mouvements du navire. De même, les études expérimentales réalisées par Waniewski [14, 15] ou Tavakolinejad [12] afin d’étudier l’entraînement d’air par les vagues d’étrave ne prennent pas en compte l’état de mer, pourtant significatif pour le phénomène de bubble sweep-down. Par conséquent le positionnement des sonars est actuellement réalisé principalement à partir de l’étude des lignes de courant. Les effets d’échelle étant très importants, la génération de bulles est très faible, voire inexistante lors des essais en bassin de traction, même en présence de houle. La dynamique des bulles est souvent simulée par injection de colorant au niveau de l’étrave. Les résultats de ce type d’essai ne sont pas toujours vérifiés au réel comme a pu le montrer l’expérience du *Pourquoi pas ?*. Malgré la validation des essais et l’emplacement des bases acoustiques sur une gondole, ce navire est sensiblement impacté par le passage de bulles sous la coque. L’identification du phénomène a été effectuée lors d’une campagne spécifique mise en place peu après les premières sorties en mer, durant laquelle le passage des bulles sous la gondole a été filmé grâce à des caméras sous-marines.

Nous présentons dans ce papier une méthodologie d’essai originale permettant la visualisation du phénomène et la caractérisation de l’entraînement d’air. La reproduction en bassin de circulation des conditions de navigation rencontrées lors de cette campagne en mer du *Pourquoi pas ?* permettra d’analyser la génération des nuages de bulles.

## II – Méthodologie d’essai

### II – 1 Moyens d’essais

Cette technique expérimentale a été développée au bassin de circulation d’Ifremer de Boulogne-sur-mer (figure 1). La zone de travail (partie supérieure du bassin) mesure 18 m de long, 4 m de large et 2 m de profondeur. Les pompes installées dans la partie inférieure permettent de générer une vitesse de courant dans la veine entre 0,2 et 2 m/s. Le bassin possède également une fenêtre d’observation de 8 m × 2 m facilitant la visualisation et l’acquisition de phénomènes sous-marins. Cette installation est équipée d’un générateur de houle, pouvant être placé en amont ou en aval de la zone de travail afin de générer la houle dans le sens du courant ou contre le courant. Une houle régulière ou irrégulière peut être générée, pour des fréquences comprises entre 0,5 et 2 Hz et une amplitude maximale  $A = 280$  mm.

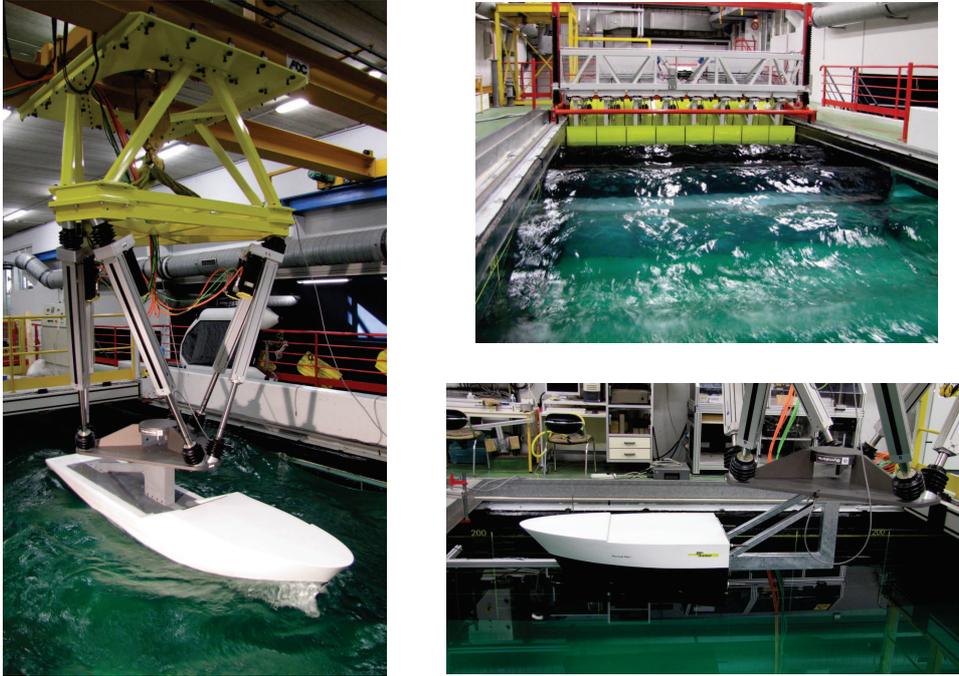


Figure 1 – Visualisation du montage expérimentale

Lorsque le batteur est situé en amont, l’interaction avec le courant génère une forte Intensité Turbulente dans l’écoulement (IT), définie par :

$$IT = \sqrt{\frac{1}{3} \frac{\overline{u'^2} + \overline{v'^2} + \overline{w'^2}}{\overline{u^2} + \overline{v^2} + \overline{w^2}}} \quad (1)$$

avec selon la décomposition de Reynolds,  $u = \bar{u} + u'$  où  $\bar{u}$  est la valeur moyenne et  $u'$  la partie fluctuante de la vitesse du courant  $u$ .

