



THÈSE

pour obtenir le titre de

Docteur de l'Université de Lille 1

École Doctorale Sciences Pour l'Ingénieur EDSPI

Spécialité : Mécanique des fluides

Présentée et soutenue le 22 Novembre 2017 par

Bachar MALLAT

Étude du phénomène d'aération sur les carènes des navires océanographiques

Jury :

M Jean-Marc FOUCAUT	Professeur à l'École Centrale de Lille	Président du Jury
M Laurent DAVID	Professeur à l'Université de Poitiers	Rapporteur
M Elie RIVOALEN	Professeur à l'INSA de Rouen	Rapporteur
Mme Céline GABILLET	Maitre de Conférence à l'École Navale	Examineur
M Philippe DRUAULT	Maitre de Conférence à l'UPMC	Examineur
M Grégory GERMAIN	Chercheur IFREMER	Directeur de thèse
M Jean-Yves BILLARD	Professeur à l'École Navale	Co-directeur de thèse

Table des matières

Remerciements	7
1 Introduction	9
1.1 Problématique et objectifs de l'étude	9
1.2 L'Ifremer et l'acoustique sous-marine	11
1.2.1 Présentation de l'Ifremer et de sa flotte océanographique	11
1.2.2 L'acoustique sous-marine	12
1.3 Le phénomène de <i>Bubble Sweep-down</i>	13
1.4 Etude bibliographique.	15
1.4.1 Entraînement d'air par déferlement de vagues	16
1.4.2 Mesure des bulles générées par déferlement de vagues	19
1.4.3 Mesure de l'écoulement autour des carènes.	21
1.4.4 Simulations numériques	23
1.4.5 Travaux de thèse de S. Delacroix	24
1.4.6 Conclusion	25
1.5 Organisation du manuscrit.	26
2 Matériels et Méthodes	29
2.1 Moyens d'essais	31
2.1.1 Bassin de circulation à houle et courant	31
2.1.2 Caractéristiques des carènes étudiées	33
2.2 Instrumentation	35
2.3 Problèmes de similitude et effets d'échelles.	37
2.4 Conditions et paramètres d'essais.	39
2.5 Déroulement de l'expérience et configurations d'essais.	40

2.6	Protocoles expérimentaux	43
2.6.1	Etude 2D du phénomène	43
2.6.2	Etude 3D du phénomène	45
2.6.3	Mesure de bulles par sonde optique	49
2.7	Conclusion	52
3	Influence de la géométrie de l'étrave sur le bullage	53
3.1	Les trois modèles d'étrave	54
3.2	Caractérisation des nuages de bulles	55
3.2.1	Fréquence d'occurrence des nuages de bulles	56
3.2.2	Dynamique des nuages de bulles	57
3.3	Caractérisation de l'écoulement	65
3.3.1	Traitement des données PIV	65
3.3.1.1	Paramètres et plans de mesures PIV	65
3.3.1.2	Détection de contours	66
3.3.1.3	POD et moyenne de phase	74
3.3.2	Analyse de l'écoulement	80
3.3.2.1	Écoulement vs Génération de nuages de bulles	80
3.3.2.2	Écoulement vs Propagation de nuages de bulles	84
3.4	Conclusion	87
4	Caractérisation fine du phénomène de bullage	89
4.1	Caractérisation 3D des nuages de bulles	90
4.1.1	Description du phénomène.	91
4.1.2	Méthode de reconstruction 3D des nuages de bulles	93
4.1.3	Reconstruction et évolution des nuages de bulles	94
4.1.3.1	Caractérisation d'un nuage de bulles de faible intensité	95
4.1.3.2	Caractérisation d'un nuage de bulles moyen	97
4.1.3.3	Caractérisation d'un nuage de bulles de forte intensité	99
4.2	Détection de bulles par sonde optique	102
4.2.1	Paramètres caractéristiques d'une bulle	102
4.2.2	Caractérisation des bulles par sonde optique	105
4.2.2.1	Fréquence d'occurrence des bulles	106

4.2.2.2	Vitesse et diamètre des bulles	110
4.3	Analyse Stéréo-PIV autour de l'étrave.	117
4.4	Conclusions	121
5	Conclusion générale et perspectives.	123
5.1	Conclusion générale.	123
5.2	Perspectives	127
	Références.	129
	A Effet d'échelles sur le bullage	139
A.1	Caractérisation du bullage.	139
A.1.1	Fréquence d'occurrence des nuages de bulles	139
A.1.2	Dynamique des nuages de bulles	140
A.1.2.1	Configuration 2 : courant et houle	140
A.1.2.2	Configuration 3 : courant et mouvements	142
A.1.2.3	Configuration 4 : courant, houle et mouvements	143
A.2	Conclusion	144
	B Effet de la turbulence	147
B.1	Caractéristiques de l'écoulement incident	147
B.2	Résistance à l'avancement	148
B.3	Mesures de couche limite	150
B.4	Conclusion	153
	C Mesure de surface libre par moyens optiques.	154
C.1	Méthode basée sur la stéréo-réfraction.	154
C.1.1	Dispositif expérimental pour la mesure de la surface libre	156
C.1.1.1	Les caméras	157
C.1.1.2	Le plan laser	158
C.1.1.3	Les sondes à houle	159
C.2	Récapitulatif des essais	159
C.3	Analyse des données de l'Ifremer	160
C.3.1	Limite de la méthode au bassin d'Ifremer	160
C.4	Conclusion	161

TABLE DES MATIÈRES

Résumé	162
Abstract	163

Remerciements

Il me sera très difficile de remercier tout le monde car c'est grâce à l'aide de nombreuses personnes que j'ai pu mener cette thèse à son terme. Je tiens tout d'abord à remercier grandement mon directeur de thèse, Grégory GERMAIN, pour m'avoir fait confiance avec une énorme implication. Je suis ravi d'avoir travaillé en sa compagnie car outre son appui scientifique, il a toujours été là pour me soutenir et me conseiller au cours de l'élaboration de cette thèse. Merci à Jean-Yves BILLARD, mon co-directeur de thèse, pour l'accompagnement durant ces trois ans et sa participation aux essais en bassin. Je remercie également l'Ifremer et la région Hauts-De-France pour le financement de cette thèse.

Merci à tous les membres du Jury d'avoir accepté d'examiner mon travail. Je remercie en particulier Philippe DRUAULT, pour son intérêt et son expertise concernant l'analyse des données PIV.

Je suis particulièrement reconnaissant envers tous les membres du bassin d'Ifremer de Boulogne-sur-Mer qui forment une équipe efficace et extrêmement accueillante. Merci donc à Christelle LEPRETRE, Benoît GAURIER, Jean-Valérie FACQ, Thomas BACHETTI et encore une fois Grégory.

Je remercie également Sylvain DELACROIX qui m'a formé pour un mois sur le déroulement de la manipe en bassin dès mon arrivée en thèse.

Je n'oublie pas le stagiaire David qui a contribué à une partie de ces travaux. Merci pour son implication et les résultats qu'il a obtenu.

Par ailleurs ces trois années de travail à Boulogne-sur-Mer vont être inoubliables grâce aux rencontres que j'ai pu faire, au sein de l'Ifremer ou ailleurs. Merci donc à Martin, Sylvain, Astrid, Pierre&Chloé, Khaled, Maria, Julien, Céline, Fabien, Robin, Ludo, Antoine, ainsi qu'à toute l'équipe du Beach Volley, du Billard et du foot aux bords de la Liane.

Enfin je tiens à remercier tous les membres de ma famille pour leur soutien infaillible sur tous les projets que j'entreprends.

Chapitre 1

Introduction

Sommaire

1.1	Problématique et objectifs de l'étude	9
1.2	L'Ifremer et l'acoustique sous-marine	11
	1.2.1 Présentation de l'Ifremer et de sa flotte océanographique . . .	11
	1.2.2 L'acoustique sous-marine	12
1.3	Le phénomène de <i>Bubble Sweep-down</i>	13
1.4	Etude bibliographique.	15
	1.4.1 Entraînement d'air par déferlement de vagues	16
	1.4.2 Mesure des bulles générées par déferlement de vagues	19
	1.4.3 Mesure de l'écoulement autour des carènes.	21
	1.4.4 Simulations numériques	23
	1.4.5 Travaux de thèse de S. Delacroix	24
	1.4.6 Conclusion	25
1.5	Organisation du manuscrit.	26

1.1 Problématique et objectifs de l'étude

L'exploration de l'océan et de ses ressources est aujourd'hui un enjeu majeur sur notre planète. L'Ifremer y joue un rôle important. Une meilleure connaissance de la nature des fonds, des sous-sols marins et des populations sous-marines est toujours en phase de progression. Ceci permettrait une meilleure exploitation de ces ressources.

Les navires de recherche océanographiques de l'Ifremer utilisent des équipements acoustiques particuliers pour localiser et identifier les bancs de poissons, comme

pour caractériser la nature des fonds. Dans certaines conditions de navigation et état de mer, ces mesures acoustiques sont perturbées par la présence de bulles, ce qui réduit fortement les performances des équipements acoustiques dont les bases sont installées sous la coque du navire. Le passage de bulles devant le transducteur se traduit par un affaiblissement du signal émis et/ou reçu qui vient biaiser de manière non perceptible les mesures de niveau par une perte partielle ou complète de la donnée. Les navires militaires sont soumis aux mêmes perturbations, ce qui entrave leurs capacités à dissimuler leur signature acoustique.

Réduire, voire supprimer ces mécanismes d'aération du milieu permettraient de limiter la perte de jours de mer nécessaire pour la prospection acoustique et d'améliorer la qualité des mesures, les données acquises étant parfois très perturbées, voire inutilisables. Afin de limiter au maximum les perturbations engendrées par ce type de phénomène, la problématique des bulles doit être prise en compte dès la conception des navires, par l'intermédiaire de spécifications architecturales et de protocoles de vérification en bassin. Cette problématique dépasse le cadre des navires de recherche d'Ifremer. En effet, l'ensemble de la flotte scientifique étrangère souffrent également de ce phénomène de bullage, montrant qu'aucune solution viable n'a encore été trouvée, même si d'importantes avancées ont été réalisées dans le cadre des travaux de thèse de Delacroix (2015) qui ont permis de reproduire le phénomène en bassin grâce à la mise en place d'un protocole d'essais spécifique.

La poursuite de ces travaux, réalisée dans le cadre de cette thèse co-financée par l'Ifremer et la Région Hauts-de-France, vise à étudier les différents aspects de l'interaction entre les bulles et l'écoulement, en se concentrant sur le phénomène physique de l'aération sur les carènes de navires océanographiques. Il s'agira principalement :

- d'étudier l'influence de la géométrie des étraves sur le phénomène de génération et de propagation des nuages de bulles,
- de caractériser et de quantifier le phénomène de bullage à partir d'une étude 3D spécifique autour de l'étrave,
- de mesurer la vitesse et la taille des bulles générées suite au déferlement de la vague d'étrave,
- d'étudier l'influence des effets d'échelles sur le phénomène de bullage.

1.2 L'Ifremer et l'acoustique sous-marine

1.2.1 Présentation de l'Ifremer et de sa flotte océanographique

L'Ifremer (Institut Français de Recherche pour l'Exploitation de la Mer) est un organisme de recherche français de type *Établissement Public à caractère Industriel et Commercial (EPIC)* principalement tourné vers la connaissance et la surveillance des océans et des fonds marins. Fondé en 1984, l'Ifremer est placé sous la co-tutelle des ministères de l'énergie, de l'écologie, du développement durable et de l'aménagement du territoire, de l'enseignement supérieur et de la recherche et de l'agriculture et de la pêche. L'Ifremer concentre essentiellement ses missions dans les domaines de surveillance des mers côtières, des ressources halieutiques et de l'exploration et de l'exploitation des fonds océaniques et de leur biodiversité.

L'Ifremer compte plus de 1500 ingénieurs, chercheurs et techniciens repartis entre le siège social situé à Issy-les-Moulineaux, 5 centres (Boulogne-sur-Mer, Nantes, Brest, Toulon, et Tahiti) et 26 stations réparties le long du littoral français et de l'outre-mer. Il conçoit et met en œuvre des outils d'observation, d'expérimentation et de surveillance du milieu marin et du littoral.

L'Ifremer s'est vu confier la direction de l'ensemble de la flotte océanographique française dont quatre navires côtiers (l'Europe, le Gwen Drez, la Thalia et l'haliotis) et quatre navires hauturiers (l'Atlante, la *Thalassa*, le Suroît et le Pourquoi pas ?). Les photographies du *Pourquoi pas ?* et de la *Thalassa* sont présentées sur la figure 1.1. Ces derniers possèdent des fonctionnalités pluridisciplinaires utilisées dans le cadre de missions d'hydrographie, de géoscience, d'halieutique, d'océanographie physique, chimique et biologique. La polyvalence de la flotte ainsi que des systèmes de mesures embarqués, font de l'Ifremer un des établissements de recherche marine les plus intégrés au monde.



FIGURE 1.1 – La *Thalassa* (gauche) et le *Pourquoi pas ?* (droite)

1.2.2 L'acoustique sous-marine

Lors des missions océanographiques, la prise d'information se fait essentiellement à l'aide des ondes acoustiques émises par des équipements de type SONAR (SOund Navigation And Ranging). En effet, la mer étant un milieu opaque, les ondes électromagnétiques utilisées dans la plupart des systèmes de télécommunication se dissipent très rapidement. La lumière ne peut s'y propager que sur des distances de quelques dizaines de mètres. En revanche, les ondes acoustiques sont capables de s'y propager sur de grandes distances et de véhiculer en retour une information après réflexion sur un obstacle pouvant être situé à plusieurs kilomètres. La figure 1.2 illustre les études acoustiques menées par l'Ifremer, notamment l'étude de la nature des fonds, les gisements de gaz ou des épaves importantes et l'évaluation de la biomasse. Le principe du fonctionnement de ces équipements acoustiques est simple. Le transducteur émet une courte impulsion sonore dans l'eau. Lorsque cette onde rencontre un obstacle, son énergie est absorbée, diffusée et réfléchiée. La partie réfléchiée vers le transducteur est dite rétrodiffusée. Le temps écoulé entre l'émission et la réception donne des informations sur la distance de la cible, sa forme et sa position.

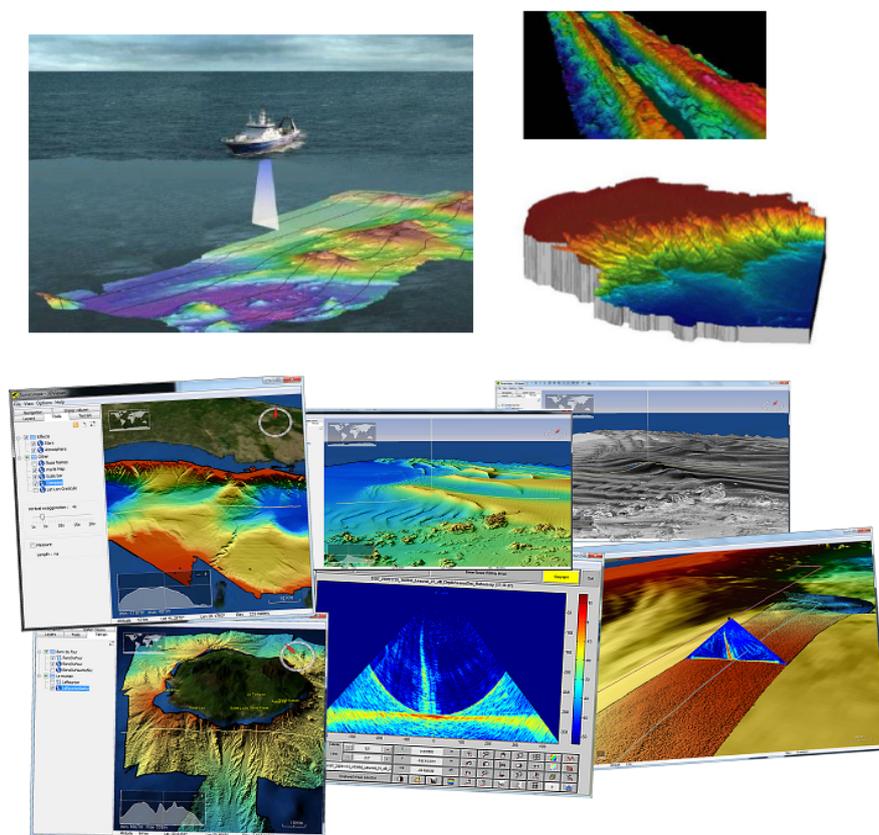


FIGURE 1.2 – Exemples d'application des sonars.

L'acoustique sous-marine est un secteur d'activité scientifique et industrielle, très varié et en phase de développement. Les principales catégories d'applications de l'acoustique sous-marine à vocation civile sont les sondeurs bathymétriques (pour la mesure de la hauteur de l'eau), les sondeurs et sonars de pêche (pour la détection et la localisation des bancs de poissons), les sonars latéraux (pour l'imagerie acoustique du fond), les sondeurs multifaisceaux de cartographie (pour le relevé précis de la topographie des fonds marins) et les systèmes à effet Doppler (pour mesurer, soit la vitesse du sonar par rapport à un milieu fixe, soit celle de l'eau par rapport à un instrument fixe). La figure 1.3 illustre certaines de ces applications.

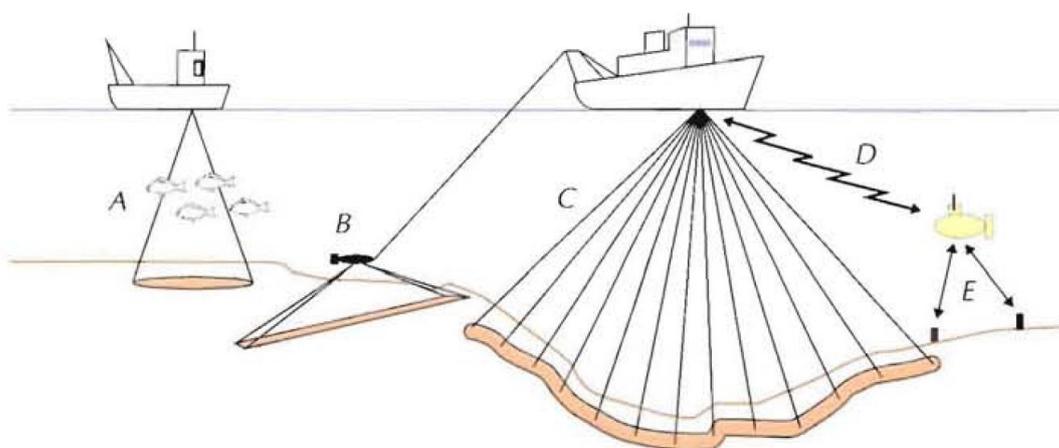


FIGURE 1.3 – Extrait de Lurton (1998) - Quelques applications civiles : A : sondeur de bathymétrie ou de pêche, B : sonar latéral, C : sondeur multifaisceaux, D : transmission de données, E : positionnement acoustique

1.3 Le phénomène de *Bubble Sweep-down*

Malgré l'efficacité des équipements acoustiques, certaines contraintes météorologiques et environnementales peuvent réduire leurs performances et limiter la prise d'information lorsque les conditions en mer deviennent instables. En effet sur tous les navires de surface en présence d'une forte houle, l'écoulement turbulent autour de l'étrave est une source potentielle de production de bulles d'air. Ces bulles sont ensuite emportées dans l'écoulement autour de la carène et entraînées sous la coque du navire jusqu'au niveau de l'emplacement des transducteurs acoustiques. Ce phénomène est connu sous le nom de "*Bubble Sweep-down*". Une importante concentration de bulles d'air sous les équipements acoustiques provoque une atténuation des signaux du fait de leurs réflexions par les bulles et peut alors rendre toute étude océanographique impossible.

Le phénomène de *Bubble Sweep-down* est plus compréhensible en le séparant en deux événements distincts. Le premier est la formation de bulles d'air soit par l'aération naturelle due à l'interaction du vent et de la houle avec la surface libre, soit par le déferlement de la vague d'étrave. L'impact entre la surface libre et l'étrave peut également être une origine de formation des bulles. Le deuxième événement est l'entraînement de ces bulles par l'écoulement sous la coque jusqu'au niveau de l'emplacement des transducteurs ce qui perturbe les mesures acoustiques et diminue fortement la productivité du navire. Les conditions environnementales, la géométrie de la coque, la dynamique du navire et l'emplacement des équipements acoustiques sont les principaux facteurs susceptibles d'influer sur la génération de bulles et leur interaction avec les ondes acoustiques.

Même si l'utilisation des équipements acoustiques a démontré son potentiel (Trenkel *et al.*, 2009), des incertitudes demeurent quand à la forme optimale de la coque et l'emplacement du sonar. Plusieurs travaux se sont concentrés sur la minimisation des bulles d'air qui se produisent autour de l'étrave et proche de la surface de l'eau. Les gondoles et les carénages (systèmes sous lesquelles sont installés les équipements acoustiques) ont montré une certaine efficacité face à ce genre de problème (voir figure 1.4). Cependant, ils sont coûteux et délicat à concevoir (problème de position). Rolland et Clark (2010) a comparé les solutions adoptées sur différents navires de recherche. Les navires équipés d'une quille, d'une gondole et d'un déflecteur ont été comparés en tenant compte des effets néfastes de l'ajout de poids et de résistance à l'avancement. Ils ont démontré qu'une simple modification de l'étrave en forme de U permet un compromis entre la réduction du phénomène de bullage et une faible augmentation de la résistance à l'avancement. Le navire de recherche allemand *Sonne* (Von Bröckel, 2014) a également été conçu en prenant en compte le problème de *Bubble Sweep-down*. Une forme de type «entaillée» a été conçue pour piéger les nuages de bulles et éviter leur propagation sous la coque. Lors de la conception du navire de recherche *Discovery* (Cooper, 2012), une attention particulière a été accordée à ce phénomène. Le retour d'expérience sur l'efficacité de ces carènes ne permet pas aujourd'hui de statuer sur leur efficacité.

À partir de diverses expériences en bassin, des recommandations sur l'augmentation du tirant d'eau et l'évitement du bulbe d'étrave ont été proposées (voir figure 1.5). Les navires FSV-40 (Karafiath *et al.*, 2001), le R/V THOMPSON (DeBord et Musatow, 1989) et le monocoque T-AGOS (Mc Donough et Green, 2005) en raison de leur mission de pêche acoustique, ont été conçus avec la limitation du phénomène comme objectif principal. Un tableau central rétractable a été monté sur le navire FSV-40. Ce tableau contient le sonar et permet de l'abaisser à 10 pieds au-dessous de la quille, en le plaçant au-dessous de la couche de bulles attendue. Un avant-corps avec des sections en forme de U a également été retenue. Ce volume supplémentaire est destiné à réorienter l'écoulement sur l'avant-corps réduisant le potentiel des interférences du phénomène.



FIGURE 1.4 – Différents types d’implantation de sonars afin de réduire l’influence du phénomène de *Bubble Sweep-down*

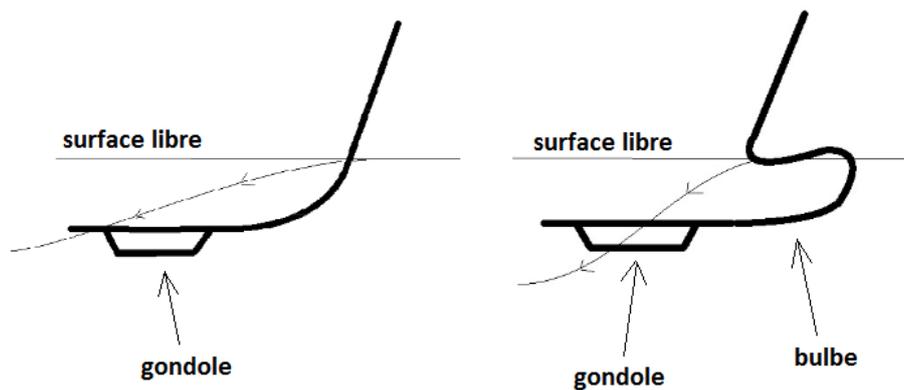


FIGURE 1.5 – Lignes de courant autour d’une étrave sans bulbe (gauche) et avec bulbe (droite) en eau calme.

1.4 Etude bibliographique

Cette section est composée d’une étude bibliographique des travaux réalisés sur l’entraînement d’air par déferlement de la vague d’étrave et sur les mesures de la distribution en taille des bulles générées. Ensuite, quelques travaux portant sur les mesures de l’écoulement autour des carènes sont présentés avec une focalisation sur la mesure de la vague d’étrave. Des travaux sur les simulations numériques de la vague d’étrave déferlante et de l’écoulement diphasique sont ensuite présentés. Enfin, les travaux sur la reproduction du phénomène de *Bubble Sweep-down* dans le bassin de circulation à houle et courant de l’Ifremer sont résumés.