Lorsque le batteur est enlevé l’intensité turbulente est faible, proche de 3 %. Une fois le batteur positionné en amont cette intensité turbulente atteint 15 %, proche des intensités turbulentes observables en mer.

Contrairement aux essais (dit "classique") en bassin de traction où la maquette est mise en mouvement sur une longueur importante, la vitesse d’avance est ici simulée par le courant. Le taux important de turbulence dans l’écoulement est également une différence entre ces essais et les essais classiques. De plus, cette nouvelle méthode consiste à imposer

les mouvements à la maquette par un générateur de mouvements (hexapode). Avec cette technique, les mouvements sont calculés par simulation numérique au préalable, et générés par l'hexapode, tandis que lors des essais classiques le modèle est libre en tangage et en pilonnement et répond dynamiquement aux sollicitations de la houle.

Il n'est donc pas nécessaire d'équilibrer la maquette en terme de déplacement, d'inertie, ni de centre de gravité, ce qui facilite sa conception. L'utilisation de l'hexapode permet également d'étudier indépendamment les effets de la houle et des mouvements sur la génération de bulles. Enfin, il est possible de travailler sur la partie avant de la maquette seulement (figure 1 en bas à droite). Cette configuration est très avantageuse dans le bassin de circulation où l'espace est relativement limité, et permet surtout de supprimer les houles parasites générées par les mouvements du tableau arrière de la maquette.

## II – 2 Lois de Similitude et effets d'échelle

L'objectif de ces travaux étant de mieux comprendre la génération et la propagation de bulles au niveau de l'étrave des navires, la prise en compte de la houle, des mouvements du navire et de l'interaction de l'étrave avec la surface libre est primordiale. Pour étudier ces phénomènes en bassin, la similitude de Froude s'impose, et permet de conserver le rapport entre les forces d'inertie et les forces gravitationnelles liées à la houle et aux déformations de la surface libre.

Cependant, il est impossible de respecter à la fois la similitude de Froude et la similitude de Reynolds en conservant les caractéristiques physiques du fluide. Le nombre de Reynolds est donc largement plus faible lors des essais en bassin que pour l'écoulement autour du navire à échelle réelle (d'un facteur 100). Les effets de la viscosité affectent principalement la couche limite, très proche de la coque et sont souvent négligeables dans le reste du volume. La propagation des bulles le long de la carène peut donc être affectée. Le régime turbulent de l'écoulement est également retardé. Ce dernier point est compensé dans cette configuration en bassin de circulation par une forte intensité turbulente, comme cela a été décrit dans le paragraphe précédent.

La problématique de similitude est également prépondérante pour la génération et le comportement des bulles dans l'écoulement. La dynamique des bulles est liée aux forces d'inertie mais également à la tension superficielle (et donc au nombre de Weber) assurant la stabilité de celles-ci. Le diamètre d'une bulle résulte du rapport entre les forces de cisaillement présentes dans l'écoulement et ces forces de tension superficielle, inversement proportionnelle au rayon de la bulle. De la même manière que pour le nombre de Reynolds, le nombre de Weber ne peut être conservé. La similitude de Froude impose en bassin une amplitude de houle et une vitesse de l'écoulement plus faible qu'au réel. Par conséquent les forces de cisaillement dans l'écoulement proche de la maquette seront fortement réduites. La quantité d'air entraîné sous la surface sera également diminuée. Les forces de cisaillement sont alors insuffisantes pour casser les cavités d'air en bulles microscopiques comme cela peut être observé en mer. La taille des bulles observées en bassin est de l'ordre du millimètre, ce qui entraîne une vitesse ascensionnelle beaucoup plus élevée et diminue fortement le phénomène d'entraînement d'air sous la carène.

Ces effets d'échelle contrarient l'observation du phénomène de bubble sweep-down en bassin d'essai, ainsi que l'extrapolation des résultats au réel. Afin de limiter un maximum les effets d'échelle, le modèle a été choisi le plus grand possible en fonction des caractéristiques du bassin (espace, génération de houle et de courant). Une maquette au 1/30 du *Pourquoi pas ?* a donc été conçue, pour laquelle les conditions d'essais générées n'entraînent pas d'effets de blocage dans le bassin. À cette échelle, la maquette possède une

longueur entre perpendiculaire  $L_{pp} = 3,13 \text{ m}$ , une largeur  $B = 0,67 \text{ m}$  et un tirant d'eau  $T = 0,18 \text{ m}$ . La valeur des caractéristiques principales des essais, dont les trois nombres adimensionnels principaux, sont détaillées dans le tableau 1.

	$L_{pp} \text{ (m)}$	$V \text{ (m/s)}$	$Fr$	$Re$	$We$
Réel	94	4,12	0,203	$3,4 \cdot 10^8$	$2,4 \cdot 10^4$
Modèle (1 :30)	3,13	0,75	0,203	$2,1 \cdot 10^6$	$2,2 \cdot 10^7$

TABLE 1 – Résumé des caractéristiques de l'écoulement au réel et pour les essais en bassin

## II – 3 Paramètres d'essais et Instrumentation

La première étape de l'étude expérimentale consiste à reproduire les conditions de navigation rencontrées par le *Pourquoi pas ?* lors de l'observation de passage de bulles sous la coque. Dans cette configuration, les mouvements sont imposés par un hexapode et synchronisés avec la houle incidente. Pour cela, il est nécessaire de travailler avec une houle régulière. Les caractéristiques de cette houle régulière sont calculées afin de conserver la densité d'énergie de la houle irrégulière rencontrée en mer. Ces calculs sont détaillés dans [5]. Les conditions finales d'essai sont les suivantes : une vitesse de courant  $U$  de  $0,75 \text{ m/s}$ , une amplitude de houle  $A$  de  $33 \text{ mm}$  et une fréquence de rencontre  $f_e$  de  $0,85 \text{ Hz}$ .

Les mouvements à imposer à la maquette doivent ensuite être calculés pour ces conditions d'essais. Des simulations numériques ont été effectuées grâce au logiciel FREDYN [3], développé au Maritime Research Institute Netherland (MARIN). De même que pour les calculs des paramètres de conditions de mer, le détail du modèle numérique et des calculs réalisés sont présentés dans [5]. Dans cette configuration par mer de face, seuls les mouvements de tangage et de pilonnement sont significatifs. On obtient finalement une amplitude de tangage de  $2^\circ$  et de pilonnement de  $20 \text{ mm}$  pour la maquette.

Avec ces paramètres d'essais, quatre configurations de base ont été étudiés :

1. avec courant uniquement
2. avec courant et houle
3. avec courant et mouvements
4. avec courant, houle et mouvement synchronisés

La génération de bulles dans le bassin sera conditionnée par les caractéristiques de l'écoulement incident, de la houle et des mouvements. Les mouvements de la maquette sont enregistrés en temps réel, à une fréquence de  $100 \text{ Hz}$ . La précision de ces mesures est supérieure à  $0,1 \text{ mm}$  en translation et  $0,01^\circ$  en rotation. À cause de l'interaction entre le courant dans la veine et le générateur de houle, l'amplitude de la houle générée subit des fluctuations importantes. Des essais spécifiques ont été réalisés afin de caractériser la houle (amplitude et longueur d'onde) dans les conditions de courant souhaitées. Malgré cela, il est nécessaire de connaître l'évolution de la surface libre au cours du temps durant tous les essais réalisés. Des sondes à houle de type résistives ont donc été utilisées, permettant d'obtenir directement l'élévation de la surface libre. Suivant les essais, une à deux sondes ont été placées entre  $1$  et  $2 \text{ m}$  en amont de l'étrave de la maquette.

Enfin, dans l'optique d'étudier la génération et la propagation des bulles, deux systèmes vidéos synchronisés ont été utilisés. Des caméras digitales CMOS pour la visualisation de la surface libre à proximité de l'étrave. Un système couplant caméra et laser (système PIV) a été utilisé afin d'acquérir des images sous-marines de très bonnes qualités. Ces

deux types d'acquisition ont été réalisés à une fréquence de 15  $Hz$ , sur des séquences de 5 minutes (4500 images).

### III – Analyse de la génération des bulles en bassin de circulation

#### III – 1 Phénomènes observés

Grâce aux quatre configurations d'essai de base, les phénomènes d'entraînement d'air et de génération de bulles ont pu être observés. Deux mécanismes distincts, présentés sur la figure 2 ont été détectés : le premier par entraînement tourbillonnaire, et le second par déferlement de la vague d'étrave.

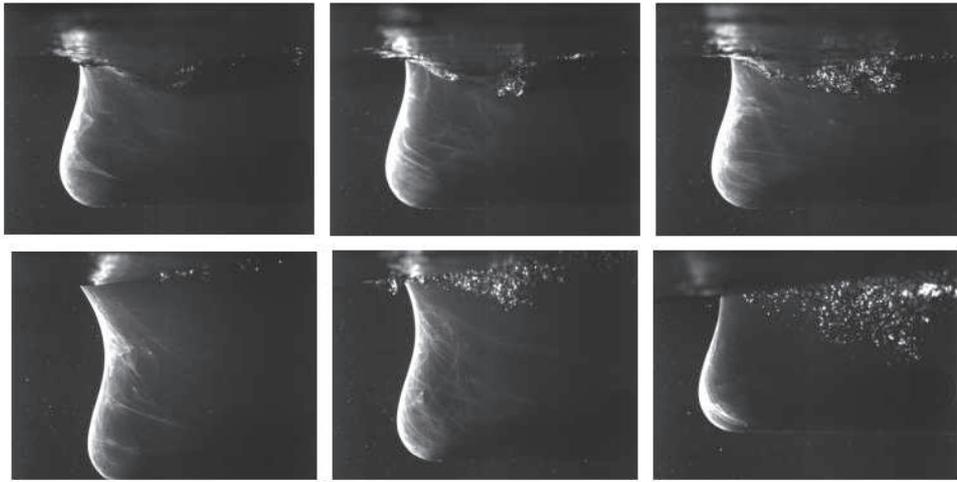


Figure 2 – Visualisation des mécanismes d'entraînement d'air observés : entraînement tourbillonnaire [haut] ou par déferlement de la vague d'étrave [bas]

Le premier type d'entraînement d'air est rencontré dans chaque configuration, même pour le cas sans houle ni mouvement. Dans ce cas l'interaction de l'écoulement turbulent incident avec l'étrave génère une déformation de la surface, créant une petite cavité d'air au contact de la maquette. Lorsque cette cavité devient instable, l'air est entraîné par un phénomène tourbillonnaire, provoquant la génération d'un nuage de bulles. L'initiation de ce mécanisme d'entraînement d'air peut durer plusieurs dixièmes de secondes. Ce phénomène apparaît aléatoirement tout au long des séquences d'essais.