1.4.1 Entrainement d'air par déferlement de vagues

L'entraînement d'air autour des carènes de navires est principalement dû au déferlement de la vague d'étrave qui est l'un des principaux paramètres caractéristiques de la signature d'un navire. Afin de caractériser cette vague, de nombreuses études utilisent une ou deux plaques planes pour simuler l'étrave du navire et décrire analytiquement la forme de la vague générée (Ogilvie (1972), Fontaine *et al.* (2000)). Waniewski *et al.* (2002) utilisent une plaque plane pour étudier la dynamique de la vague générée et le phénomène d'entraînement d'air. De même, Delhommeau *et al.* (2009a) et Noblesse *et al.* (2008) utilisent des plaques planes afin de simuler les vagues d'étraves générées par un navire (figure 1.6). Grâce à cette approximation, le tirant d'eau, l'angle d'entrée et l'angle de tulipage peuvent être modifiés simplement.

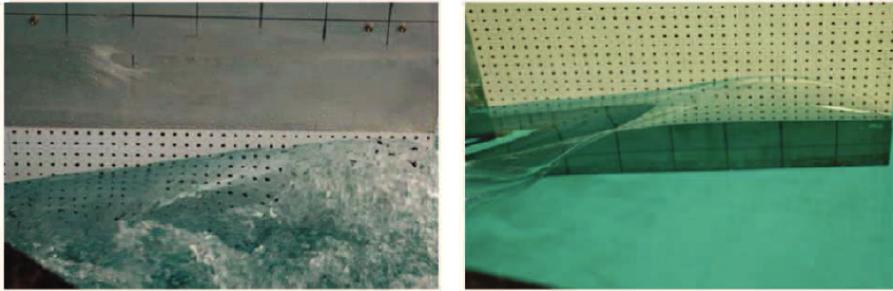


FIGURE 1.6 – Vague d'étrave générée par une plaque plane. Issue de Noblesse *et al.* (2008).

Des mesures sur des plaques planes et sur différentes formes de carènes ont été également réalisées par Standing (1974); Larrarte (1993). Ces mesures expérimentales sont ensuite comparées à des expressions analytiques simples définissant les caractéristiques de la vague d'étrave (Noblesse *et al.*, 2006, 2008, 2009, 2011; Guilbaud *et al.*, 2008; Delhommeau *et al.*, 2009a). Ces expressions définissent la hauteur, la forme ainsi que la position de la vague d'étrave en fonction de la vitesse du navire, U , du tirant d'eau D et de l'angle d'entrée α_E . Par exemple, la hauteur de la vague d'étrave Z_b et sa position X_b s'expriment de la façon suivante :

$$Z_b = \frac{2,2 \frac{U^2}{g}}{1 + U\sqrt{gD}} \cdot \frac{\tan \alpha_E}{\cos \alpha_E} \quad (1.1)$$

$$X_b = \frac{1,1 \frac{U^2}{g}}{1 + U\sqrt{gD}} \quad (1.2)$$

Les résultats des expressions analytiques issus de Guilbaud *et al.* (2008) sont comparés à des mesures réalisées sur une plaque plane et montrent un bon accord.

La figure 1.7 montre une comparaison entre une photographie de la vague générée et celle calculée analytiquement.

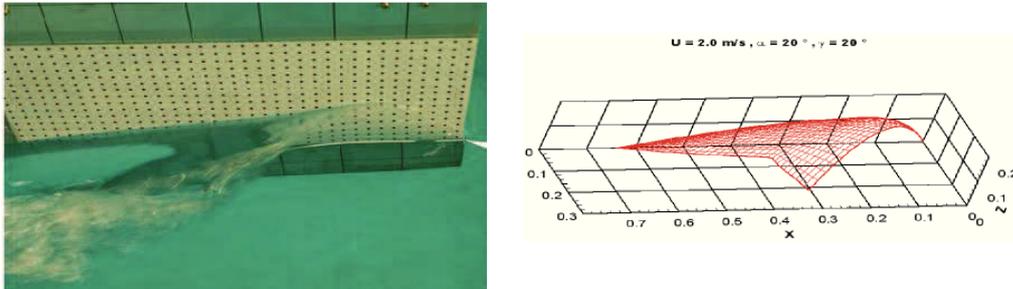


FIGURE 1.7 – Comparaison entre le calcul analytique et une photographie d’une vague d’étrave générée par une plaque plane. Issues de Guilbaud *et al.* (2008).

Après le déferlement de la vague d’étrave, l’air est entraîné sous forme de bulles de différentes tailles caractérisées par des fractions volumiques élevées. Deane et Stokes (2002) divisent la durée de vie de panache de bulles en deux phases : la phase acoustique où les bulles sont générées et la phase de repos qui commence lorsque la formation des bulles s’arrête. La phase acoustique est divisée en trois événements illustrés dans la figure 1.8 :

- le premier événement apparaît quand le creux de la vague est formé et tape sur le front de la vague. L’impact du jet sur l’avant de la vague entraîne la formation d’un panache de bulles,
- la deuxième phase commence quand la cavité a presque complètement fragmenté. À ce stade, le jet plongeant forme une couche de cisaillement sur la face de la vague. Un nuage de bulles est formé suite à l’interaction du jet avec l’avant de la vague. La circulation dans le sens horaire autour la cavité advecte des bulles entraînées par le jet et certaines d’entre elles sont remises en circulation à travers le jet,
- le jet plongeant est dissipé pendant la troisième phase, laissant un panache de bulles.

C’est la phase acoustique de courte durée qui détermine la première répartition de la taille des bulles générées, tandis que l’évolution dans la phase de repos est contrôlée par l’advection, le transport turbulent et la flottabilité. Deane et Stokes ont trouvé deux mécanismes qui contrôlent la distribution en tailles des bulles : pour une taille $> 1\text{mm}$, la fragmentation turbulente détermine la distribution en taille de bulles. Les petites bulles (taille $< 1\text{mm}$) sont créées à partir de l’impact du jet et sont stabilisées par la tension de surface. L’échelle séparant ces 2 mécanismes est connu sous le nom de l’échelle de Hinze.

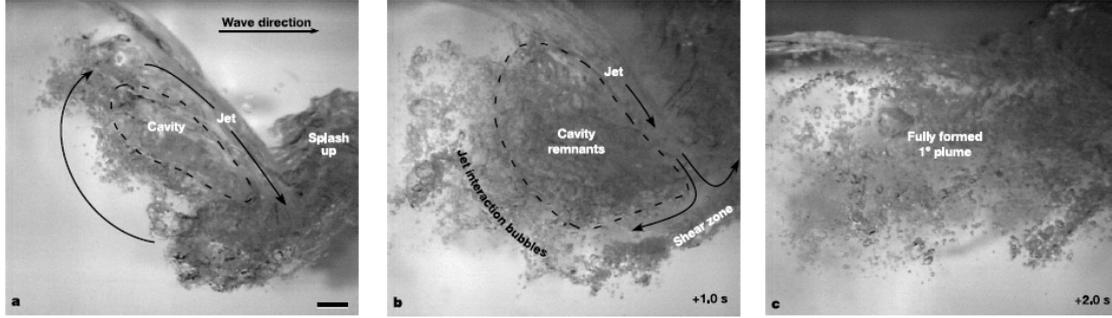


FIGURE 1.8 – Extrait de Deane et Stokes (2002). Les trois évènements de la phase acoustique.

D'autre part, Chanson et Cummings (1994) ont étudié les effets des vagues déferlantes sur la dissolution des gaz dans l'océan. Les caractéristiques d'aération de ces vagues en mer profonde ont été présentées par similitude avec un jet plongeant. Une méthode théorique est développée afin de prédire la vitesse critique d'entraînement d'air, la taille des bulles entraînées et leur profondeur. Par exemple, les expressions de la taille maximale d'une bulle générée par le jet (dm) et la profondeur de pénétration des bulles (D) s'expriment de la façon suivante :

$$dm = \sqrt[3]{\frac{2 \times \sigma \times We_c}{\rho_w \times \frac{dV^2}{dy}}} \quad (1.3)$$

où ρ_w est la densité de l'eau, V la vitesse d'impact du fluide, σ la tension de surface et We_c est le nombre de Weber critique.

$$\frac{D}{d} = 0,0240 \times \left(\frac{V}{u_r}\right)^2 \times \frac{(\sin \alpha)^3}{(\tan \theta_3)^2} \times \left(1 + \sqrt{1 - 20,81 \times \left(\frac{u_r}{V}\right)^2 \times \frac{(\tan \theta_3)^3}{(\sin \alpha)^2}}\right)^2 \quad (1.4)$$

où d est l'épaisseur du jet, u_r est la vitesse d'ascension de la bulle, α l'angle du jet avec l'horizontal et θ_3 est l'angle de diffusion du jet dans la région totalement développée.

Les modèles analytiques définissant les caractéristiques de la vague d'étrave générée et l'entraînement d'air fournissent des informations importantes. En effet, à partir de ces modèles et pour une vitesse d'avance et une géométrie d'étrave données, les caractéristiques de la vague d'étrave ainsi que les propriétés du jet plongeant peuvent être obtenues. Ce jet plongeant est à l'origine du mécanisme d'entraînement d'air. Ainsi, la taille et la profondeur de pénétration des bulles générées peuvent être calculées. Cependant, les études précédentes portant sur l'entraînement d'air par déferlement de la vague d'étrave sont réalisées en eau calme. Ces modèles sont

donc plus pertinents pour étudier l'échange air-eau proche de la surface libre que pour étudier le phénomène de *Bubble Sweep-down* qui se produit plus profondément et dans des conditions plus sévères. D'autre part, l'interaction entre la houle et le navire au niveau de l'étrave est à l'origine de la génération des nuages de bulles (Delacroix *et al.*, 2016b). Par conséquent, il est primordial de prendre en compte les caractéristiques de la géométrie de l'étrave ainsi que les conditions de l'état de mer, notamment la houle et les mouvements du navire.

1.4.2 Mesure des bulles générées par déferlement de vagues

La distribution en taille des bulles générées par déferlement des vagues a été mesurée en mer et en laboratoire en utilisant différentes techniques acoustiques (Medwin (1970); Hwang *et al.* (1990)), photographiques (Deane (1997); Johnson et Cooke (1979); Leifer et de Leeuw (2006)) et par technique de piégeage de bulles (Kolayev (1976)). Malgré une divergence entre les différents résultats obtenus, il est admis que la distribution en taille des bulles suit une loi de puissance et il semble y avoir une modification de la valeur de la pente spectrale séparant les grandes et petites populations de bulles.

Certains de ces travaux ont ensuite été comparés à des résultats du modèle théorique développée par Chanson et Jaw-Fang (1997). On note notamment les travaux de Tavakolinejad (2010) et de Waniewski (1999); Waniewski *et al.* (2001, 2002) sur l'entraînement d'air par déferlement de vague. Lors des travaux de Tavakolinejad, l'entraînement d'air a été simulé par la technique 2D+T qui consiste à tracter une planche déformable qui simule la forme de la maquette du navire pour une période donnée. Le taux de vide et la taille des bulles sont ensuite mesurés par la technique de "shadow graph measurement system". En ce qui concerne les travaux de Waniewski, la taille et la vitesse des bulles ont été mesurées avec des sondes IVFM (Impedance Void Fraction Meter).

Ces travaux ont montré une bonne adéquation avec les modèles analytiques de Chanson et Cummings sur la taille maximale des bulles générées sous la surface. Cependant, l'estimation du taux de vide n'est pas cohérente avec les résultats de Tavakolinejad. Mori *et al.* (2007) ont utilisé une sonde résistive à double pointe pour mesurer la fraction de vide et la distribution en taille des bulles à deux échelles. Ils ont constaté que même si certains effets d'échelle apparaissent clairement dans leurs mesures de fraction de vide, la pente du spectre qui représente la taille des bulles est indépendante de l'échelle.

Les difficultés liées à la mesure précise de la distribution en taille des bulles générées par déferlement de la vague d'étrave ont été étudiées par Serdula et Loewen (1988). Ils ont conclu que les sondes de détection de phases à fibre optique représentent la technique la plus prometteuse pour effectuer des mesures de taux de vide et de distribution en taille des bulles entraînées initialement par déferlement des

vagues. Cette technique a d'abord été utilisée par Miller et Mitchie (1970) et est décrite en détail par Cartellier et Achard (1991). Serdula et Loewen (1988) ont utilisé une sonde optique à pointe pour mesurer les tailles de bulle dans un écoulement unidirectionnel à faible fraction de vide. Ils ont ensuite suggéré que l'écoulement sous les vagues déferlantes est significativement plus complexe et pourrait limiter les performances de la technique. Malgré cette limitation, ils ont conclu que si les sondes à fibres optique peuvent fournir des estimations qui seront exactes d'un facteur de 2 ou 3 de la taille des bulles, alors cela constituerait une avancée significative. L'analyse des résultats des mesures de bulles à l'aide d'une sonde optique (Christopher et Chaplin, 2010) a mis en évidence l'évolution spatiale et temporelle des tailles de bulles. Il a démontré que l'entraînement d'air est divisé en deux phases et que de grandes cavités d'air de plusieurs centimètres de diamètre sont initialement entraînées. Les bulles diminuent rapidement en taille en fonction du temps et de la distance au point de début de l'entraînement d'air (figure 1.9). La figure 1.10 présente les deux types d'entraînement d'air nommées Plunging et Plunging/Spilling.

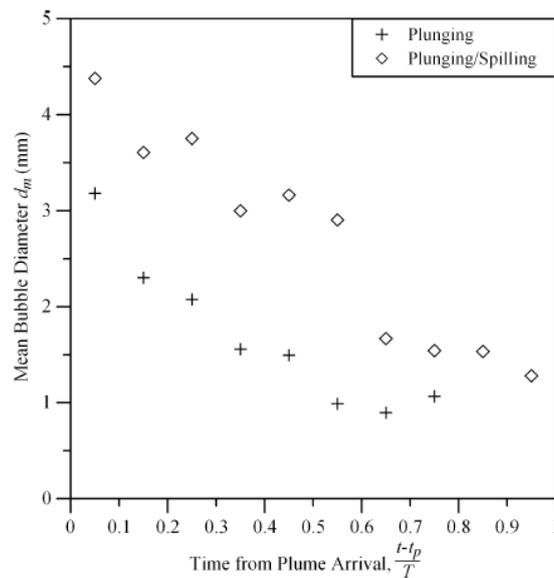


FIGURE 1.9 – Extrait de Christopher et Chaplin (2010). Variation de la proportion de petites bulles ($d < 2,4$ mm) en fonction de temps pour les cas de houle plongeant (Plunging) et des houles plongeant/renversant (Plunging/Spilling).

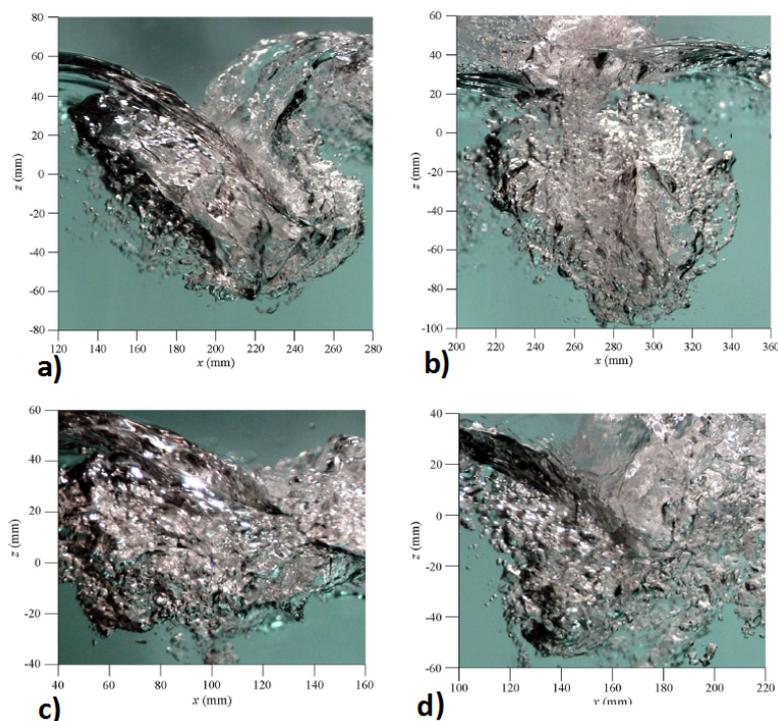


FIGURE 1.10 – Extrait de Christopher et Chaplin (2010). a) entrainement de la grande cavité (plunging). b) division de la cavité en grosses bulles sous l'influence de la turbulence et le cisaillement de l'écoulement. c) et d) : panache de bulles entraînées sous forme de bulles individuelles dans la phase spilling/plunging.

1.4.3 Mesure de l'écoulement autour des carènes

Contrairement aux caractéristiques de l'entrainement d'air qui sont différentes entre le réel et le bassin du fait du non respect de la similitude de Webber, la mesure de l'écoulement autour d'un modèle dans un bassin d'essai est représentatif du réel grâce au respect de la similitude de Froude. C'est pour cela que les mesures des écoulements autour des carènes suscitent un intérêt particulier en hydrodynamique navale.

Des tubes de Pitot ont été utilisés pour estimer la vitesse locale de l'écoulement à partir de mesures de pression. Kim *et al.* (2001) ont mesuré la résistance à l'avancement, la houle et la vitesse de l'écoulement (par des tubes de Pitot) autour de différents modèles d'étraves avec bulbe dans un bassin de traction. Le développement des systèmes de mesure avec des lasers est actuellement en progression. Ces systèmes permettent de mesurer l'écoulement d'une façon non intrusive. Les deux systèmes laser les plus connus et utilisés sont la LDV (Laser Doppler Velocimetry) et la PIV (Particle Image Velocimetry). La LDV permet de mesurer la vitesse de

l'écoulement en un point donné, alors que la PIV permet de réaliser des mesures du champ de vitesse instantané dans un plan, comme dans un volume.

De nombreuses études portent sur la caractérisation de l'écoulement autour de carènes de navires à l'aide de mesure PIV dans des bassins de traction, comme dans des bassins de circulation et des tunnels de cavitation. Chen et Chang (2006) ont développé un système mobile qui permet de réaliser des mesures PIV autour d'une carène à haute vitesse d'avance en bassin de traction. Lee *et al.* (2003, 2009) ont développé des systèmes fixes pour mesurer le sillage derrière une maquette en bassin de circulation. Paik *et al.* (2007) ont mesuré le sillage derrière un propulseur en rotation dans un tunnel de cavitation. Des mesures PIV ont été également réalisées autour d'une carène uniquement soumise à de larges amplitudes de roulis (Bassler *et al.*, 2010). Un état de l'art sur les principales applications de la PIV en hydrodynamique navale est réalisé dans Di Felice et Pereira (2008).

La caractérisation de vague d'étrave déferlante a fait l'objet de nombreuses études car ce phénomène est responsable de la signature acoustique d'un navire. Différentes techniques ont été utilisées pour mesurer l'écoulement au sein de la vague déferlante. Dong *et al.* (1997) et Roth *et al.* (1999) relient la structure de l'écoulement à la forme de la surface de la vague d'étrave déferlante à partir de mesures PIV. Olivieri *et al.* (2003); Olivieri (2004) ont également étudiés la structure d'une vague d'étrave déferlante pour un modèle de bateau tracté à haute vitesse à partir de mesures de pression. Des mesures de la hauteur de la vague d'étrave ont également été réalisées à l'aide de sondes capacitives. Dong *et al.* (1997) ont mis en évidence l'apparition de "scars" (cicatrices) sur la surface libre de la vague d'étrave (figure 1.11). Ces scars correspondent à des discontinuités de la surface libre et sont caractéristiques de zones à fortes fluctuations de hauteur. Olivieri (2004) a montré que les effets d'échelles augmentent avec l'augmentation du nombre de Froude.

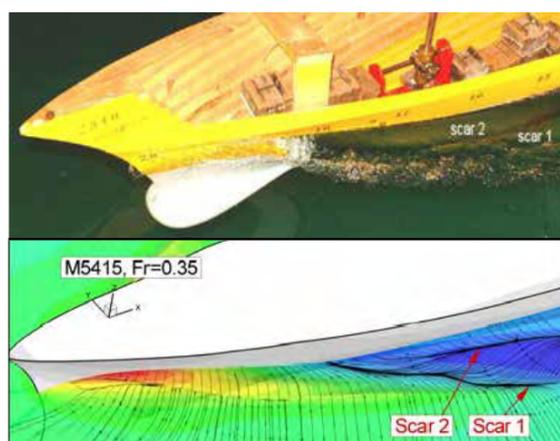


FIGURE 1.11 – Extrait de Olivieri (2004). Apparition de "scars" au niveau de la surface libre de la vague d'étrave.

1.4.4 Simulations numériques

Pour simuler le comportement d'une vague d'étrave, plusieurs méthodes numériques ont été développées dans la bibliographie. La méthode 2D+T, introduite dans la partie précédente, est utilisée par Landrini *et al.* (2012) pour simuler les vagues d'étraves déferlantes. Dommermuth *et al.* (2006), Di Mascio *et al.* (2007) utilisent des méthodes comme les solveurs RANS (Reynolds Averaged Navier-Stokes) avec les détections de surfaces VOF (Volume Of Fluid) ou level-sets pour caractériser ces vagues. Ces méthodes sont basées sur des analyses tridimensionnelles. Marrone *et al.* (2012) utilisent une méthode SPH (Smoothed Particle Hydrodynamics) pour simuler les vagues d'étrave déferlantes (figure 1.12). Des études basées sur cette méthode ont également été réalisées pour simuler le couplage solide-fluide avec une surface libre (Oger *et al.*, 2006; Le Touzé *et al.*, 2010; Guilcher *et al.*, 2006; Doring *et al.*, 2004).



FIGURE 1.12 – Extrait de Marrone *et al.* (2012). Simulation de la vague d'étrave déferlante par SPH. Comparaison avec une photographie de l'écoulement.

Cependant, pour l'étude de l'entraînement d'air par déferlement de vagues, les outils numériques sont en fait assez limités. Les modèles ne sont pas suffisamment performant pour simuler l'écoulement diphasique engendré par le déferlement d'une vague. En revanche, les développements de modèles numériques pour simuler ce genre de phénomène sont en cours. Ma *et al.* (2011), Carrica *et al.* (1999), Castro et Carrica (2013); Castro *et al.* (2016) ont développé un modèle de sous-maillage couplé à un modèle diphasique RANS pour résoudre l'écoulement et obtenir une prédiction numérique quantitative du taux de vide autour de la coque d'un navire. Cependant, ces simulations reposent sur des modèles simples d'entraînement d'air. Moraga *et al.* (2008) ont développé un modèle pour localiser des régions à fraction de vide élevée en utilisant les distributions de bulles observées par Deane et Stokes

(2002) lors du déferlement de la vague. L'entraînement d'air des expériences de vagues déferlantes de Waniewski *et al.* (2001) a été simulé et les résultats ont montré une bonne corrélation entre les expériences et les simulations numériques.

1.4.5 Travaux de thèse de S. Delacroix

En 2014, l'unité de l'Ifremer Navire et Systèmes Embarqués (responsable de la construction et de la modernisation des navires de la flotte de l'Ifremer) en collaboration avec le laboratoire Comportement des Structures en Mer, a mis en place un projet d'étude qui a débuté avec la thèse de Delacroix (2015) pour étudier le phénomène de *Bubble Sweep-down*. Les objectifs étaient les suivants :

- obtenir une meilleure compréhension de la génération et de la propagation des bulles autour de la carène des navires ;
- développer une méthode permettant d'étudier expérimentalement le phénomène de *Bubble Sweep-down* ;
- proposer des solutions permettant d'améliorer le comportement des futurs navires de la flotte, et la proposition d'éventuelles modifications pour les navires actuels.

Un protocole expérimental a été défini afin de reproduire le phénomène de *Bubble Sweep-down*. Les mouvements d'une maquette du *Pourquoi pas ?* à l'échelle 1/30 en présence de houle régulière ont été reproduits à l'aide d'un hexapode, la vitesse d'avance du navire étant simulée par la génération d'un courant (Delacroix *et al.*, 2016b). Cette expérience a permis de reproduire et étudier le phénomène de *Bubble Sweep-down*. Les résultats des essais ont permis l'identification de deux mécanismes de formation de nuages de bulles. Le premier est l'entraînement d'air par détachement tourbillonnaire et le deuxième est l'entraînement d'air par déferlement de la vague d'étrave.

Ces deux mécanismes ont ensuite été quantifiés autour de l'étrave du *Pourquoi pas ?* (Delacroix *et al.*, 2016c) et d'une autre étrave de type étrave inversée. Les nuages de bulles générés ont été caractérisés en terme de surface, de profondeur et de vitesse verticale pour différentes configurations (avec courant uniquement, avec courant et houle, avec courant et mouvement, avec courant houle et mouvements) afin d'étudier l'influence de chaque paramètre sur le phénomène de génération de bulles. La fréquence d'occurrence des nuages de bulles a également été déterminée pour chaque configuration. Des mesures par PIV ont été réalisées autour de l'étrave afin de trouver un lien entre l'écoulement hydrodynamique et la génération de bulles.