Le second type d'entraînement d'air apparaît en présence de mouvements de la maquette, ou plus significativement en présence de houle. L'impact entre l'étrave et la surface libre provoque le déferlement de la vague d'étrave. L'entraînement d'air est dans ce cas plus énergétique et presque instantané.

Afin de déterminer les conditions d'apparition de ces deux mécanismes, leur fréquence d'occurrence est déterminée pour chaque configuration à partir de l'analyse des vidéos sous-marines. Les résultats obtenus pour les quatre cas sont présentés sur la figure 3.

Pour la première configuration, avec courant uniquement, la fréquence d'apparition des nuages de bulles est faible ( $< 0,2 Hz$ ), et uniquement due au phénomène d'entraînement tourbillonnaire. Pour la seconde configuration avec houle et courant, le phénomène de déferlement apparaît. La fréquence des nuages de bulles augmente jusqu'à atteindre une génération de bulles pour environ sept vagues sur dix : une fréquence de  $0,59 Hz$  pour une fréquence de houle de  $0,85 Hz$ . Le phénomène de déferlement est deux fois plus fréquent que l'entraînement tourbillonnaire. Pour le troisième cas avec mouvements

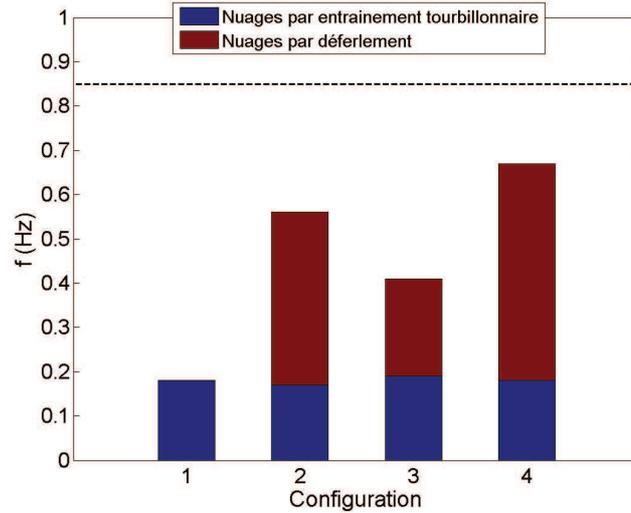


Figure 3 – Fréquences d’apparition des nuages de bulles, générés par entrainement tourbillonnaire ou par déferlement, pour les quatre configurations de base

et courant, la fréquence des nuages de bulles est environ deux fois plus élevé que pour le premier cas ( $0,40\text{ Hz}$ ). Les deux mécanismes d’entrainement d’air apparaissent ici à des fréquences similaires. Les mouvements de la maquette provoquent moins de déferlement que la présence de houle. Pour la dernière configuration avec courant, houle et mouvements, la combinaison des sollicitations provoque un entrainement d’air pour huit vagues sur dix ( $0,66\text{ Hz}$ ).

On peut remarquer ici que la fréquence de l’entrainement tourbillonnaire varie très peu selon les cas. Ce phénomène est uniquement lié à l’interaction entre l’écoulement turbulent incident et la forme de l’étrave. Au contraire, la fréquence de déferlement varie fortement en fonction des configurations. Les effets de la houle et des mouvements se superposent pour obtenir la fréquence de nuages de bulles la plus importante.

### **III – 2 Caractérisation des mécanismes d’entrainement d’air**

Une méthode de traitement d’image a été élaborée de façon à détecter les bulles sur chaque image, et de suivre l’évolution des nuages de bulles. Cette analyse permet donc de mieux caractériser et comprendre les deux mécanismes d’entrainement d’air et de caractériser la dynamique des nuages de bulles.

Chaque image est traitée par une analyse de niveau de gris dans MATLAB. Le détail de la méthode pourra être trouvé dans [6]. L’application de ce traitement d’images pour une séquence de déferlement est présentée sur la figures 4, où sont illustrées les détections de bulles et l’évolution des nuages. Cette analyse permet de calculer de façon automatique la fréquence de génération de bulles, mais également leur taille et leur quantité, l’aire des nuages, la densité (définie comme le rapport entre l’aire des aérations et l’aire du nuage), la profondeur, et l’évolution global du nuage (vitesses verticales et horizontales du centre du nuage).