Plusieurs points ont été soulignés :

- le bassin de circulation à houle et courant est bien adapté pour la reproduction du phénomène de *Bubble Sweep-down*.
- le mécanisme d'entraînement d'air par détachement tourbillonnaire apparaît uniquement suite à l'interaction de l'écoulement incident turbulent avec la forme de l'étrave.
- la houle incidente est un facteur important agissant sur la génération des bulles suite au déferlement de la vague d'étrave.
- la fréquence d'occurrence des nuages de bulles est directement proportionnelle à la hauteur de la houle incidente.
- des études en moyenne de phase ont permis de caractériser les fluctuations de l'écoulement et de démontrer l'effet de la houle.
- une diminution conséquente de la fréquence et de l'intensité de l'entraînement d'air est observée autour de l'étrave inversée.

Les travaux de S. Delacroix ont permis d'avancer de manière significative sur les objectifs principaux du projet d'étude. La méthode expérimentale développée a permis d'obtenir des informations sur les mécanismes d'entraînement d'air et sur l'écoulement autour de l'étrave. L'analyse de la génération de bulles a permis également une meilleure compréhension des phénomènes d'entraînement d'air. Ces essais permettent finalement une comparaison entre différentes formes d'étraves afin de limiter le passage de bulles sous la coque des navires.

1.4.6 Conclusion

L'entraînement d'air autour des étraves de navires est principalement dû au déferlement de la vague d'étrave. De nombreuses études expérimentales, théoriques et numériques ont été réalisées afin de modéliser et de caractériser ce phénomène. Des modèles analytiques ont été développés à partir de mesures réalisées sur des plaques planes. De même, différents modèles ont été développés pour estimer les propriétés physiques (fraction du vide, taille et profondeur de pénétration des bulles) du jet plongeant qui est responsable de l'entraînement d'air. Les résultats expérimentaux ont montré que la taille des bulles est bien en accord avec la taille prédite par les modèles. En revanche, le taux de vide ainsi que la profondeur de pénétration de bulles donnent des résultats contradictoires. D'autre part, de nombreuses études expérimentales se focalisent sur la mesure des bulles générées par déferlement de la vague. Les sondes à fibre optique représentent la technique la plus prometteuse pour effectuer des mesures de taux de vide et de distribution en taille des bulles. D'un point de vue numérique, les simulations de l'entraînement d'air par déferlement

de vagues sont en cours de développement et ne sont valables qu'en eau calme. Ces simulations reposent sur des modèles simples qui permettent d'obtenir une prédiction du taux du vide autour de la coque des navires.

L'étude de l'écoulement proche de la coque des navires a fait l'objet de différents papiers. Cet écoulement est déterminé à l'aide de mesures de pression par tubes de Pitots ou encore à partir de mesures de vitesses PIV et LDV. Ces études portent essentiellement sur le sillage de la vague d'étrave et permettent de caractériser l'écoulement à proximité de la paroi du modèle.

Les modèles analytiques, expérimentaux et numériques décrits dans cette partie bibliographique ne sont valables qu'en eau calme. La présence de la houle et des mouvements du navires influent d'une manière significative sur l'entraînement d'air par déferlement de la vague d'étrave. Ce dernier a été étudié dans un bassin de circulation à houle et courant où l'influence de la houle et des mouvements du navire sur la génération de bulles ont été pris en compte. Les résultats de cette étude ont permis une meilleure compréhension des mécanismes d'entraînement d'air et ont montré que la houle est le paramètre prépondérant agissant sur la génération des bulles (Delacroix, 2015). Il a été montré qu'une simple modification de la géométrie de l'étrave joue un rôle important sur la diminution de la fréquence d'occurrence des bulles autour de l'étrave.

La présente thèse a pour but de poursuivre l'étude préliminaire de S. Delacroix tout en caractérisant d'une manière fine le phénomène de *Bubble Sweep-down* autour de différentes étraves de navires.

1.5 Organisation du manuscrit

Même si la définition d'une carène modifiée a permis de réduire significativement la fréquence d'apparition du phénomène (Delacroix, 2015), il semble impossible de le supprimer complètement sur les futurs navires. Une meilleure compréhension du phénomène physique par une prise en compte des effets de la géométrie de l'étrave, des effets d'échelles et de la généralisation des résultats obtenus est par conséquent nécessaire pour appréhender de façon encore plus précise le phénomène.

Nous proposons au travers de ce travail de thèse de caractériser, quantifier et mieux comprendre le phénomène de *Bubble Sweep-down* autour des étraves dans le bassin de circulation à houle et courant de l'Ifremer à Boulogne-sur-Mer.

Ce manuscrit s'articule comme suit :

- le chapitre 2 est consacré à la présentation des matériels et méthodes utilisés dans le bassin de circulation à houle et courant de Boulogne-sur-Mer afin de reproduire le phénomène de *Bubble Sweep-down*. Les moyens d'essais ainsi que

l'instrumentation nécessaire sont détaillés. Les lois physiques à respecter et les conditions d'essais à reproduire dans le bassin sont ensuite abordées. Enfin et en fonction de l'étude souhaitée, les différents montages expérimentaux réalisés sont présentés ;

- la suite du manuscrit est consacrée à la caractérisation expérimentale du phénomène de bullage autour des étraves. Le chapitre 3 présente une étude sur l'influence de la géométrie de l'étrave sur la génération et la propagation des nuages de bulles autour de trois modèles de navires. La dynamique des nuages de bulles générés ainsi que l'écoulement autour des étraves sont étudiés et analysés ;
- le chapitre 4 présente une caractérisation fine du phénomène de bullage. La reconstruction et l'évolution des nuages de bulles en 3D sont abordés. Cela a permis d'optimiser le positionnement d'une sonde optique et de mesurer localement les vitesses et les diamètres de bulles. Pour compléter la caractérisation 3D du phénomène de bullage, des analyses 3D de l'écoulement sont présentées à la fin de ce chapitre. Ces analyses mettent en évidence le comportement de l'écoulement pour des périodes de houles avec et sans génération de bulles ;
- un résumé des résultats obtenus et des perspectives envisagées sont présentés dans le chapitre 5 ;

Le manuscrit est clôturé par des annexes. L'annexe A est consacrée à l'étude de l'influence des effets d'échelles sur les conditions d'apparition et la dynamique des nuages de bulles. Deux maquettes du navire *Thalassa* à l'échelle 1/22 et à l'échelle 1/30 sont étudiées. L'annexe B présente une étude sur les effets de la turbulence sur la résistance à l'avancement et la couche limite du *Pourquoi pas ?*. Enfin l'annexe C présente une méthode optique de stéréo-réfraction pour mesurer la déformation de la surface libre en contact avec l'étrave du navire.

Chapitre 2

Matériels et Méthodes

Sommaire

2.1	Moyens d'essais	31
	2.1.1 Bassin de circulation à houle et courant	31
	2.1.2 Caractéristiques des carènes étudiées	33
2.2	Instrumentation	35
2.3	Problèmes de similitude et effets d'échelles	37
2.4	Conditions et paramètres d'essais.	39
2.5	Déroulement de l'expérience et configurations d'essais.	40
2.6	Protocoles expérimentaux	43
	2.6.1 Etude 2D du phénomène	43
	2.6.2 Etude 3D du phénomène	45
	2.6.3 Mesure de bulles par sonde optique	49
2.7	Conclusion	52

Il existe différents types de bassin permettant d'analyser un écoulement aux abords d'une étrave : i) les bassins de traction disposant d'un mécanisme permettant de tracter la maquette sur une longue distance et ii) les bassins à circulation générant un courant incident pour solliciter la maquette placée à un endroit fixe. La quasi-totalité des études menées jusqu'à présent pour étudier la génération et la propagation des bulles le long de la carène des navires a été réalisée dans des bassins de traction avec des carènes libres en tangage et en pilonnement, répondant dynamiquement à la houle. Les résultats ont montré la présence très faible de bulles, voir l'inexistence de celles-ci. Face à cette impossibilité d'étudier directement le phénomène de *Bubble Sweep-down*, le comportement des bulles dans l'écoulement a été simulé par l'injection de colorant. Le choix de l'emplacement des équipements acoustiques a été décidé à partir de la connaissance des lignes de courant ainsi obtenues,

mais qui ne prennent pas en compte la dynamique des nuages de bulles.

Le développement d'une méthode d'essai spécifique pour l'étude du phénomène de génération de bulles par déferlement de la vague d'étrave a été réalisé en 2013 dans le bassin à houle et courant de Boulogne-sur-Mer (Delacroix *et al.*, 2016b). Cette méthode a permis d'observer les mécanismes d'entraînement d'air. Elle a donc été reprise et améliorée dans le cadre de ces travaux. Ce chapitre vise à présenter les outils expérimentaux utilisés pour caractériser finement le phénomène ainsi que l'écoulement autour de différentes étraves. Dans un premier temps, les moyens d'essais mis en œuvre sont présentés, à savoir le bassin, le générateur de houle et le générateur de mouvement et les différents types de carènes étudiées. L'instrumentation utilisée pour ces travaux est détaillée dans un deuxième temps. Cette instrumentation a permis de mesurer avec précision les différents paramètres agissant sur la génération des bulles, tel que la houle et les mouvements du navire, et de visualiser le bullage autour de l'étrave. Les lois physiques à respecter et les conditions d'essais à reproduire dans le bassin sont ensuite abordés, avec une attention particulière pour limiter les effets d'échelles entre les essais en bassin et le réel. Le déroulement de l'expérience ainsi que les configurations d'essais sont ensuite présentées. Enfin et en fonction de l'étude souhaitée, les différents montages expérimentaux développés sont détaillés.

2.1 Moyens d'essais

2.1.1 Bassin de circulation à houle et courant

Le bassin d'essais de Boulogne-sur-Mer est un bassin de circulation à houle et courant mesurant 18m de long, 4m de large et 2m de profondeur. Les turbines installées dans la partie inférieure du bassin permettent de générer un courant avec une vitesse entre 0.1 et 2m/s. La fenêtre d'observation du volume utile (Figure 2.2) s'étend sur 8 m de longueur et 2 m de hauteur. Elle facilite l'identification des phénomènes sous marins autour des dispositifs étudiés.

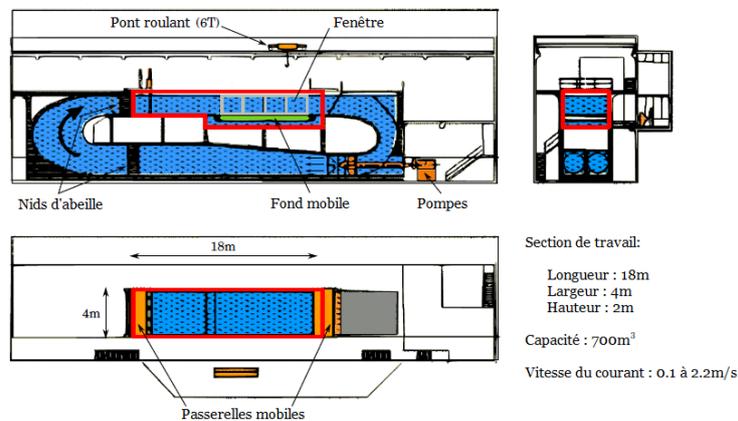


FIGURE 2.1 – Vue schématique du bassin de circulation de Boulogne-sur-Mer.

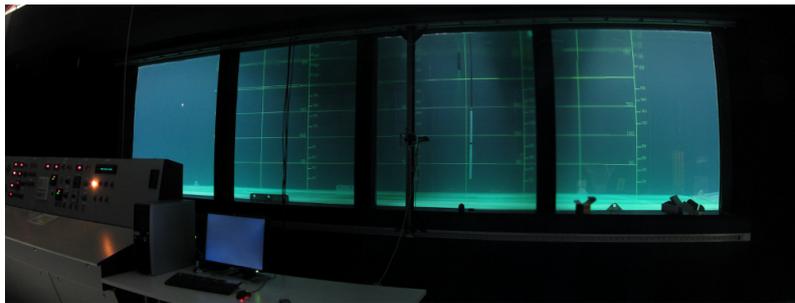


FIGURE 2.2 – Vue de la zone d'observation du bassin.

Le bassin est équipée d'un générateur de houle (figure 2.3), composé de 8 modules indépendants de 50cm de large et immergés à 50cm de profondeur. Le générateur de houle peut être positionné à l'amont ou à l'aval de la section d'essais afin de créer des houles contre ou dans le sens du courant. Une houle régulière ou irrégulière peut être générée, pouvant atteindre une amplitude maximale de 280mm et une fréquence variant entre 0.5 et 2Hz pour une vitesse de courant maximale de 0.8m/s.



FIGURE 2.3 – Vue d’une houle régulière générée contre le courant.

Lorsque le batteur est enlevé l’intensité turbulente est faible, proche de 6% en surface. Une fois le batteur positionné en amont de la section d’essai, cette intensité turbulente atteint 15%, proche des intensités turbulentes observables en mer. Ce taux de turbulence important est dû à l’interaction entre le courant et la partie immergée du générateur de houle. Cette intensité est calculée de la manière suivante :

$$IT = \sqrt{\frac{1}{3} \frac{u'^2 + v'^2 + w'^2}{\bar{u}^2 + \bar{v}^2 + \bar{w}^2}} \quad (2.1)$$

avec la décomposition de Reynolds, $u = \bar{u} + u'$, où \bar{u} est la partie moyennée en temps et u' la partie fluctuante de la vitesse u . Les trois composantes fluctuantes du champs de vitesses sont ainsi représentées par u' , v' et w' .

Contrairement aux essais dans un bassin de traction où la maquette est tractée sur une longue distance, la vitesse d’avance de la maquette est ici simulée par la vitesse du courant et les mouvements du navire sont reproduits à l’aide d’un hexapode (figure 2.4 gauche). L’hexapode permet de mettre en mouvement la maquette suivant les 6 degrés de liberté. La maquette peut ainsi être facilement positionnée suivant sa ligne de flottaison. Il n’est donc pas nécessaire de créer une réplique équilibrée en terme de déplacement ou de position du centre gravité, ce qui facilite amplement le montage expérimental. Les performances maximales de l’hexapode en terme de pilonnement sont une amplitude de $\pm 400mm$, une vitesse de déplacement de $\pm 650mm/s$ et une accélération de $\pm 8m/s^2$. En ce qui concerne le mouvement de tangage, les performances maximales correspondent à une rotation de $\pm 30^\circ$, une vitesse de $\pm 50^\circ/s$ et une accélération de $\pm 500^\circ/s^2$. Afin de limiter les perturbations engendrées par les mouvements du tableau arrière du navire (Delacroix *et al.*, 2016b),

et après vérification que la coupure de la maquette au niveau du tiers avant n'a pas d'influence sur l'écoulement autour de l'étrave, les essais sont réalisés uniquement avec le tiers avant de la maquette (figure 2.4 droite).

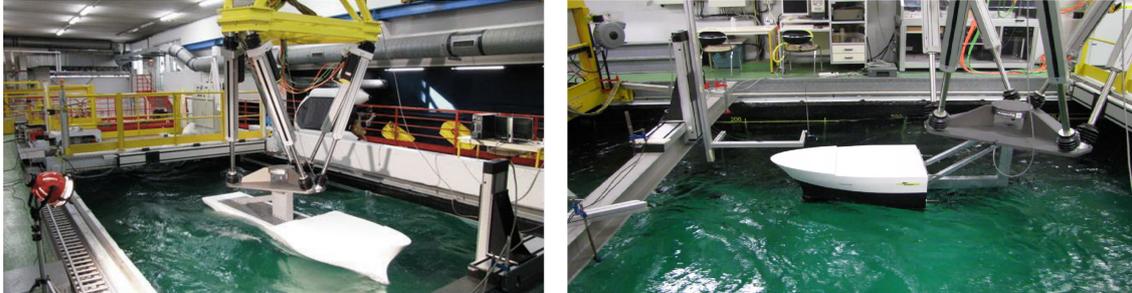


FIGURE 2.4 – Gauche : Vue du montage de la maquette et du générateur de mouvement (hexapode). Droite : Vue du tiers avant de la maquette.

2.1.2 Caractéristiques des carènes étudiées

Les essais ont été effectués avec différents modèles de navires. Le premier modèle est une étrave classique du navire de recherche océanographique *Pourquoi pas ?* ($Pp ?$) de l'Ifremer. La seconde est une forme de type étrave inversée (EI). Elle a été conçue de manière à conserver la longueur totale, la largeur et le tirant d'eau du $Pp ?$. Ce type d'étrave présente une bonne tenue à la mer. Il permet d'obtenir une longueur entre perpendiculaire supérieure, pour une même longueur hors-tout, ce qui permet une réduction de la résistance à l'avancement, et donc une diminution de la consommation de carburant. Cette forme d'étrave a surtout été retenue pour son bon comportement face à des houles importantes. Ces deux modèles sont à l'échelle 1/30. Le troisième modèle (EF) est un chalutier de pêche avec la même longueur et la même largeur que le $Pp ?$, mais avec un tirant d'eau plus grand et une étrave fine. Ce modèle correspond au navire *Thalassa* ($Thal$) à l'échelle 1/22. Cette échelle a été choisie de manière à satisfaire les deux objectifs suivants :

- étudier l'influence de la géométrie d'étrave ($Pp ?$, EI et EF) sur la génération de nuages de bulles ;
- étudier les effets d'échelles à partir de maquettes de la *Thalassa* à l'échelle 1/22 ($=EF=Thal$ 1/22) et 1/30 ($Thal$ 1/30).

La figure 3.1 présente les photos et les images CAO des carènes à partir de différents angles de vue. Les caractéristiques des modèles sont synthétisées dans le tableau 2.1.

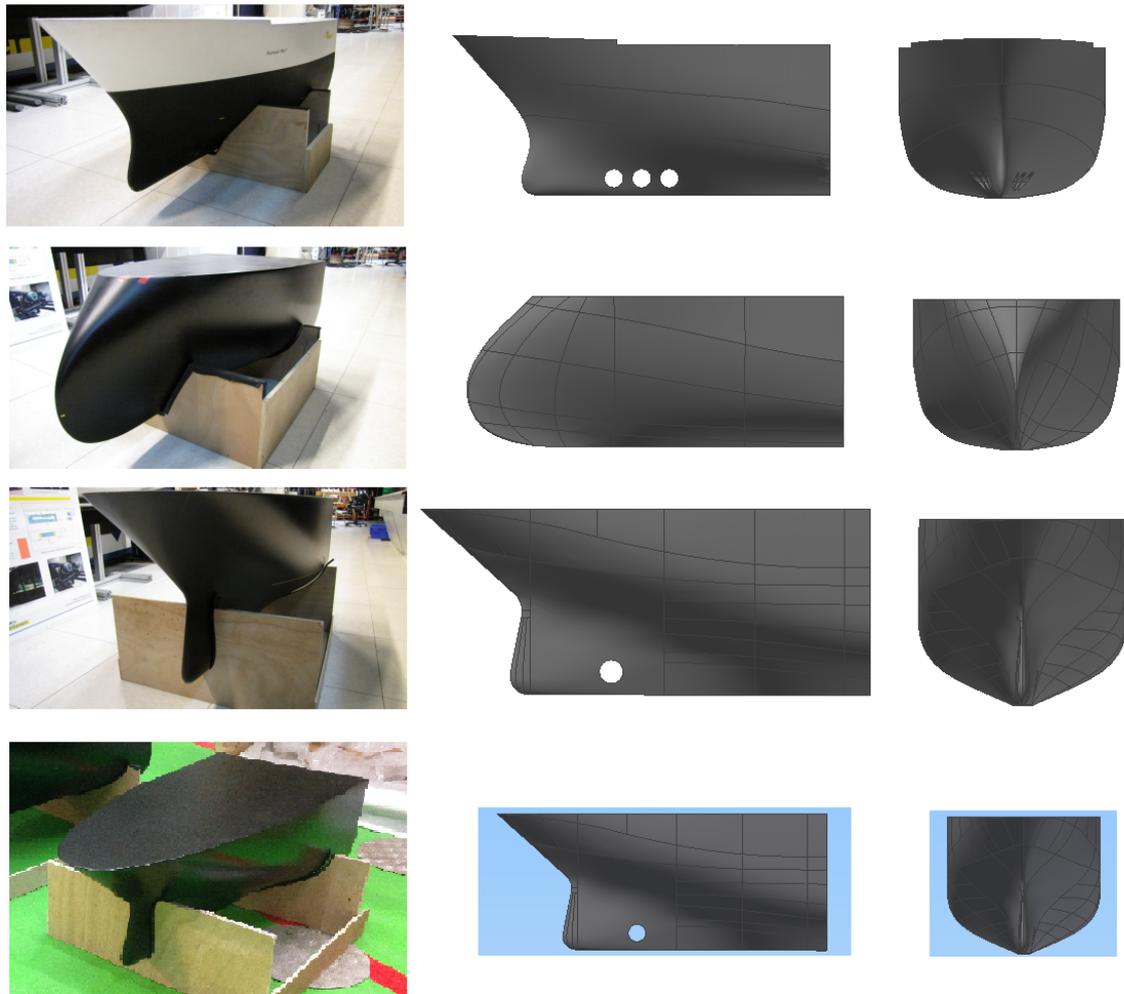


FIGURE 2.5 – De haut en bas, de gauche à droite : photos et images CAO d'une vue latérale et d'une vue de face de l'étrave classique du Pp?, de l'étrave inversée, de l'étrave fine ou de la Thalassa 1/22 et de la Thalassa 1/30.

	$Pp ? 1/1$	$Pp ? 1/30$	$EI 1/30$	EF ou $Thal 1/22$	$Thal 1/30$
Lpp (m)	94	3.13	3.13	3.13	2.223
Largeur (m)	20	0.67	0.67	0.67	0.49
Tirant d'eau (m)	5.46	0.182	0.182	0.24	0.18
C_B	0.577	0.577	0.577	0.442	0.442

TABLE 2.1 – Caractéristiques des quatre modèles d'étraves.

2.2 Instrumentation

La houle incidente, les mouvements de la maquette et l'écoulement autour de l'étrave sont les paramètres principaux du phénomène de bullage. Il est donc nécessaire de mesurer ces différents éléments avec une bonne précision. L'ensemble de l'instrumentation utilisée et décrit ci-après est synchronisé.

Sondes à houle

Afin de caractériser la houle incidente en termes d'amplitude, de longueur d'onde et de célérité, des sondes à houle de type résistive ont été utilisées. Ces sondes sont constituées de deux tiges en acier rigides et parallèles de 35cm de long, de 3mm de diamètre et espacées de 10mm. Les sondes délivrent un courant proportionnel à la hauteur d'immersion. Une calibration est nécessaire au préalable pour déterminer la réponse de chacune des sondes. Suivant les essais, une à trois sondes ont été placées entre 1 et 3 m en amont de l'étrave de la maquette. Il est à noter qu'avec l'interaction entre le courant et le batteur, la houle générée fluctue dans le temps en amplitude et diffère de la consigne émise. Différents essais ont donc été réalisés afin de connaître la bonne consigne du batteur qui permet la génération des conditions souhaitées.

Acquisition des mouvements

Un hexapode, développé par la société Symétrie, permet d'imposer tout type de mouvements avec une mesure en temps réelle des différents déplacements. La position initiale de la maquette (ligne de flottaison, assiette) est initialement réglée à l'aide d'un mode de positionnement simple. Ensuite, l'utilisation de trajectoires pré-définies permet d'imposer les mouvements à la maquette, la position du centre de gravité étant réglée manuellement. Les mouvements de la maquette sont enregistrés en temps réel à une fréquence de 100Hz à partir de mesures de déplacements des différents actionneurs (verrins électriques, pilotés par variateurs de vitesse). Les erreurs sur les déplacements (entre la consigne et le déplacement réel) sont de l'ordre de 0,1mm en translation et de 0,01° en rotation.

Mesure de l'écoulement

Afin de caractériser l'écoulement autour de l'étrave, des mesures ont été effectuées à l'aide de deux systèmes PIV (Particle Image Velocimetry). Le premier est le système PIV 2D2C et le deuxième est le système Stéréo-PIV. Ces deux systèmes permettent d'accéder respectivement aux deux et trois composantes du champs de vitesses instantanés sur une tranche de l'écoulement. Le principe de la PIV consiste à enregistrer des doublets d'images de particules, éclairées à l'aide d'un laser générant deux impulsions espacées d'un pas de temps dt (temps inter-images qui est le temps entre chaque doublet d'images) connu et à une fréquence donnée. Une caméra

synchronisée au laser est placée face au plan de mesure pour acquérir les doublets d'images. Chacune des deux images d'un doublet est découpée en un nombre de sous-fenêtres, appelées zone d'interrogation à partir desquelles le déplacement des particules dz entre les deux instants peut être déterminé par inter-corrélation des niveaux de gris. Cela permet de déduire la vitesse locale u de l'écoulement par la formule $u = S \frac{dz}{dt}$ où S est le facteur d'échelle de l'image déterminé à partir d'une calibration préalable. Le principe général de la mesure PIV 2D2C est illustré dans la figure 2.6.

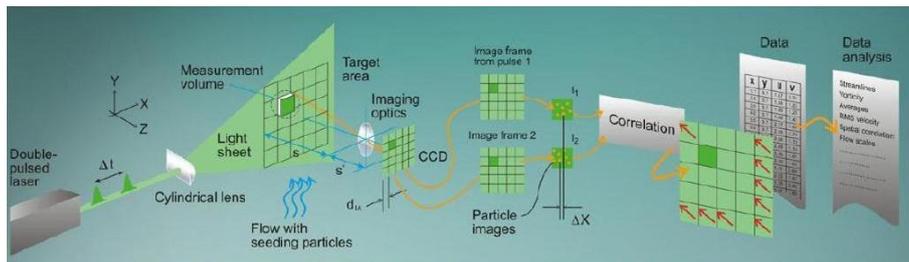


FIGURE 2.6 – Schéma de principe de la mesure PIV 2D2C (source : Dantec Dynamics)

Pour ces deux systèmes de mesure, l'écoulement estensemencé avec des particules de billes de verre argentées de diamètre $10\mu\text{m}$ et de densité proche de celles de l'eau de sorte à ne générer aucune modification au niveau de l'écoulement. Le laser utilisé fonctionne à une fréquence maximale de 15Hz (fréquence d'émission du couple d'impulsion laser). Celui-ci délivre une énergie de 200mJ, avec une longueur d'onde de 532nm. Le logiciel DynamicStudio, développé par la société DANTEC, a été utilisé pour le post-traitement. Les méthodes de corrélation croisée ("cross correlation") ou de corrélation adapté ("adaptative correlation") ont été appliquées afin d'obtenir les champs de vitesses dans les plans d'études. Les différents plans étudiés ainsi que l'analyse de l'écoulement autour de l'étrave effectuée grâce à ces deux systèmes de mesure seront présentés dans les chapitres 3 et 4.

Les caméras

Trois caméras digitales (FlowSence EO2M de $1600 * 1200\text{pixels}^2$ de résolution) ont été utilisées (figure 2.7). En fonction des protocoles expérimentaux détaillés à la fin de ce chapitre, ces caméras seront utilisées, soit pour la mesure de l'écoulement autour de l'étrave par PIV, soit tout simplement pour visualiser le phénomène de bullage. De même, les objectifs utilisés sont choisis pour chaque caméra en fonction de l'étude réalisée. Trois objectifs de 20, 25 et 60mm de focal sont utilisés. Dans la suite du manuscrit, les trois caméras seront nommées cam1, cam2 et cam3. L'enregistrement des images par les caméras est synchronisé avec celui des sondes à houle et des mouvements de la maquette.



FIGURE 2.7 – Caméras FlowSence EO2M.

2.3 Problèmes de similitude et effets d'échelles

Notre étude concerne la génération et la propagation des bulles d'air par déferlement de la vague d'étrave. Les paramètres impliqués sont donc liés à la propagation de la houle et aux mouvements du navire. Ainsi, l'étude expérimentale exige le respect de la similitude de Froude pour une bonne représentation de la surface libre. Le nombre de Froude est défini comme étant :

$$Fr = U/\sqrt{g.L_{pp}} \quad (2.2)$$

où U est la vitesse du navire, g la gravité et L_{pp} la longueur entre perpendiculaire du navire. Cependant, il est impossible de respecter les similitudes de Froude et de Reynolds en préservant les caractéristiques physiques du fluide. Le nombre de Reynolds est défini comme étant :

$$Re = U.L_{pp}/\nu \quad (2.3)$$

où ν est la viscosité cinématique. Pour une échelle de 1/30, ce nombre est largement inférieur d'un facteur 100 pour les essais en bassin comparés aux essais en mer. Les effets visqueux induits affectent principalement la couche limite très proche de la coque et peuvent retarder l'apparition d'un écoulement turbulent qui est compensé dans le bassin par une forte intensité turbulente.

Des essais spécifiques sur la carène du *Pp* ? ont été réalisés afin de quantifier l'influence d'un écoulement turbulent sur la résistance à l'avancement. Des essais similaires sur la mesure de la résistance à l'avancement dans un bassin de circulation ont été réalisés par Tamashima *et al.* (1983). Ils ont utilisé des techniques expérimentales permettant une mesure précise de la résistance à l'avancement des modèles de navires et une extrapolation des résultats à l'échelle réelle. Des mesures de couche limite ont ensuite été effectuées en proche paroi du *Pp* ?. Les résultats obtenus ont montré que cette dernière est très peu influencée par les fluctuations locales de vitesses présentes dans l'écoulement incident (Annexe B).

D'autre part, le respect de la similitude de Froude est également problématique pour la génération et la propagation des bulles dans l'écoulement. La dynamique des bulles est liée à la stabilité des forces inertielles mais également à la tension superficielle et donc au nombre de Webber qui est défini comme étant

$$We = \rho L_{pp} U^2 / \sigma \quad (2.4)$$

où ρ est la densité du fluide et σ est la tension superficielle. La tension superficielle est plus ou moins importante en fonction des caractéristiques de houle, elle-même contrôlée par les dimensions du modèle. Comme pour le nombre de Reynolds, le nombre de Webber ne peut pas être conservé (facteur 100 par rapport au réel pour une échelle de 1/30).

Enfin, la similitude de Froude impose une amplitude de houle et une vitesse d'écoulement inférieure à celle de l'échelle réelle. Par conséquent, les forces de cisaillement dans l'écoulement proche du modèle et la quantité d'entraînement d'air sous la surface sont considérablement réduites. Pour limiter autant que possible les effets d'échelle, le modèle choisi est aussi large que possible en fonction des caractéristiques du bassin (espace latéral, génération de houles et de courant). Un résumé des caractéristiques de l'écoulement au réel et pour les essais en bassin est illustré dans le tableau 2.2.

	$L_{pp}(m)$	$V(m/s)$	Fr	Re	We
$Pp ?$, EI , EF (réel)	94	4,12	0,203	$3,4 \cdot 10^8$	$2,2 \cdot 10^7$
$Pp ?$, EI , EF (1/30)	3,13	0,75	0,203	$2,1 \cdot 10^6$	$2,4 \cdot 10^4$
<i>Thal</i> (réel)	66,7	4,11	0.16	$2,7 \cdot 10^8$	$1,5 \cdot 10^7$
<i>Thal</i> (1/30)	2.223	0.75	0.16	$1,6 \cdot 10^6$	$1,7 \cdot 10^4$
<i>Thal</i> (1/22)	3.03	0.87	0.16	$2,6 \cdot 10^6$	$3,2 \cdot 10^4$

TABLE 2.2 – Résumé des caractéristiques de l'écoulement au réel et pour les essais en bassin.

L'influence des effets d'échelles sur les conditions d'apparition et la dynamique des nuages de bulles, a été étudiée sur l'étrave de la *Thalassa* à l'échelle 1/22 et 1/30. Les résultats sont présentés en annexe A. Ils ont montré que les nuages de bulles autour de la *Thalassa* 1/22 et 1/30 se comportent de la même manière pour la configuration sans mouvements du navire. Dès que le mouvement du navire est pris en compte, une légère augmentation des propriétés physiques adimensionnées du nuage de bulle (aire, profondeur, vitesse verticale) autour de la *Thalassa* 1/30 est observée.

2.4 Conditions et paramètres d'essais

Les essais consistent à reproduire les conditions de navigation et l'état de mer rencontrés pendant les essais en mer ESSBULLES 2006. Durant cette campagne en mer, le phénomène de *Bubble Sweep-down* a été observé en mer de face pour une vitesse de 8 nœuds, une longueur d'onde de 109m, une hauteur significative de vague $H_s=2.8\text{m}$ et une période de houle $T=8.4\text{s}$ (voir tableau 2.3).

$V(nds)$	$\lambda(m)$	$H_s(m)$	$T_p(s)$
8	109	2.8	8.4

TABLE 2.3 – Conditions de navigation durant la campagne Essbulles.

L'étude expérimentale du phénomène de *Bubble Sweep-down* consiste à reproduire ces conditions dans le bassin. Les mouvements du modèle sont imposés par l'hexapode et synchronisés avec la houle incidente. Ainsi, il est nécessaire de travailler avec une houle régulière. La conservation de la densité d'énergie de la houle irrégulière nous permet de calculer les caractéristiques de la houle régulière dans le bassin.

La densité d'énergie d'une houle irrégulière en mer est définie comme étant :

$$E = \rho g m_0 [J/m^2], \text{ avec } H_s = 4\sqrt{m_0} \quad (2.5)$$

Pour une houle sinusoïdale,

$$E = \frac{1}{2}\rho g A^2, \text{ où } A \text{ est l'amplitude } (A = H/2). \quad (2.6)$$

Afin de conserver la densité d'énergie, A doit satisfaire :

$$m_0 = \frac{1}{2}A^2 \quad (2.7)$$

$$\text{soit } A = \frac{\sqrt{2}H_s}{4} \text{ et } H = \frac{\sqrt{2}H_s}{2} \quad (2.8)$$

Pour $H_s = 2,8\text{m}$, la hauteur de la houle sinusoïdale est $H = 2\text{m}$. Les données d'entrée sont le courant, l'amplitude et la fréquence de la houle. Ces données sont directement obtenus par la similitude de Froude. La vitesse du courant est $U = V/\sqrt{\text{échelle}}$ et l'amplitude de la houle est $A_m = A_r/\text{échelle}$ avec A_m l'amplitude de la houle pour le modèle et A_r celle du réel. Le fait que le modèle soit fixe impose de considérer une fréquence de rencontre supérieure à celle de la houle.

La fréquence de rencontre f_e est calculée comme :

$$f_e = f - \frac{V}{\lambda}\cos(\theta) \quad (2.9)$$

avec $\theta = 0^\circ$ par mer d'arrière et 180° par mer de face. Pour notre configuration :

$$f_e = f + \frac{V}{\lambda} \quad (2.10)$$

On obtient $f_e = 0.85 Hz$. Les paramètres d'essais (caractéristiques de houle et de courant) sont présentés aux échelles 1/30 et 1/22 dans le tableau 2.4.

	U (m/s)	A (mm)	f_e (Hz)
échelle 1/30	0.75	33	0.85
échelle 1/22	0.87	45	0.73

TABLE 2.4 – Paramètres d'essais (houle et courant) aux échelles 1/22 et 1/30.

Le logiciel FREDYN développé chez MARIN (Maritime Research Institute Netherland) a été utilisé pour réaliser des simulations numériques afin de déterminer les mouvements du navire pour les conditions d'essai à l'échelle réelle. Le modèle numérique est défini à partir de la géométrie, la résistance à l'avancement et les caractéristiques des propulseurs et des safrans. Les entrées de calcul sont ensuite définies : vitesse de rotation des propulseurs, direction et spectre de houle. Les calculs sont réalisés dans le domaine temporel grâce à la résolution des six équations différentielles couplées de mouvement. Une intégration des accélérations permet d'obtenir les vitesses du navire, puis une seconde intégration mène à la position du navire à chaque pas de temps. Après une phase de validation (à partir de résultats d'essais en bassin de carènes), les mouvements du navire sont calculés pour les conditions d'essai à l'échelle réelle. Ces résultats sont ensuite convertis à l'échelle 1/30 et 1/22 suivant le modèle utilisé en respectant la similitude de Froude ($\times 1$ pour le tangage, $\times 1/30$ pour le pilonnement et $\times 1/\sqrt{30}$ pour le temps). Les mouvements du Pourquoi pas? (*Pp?*), de l'étrave inversée (*EI*) et de l'étrave fine (*EF*) ainsi calculés sont synthétisés dans le tableau 2.5.

	<i>Pp?</i> (1/30)	<i>EI</i> (1/30)	<i>EF</i> (1/30)	<i>Thal</i> 1/22	<i>Thal</i> 1/30
Pilonn (mm)	20	20	20	39	29
Tang ($^\circ$)	2	2	2	3.5	3.5

TABLE 2.5 – Mouvements imposés selon la carène étudiée.

2.5 Déroulement de l'expérience et configurations d'essais

Cette expérience a été développée dans le cadre de la thèse de S. Delacroix (Delacroix *et al.*, 2016b). La méthode consiste à synchroniser les mouvements de la

maquette avec la houle incidente. Pour cela une procédure de démarrage spécifique a été mise en place (voir le schéma de la figure 2.8).

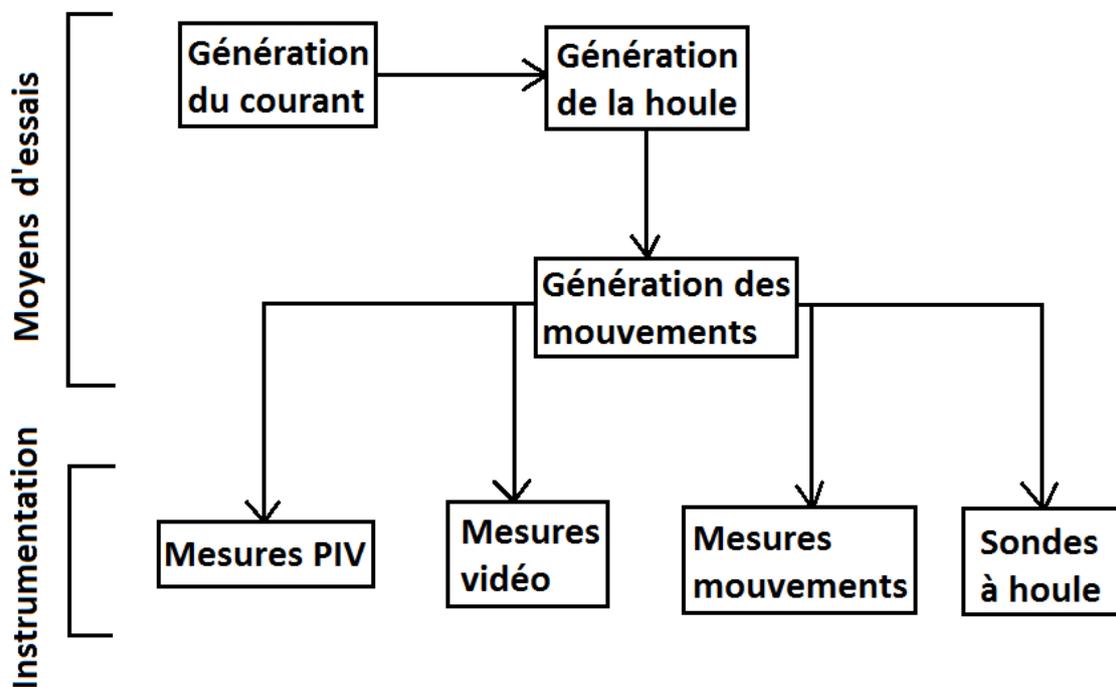


FIGURE 2.8 – Diagramme du système de synchronisation de la méthode expérimentale.

Dès que le courant est stabilisé, l'utilisateur démarre la séquence du générateur de houle, ce qui génère l'envoi d'un signal de front montant permettant de déclencher le départ de la séquence de l'hexapode. Au début de cette séquence, un temps d'attente est inséré, correspondant au temps de propagation de la houle jusqu'au modèle. Le déphasage entre la houle et les mouvements est alors ajusté en faisant varier ce temps d'attente. Le démarrage de la séquence de l'hexapode génère également l'envoi d'un signal de front montant permettant le démarrage simultané de tous les systèmes de mesures (système PIV, caméras, système d'acquisition des mouvements de l'hexapode, sondes à houle).

La synchronisation est vérifiée a posteriori à partir des enregistrements de houle et de mouvement, comme le montre la figure 2.9 où le pilonnement est en phase avec le signal de houle. L'élévation de la surface libre au niveau du centre de gravité du modèle est obtenue à partir des mesures de la sonde à houle placée 1 m en amont de l'étrave, en prenant en compte la célérité de la houle.

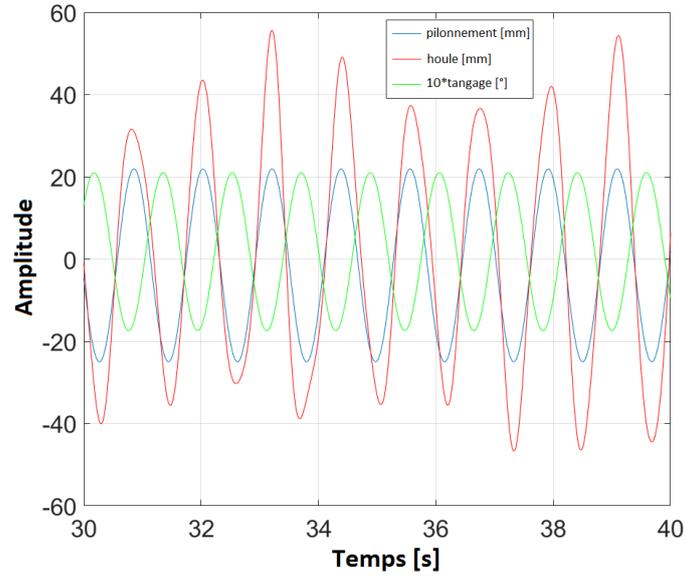


FIGURE 2.9 – Synchronisation entre pilonnement et houle.

Afin de mettre en évidence les phénomènes physiques qui conduisent au phénomène de *Bubble Sweep-down*, quatre configurations de bases ont été considérées pour appréhender l'influence de chaque paramètre (courant, houle et mouvements du navire) sur le phénomène. Le tableau 2.6 présente les caractéristiques de chaque configuration testée : courant seul (vitesse $U = 0,75$ m/s), avec houle régulière (33 mm d'amplitude et $f_0 = 0.85$ Hz de fréquence), avec mouvements forcés (2° tangage et 20 mm pilonnement à 0.85 Hz). A noter que pour la quatrième configuration, où le modèle est soumis au courant avec mouvements du navire imposés en présence de houle, les mouvements sont synchronisés avec la houle.

Configuration	Courant ($U = 0.75$ m/s)	Houle régulière ($H=33$ mm ; $f=0.85$ Hz)	Mouvements du navire (20mm, 2° , $f=0.85$ Hz)
1	X	-	-
2	X	X	-
3	X	-	X
4	X	X	X

TABLE 2.6 – Caractéristiques des configurations d'essais.

2.6 Protocoles expérimentaux

Différents protocoles expérimentaux ont été utilisés pour caractériser finement le phénomène de *Bubble Sweep-down* autour de l'étrave. Cette section est consacrée à la présentation des montages expérimentaux utilisés pour les différentes études réalisées durant ces travaux de thèse. Tout d'abord, le montage expérimental mis en œuvre pour l'étude 2D du phénomène de bullage comprenant des mesures PIV 2D2C est présenté. Ensuite, le dispositif expérimental développé pour l'étude 3D du phénomène comprenant des mesures Stéréo-PIV est détaillé. Enfin, le montage expérimental utilisé pour étudier spécifiquement le phénomène à partir de la mesure des bulles par une sonde optique est présenté.

2.6.1 Etude 2D du phénomène

L'étude 2D du phénomène de bullage est réalisée en deux temps. Une caméra munie d'un objectif de focale 60mm positionnée derrière la fenêtre d'observation permet de visualiser le phénomène autour de la maquette. Une nappe laser de 5mm d'épaisseur (de 120mJ uniquement à cette époque) est utilisée uniquement comme source d'éclairage afin de bien visualiser les bulles.

Pour compléter la caractérisation qualitative du phénomène, l'écoulement est quantifié à l'aide de mesure PIV 2D2C dans différents plans situés autour de l'étrave. Le plan laser est vertical durant cette étude (figure 2.10). La distance entre la caméra et le plan laser est de 2.2m. Le montage expérimental de l'étude 2D du phénomène de bullage est présenté sur le schéma de la figure 2.11. La nappe laser est émise dans l'eau avec un faible intervalle de temps $t = 1200 \mu s$, correspondant au temps entre les doublets d'images PIV. La caméra enregistre les doublets d'images à une fréquence de 8,5Hz afin d'obtenir 10 champs de vitesse instantanés par période de houle. Les champs de vitesse instantanés ont été obtenus à l'aide d'un algorithme adaptatif PIV avec une aire d'interrogation de $32 * 32 pixels^2$ et un recouvrement horizontal et vertical de 25%. Les composantes de vitesse longitudinales (direction x) et verticales (direction z) sont alors disponibles sur un plan 2D de $(n_x \times n_z) = (66 \times 49)$ points avec une discrétisation spatiale de 8mm dans chaque direction. Les dimensions physiques du plan PIV sont de $528 * 396 mm^2$. Les principaux paramètres PIV sont rappelés dans le tableau 3.2. En fonction des paramètres de calibration et du choix de l'algorithme PIV sur Dynamic Studio, on se retrouve avec une incertitude de mesure sur la vitesse qui est de l'ordre de $\pm 5\%$ et qui est calculée à l'aide de la méthode GUM (Guide to the expression of Uncertainty in Measurement).

2.6. PROTOCOLES EXPÉRIMENTAUX

Paramètres	Configurations
Dimensions physiques (plan PIV)	$528.1 \times 396.1 \text{mm}^2$
Nombre de points de la grille	$(n_x, n_z) = (66, 49)$
Discrétisation spatiale	$dx = dz = 8 \text{mm}$
Discrétisation en pixel	$dpx = dpz = 0.33 \text{mm}$
Fréquence d'échantillonnage f_e (Hz)	8.5
Nombre de doublets d'images PIV	1530

TABLE 2.7 – Les principaux paramètres des mesures PIV dans les plans $y=0\text{mm}$ et $y=100\text{mm}$.

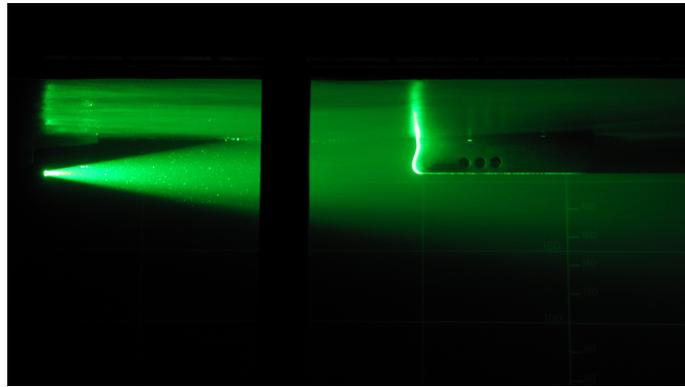


FIGURE 2.10 – Vue de la nappe laser verticale dans l'axe de la maquette.

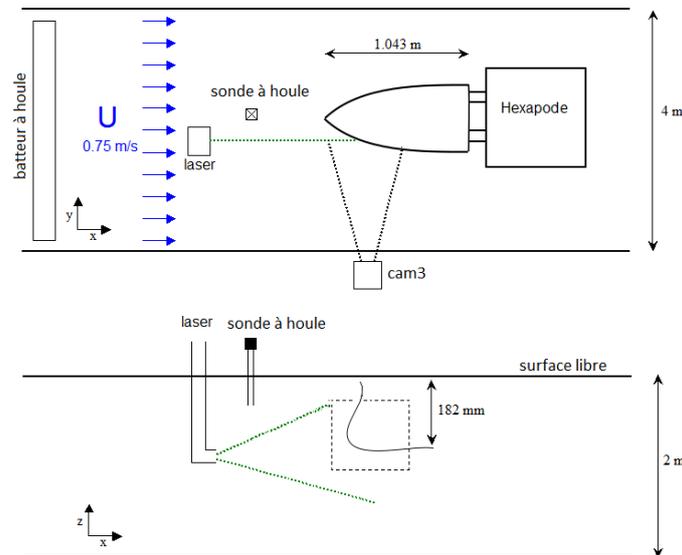


FIGURE 2.11 – Schéma du montage expérimental de l'étude 2D.

2.6.2 Etude 3D du phénomène

En complément de l'étude 2D, une étude 3D a été développée afin de caractériser plus précisément le phénomène de *Bubble Sweep-down*. Pour se faire, deux caméras ont été placées autour de l'étrave en plus de la caméra installée derrière la fenêtre d'observation (utilisée pour l'étude 2D). Le gain par rapport à l'étude 2D est l'identification de la position des bulles en profondeur du champ, ce qui permet de reconstruire les nuages de bulles dans les trois dimensions de l'espace. De plus, l'énergie d'impulsion de 200mJ de la nappe laser a permis d'obtenir un contraste suffisant pour la caméra au fond du bassin, permettant une visualisation simultanée du phénomène dans le plan horizontal et vertical. Ce contraste était inatteignable avec une énergie d'impulsion de 120mJ utilisée précédemment pour l'étude 2D.

L'étude 3D est divisée en deux parties. La première est la visualisation 3D des nuages de bulles et la deuxième est la mesure de l'écoulement dans l'axe de symétrie de l'étrave à l'aide d'un système Stéréo-PIV.

Visualisation 3D

La nappe laser est horizontale dans ce montage. Elle est positionnée à 230mm sous la surface libre. Trois caméras sont utilisées pour visualiser le phénomène de bullage autour de la maquette (voir figure 2.12) :

- cam1 (objectif focale de 20mm) installée dans un caisson étanche au fond du bassin pour visualiser les bulles dans un plan horizontal. La distance entre le capteur CCD de la cam1 et la surface libre est de 1740mm. Les dimensions physiques du plan de mesure de la cam1 sont de $621 * 461mm^2$;
- cam2 (objectif focale de 25mm) installée au dessus de la surface libre pour visualiser le deferlement de la vague d'étrave. Les dimensions physiques du plan de mesure de la cam2 sont de $512 * 384mm^2$;
- cam3 (objectif focale de 60mm) placée à l'extérieur du bassin devant la fenêtre d'observation pour visualiser les bulles dans un plan vertical. La distance entre la cam3 et l'axe central de la veine est d'environ 2m. Les dimensions physiques du plan de mesure de la cam3 sont de $635 * 476mm^2$.