À cause de la complexité des essais, la luminosité n’est pas parfaite et peut varier en fonction de la houle et des mouvements de la maquette. Cela impose donc de définir certains critères de détection des bulles pour ne pas prendre en compte les réflexions de la forme, de la surfaces libre, ou des particules d’ensemencement PIV présentes dans l’écoulement. La détection automatique est ainsi limitée à des bulles ayant des diamètres

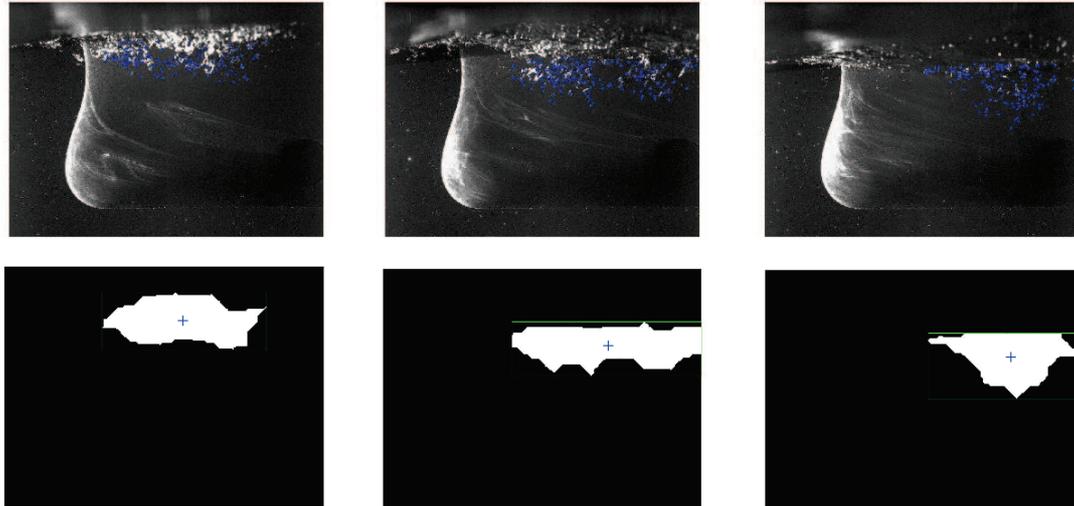


Figure 4 – [Haut] Illustration de la détection des bulles d'un nuage de bulle par déferlement (configuration 2 avec courant et houle). Les aérations détectées sont marquées en bleu. [Bas] Évolution de l'aire du nuage de bulle.

équivalents supérieurs à  $d_{min} = 0,6 \text{ mm}$ . Malgré cela, ce post-traitement procure de nombreuses données très utiles à la caractérisation des phénomènes de génération de bulles.

La figure 5 montre l'évolution des nuages significatifs (définis comme étant observable sur au moins quatre images consécutives) pour les deux premières configurations. Chaque courbe en pointillé correspond à un nuage significatif. Trois propriétés sont présentées : l'aire du nuage, la profondeur maximale et la vitesse verticale des nuages. Les abscisses de chaque figure correspondent au temps adimensionnel  $t/T$  où  $T$  est la période de la houle et des mouvements ( $T = 1/0,85 \approx 1,18 \text{ s}$ ).

Pour la première configuration (graphiques du haut), l'instant  $t = 0$  correspond à la première détection de bulles pour chaque nuage. Dans ce cas, tous les nuages sont dus au phénomène d'entraînement tourbillonnaire. L'aire des nuages est toujours inférieure à  $0,5 \cdot 10^4 \text{ mm}^2$ . La profondeur maximale de pénétration est légèrement supérieure à  $50 \text{ mm}$ . La vitesse verticale des nuages est proche de zéro durant la première moitié de la vie des nuages puis tend vers une valeur positive, les bulles remontant vers la surface.

Dans la seconde configuration (graphiques du bas), l'instant  $t = 0$  correspond au pic de la houle incidente au niveau de l'étrave. Durant cet essai, la grande majorité des nuages de bulles significatifs sont dus au phénomène de déferlement. La détection de l'initiation des nuages de bulles a lieu entre  $0,1$  et  $0,3 T$  après le pic de houle. Les propriétés des nuages de bulles sont très différentes de celles des nuages de bulles par entraînement tourbillonnaire. L'aire des nuages et la profondeur passent par un maximum entre  $0,3$  et  $0,5 T$ . La valeur maximale de l'aire des nuages est pour plusieurs nuages 3 fois supérieure à celle des nuages observés pour la première configuration (jusqu'à  $1,8 \cdot 10^4 \text{ mm}^2$ ). La profondeur maximale de pénétration atteint  $140 \text{ mm}$ . Même si cette valeur est considérablement plus élevée que pour les nuages par entraînement tourbillonnaire, les bulles ne passent jamais sous la coque (la maquette possédant un tirant d'eau de  $182 \text{ mm}$ ). Il doit être rappelé ici que cela est dû aux effets d'échelle et à la taille des bulles générées dans le bassin. Les bulles microscopiques générées en mer seront entraînées plus en profondeur. Enfin, les vitesses verticales sont proches de  $-0,25 \text{ m/s}$  après le déferlement, proche de zéro entre  $0,4$  et  $0,5 T$  et augmentent jusqu'à une vitesse ascensionnelle de  $0,25 \text{ m/s}$  entre  $0,5$  et  $0,7 T$ .

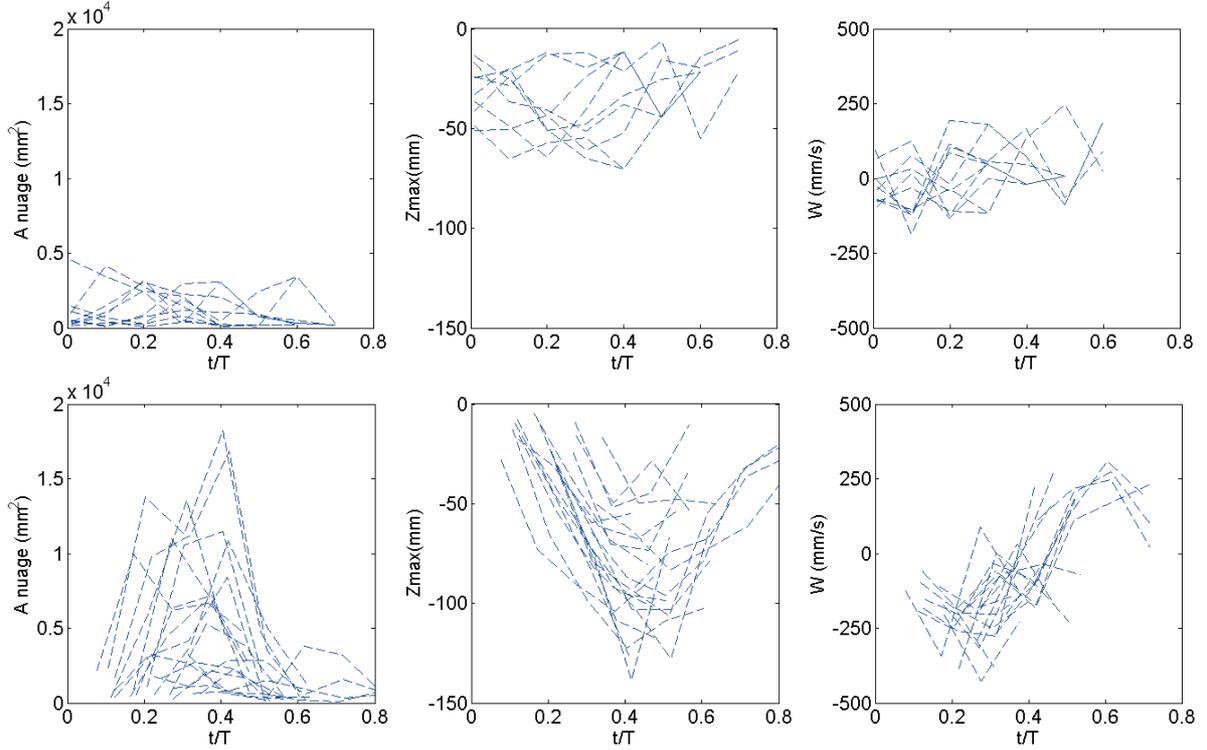


Figure 5 – Évolution des propriétés (aire, profondeur maximale et vitesse verticale) de chaque nuage de bulles significatif dans la première configuration avec courant seulement [haut] et la seconde configuration avec courant et houle [bas].

Ces valeurs peuvent être comparées aux vitesses verticales générées par la houle. D’après la théorie d’Airy, la vitesse orbitale en approximation de profondeur infinie peut être obtenue par :

$$w = A\omega e^{kz} \sin(kx - \omega t) \quad (2)$$

avec  $A$  l’amplitude de la houle,  $\omega$  la pulsation,  $k$  nombre d’onde et  $z$  la profondeur. Par conséquent le maximum de la vitesse orbitale proche de la surface libre sera  $w = A\omega = 0,18 \text{ m/s}$  pour une amplitude de houle de  $33 \text{ mm}$ . Le déferlement provoque donc une sur-vitesse, responsable de l’entraînement d’air en profondeur.

### III – 3 Étude paramétrique de la génération de bulles

La paragraphe précédent a permis de caractériser les deux types de nuages de bulles générés dans un bassin de circulation. Les quatre configurations de base ont permis d’obtenir les effets de l’interaction entre un écoulement incident turbulent et l’étrave du *Pourquoi pas ?*, mais aussi de la houle et des mouvements, sur la génération de nuages de bulles. Les paramètres d’essais ont ici été modifiés afin de mieux comprendre l’influence de chacun de ces paramètres sur les phénomènes d’entraînement d’air.

L’impact de la houle au niveau de l’étrave peut générer un déferlement et un nuage de bulles associé. La houle est par conséquent un des paramètres prépondérants. Cependant il est difficile d’en contrôler parfaitement la génération pour cette configuration dans le bassin, à cause de l’interaction entre le générateur de houle et l’écoulement incident. Les

fluctuations de l'amplitude de la houle pour une consigne donnée sont importantes : pour une amplitude moyenne du signal de  $33\text{ mm}$ , l'écart type est de  $13\text{ mm}$ .