Le montage expérimental de la visualisation 3D est présenté dans le schéma de la figure 2.13.

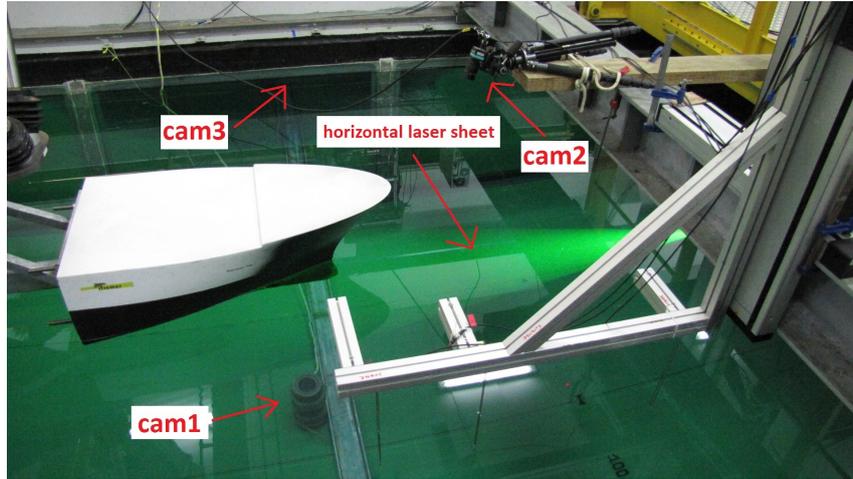


FIGURE 2.12 – Vue de du montage expérimental pour la visualisation 3D.

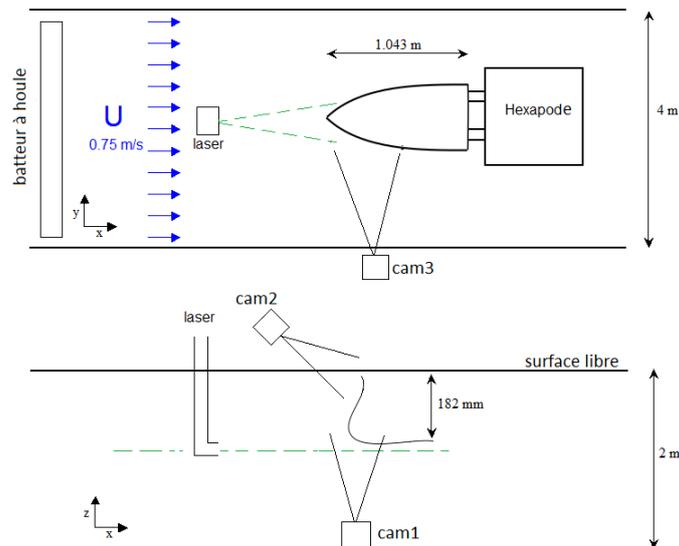


FIGURE 2.13 – Schéma du montage expérimental pour la visualisation 3D.

Stéréo-PIV

Des mesures Stéréo-PIV ont été réalisées dans le plan correspondant à l'axe de symétrie de la maquette du Pp ?. Le système Stereo-PIV (figure 2.15) est composé d'une nappe laser verticale et de deux caméras, cam1 et cam2 (objectif focale de 60 mm chacune) qui vont servir pour la mesure de l'écoulement dans les 3 dimensions de l'espace autour de la maquette. La distance entre les deux caméras est de 1440mm et la distance entre les caméras et la nappe laser verticale est de 2,5m. Les cam1 et cam2 sont orientés d'un angle de 16° et 17° respectivement (voir schéma de la

figure 2.14). La précision de l'évaluation de la composante transversale de la vitesse est liée à l'étalonnage requis par l'installation d'un support Scheimpflug utilisé lors de ces essais (figure 2.16). L'étalonnage a été effectué avec une mire 2D (voir la figure 2.17) positionnée à différents endroits dans le plan vertical à $y = \{-4; -2; 0; 2; 4\}$.

Les mesures ont été réalisées pendant 5 minutes. La taille des images est de $500.7 \times 358.4 \text{ mm}^2$. Les champs de vitesse instantanée ont été obtenus en utilisant la méthode de corrélation croisée "Cross Correlation" avec une taille de fenêtre d'interrogation de $99 \times 74 \text{ pixels}^2$ suivi d'une UOD (Universal Outlier Detection). Les composantes de vitesse longitudinales (direction x) et verticales (direction z) sont ensuite disponibles sur un plan 2D de $(n_x \times n_z) = (93 \times 69)$ points avec une discrétisation spatiale de 5mm dans chaque direction. L'erreur moyenne de calibration est de $1.8 \times 10^{-1} \text{ pixels}$. Les paramètres Stereo-PIV sont présentés dans le tableau 2.8. Le montage expérimental des mesures Stéréo-PIV est présenté dans le schéma de la figure 2.18.

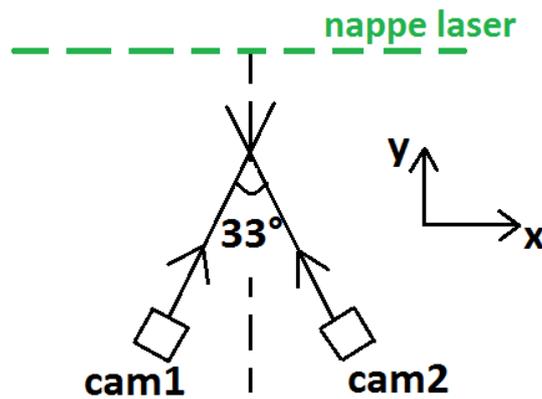


FIGURE 2.14 – Orientation des caméras pour la mesure Stéréo-PIV.

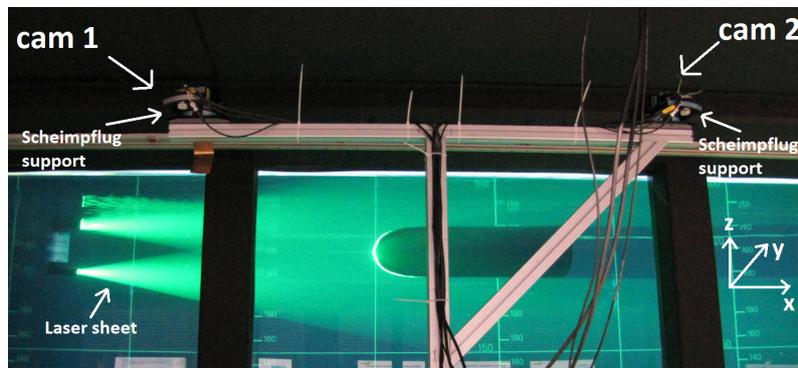


FIGURE 2.15 – Présentation du système Stéréo-PIV.



FIGURE 2.16 – Présentation de la caméra montée sur le support de Scheimpflug.

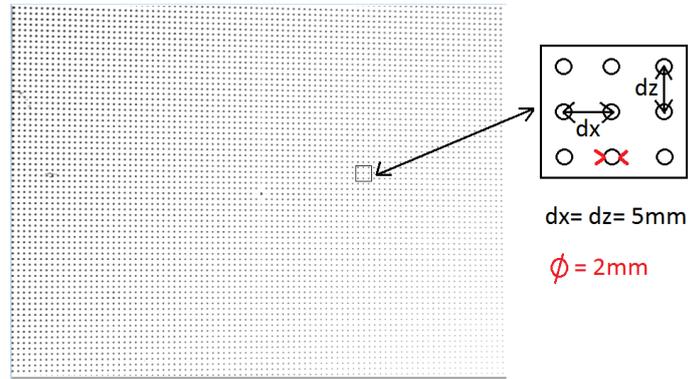


FIGURE 2.17 – Mire 2D pour la calibration des caméras.

Paramètres	Configurations
Dimensions physiques (plan Stereo-PIV)	$500.7 \times 358.4 \text{mm}^2$
Nombre de points dans le plan	$(n_x, n_z) = (93, 69)$
Discrétisation spatiale	$dx = dz = 5 \text{mm}$
Discrétisation en pixel	$dpx = dpz = 0.31 \text{mm}$
Discrétisation spatiale et en pixel	$dx \approx 16dpx$
Erreur moyenne de calibration	$1.8 * 10^{-1} \text{pixels}$
Fréquence d'échantillonnage f_e (Hz)	8.5
Nombre de doublets d'images	2550

TABLE 2.8 – Les paramètres de la Stéréo-PIV.

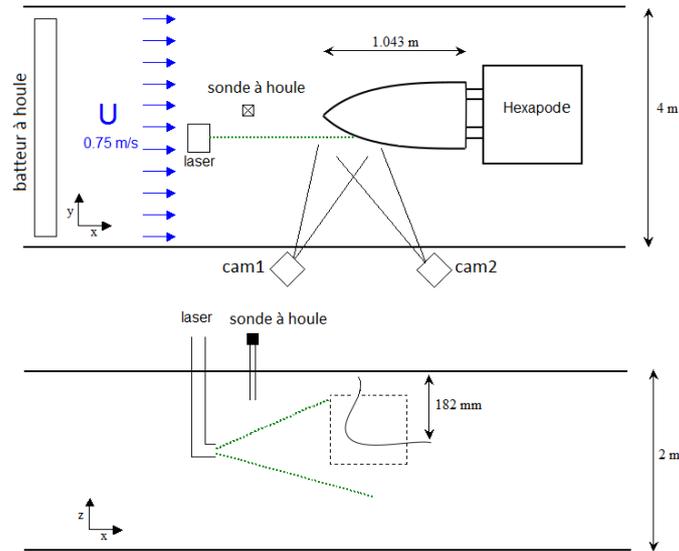


FIGURE 2.18 – Schéma du montage expérimental pour la visualisation 3D.

2.6.3 Mesure de bulles par sonde optique

Une sonde optique à double fibre et un module optoélectronique fabriqués par RBI-Instrumentation ont été utilisés pour mesurer ponctuellement le taux de vide dans l'écoulement. À partir de ces mesures, il est possible de déterminer la vitesse des bulles et leur distribution en taille (Makiharju *et al.*, 2013). La sonde comprend deux pointes de saphir de 30 microns, séparées dans le sens du courant d'une distance de 1,15mm (figure 2.19). Le module optoélectronique permet d'émettre un faisceau infra-rouge dans les fibres de la sonde, détecter les signaux réfléchis et les transformer en niveaux de tension. En raison de la différence d'indice de réfraction entre l'eau et l'air, l'intensité réfléchie sur le module optoélectronique varie selon que la pointe est immergée dans l'eau (0 Volt) ou dans l'air (5 Volt). La sonde a été étalonné en tenant compte de ces 2 valeurs.

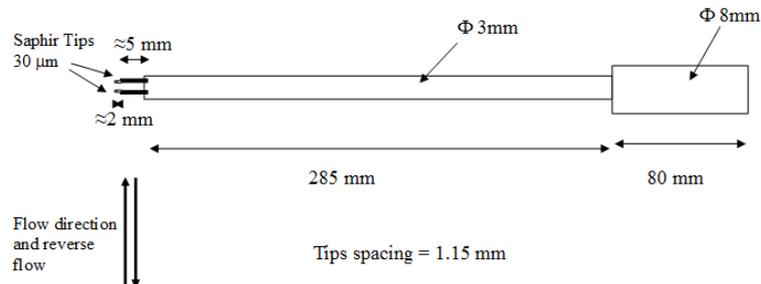


FIGURE 2.19 – La sonde optique à double fibre. Les pointes s'étendent à 5mm de leurs supports. Les tiges principales de la sonde ont un diamètre de 3mm.

2.6. PROTOCOLES EXPÉRIMENTAUX

Pendant ces essais, deux caméras ont été utilisées pour visualiser le phénomène de bullage autour de la carène de manière à identifier les bulles détectées par la sonde. La première caméra (cam1) est installée au fond du bassin et la deuxième caméra (cam2) est installée derrière la vitre du bassin (figure 2.20). Les 2 caméras sont synchronisées avec une fréquence de 20Hz.

Dans un premier temps, les mesures ont été réalisées avec une nappe laser horizontale au dessous de la carène, ce qui nous a permis de bien visualiser les bulles au niveau des pointes de la sonde. Cependant, le signal sur l'oscilloscope est bruité et on aperçoit des pics dus à la lumière très intense émise par le laser et non pas suite à une détection de bulle. Nous avons essayé de diminuer la puissance du laser mais le problème persiste. Nous avons donc démonté le laser et monter un projecteur derrière la vitre pour éclairer la zone autour de la maquette (voir figure 2.20 droite). Les bulles sont beaucoup moins nettes avec le projecteur et sans le laser mais les pics sur le signal de l'oscilloscope correspondent bien à des détections de bulles. Une sonde à houle positionnée à 3m en amont de la carène permet de déterminer l'amplitude de la houle pendant toute la durée de l'acquisition.

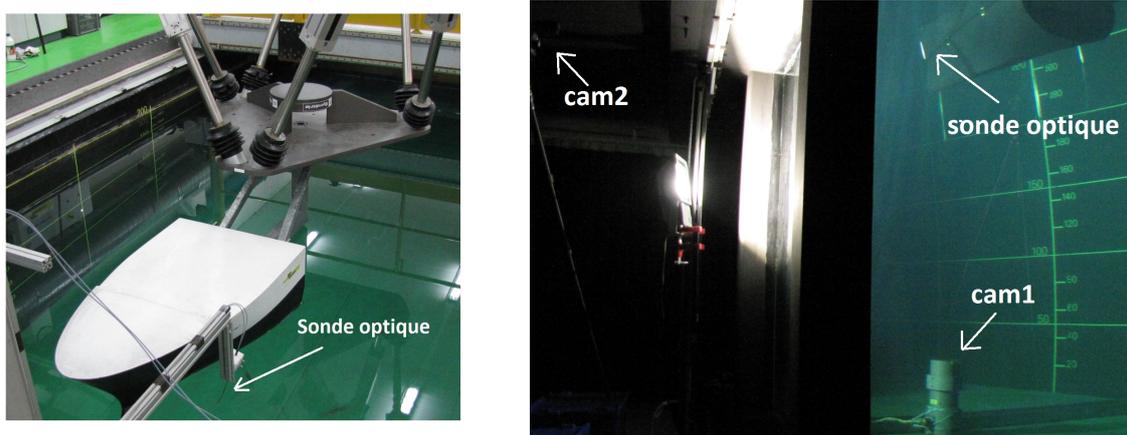
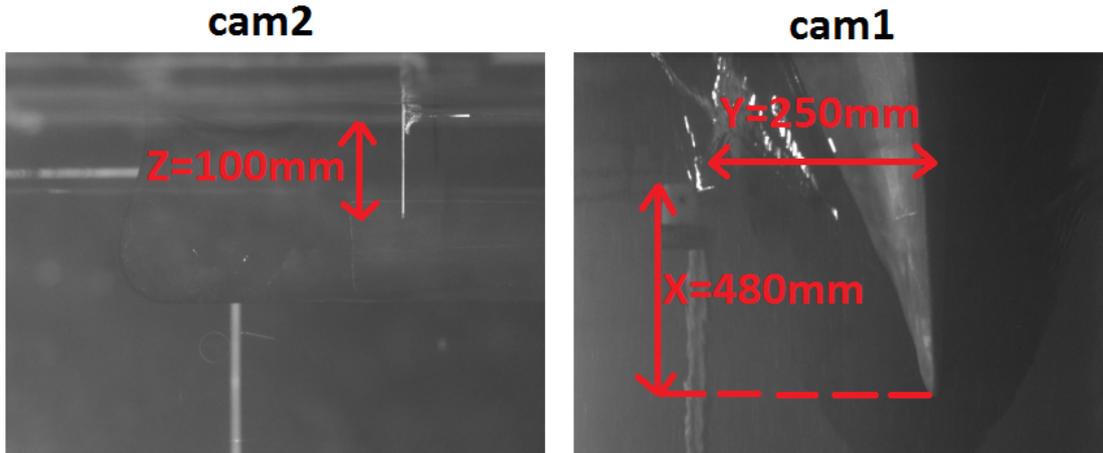


FIGURE 2.20 – Montage expérimental de l'étude de mesure de bulles à l'aide d'une sonde optique.

La sonde optique a été positionnée à une profondeur de 100mm (tirant d'eau du Pp ? de 182mm). La distance entre l'axe de symétrie de la maquette et la sonde est $Y=250\text{mm}$ et la distance entre la pointe de l'étrave et la sonde est $X=480\text{mm}$ (voir figure 2.21). La sonde est positionnée verticalement avec une inclinaison de 20° avec l'axe verticale et les pointes sont orientées l'une derrière l'autre selon l'axe X (sens du courant). Les mesures ont été réalisées avec une durée d'acquisition de 1 heure pour une fréquence de $f_e = 10\text{KHz}$.

FIGURE 2.21 – Position de la sonde optique autour de la maquette du Pp ?.

Une sonde à houle positionnée à 3m en amont de la carène permet de déterminer l'amplitude de la houle pendant toute l'acquisition. L'interaction entre le batteur à houle et le courant est l'origine d'apparition de grandes fluctuations d'amplitudes de houles (figure 2.22). On note une amplitude moyenne de 40.7mm avec un écart type de 12.7mm. Une synchronisation des mouvements de la maquette avec la houle incidente au niveau du centre de gravité de la maquette est nécessaire. Le synchronisme est vérifié à posteriori à partir des enregistrements de houle et de mouvements du navire.

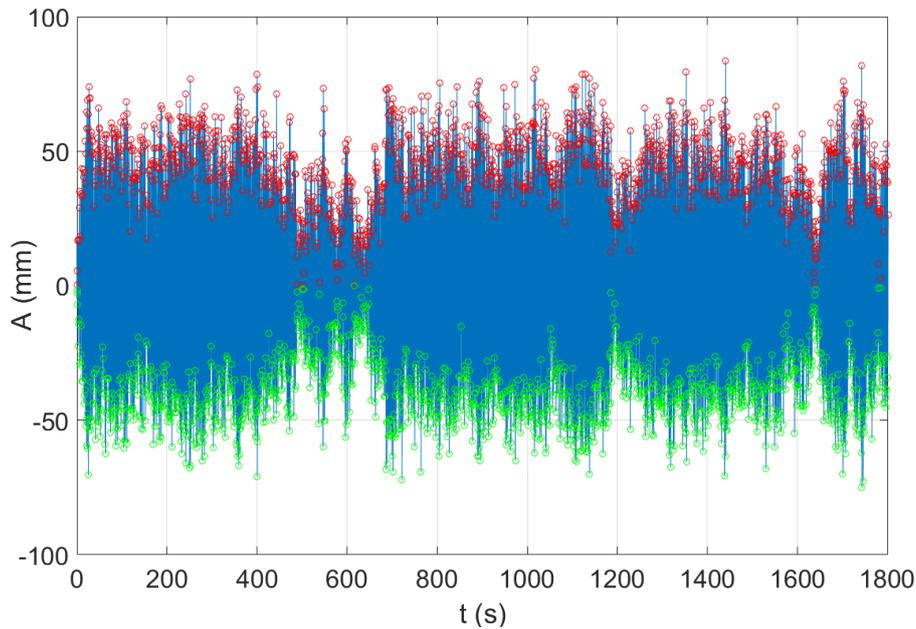


FIGURE 2.22 – Signal de houle pendant les premières 30 minutes.

2.7. CONCLUSION

Le montage expérimental de l'étude de mesure des bulles à l'aide d'une sonde optique est présenté dans le schéma 2.23.

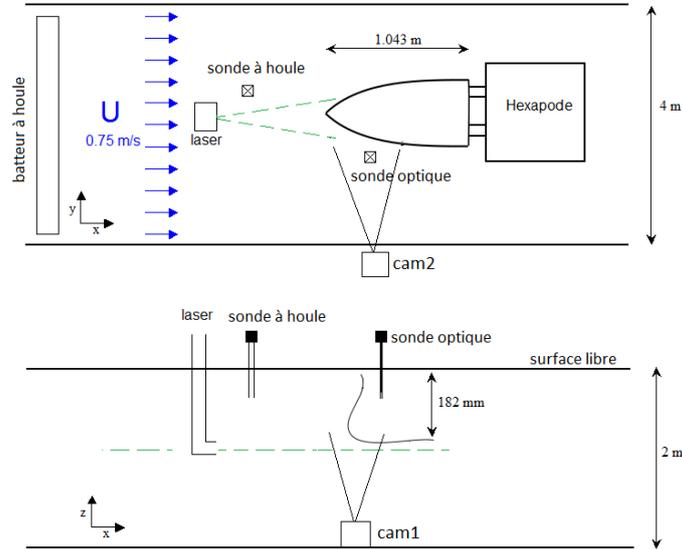


FIGURE 2.23 – Schéma du montage expérimental de l'étude de mesure de bulles à l'aide d'une sonde optique.

2.7 Conclusion

Ce chapitre a permis de présenter la mise en place des essais dans le bassin de circulation à houles et courant, en décrivant les moyens mis en oeuvre, l'instrumentation utilisée et la méthodologie pour reproduire les configurations d'essais. Une discussion sur les effets d'échelle, dus à une différence importante des nombres de Reynolds et de Weber entre les essais en bassin et le réel, a été présentée. Enfin le protocole expérimental réalisé pour chaque étude a été détaillé.

Chapitre 3

Influence de la géométrie de l'étrave sur le bullage

Sommaire

3.1	Les trois modèles d'étrave	54
3.2	Caractérisation des nuages de bulles	55
	3.2.1 Fréquence d'occurrence des nuages de bulles	56
	3.2.2 Dynamique des nuages de bulles	57
3.3	Caractérisation de l'écoulement	65
	3.3.1 Traitement des données PIV	65
	3.3.2 Analyse de l'écoulement	80
3.4	Conclusion	87

Les études précédentes effectuées au cours de la thèse de Delacroix (2015) ont montré que le bassin de circulation à houle et courant est bien adapté pour étudier le phénomène de *Bubble Sweep-down* sur une maquette à l'échelle 1/30 du *Pourquoi pas ? (Pp ?)*. Après la caractérisation des conditions d'apparition du phénomène et l'observation des mécanismes d'entraînement d'air, le phénomène a été caractérisé. La dynamique des nuages de bulles a été analysée afin de mieux comprendre le comportement des nuages de bulles autour de la maquette. Une étude paramétrique a été réalisée pour étudier l'influence de chaque paramètre d'essai (courant, houle, mouvements du navire) sur la génération des nuages de bulles. L'écoulement autour de l'étrave a été caractérisé pour établir un lien entre la génération des bulles et la dynamique de l'écoulement. Il a été montré que la fréquence d'apparition des nuages de bulles est directement proportionnelle à la hauteur de la houle qui joue un rôle important sur les vitesses ascendantes en contact de l'étrave du *Pp ?*.

Afin d'étudier l'influence de la géométrie d'étrave sur la génération des nuages de bulles, nous proposons dans ce chapitre de caractériser le phénomène de *Bubble Sweep-down* autour de trois modèles de navires aux géométries d'étraves différentes. Dans un premier temps, les trois modèles d'étraves sont rappelés. La deuxième partie est consacrée au calcul de la fréquence d'occurrence des nuages de bulles autour des trois étraves pour les quatre configurations de base. Ensuite, la dynamique des nuages de bulles en terme de surface, de profondeur et de vitesse verticale est analysée autour des trois modèles pour les différentes configurations. La partie finale de ce chapitre se concentre sur la caractérisation de l'écoulement autour du *Pp ?* et d'une étrave de type étrave inversée. Des mesures PIV (Particle Image Velocimetry) et des analyses par Décomposition Orthogonale aux valeurs Propres (POD) ont été réalisées pour établir une relation entre l'écoulement autour de l'étrave et la génération des nuages de bulles mais également de leur propagation.

3.1 Les trois modèles d'étrave

Les essais ont été effectués sur trois modèles de navires à l'échelle 1/30 pour étudier l'effet de la géométrie de l'étrave sur le phénomène de bullage. Le premier modèle est le *Pp ?*. Le deuxième est une forme de type étrave inversée (*EI*). Elle a été conçue de manière à conserver la longueur totale, la largeur et le tirant d'eau du *Pp ?*. Le troisième modèle (*EF*) est un chalutier de pêche avec la même longueur et la même largeur que le *Pp ?*, mais avec un tirant d'eau plus grand. Nous rappelons que pour les trois modèles, la longueur entre perpendiculaires est de 3,13m et la largeur est de 0,67m. L'étrave classique du *Pp ?* et l'*EI* possèdent un tirant d'eau de 0.182m et un coefficient de bloc C_B de 0.577, alors que le tirant d'eau de l'étrave fine est de 0.24m et son coefficient de bloc est de 0.442.

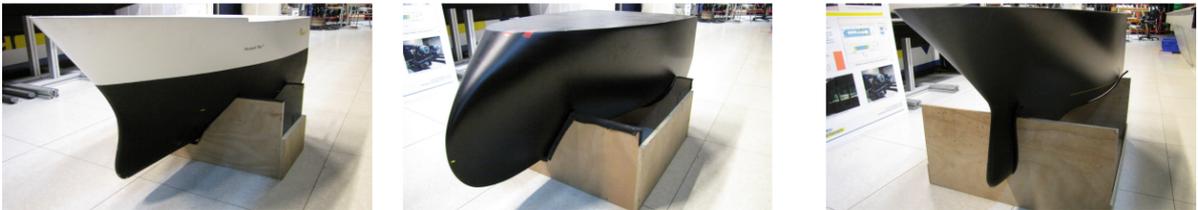


FIGURE 3.1 – De gauche à droite : photos de l'étrave classique du *Pp ?*, de l'*EI* et de l'*EF*.

3.2 Caractérisation des nuages de bulles

Le montage expérimental utilisé dans ce chapitre est présenté dans la partie 2.5.1. Une seule caméra placée derrière la fenêtre d'observation permet d'étudier en 2D le phénomène. Grâce aux quatre configurations d'essais résumées dans le tableau 2.6 du chapitre 2, deux mécanismes d'entraînement d'air ont été observés autour des trois étraves. Le premier est l'entraînement d'air par détachement tourbillonnaire. Ce mécanisme est dû suite à l'interaction entre l'écoulement incident et l'étrave qui génère une déformation de la surface libre, créant une cavité d'air en proche paroi (voir figure 3.2). Ensuite, l'instabilité de ce phénomène entraîne de l'air par détachement tourbillonnaire, provoquant la génération d'un nuage de bulles. Ce mécanisme est observé dans toutes les configurations d'essais et sur les différents types de carènes. La cavité et l'entraînement d'air sont plus ou moins importants selon l'interaction de l'écoulement turbulent avec l'étrave.

Le deuxième mécanisme d'entraînement d'air est dû au déferlement de la vague d'étrave résultant de l'interaction entre la houle incidente et celle réfléchiée par l'étrave et/ou l'impact entre l'étrave et la surface libre (voir figure 3.3 et 4.2). Ce mécanisme est observé pour toutes les carènes et dans toutes les configurations d'essais sauf dans la configuration avec courant seul où uniquement le mécanisme d'entraînement d'air par détachement tourbillonnaire a lieu. La quantité de l'entraînement d'air générée par déferlement de la vague d'étrave est plus importante que celle par détachement tourbillonnaire.

Les deux mécanismes sont bien distincts et ont été observés et identifiés autour des trois modèles de navire. Dans ce qui suit, nous comparons la fréquence d'occurrence des nuages de bulles des deux mécanismes autour des trois types d'étraves.

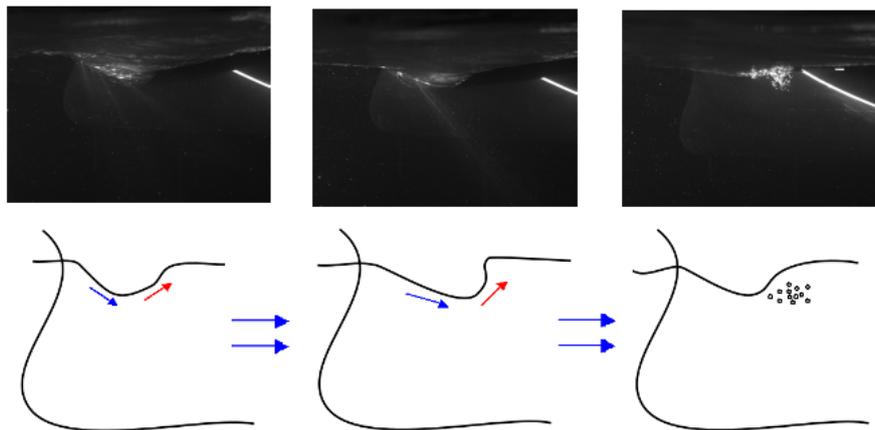


FIGURE 3.2 – Description du mécanisme d'entraînement d'air par détachement tourbillonnaire, de la déformation de la surface libre à la génération d'un nuage de bulles. En haut : images brutes. En bas : représentation schématique du mécanisme.

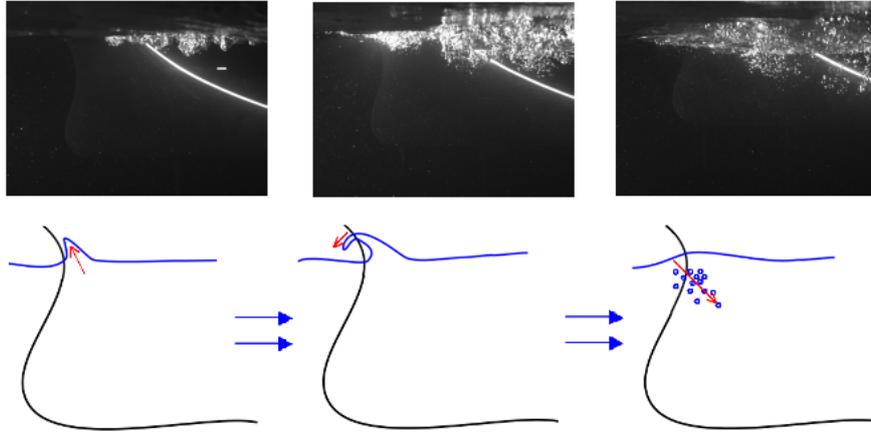


FIGURE 3.3 – Description du mécanisme d’entraînement d’air par déferlement de la vague d’étrave. En haut : images brutes. En bas : représentation schématique du mécanisme.

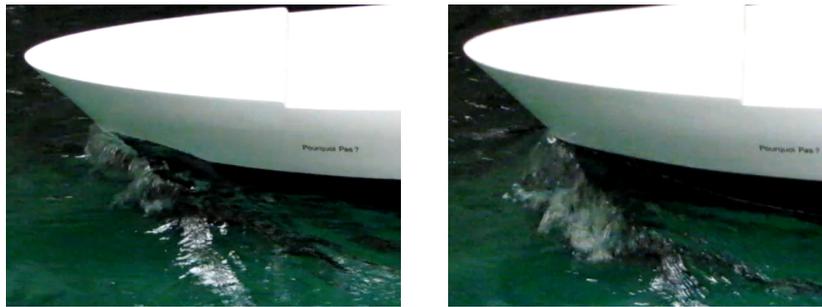


FIGURE 3.4 – Visualisation de la vague d’étrave au niveau de l’étrave classique du Pp ?.

3.2.1 Fréquence d’occurrence des nuages de bulles

Le phénomène de bullage est un évènement complexe et difficile à appréhender. Néanmoins, ce phénomène est caractérisé par une fréquence dominante. Cette fréquence d’occurrence des nuages de bulles a été déterminée pour chaque configuration de base des trois modèles. Cette fréquence a été calculée par un comptage manuel et correspond au nombre d’évènements (détachement tourbillonnaire ou déferlement de la vague d’étrave) divisé par le temps d’acquisition des mesures (trois minutes). Les images ont été prises à une fréquence d’acquisition de 10Hz. Cette méthode de calcul permet d’observer et d’identifier chaque mécanisme d’entraînement d’air pour les différentes configurations. Le nombre d’évènements a été comptabilisé par période de 30 secondes sur toute la durée d’acquisition (180 secondes), ce qui a permis d’une part de déterminer une fréquence d’occurrence correspondant au passage des nuages de bulles, et d’autre part de vérifier la convergence des résultats.

Les résultats sont présentés dans la figure 3.5, où f est la fréquence d'occurrence des nuages de bulles et f_0 est la fréquence de la houle incidente et des mouvements du navire. Pour la configuration 2 (courant et houle), 3 (courant et mouvements) et 4 (courant, houle et mouvements), la fréquence adimensionnée des nuages de bulles (f/f_0) est présentée. Pour la configuration 1 avec courant seul, le résultat est présenté en terme de fréquence (f) uniquement. Ces résultats en terme de fréquence sont précis à $\pm 6\%$.

Les points ci-dessous ont été observés :

- la fréquence d'occurrence des nuages de bulles par détachement tourbillonnaire reste constante pour les quatre configurations et pour chaque modèle d'étrave. Cette fréquence est deux fois plus grande autour de l'étrave classique du $Pp ?$ (0.2Hz) qu'autour des étraves inversée et fine (0.08Hz). Cela est dû à l'évasement de l'étrave du $Pp ?$ qui favorise l'apparition de petites cavités d'air et par conséquent un nombre plus important de nuages de bulles ;
- les étraves inversée et fine ont presque le même comportement pour les quatre configurations. Pour les configurations 2 et 3, un nombre plus important de nuages de bulles générés par déferlement de la vague d'étrave est observé autour de l'étrave fine ;
- la fréquence d'occurrence des nuages de bulles diminue fortement autour des étraves inversée et fine par rapport à l'étrave classique du $Pp ?$ pour les configurations 2 et 4. La fréquence (par détachement tourbillonnaire et déferlement de la vague d'étrave) est de $0.69f_0$ pour la configuration 2 autour du $Pp ?$, contre $0.3f_0$ et $0.24f_0$ autour des étraves fine et inversée ;
- pour la configuration 3 autour du $Pp ?$, la fréquence d'occurrence des nuages de bulles par détachement tourbillonnaire est égale à celle par déferlement de la vague d'étrave. Cependant, un nombre plus important de nuages de bulle générés par déferlement de la vague d'étrave est observé autour des étraves fine et inversée.

Ces observations montrent que la houle est le paramètre principal agissant sur la génération de nuages de bulles autour de l'étrave classique du $Pp ?$. En ce qui concerne l'étrave inversée, seule la combinaison entre la houle et les mouvements du navire permet de générer un nombre important de nuages de bulles. La même fréquence d'occurrence de nuages de bulles (par détachement tourbillonnaire et déferlement de la vague d'étrave) a été identifiée dans les configurations 2, 3 et 4 autour de l'étrave fine. Tous ces résultats montrent que l'évasement de l'étrave classique du $Pp ?$ favorise la génération des nuages de bulles.

3.2.2 Dynamique des nuages de bulles

Dans cette section, la dynamique des nuages de bulles détectés autour des trois modèles d'étraves est analysée en terme de surface, profondeur et vitesse verticale

3.2. CARACTÉRISATION DES NUAGES DE BULLES

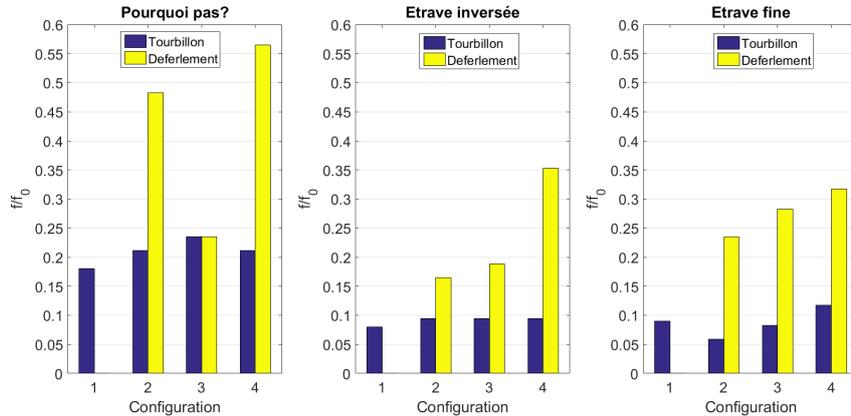


FIGURE 3.5 – Fréquence d’occurrence des deux mécanismes d’entraînement d’air pour les quatre configurations autour des trois modèles d’étraves.

de déplacement. Une méthode de traitement d’image par analyse de niveau de gris a été développée pour détecter et suivre les nuages de bulles (Delacroix *et al.*, 2016c). Chaque image est traitée par une analyse de niveau de gris : l’image brute est convertie en image binaire en tenant compte d’un premier niveau de gris. Cette image binaire permet de détecter la surface libre et le contour de l’étrave. La région contenant l’ensemble du nuage de bulles est ensuite détectée. Une seconde boucle avec un deuxième seuil de niveau de gris est appliquée afin d’obtenir un maximum d’informations dans la zone du nuage de bulles détectée précédemment. Différents seuils ont été testés afin de détecter le nuage de bulles avec précision. Il a été montré que les variations de seuil ont très peu d’influence sur les résultats présentés.

Cette méthode permet de caractériser et quantifier les deux mécanismes d’entraînement d’air et la dynamique des nuages de bulles autour de l’étrave. Un exemple de détection et d’évolution d’un nuage de bulles généré par déferlement de la vague d’étrave est illustré par la figure 4.4.

Il est à souligner que les nuages de bulles se produisent et se propagent dans les trois dimensions de l’espace. L’étude dans ce chapitre est une étude 2D qui permet de mesurer qu’une seule partie du nuage qui n’est pas facilement quantifiée en raison des difficultés résultant de la profondeur de champ. Le but de cette étude est de comparer les trois modèles de navires à partir d’essais réalisés dans les mêmes conditions. Les imprécisions résultant de l’instrumentation utilisée ne permet pas de prendre en compte l’aspect 3D du phénomène. Cependant, la comparaison de données obtenues dans le même plan de mesure permet de comparer le comportement des nuages de bulles autour de chaque modèle.

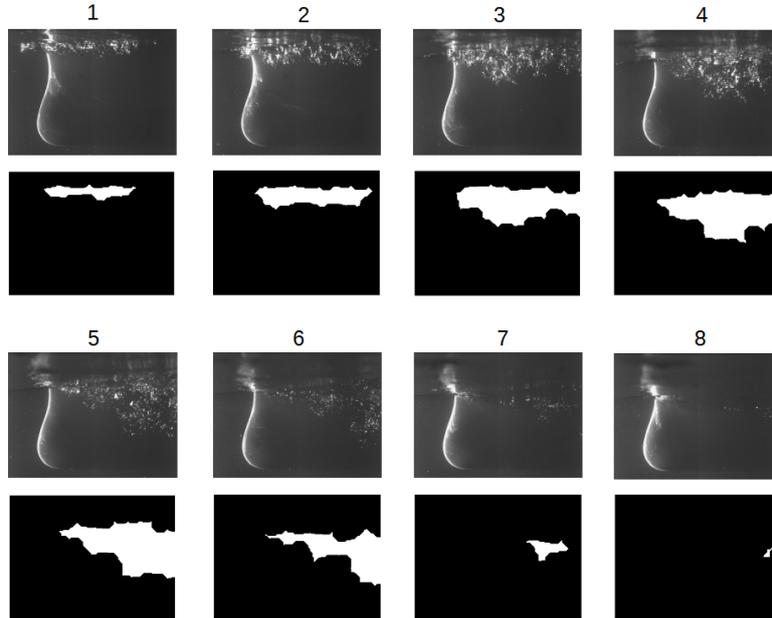


FIGURE 3.6 – Détection et évolution d'un nuage de bulles dans la configuration 2 autour du Pp ?.

La figure 3.7 présente les principales propriétés d'un nuage de bulles : l'aire (A_{nuage}) en blanc, la profondeur maximale (Z_{max}) et la vitesse verticale (W_{nuage}). La vitesse est calculée à partir de la position du centre du nuage détecté. Dans certains cas, le nuage de bulles n'est pas complètement présent dans l'image (en particulier à la fin de la période de houle). La position du centre de nuage est donc mal détectée (voir la figure 3.8). Par conséquent, le calcul de la vitesse verticale n'est pas entièrement validé mais suffisant pour comparer le comportement des trois modèles de navires.

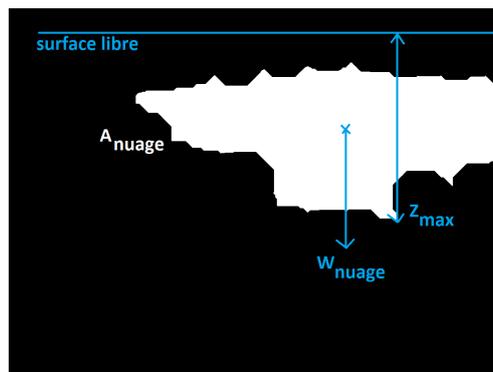


FIGURE 3.7 – Propriétés physiques d'un nuage de bulles : l'aire (A_{nuage}) en blanc, la profondeur maximale (Z_{max}) et la vitesse verticale (W_{nuage}).

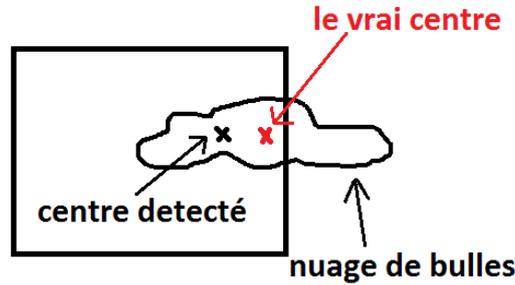


FIGURE 3.8 – Vue schématique d'un cas où un nuage de bulle n'est pas entièrement présent dans l'image PIV représentée par le carré noir.

Les figures 3.9 à 3.12 présentent l'évolution des propriétés physiques adimensionalisées autour des trois modèles d'étrave et pour les quatre configurations de base. L'adimensionalisation est réalisée avec :

- A_0 la zone définie par le tirant d'eau et la longueur $l = 0.2L_{pp} = 0.626m$: environ $0.152m^2$ pour l'étrave fine et $0.113m^2$ pour le $Pp ?$ et l'étrave inversée ;
- Z_0 le tirant d'eau. Il est de $0,243m$ pour l'étrave fine et de $0,182m$ pour le $Pp ?$ et l'étrave inversée ;
- $U = 0.75m/s$ la vitesse du courant.

L'abscisse de chacune de ces figures correspond au temps adimensionalisé t/T , où T est la période de houle et de mouvements du navire ($T = 1/0.85 = 1.18s$). Une ligne pleine présente l'évolution moyenne de tous les nuages de bulle significatifs, détectés pour chaque modèle d'étrave. Une ligne pointillée correspond à l'évolution maximale d'un nuage de bulle "extrême", le but étant d'avoir un ordre de grandeur sur les valeurs maximales des propriétés physiques que peut avoir un nuage de bulle. Un nuage de bulles significatif est défini comme étant observable sur au moins quatre images consécutives (soit une durée de $0.47s$). Dans certains cas, les valeurs moyennes ne convergent pas statistiquement, par exemple lorsque l'évolution moyenne est calculée avec 5 nuages de bulles uniquement. En revanche, ces valeurs moyennes donnent une bonne tendance de l'évolution des propriétés physiques autour des trois modèles d'étraves.

- Pour la configuration 1 avec courant uniquement (figure 3.9), l'instant $t= 0$ correspond à la première détection d'aération de chaque nuage. Au cours des trois minutes d'acquisition, 11 nuages de bulles ont été détectés autour du $Pp ?$, 10 autour de l'étrave inversée et 10 autour de l'étrave fine. L'aire moyenne des nuages de bulles atteint une valeur de $0.025A_0$ autour de l'étrave fine et de $0.02A_0$ autour du $Pp ?$ et de l'étrave inversée. La profondeur moyenne maximale est d'environ $0.18Z_0$ autour de l'étrave inversée et légèrement supérieure à $0.2Z_0$ autour du $Pp ?$ et l'étrave fine. La vitesse verticale est proche de zéro

dans la première moitié de la durée de vie des nuages, puis tend vers une valeur positive, les nuages de bulles remontant en surface. Les nuages de bulles sont proches de la surface dans cette configuration. Il n'y a donc aucune perturbation potentielle des mesures acoustiques pouvant provenir des nuages de bulles dans ce cas.

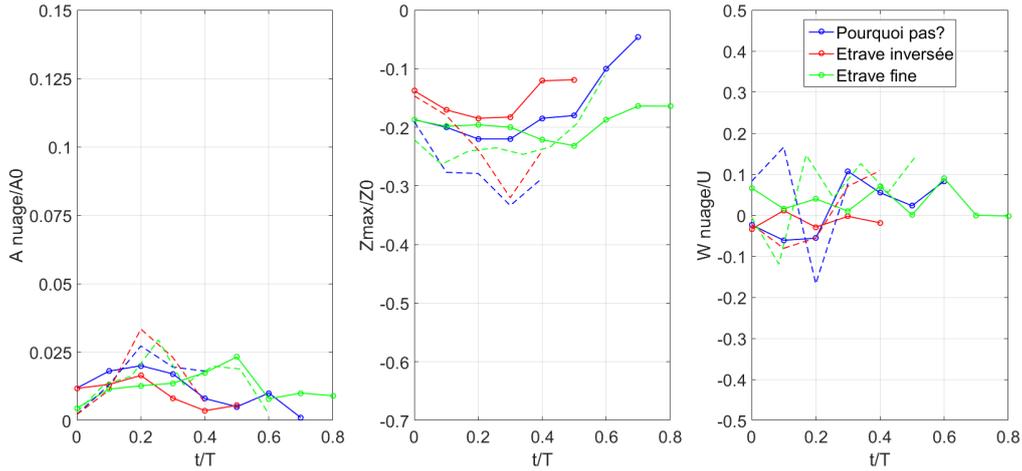


FIGURE 3.9 – Propriétés physiques des nuages de bulles (aire, profondeur et vitesse verticale) pour la configuration 1 avec courant uniquement autour des trois modèles de navire. Ligne pleine : évolution moyenne des propriétés des nuages de bulles. Ligne pointillée : évolution maximale des propriétés d'un nuage de bulle "extrême".

- Pour la configuration 2 avec courant et houle (figure 3.10), l'instant $t = 0$ correspond au pic de la houle incidente au niveau de l'étrave. Pendant les trois minutes d'acquisition, 20 nuages de bulles autour du *Pp* ? ont été détectés, 7 autour de l'étrave inversée et 12 autour de l'étrave fine. L'aire moyen des nuages atteint une valeur de $0.05A_0$ autour du *Pp* ?, $0.013A_0$ autour de l'étrave inversée et $0.016A_0$ autour de l'étrave fine. Cette différence est due au fait que les vagues réfléchies par les étraves fine et inversée sont de faible amplitude, ce qui conduit à un nombre moins important de gros nuages de bulles. La profondeur moyenne atteint une valeur de $0.48Z_0$ autour du *Pp* ?, une valeur légèrement supérieur à $0.25Z_0$ autour de l'étrave inversée et une valeur légèrement inférieur à $0.28Z_0$ autour de l'étrave fine. Cette différence est également due aux nuages peu intenses générés autour des étraves fine et inversée. En d'autres termes, la vitesse du jet d'impact de la vague générée autour de ces deux étraves est moins importante que celle générée autour du *Pp* ?. Ainsi, les nuages de bulles n'ont pas tendance à aller en profondeur. Enfin, les vitesses verticales moyennes autour du *Pp* ? sont d'environ $-0.33U$ après le déferlement de la vague, et augmentent jusqu'à $0.33U$. Pour les étraves fine et inversée, les vitesses moyennes varient entre $-0.2U$ et $0.2U$. Dans cette configuration, les propriétés des nuages de bulles atteignent des valeurs importantes, suffisantes

pour perturber les mesures acoustiques autour du $Pp?$ qui possède également une fréquence d'occurrence de nuage de bulles élevée (voir section 2.2.1).

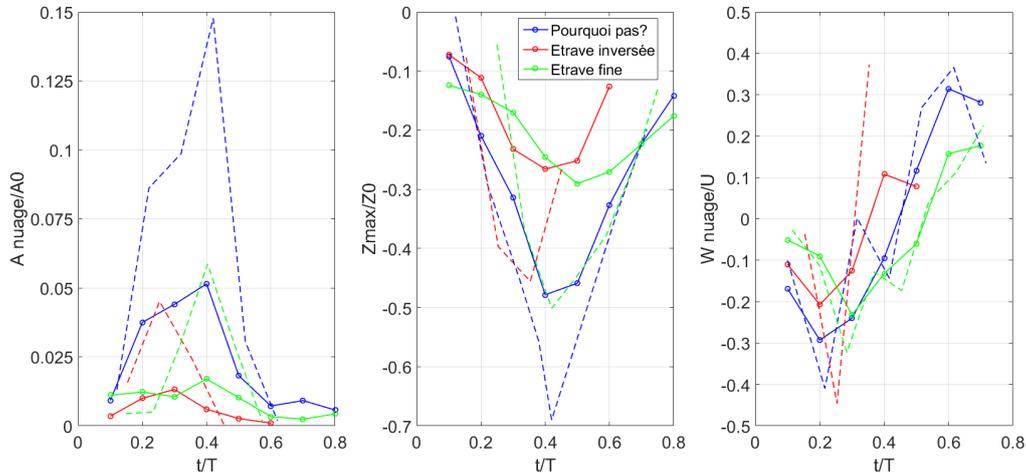


FIGURE 3.10 – Propriétés physiques des nuages de bulles (aire, profondeur et vitesse verticale) pour la configuration 2 avec courant et houle autour des trois modèles de navire. Ligne pleine : évolution moyenne des propriétés des nuages de bulles. Ligne pointillée : évolution maximale des propriétés d'un nuage de bulle "extrême".