Tous les signaux de houle ont été triés par groupe de hauteur de vague par intervalle de  $10\text{ mm}$ . La fréquence d'apparition des nuages de bulles est calculée pour chaque groupe et présentée sur la figure 6 (graphique de gauche). Ces résultats montrent que la fréquence des nuages de bulles dans la configuration avec houle et courant est directement proportionnelle à la hauteur de vague (avec un coefficient de détermination  $R^2 = 0,91$ ). Par ailleurs on retrouve bien une droite affine, avec une ordonnée à l'origine légèrement inférieure à  $0,2\text{ Hz}$  correspondant à la fréquence du mécanisme d'entraînement tourbillonnaire ayant lieu sans houle. Le graphique de droite de la figure 6 correspond aux analyses des essais pour des fréquences de houle de  $0,85$ ;  $0,65$ ;  $0,75$  et  $1,00\text{ Hz}$ , en conservant uniquement la hauteur de houle de  $66\text{ mm}$  (+ ou -  $5\text{ mm}$ ). La fréquence des nuages de bulles passe par un maximum (proche de  $0,6\text{ Hz}$ ) entre les fréquences de houle de  $0,75$  et  $0,85\text{ Hz}$  et décroît jusqu'à  $0,3\text{ Hz}$  pour une fréquence de houle de  $1,00\text{ Hz}$ . Pour une telle fréquence la longueur d'onde devient trop courte, l'impact de la houle sur la carène est moins important et la quantité de déferlement diminue.

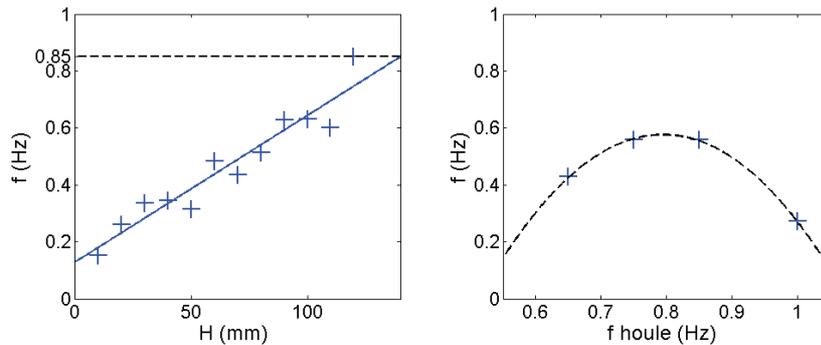


Figure 6 – Influence des paramètres de houle sur la fréquence d'apparition des nuages de bulles. [Gauche] : fréquence des nuages en fonction de la hauteur de vague (régression linéaire :  $R^2 = 0,91$ ). [Droite] : fréquence des nuages en fonction de la fréquence de la houle (régression quadratique :  $R^2 = 0,99$ )

L'influence de la vitesse du courant, des caractéristiques de mouvements (amplitude et fréquence) et du déphasage entre la houle et les mouvements ont également été étudiés à travers divers essais spécifiques. Les résultats de ces essais sont présentés dans [6].

Le dernier paramètre pris en compte est la turbulence. Comme cela a été mentionné dans le paragraphe III – 1, l'interaction entre l'écoulement turbulent incident et la forme de l'étrave de la maquette du *Pourquoi pas ?* crée une perturbation de l'écoulement proche de la surface libre. Une cavité d'air se développe et des bulles peuvent être entraînées pendant le détachement tourbillonnaire. Ce phénomène n'est pas observé lors d'essais classiques en bassin de traction. L'une des différences majeures entre ces deux types d'essai est le fait que le générateur de houle placé en amont de l'écoulement provoque un écoulement fortement turbulent. Pour conserver les mêmes propriétés d'écoulement incident, les quatre configurations de bases ont été réalisées avec le générateur de houle immergé provoquant une intensité turbulente de 15%. Afin d'étudier l'influence de la turbulence, le générateur de houle a été enlevé pour répéter les configuration 1 (avec courant seul) et 3 (avec courant et mouvement), réduisant l'intensité turbulente de l'écoulement à  $IT = 3\%$ .

Dans le cas avec courant seulement et une intensité turbulente de 3%, il n'y a pas de génération de bulles. Le mécanisme de génération de bulles par entraînement tourbillonnaire

naire disparaît, ce qui confirme l'importance de la turbulence sur ce phénomène. Dans le cas avec mouvement, la fréquence des nuages est également très faible ( $f = 0,06 \text{ Hz}$ ). La turbulence favorise donc également la génération de bulles par déferlement.

Le bassin de circulation, permet de générer des conditions plus proche du réel, ce qui rend ce type d'installation mieux adapté à l'étude de l'entraînement d'air et facilite son observation. La similitude de Froude ne permettant pas de conserver le nombre de Reynolds, les forces de frottement du fluide sur la carène en sont affectées. En bassin de traction, cet effet est compensé par l'ajout d'une bande de rugosité à l'étrave afin d'accélérer la transition vers un régime turbulent. La turbulence étant déjà importante en bassin de circulation, il n'est pas nécessaires de recourir à ces bandes de rugosité dans notre configuration.