- Pour la configuration 3 avec courant et mouvements du navire (figure 3.11), l'instant $t=0$ correspond au pic de tangage (position la plus haute de l'étrave). Au cours des trois minutes d'acquisition, 10 nuages de bulles ont été détectés autour du $Pp?$, 5 autour de l'étrave inversée et 8 autour de l'étrave fine. L'aire des nuages de bulles est légèrement inférieure à $0.025A_0$ autour du $Pp?$ et de l'étrave inversée. La profondeur maximale atteint une valeur moyenne de $0.27Z_0$ autour du $Pp?$, $0.24Z_0$ autour de l'étrave inversée et environ $0.22Z_0$ autour de l'étrave fine. L'aire et la profondeur maximale des nuages de bulles ont donc quasiment le même comportement entre cette configuration et la configuration 1 avec courant uniquement. Cela est dû au fait que les nuages sont principalement générés par détachement tourbillonnaire dans cette configuration. Cependant, les vitesses verticales moyennes varient entre $-0.1U$ et $0.26U$. Ces valeurs sont plus élevées que les valeurs de vitesses relevées dans la configuration 1, probablement en raison des mouvements du modèle. Les propriétés physiques dans cette configuration ne sont pas assez élevées pour être vraiment problématique pour les mesures acoustiques.

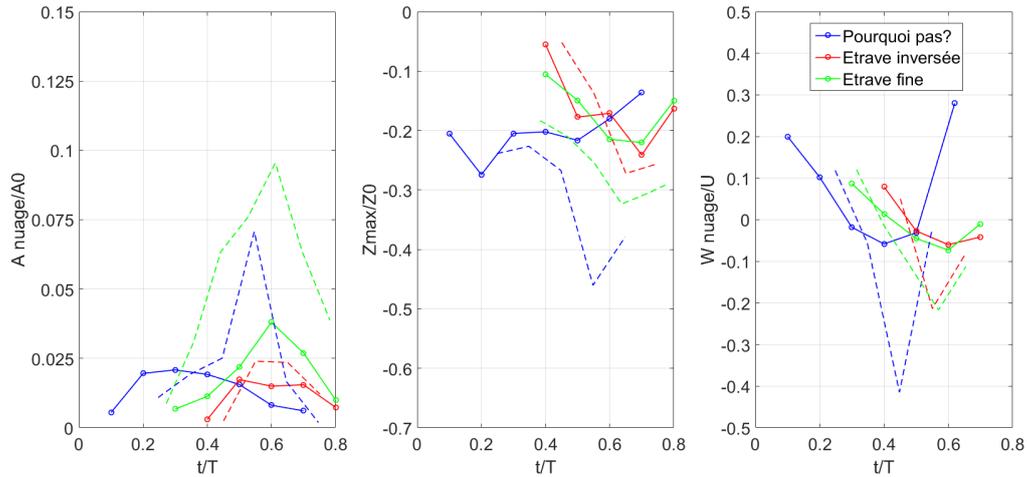


FIGURE 3.11 – Propriétés physiques des nuages de bulles (aire, profondeur et vitesse verticale) pour la configuration 3 avec courant et mouvements autour des trois modèles de navire. Ligne pleine : évolution moyenne des propriétés des nuages de bulles. Ligne pointillée : évolution maximale des propriétés d'un nuage de bulle "extrême".

- Pour la configuration 4 avec courant, houle et mouvements (figure 3.12), l'instant $t = 0$ correspond au pic de la houle incidente au niveau de l'étrave. Pendant les trois minutes d'acquisition, 39 nuages de bulles ont été détectés autour du Pp ?, 17 autour de l'étrave inversée et 27 autour de l'étrave fine. La combinaison entre la houle incidente et les mouvements du navire permet de générer des nuages significatifs avec une aire moyenne d'environ $0.05A_0$ autour de l'étrave fine, $0.04A_0$ autour du Pp ? et $0.055A_0$ autour de l'étrave inversée. Pour les trois modèles d'étrave, la profondeur des nuages atteint une valeur moyenne entre $0.4Z_0$ et $0.45Z_0$ et les vitesses verticales moyennes varient entre $-0.2U$ et $0.33U$. En guise de comparaison avec les autres configurations, les nuages de bulles ont la plus grande valeur moyenne en surface, en profondeur et en vitesse verticale dans cette configuration. Cependant, il n'existe pas de différence notable entre les trois types d'étrave. Cela est dû à la combinaison entre la houle et les mouvements du navire, en supposant que les trois modèles de navires ont le même comportement sur houle, ce qui ne serait pas le cas dans la réalité. Dans cette configuration et compte tenu de la combinaison entre la houle et les mouvements du navire, le déferlement de la vague d'étrave est assez intense et à l'origine de génération de nuages de bulles assez importants en termes d'aire, de profondeur et de vitesse verticale. Ces nuages sont suffisamment intenses pour perturber les mesures acoustiques.

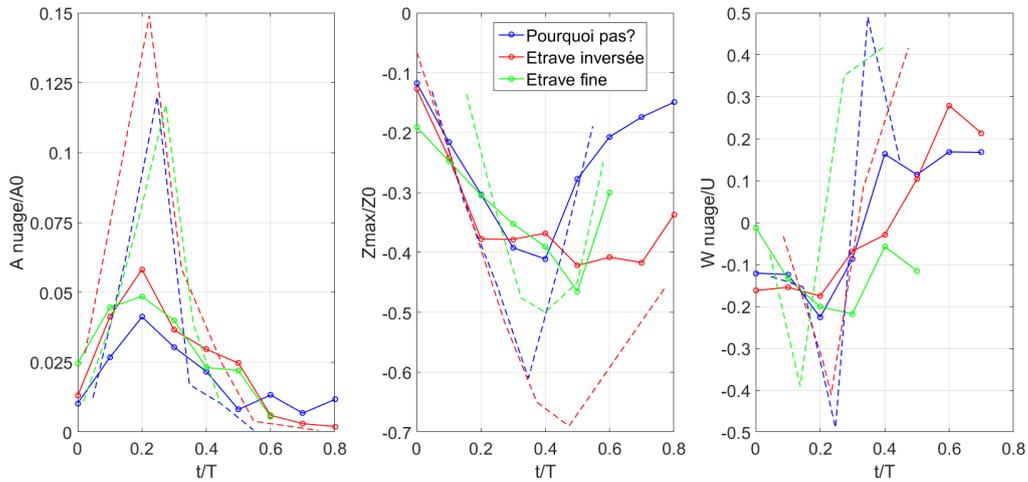


FIGURE 3.12 – Propriétés physiques des nuages de bulles (aire, profondeur et vitesse verticale) pour la configuration 4 avec courant, houle et mouvements autour des trois modèles de navire. Ligne pleine : évolution moyenne des propriétés des nuages de bulles. Ligne pointillée : évolution maximale des propriétés d'un nuage de bulle "extrême"..

L'analyse de la dynamique des nuages de bulles montre que l'interaction entre la houle et l'étrave a un rôle important non seulement sur la fréquence d'occurrence des nuages de bulles, mais aussi sur leur dynamique, notamment autour de l'étrave classique du Pp ? Les valeurs des propriétés physiques (aire, profondeur et vitesse verticale) sont également très élevées lorsque les mouvements du navire sont combinés avec la houle. Dans les deux cas, que ce soit avec houle uniquement ou avec houle et mouvements du navire, les mesures acoustiques peuvent être perturbées autour de l'étrave classique du Pp ? en particulier en raison de la fréquence d'occurrence des nuages de bulles élevée dans ces deux configurations. Cette conclusion doit être modérée compte tenu du fait que le comportement sur houle pour les navires équivalents ne serait pas le même. Pour l'étrave fine, le mouvement en tangage devrait être plus élevé tandis que pour l'étrave inversée il devrait être plus faible avec une pénétration plus importante dans la houle.

Les propriétés des nuages de bulles autour des modèles de navires sont converties en réel dans le tableau 3.1 en respectant la similitude de Froude ($\times 30^2$ pour l'aire du nuage de bulles A , $\times 30$ pour le nuage de bulles profondeur Z , $\times \sqrt{30}$ pour la vitesse verticale du nuage de bulles W).

	<i>Pourquoi pas ?</i>			Etrave Inversée			Etrave Fine		
	$A(m^2)$	$Z(m)$	$W(m/s)$	$A(m^2)$	$Z(m)$	$W(m/s)$	$A(m^2)$	$Z(m)$	$W(m/s)$
config 1	2.03	1.09	± 0.74	2.03	0.98	± 0.41	3.42	1.46	± 0.62
config 2	5.08	2.62	± 1.35	1.32	1.36	± 0.82	2.18	2.04	± 0.82
config 3	2.54	1.47	± 0.82	2.54	1.31	± 0.41	4.78	1.60	± 0.41
config 4	4.06	2.29	± 1.10	5.59	2.18	± 1.02	6.84	3.28	± 0.82

TABLE 3.1 – Valeurs moyennes des propriétés physiques du nuage de bulles (aire A , profondeur Z , vitesse verticale W) converties du modèle à l'échelle réelle pour les quatre configurations autour des trois types de navires.

Dans ce qui suit, l'écoulement autour de l'étrave classique du $Pp?$ et de l' EI est mesuré et analysé pour les configurations 2 et 4. L'identification de l'écoulement responsable de l'entraînement d'air sera effectuée. Le lien entre l'écoulement et la propagation des nuages de bulles sera ensuite analysé.

3.3 Caractérisation de l'écoulement

Cette section est consacrée à l'étude de l'écoulement autour de l'étrave afin de trouver un lien entre l'écoulement hydrodynamique et la génération/propagation des nuages de bulles. Deux parties sont présentées dans cette section. La première partie présente le traitement des données PIV et la deuxième partie est consacrée à l'analyse de l'écoulement autour de l'étrave.

3.3.1 Traitement des données PIV

Cette sous-section est divisée en trois parties. La première partie présente les paramètres et les plans de mesures PIV autour de l'étrave. Dans la deuxième partie, une méthode de détection de la surface libre est présentée afin d'analyser les images issues des mesures PIV. Une analyse POD (Décomposition Orthogonale aux valeurs Propres) est proposée dans la troisième partie et la procédure utilisée pour le calcul de la moyenne de phase permettant de déterminer les champs de vitesse moyennes est détaillée.

3.3.1.1 Paramètres et plans de mesures PIV

Afin de caractériser l'écoulement autour de l'étrave, des mesures PIV ont été réalisées sur deux plans verticaux situés à $y = 0\text{mm}$ et $y = 100\text{mm}$. Ces deux plans sont également décalés selon l'axe des x (figure 3.13). La nappe laser est émise dans l'eau avec un intervalle de temps $t = 1200 \mu\text{s}$, correspondant au temps entre les

3.3. CARACTÉRISATION DE L'ÉCOULEMENT

doublés d'images PIV. La caméra permet d'acquérir des images à une fréquence de 8,5Hz afin d'obtenir 10 champs de vitesse instantanés par période de houle. Les dimensions physiques du plan PIV sont de $528 \times 396\text{mm}^2$. Les champs de vitesse instantanés ont été obtenus à l'aide d'un algorithme adaptatif PIV avec une aire d'interrogation de $32 \times 32\text{pixels}^2$ et un recouvrement horizontal et vertical de 25%. Les composantes de vitesse longitudinales (direction x) et verticales (direction z) sont alors disponibles sur un plan 2D de $(n_x \times n_z) = (66 \times 49)$ points avec une discrétisation spatiale de 8mm dans chaque direction. Les principaux paramètres PIV sont rappelés dans le tableau 3.2.

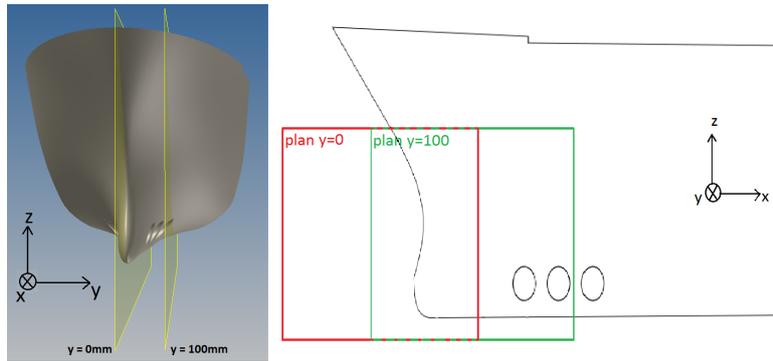


FIGURE 3.13 – Schéma présentant les deux plans $y=0\text{mm}$ et $y=100\text{mm}$ autour du Pp ?.

Paramètres	Configurations
Dimensions physiques (plan PIV)	$528.1 \times 396.1\text{mm}^2$
Nombre de points de la grille	$(n_x, n_z) = (66, 49)$
Fréquence d'échantillonnage f_e (Hz)	8.5
Nombre de doublés d'images PIV	1530

TABLE 3.2 – Principaux paramètres des mesures PIV dans les plans $y= 0\text{mm}$ et $y= 100\text{mm}$.

3.3.1.2 Détection de contours

L'analyse des images brutes des mesures PIV est problématique en raison de la présence de la surface libre oscillante, des bulles, de nombreuses réflexions notamment dues à la présence de l'étrave. Afin de surmonter ces perturbations, les oscillations de l'interface eau-air ainsi que le contour de l'étrave et de la trace laser sont détectés (Dussol *et al.*, 2016) (voir figure 3.29).

Détection de la surface libre

Un algorithme spécifique pour la détection des variations de l'interface eau-air a été développé. Une brève description des différentes étapes de l'algorithme est détaillée ci-dessous :

Étape 1 : Détection des agglomérats de particules

La première étape consiste à transformer l'image brute en binaire (commande «edge», option «canny, prewit»). Cela permet d'augmenter le contraste entre les zones lumineuses et les zones sombres (figure 3.14b et d). Les zones blanches obtenues après transformation correspondent aux agglomérats de particules PIV, et/ou aux bulles formées lors du déferlement de la vague, et/ou aux réflexions des bulles au-dessus de la surface. Les bulles générées lors du déferlement de la vague et les réflexions (au dessus de l'interface air/eau) apparaissent aléatoirement dans le champ de vision. Les agglomérats de particules PIV quant à elles ne peuvent apparaître qu'en dessous de la surface.

L'idée est de filtrer tout ce qui ne correspond pas à des agglomérats de particules PIV pour distinguer finement l'interface de la surface libre. Cela nécessite d'acquérir le maximum d'information permettant de caractériser les agglomérats de particules PIV (aires, densités, intensités lumineuses) pour optimiser au maximum le filtre et donc la distinction des particules PIV avec le reste des zones blanches. Un exemple d'image pour laquelle il n'y a ni bulles et donc ni réflexions au-dessus de la surface est présenté sur les figures 3.14c et 3.14d (plan $y=0\text{mm}$). Sur cette image, on peut très nettement distinguer la surface libre grâce à la présence des agglomérats de particules PIV.

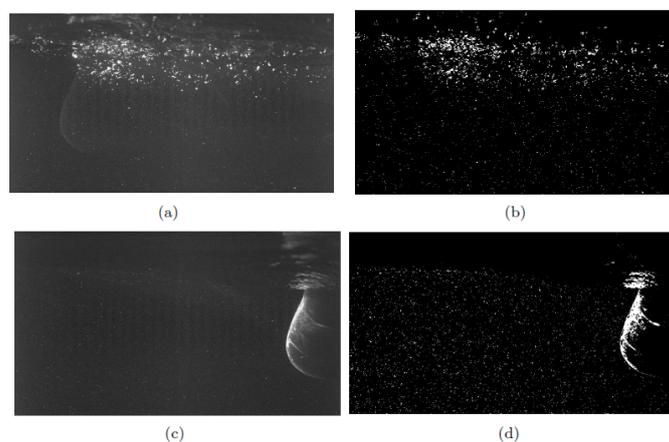


FIGURE 3.14 – (a) et (b) : Images brutes ; (c) et (d) : Images binaires.

Étape 2 : Détection de la taille caractéristique des agglomérats de particules PIV

La détermination de la taille caractéristique des agglomérats de particules PIV s'effectue tout d'abord en définissant approximativement une zone d'étude homogène contenant uniquement des particules PIV et présentant le moins de perturbation possible, loin des bulles et des réflexions (zones encadrées sur les figures 3.15a et c).

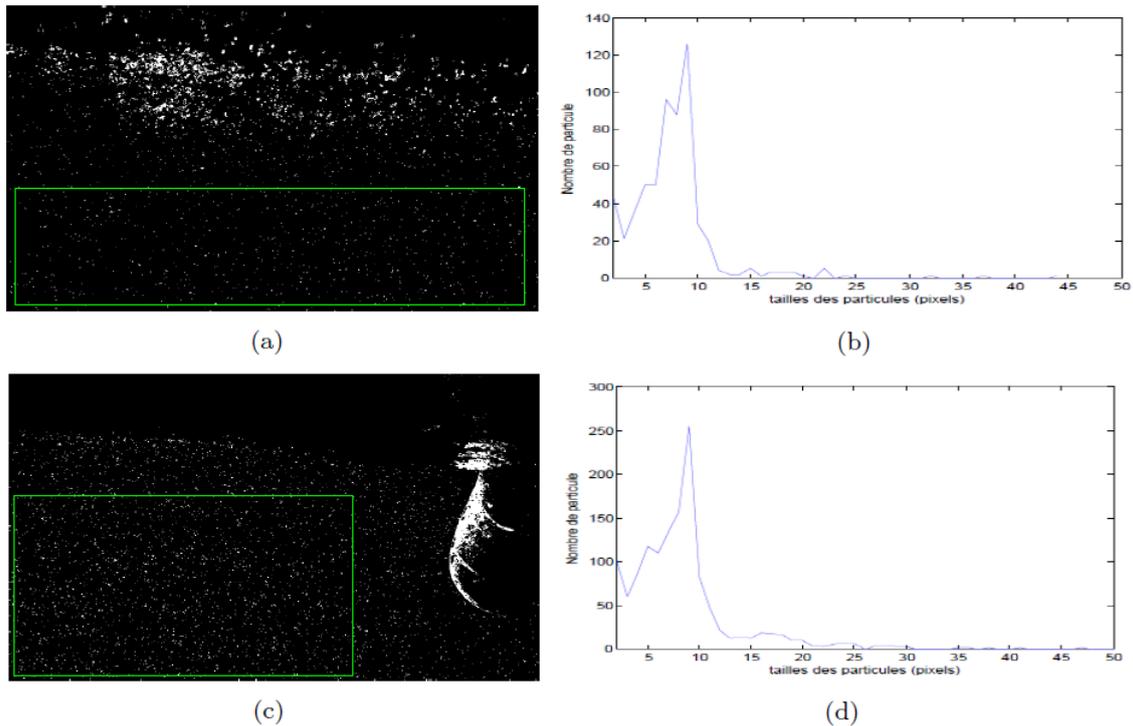


FIGURE 3.15 – (a) et (c) : Zone d'étude (vert); (b) et (d) : Nombre d'agglomérats correspondant aux différentes tailles.

La taille (aire) moyenne ainsi que la densité (nombre d'agglomérats/discrétisation) moyenne des zones blanches présentes au niveau de la zone d'étude est ensuite calculée. Les figures 3.15b et 3.15d correspondent à deux instants distincts et montrent la répartition de tailles (en pixel) correspondant aux zones d'étude prédéfinies. On en déduit ainsi la taille dominante des agglomérats de particules PIV pour chaque instant qui correspond majoritairement ici à 9 pixels. Cette étape permet ainsi d'optimiser la distinction des agglomérats PIV avec le reste des zones lumineuses.

Etape 3 : Filtrage : Suppression des bulles et des réflexions au-dessus de la surface libre

L'application d'un filtre à partir des informations obtenues précédemment permet de supprimer les bulles et les réflexions pour ne garder sur l'image que les agglomérats de particules PIV et au final obtenir une visibilité plus nette de la surface libre (figure 3.16).

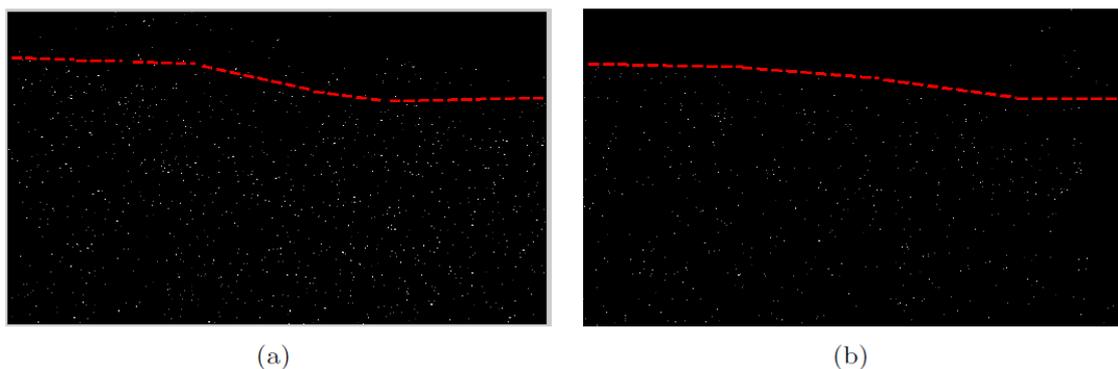


FIGURE 3.16 – Image binaire après filtrage (a) : plan $y=100\text{mm}$; (b) : plan $y=0\text{mm}$.

Etape 4 : Détection des agglomérats de particules

Chaque zone présentant les mêmes caractéristiques que les agglomérats de particules PIV est ensuite identifiée (figure 3.17). Les zones masquées en dessous de la surface libre sont détectées par interpolation avec les pixels voisins (Figure 3.17b).

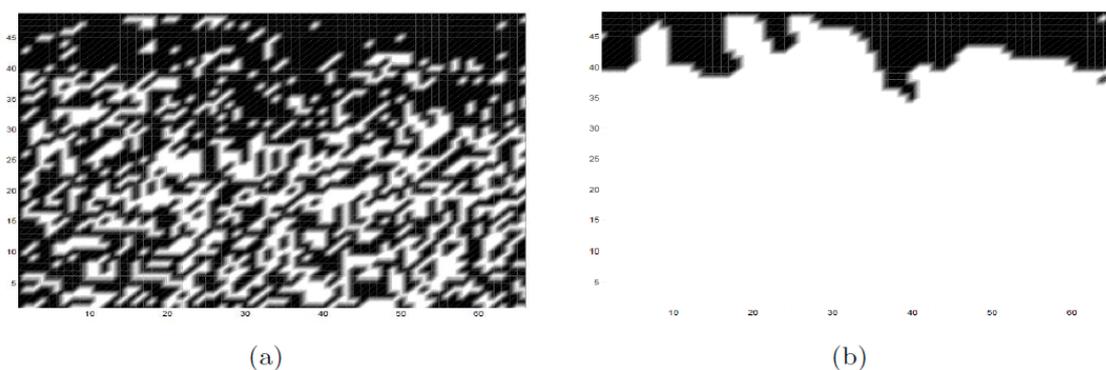


FIGURE 3.17 – (a) : Détection des agglomérats PIV ; (b) : Interpolation.

Etape 5 : Choix du modèle pour la structuration du masque

Trois modèles correspondant aux trois types de surface possible (horizontale, croissante ou décroissante) ont été développés (Figure 3.18). Il est donc nécessaire de déterminer le type de surface en présence pour pouvoir déterminer ensuite le choix du modèle à appliquer.

L'interface entre la zone masquée et la zone marquée est détectée par dichotomie suivie d'une régression polynomiale d'ordre 2. Le choix du modèle s'effectue ensuite en fonction de l'écart type et de la pente de la régression polynomiale. La figure 3.18 présente des exemples de surface possible. Pour chacune d'elle, un modèle différent sera appliqué pour détecter la surface libre et générer le masque.

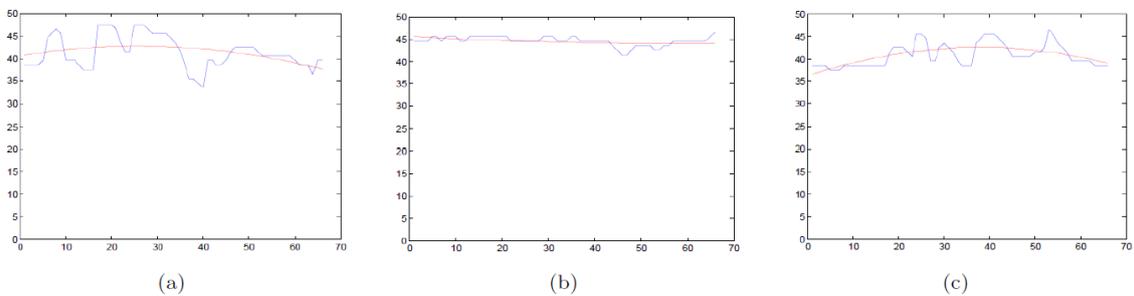


FIGURE 3.18 – Exemple de surface possible (a) : Surface décroissante (b) : Surface horizontale; (c) : Surface croissante.