## IV – Conclusion et perspectives

L'objectif à long terme de ce projet est de développer des outils, destinés aux architectes des navires de recherche, capables de prédire le comportement du navire en terme de génération et de propagation de bulles. Pour cela une méthode spécifique d'essai a été développée, et cet article a permis de démontrer plusieurs points. Le bassin de circulation et de houle est bien adapté pour reproduire les conditions d'apparition en mer du phénomène de bubble sweep-down pour une maquette à l'échelle 1/30 du *Pourquoi pas ?*. L'utilisation de l'hexapode pour imposer les mouvements de la maquette permet de travailler avec la partie avant de la maquette, et facilite l'étude paramétrique des phénomènes. L'acquisition d'images sous-marines de bonne qualité est également facilitée dans cette configuration.

Les résultats obtenus permettent de caractériser les différents mécanismes de génération de bulles. Ils contribuent également à la compréhension et à la maîtrise de ces phénomènes en bassin de circulation. Ces essais ont permis la visualisation et l'analyse de la génération de bulles autour de l'étrave d'une maquette soumise à des conditions proches du réel en prenant en compte la turbulence, la houle et les mouvements.

Une méthode de traitement d'image a été établie et utilisée afin de caractériser les processus de génération de bulles. Deux phénomènes ont été décrits : l'entraînement tourbillonnaire et le déferlement. Les essais réalisés permettent de caractériser l'influence des paramètres d'essais. Les nuages de bulles par entraînement tourbillonnaire apparaissent seulement lorsque le générateur de houle immergé provoque une forte intensité turbulente dans l'écoulement. La fréquence du phénomène d'entraînement tourbillonnaire varie très peu malgré toutes les configurations et les gammes de paramètres testées. Ce phénomène est donc uniquement lié à la géométrie de la maquette et à la turbulence de l'écoulement incident. De plus la turbulence est favorable aux deux mécanismes de génération de bulles. Par ailleurs, la houle est un facteur déterminant de la génération de bulles par déferlement. La fréquence des nuages de bulles est directement proportionnelle à la hauteur de vague.

Ces essais ouvrent également de nouvelles perspectives. La base de données originale ainsi obtenue pourrait être utilisée lors du développement de modèles numériques. Enfin l'un des grands avantages de cette technique expérimentale consiste en la possibilité de réaliser des acquisitions simultanées de champs de vitesses grâce aux mesures PIV. De cette manière il sera possible d'étudier à la fois la génération de bulles et les caractéristiques de l'écoulement autour de l'étrave. Grâce à la similitude de Froude ces mesures seront représentatives de l'écoulement réel et donc complémentaires des analyses réalisées dans cet article.

## Références

- [1] E. B. Cooper. The future RRS Discovery. *Ocean Challenge*, 2012.
- [2] J. Dalen and A. Løvik. The influence of wind-induced bubbles on echo integration surveys. *J. Acoust. Soc. Am.*, 1981.
- [3] J. R. De Kat, J. O. and. Paulling. Prediction of extreme motions and capsizing of ships and offshore vehicles. *Proc. of the 20th OMAE Conference, Rio de Janeiro*, 2001.
- [4] G. B. Deane and M. D. Stokes. Scale dependance of bubble creation mechanisms in breaking waves. *Nature*, 2002.
- [5] S. Delacroix, G. Germain, B. Gaurier, and J. Y. Billard. Experimental study of bubble sweep-down in wave and current circulating tank. part 1 : Experimental set-up and observed phenomena. *Soumis au European Journal of Mechanics - B/Fluids*, 2014.
- [6] S. Delacroix, G. Germain, B. Gaurier, and J. Y. Billard. Experimental study of bubble sweep-down in wave and current circulating tank. part 2 : Bubble clouds characterization. *Soumis au European Journal of Mechanics - B/Fluids*, 2014.
- [7] J. Ma, A. A. Oberai, M. C. Hyman, D. A. Drew, and R. T. Lahey Jr. Two-fluid modeling of bubbly flows around surface ships using a phenomenological subgrid air entrainment model. *Computers & Fluids*, 2011.
- [8] F. J. Moraga, P. M. Carrica, D. A. Drew, and R. T. Lahey Jr. A sub-grid air entrainment model for breaking bow waves and naval surface ships. *Computers & Fluids*, 2008.
- [9] A. L. New. Factors affecting the quality of shipboard acoustic doppler current profiler data. *Deep-Sea Research*, 1992.
- [10] D. Rolland and P. Clark. Reducing bubble sweep-down effects on research vessels. In *OCEANS'10 IEE Sydney*, 2010.
- [11] F. W. Shabangu, E. Ona, and D. Yemane. Measurements of acoustic attenuation at 38khz by wind-induced air bubbles with suggested correction factors for hull-mounted transducers. *Fisheries Research*, 2014.
- [12] M. Tavakolinejad. *Air bubble entrainment by breaking bow waves simulated by a 2D+T technique*. PhD thesis, University of Maryland, 2010.
- [13] K. Von Bröckel. Echo sounders versus air bubbles in research vessels. *Hydro International*, 2014.
- [14] T. A. Waniewski. *Air entrainment by bow waves*. PhD thesis, California Institute of Technology, 1999.
- [15] T. A. Waniewski, C. E. Brennen, and F. Raichlen. Measurements of air entrainment by bow waves. *Journal of Fluids Engineering*, 2001.