Etape 6 : Structuration de la surface et lissage près des parois

Une fois le modèle choisi, les zones identifiées au dessus de la surface libre sont masquées par interpolation avec les pixels voisins (figure 3.19a). On obtient une nouvelle interface entre la zone masquée et la zone marquée, suivit d'une régression polynomiale d'ordre 5 représentatif de la surface libre que l'on est sensé obtenir (figure 3.19b). L'étape correspondant à l'interpolation des zones masquées au dessus de la surface libre est fiable et efficace mais peut parfois présenter des aberrations notamment sur les bords de l'image. Il est donc nécessaire de déterminer les zones présentant des aberrations en calculant la pente de la courbe de surface près des parois gauche et droite. Un lissage est appliqué à la surface initialement déterminée par dichotomie suivie d'une nouvelle régression polynomiale d'ordre 5 (figure 3.19c).

3.3. CARACTÉRISATION DE L'ÉCOULEMENT

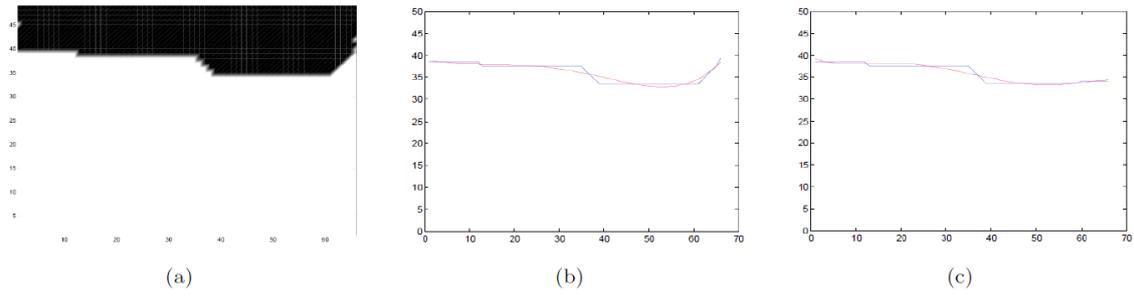


FIGURE 3.19 – (a) Interpolation (b) : Détection d'interface (c) : Lissage de la courbe de surface.

Etape 7 : Création du masque et identification de la surface libre

La courbe de la surface libre obtenue est illustrée sur l'image brute (figures 3.20b et 3.20d). Un masque est générée par mise à zéros des valeurs au dessus de la surface libre (figures 3.20a et 3.20c).

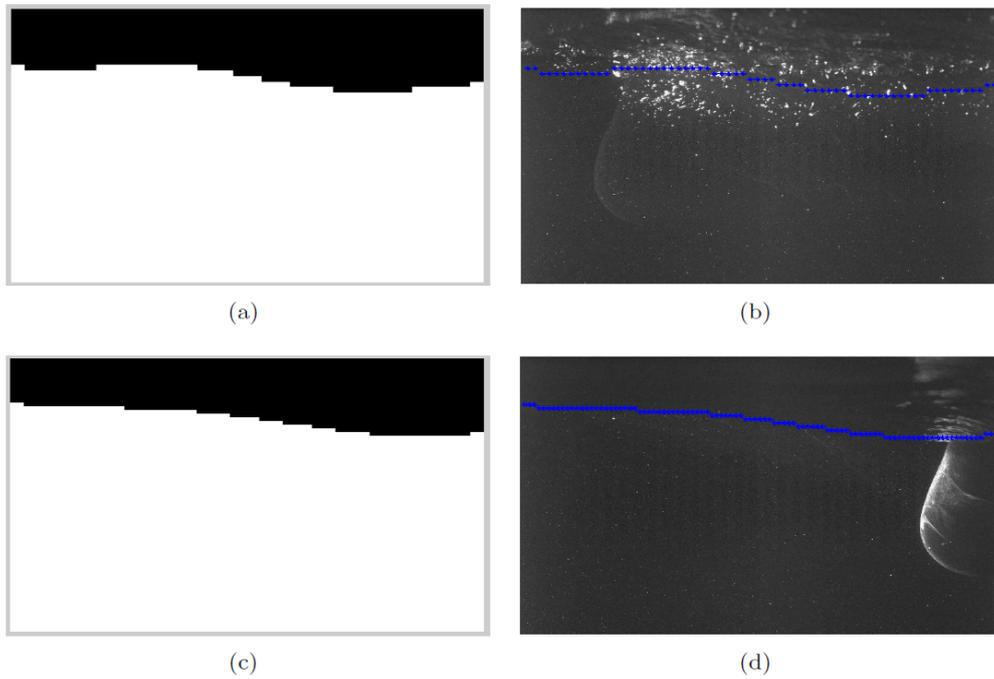


FIGURE 3.20 – Génération du masque et représentation de la surface libre sur l'image brute (courbe bleu). (a,b) : plan $y=100\text{mm}$; (c,d) : plan $y=0\text{mm}$.

Analyse fréquentielle et validation de l'algorithme

L'analyse fréquentielle de l'évolution de la courbe de surface permet d'identifier les fréquences dominantes. Le calcul de la *Transformée de Fourier discrète (TFD)* en chaque point de la courbe de surface montre que la périodicité de la houle est parfaitement retrouvée. Un pic de fréquence à 0.85 Hz est obtenu dans les deux plans $y=0\text{mm}$ et $y=100\text{mm}$ pour les deux configurations 2 et 4 (figure 3.21). On observe également la présence d'une harmonique à $f = 2f_0 = 1,7\text{Hz}$ dans la configuration 4. Cela peut être directement lié à la houle incidente et aux mouvements du navire générés à la fréquence f_0 .

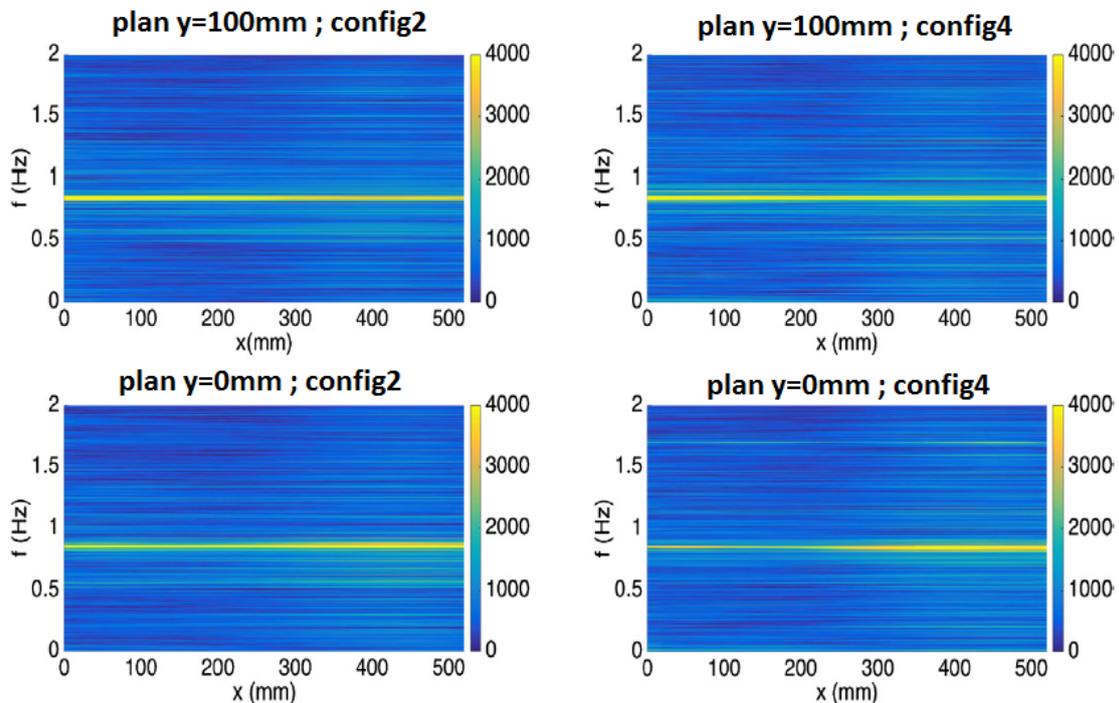


FIGURE 3.21 – Spectres de Fourier des signaux de surface libre déterminés pour chaque configuration.

Les résultats de l'analyse fréquentielle confirme bien la présence d'une périodicité où l'on retrouve la fréquence de la houle initialement imposée à 0.85 Hz. Ces résultats permettent ainsi de valider le programme de détection de surface dans les deux plans pour les deux configurations. Cependant, il est important de préciser que ce programme étant relativement efficace dans la majorité des cas, on retrouve parfois des courbes de surfaces décalées de ± 1 maille = $\pm 0.33\text{mm}$ par rapport à l'interface réelle. En effet l'efficacité du programme dépend sensiblement de la concentration de particules PIV présentes dans l'écoulement. L'application du programme de détection de surface pour une séquence complète de déferlement d'une vague est illustrée

sur la figure 3.22.

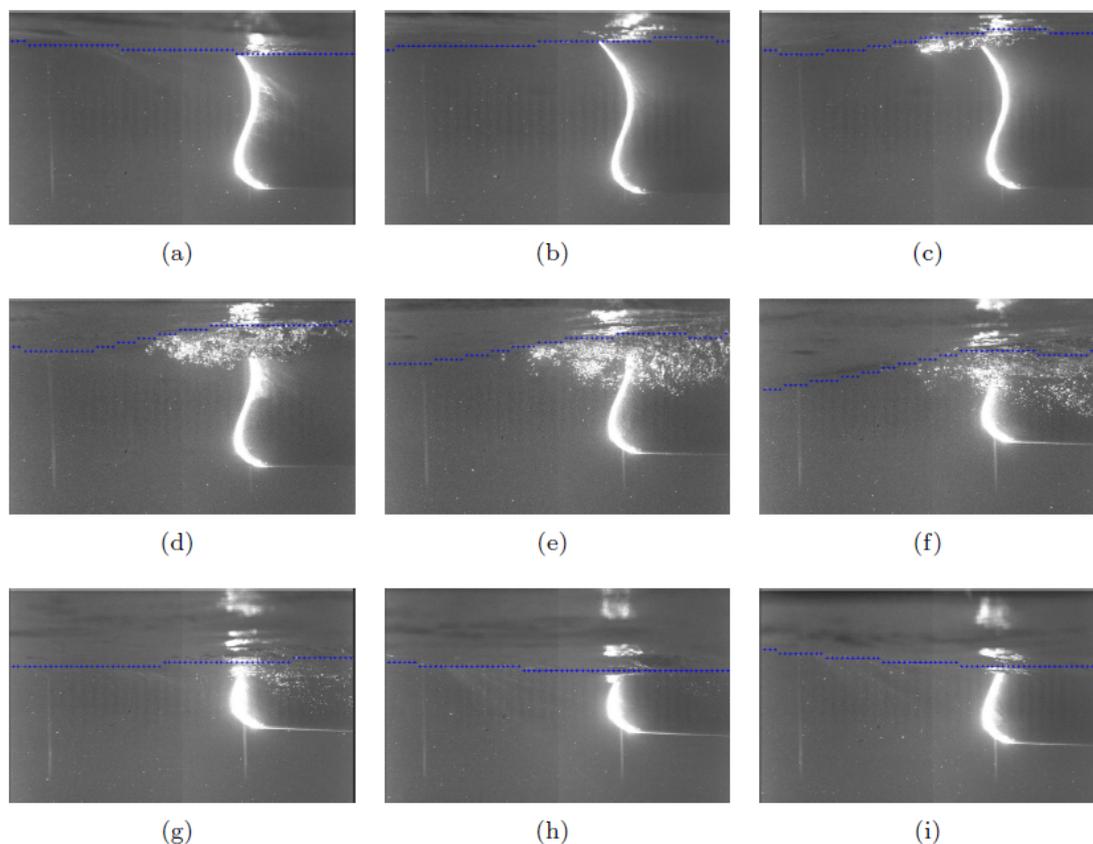


FIGURE 3.22 – Illustration d’une période de houle avec generation d’un nuage de bulles dans la configuration 4. Les surfaces détectées sont marquées en bleu.

Detection du contour de l'étrave et de la trace laser

Le masquage de l'étrave est réalisé sur les images PIV dans le plan $y=0\text{mm}$ après avoir identifié les contours de forme. La présence de l'étrave dans l'image PIV génère des zones de haute intensité lumineuse liées aux réflexions laser, ce qui permet de bien visualiser son contour. Les contours de forme de l'étrave sont déterminés manuellement dans la première image PIV de chaque configuration d'essais. Pour la configuration 2 sans mouvement de l'étrave, ce masque est dupliqué pour toutes les autres images PIV. Pour la configuration 4, avec mouvements de l'étrave, les mouvements imposés ainsi que la fréquence des mesures PIV sont connus. Ainsi, le masque de l'étrave est directement déduit de l'image PIV correspondant à chaque position de l'étrave. Ce masque dynamique est ensuite appliqué sur le reste des images PIV afin d'éliminer la région de l'image contenant l'étrave. La même méthode

est utilisée sur les images PIV dans le plan $y=100\text{mm}$, où un masque est appliqué sur les bords de la trace laser et non pas sur les bords de l'étrave. Une illustration de la détection du contour de l'étrave (pour le plan $y=0\text{mm}$) et de la trace laser (pour le plan $y=100\text{mm}$) est présentée en rouge dans la figure 3.23. Le masque de la surface libre est présenté par la ligne bleue en pointillée.

La détection de l'interface eau-air, du contour de la forme de l'étrave et de la trace laser a permis de surmonter les perturbations liées aux réflexions dues à la présence de l'étrave et d'une surface libre oscillante. Cela va permettre d'analyser proprement les champs de vitesse autour de l'étrave.

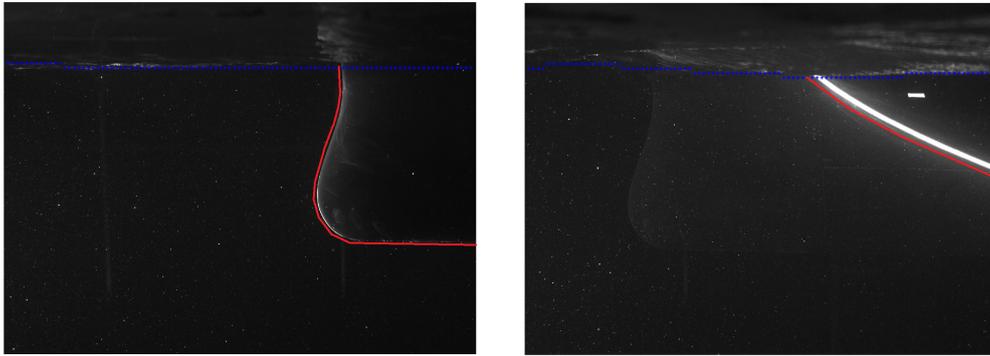


FIGURE 3.23 – Détection de l'interface eau-air (ligne pointillée en bleue) appliquée sur une image brute PIV. La ligne rouge correspond aux contours de l'étrave dans le plan $y=0\text{mm}$ (gauche) et à la trace laser dans le plan $y=100\text{mm}$ (droite).

3.3.1.3 POD et moyenne de phase

Afin d'étudier l'écoulement dans la zone où le processus de déferlement de la vague d'étrave a lieu, des mesures PIV ont été effectuées dans le plan $y=0\text{mm}$ correspondant à l'axe de symétrie des maquettes du $Pp?$ et de l' EI . Dans ce plan, on observe peu de bulles, une analyse par Décomposition Orthogonale aux valeurs Propres (POD) peut donc être utilisée.

Décomposition Orthogonale aux valeurs Propres

Après l'application d'un masque dynamique (masque de la surface libre et masque de l'étrave) pour chaque champ de vitesse instantané, une analyse POD est effectuée afin de déterminer le nombre de modes nécessaires pour reconstruire le champ de vitesse moyenne. Pour se faire, la POD est appliquée au champ de vitesses d'origine sans soustraire une moyenne d'ensemble.

L'analyse POD est effectuée à partir de $N_t = 1530$ champs de vitesse instantanés longitudinales (u ou v_1) et transversales (w ou v_2) sur un plan de $n_x \times n_z = 66 \times 49$ points. Dans ce qui suit, \mathbf{X} correspond aux points (x_i, z_j) avec (i, j) variant de 1 à 66 et de 1 à 49 respectivement.

Rappel sur le principe de la POD

Une procédure classique de moyenne d'ensemble (comme la moyenne de Reynolds) ne peut être appliquée près de la surface libre en raison de l'instabilité de celle-ci. Il est donc nécessaire d'extraire un écoulement «moyen» à chaque instant et donc à chaque position de l'interface eau-air et à chaque position de l'étrave. Le but de la procédure de moyenne de phase est d'exprimer chaque composante de vitesse instantanée comme étant :

$$u(\mathbf{X}, t_i) = u_m(\mathbf{X}, t_i) + u'(\mathbf{X}, t_i) \text{ et } w(\mathbf{X}, t_i) = w_m(\mathbf{X}, t_i) + w'(\mathbf{X}, t_i) \quad (3.1)$$

où (u_m, w_m) sont les composantes de vitesse du champ moyen et (u', w') les parties fluctuantes. La procédure de décomposition orthogonale présentée dans (Druault *et al.*, 2012, 2014) est étendue pour être efficace entre l'interface instable eau-air et des interfaces mobiles.

Généralement appliquée aux fluctuations de champ de vitesse d'un écoulement turbulent, l'application POD permet une extraction des structures énergétiques à grande échelle (Holmes *et al.*, 1996). Sur la base d'une variable de l'écoulement notée \mathbf{V} selon le temps t et les variables d'espace \mathbf{X} , l'application POD fournit une base de fonctions propres spatiales notées $\Phi(\mathbf{X})$ qui contribue principalement à l'énergie du signal, définie comme la valeur de fluctuation moyenne de la variable de l'écoulement. Par conséquent, le signal \mathbf{V} peut être décomposé linéairement comme suit :

$$\mathbf{V}(\mathbf{X}, t) = \sum_{n=1}^{N_{mod}} \Phi^{(n)}(\mathbf{X}) a^{(n)}(t) \quad (3.2)$$

où $a^{(n)}(t)$ sont les coefficients temporels correspondant à la projection de \mathbf{V} sur n modes spatiaux et N_{mod} est le nombre total de la base. La détermination des N_{mod} fonctions propres est basée sur la résolution de l'équation de Fredholm (Holmes *et al.*, 1996). Ceci correspond à la résolution des fonctions propres du tenseur de corrélation en deux points du signal. Une telle résolution permet également la détermination de N_{mod} valeurs propres indiquées $\lambda^{(n)}$. Ces valeurs propres sont classées en fonction de leur contenu énergétique $\lambda^{(1)} > \lambda^{(2)} > \dots > \lambda^{(N_{mod})}$. Les coefficients temporels satisfont $\overline{a^{(n)}(t)a^{(m)}(t)} = \delta_{mn}$ où δ est le symbole de Kronecker. Plus de détails sur

la mise en œuvre de la POD sur une base de données PIV se trouve dans (Druault *et al.*, 2005, 2012).

Dans le présent travail, une POD vectorielle prenant en compte les deux composantes de la vitesse est exécutée successivement à partir des configurations d'essais 2 et 4. Dans chaque configuration, l'application POD conduit à la décomposition de vitesse suivante :

$$v_i(\mathbf{X}, t) = v_{i_m}(\mathbf{X}, t) + v'_i(\mathbf{X}, t) = \sum_{n=1}^{N_1} \Phi_{v_i}^{(n)}(\mathbf{X})a^{(n)}(t) + \sum_{n=N_1+1}^{N_{mod}} \Phi_{v_i}^{(n)}(\mathbf{X})a^{(n)}(t) \quad (3.3)$$

avec $i = 1$ ou 2 , $v_1 = u$ et $v_2 = w$. Il est supposé que les premiers modes N_1 permettent de reproduire le champ moyen de vitesse.

Analyse des fonctions propres spatiales et des coefficients temporels

L'évolution de $\sum_{i=1}^n \lambda^{(i)} / \sum_{i=1}^{N_{mod}} \lambda^{(i)}$ en fonction de n pour la base de données PIV obtenue pour chaque configuration est présentée sur la figure 3.24. La première valeur propre représente environ 82% de l'énergie totale. Cette valeur est inférieure à la valeur obtenue dans d'autres applications similaires (Druault *et al.*, 2012, 2014) où plus de 98% de l'énergie totale est généralement obtenue. La répartition énergétique actuelle indique que le flux considéré est moins cohérent que ceux analysés précédemment. Ceci est directement lié à la surface libre qui varie dans le temps et dans l'espace avec des oscillations d'amplitudes non négligeables. Il est remarquable que la deuxième et la troisième valeur propre ont des contenus énergétiques non négligeables (tableau 3.3, les modes supérieurs ont moins de 0,6% d'énergie). Ainsi, l'énergie de l'écoulement est principalement contenue dans les trois premiers modes.

Configuration	$\lambda^{(1)}$	$\lambda^{(2)}$	$\lambda^{(3)}$
2	434.2 (83.2%)	11.1 (2.1%)	6.01 (1.1%)
4	450.1 (81.46%)	14.14 (2.56%)	7.2 (1.3%)

TABLE 3.3 – Les premières valeurs propres POD. Le pourcentage de l'énergie contenue dans chaque mode est également indiqué.

La figure 3.25 présente les spectres des trois premiers coefficients temporels POD pour chaque configuration. La transformée de Fourier est appliquée aux coefficients fluctuants (leurs valeurs moyennes ont été soustraites). Chaque coefficient temporel présente la fréquence de la houle incidente et celle des mouvements du navire $f = f_0 = 0.85Hz$. Ces résultats mettent en évidence le fait que le contenu énergétique de l'écoulement est lié à la houle incidente pour les configuration 2 et 4.

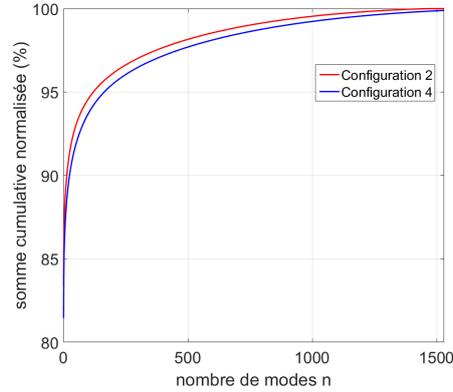


FIGURE 3.24 – La convergence en energie pour les configurations 2 et 4.

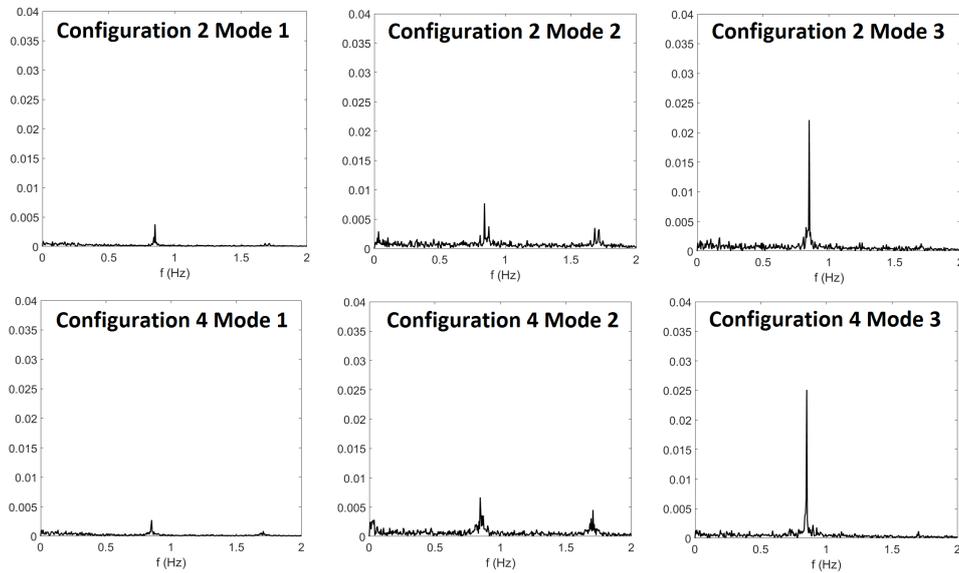


FIGURE 3.25 – Spectres de Fourier des trois premiers coefficients POD pour la configuration 2 (en haut) et la configuration 4 (en bas).

Les figures 3.26 et 3.27 présentent les fonctions spatiales des trois premiers modes POD des composantes (v_1, v_2) respectivement, multipliées par les valeurs propres associées : $\sqrt{\lambda^{(n)}}\Phi_{v_i}^{(n)}(\mathbf{X})$. Pour chaque configuration, le premier mode POD ressemble au champ de vitesse moyen de Reynolds. Le deuxième mode spatial est dominant dans la zone liée aux oscillations (surface libre pour la configuration 2 et la combinaison de la surface libre et des mouvements de l'étrave pour la configuration 4). Cela confirme la nécessité de conserver ce deuxième mode pour reconstruire le champ de l'écoulement moyen dans les deux configurations. En outre, la représentation spatiale du mode 3 dans les deux configurations montre qu'il a des amplitudes non négligeables.

3.3. CARACTÉRISATION DE L'ÉCOULEMENT

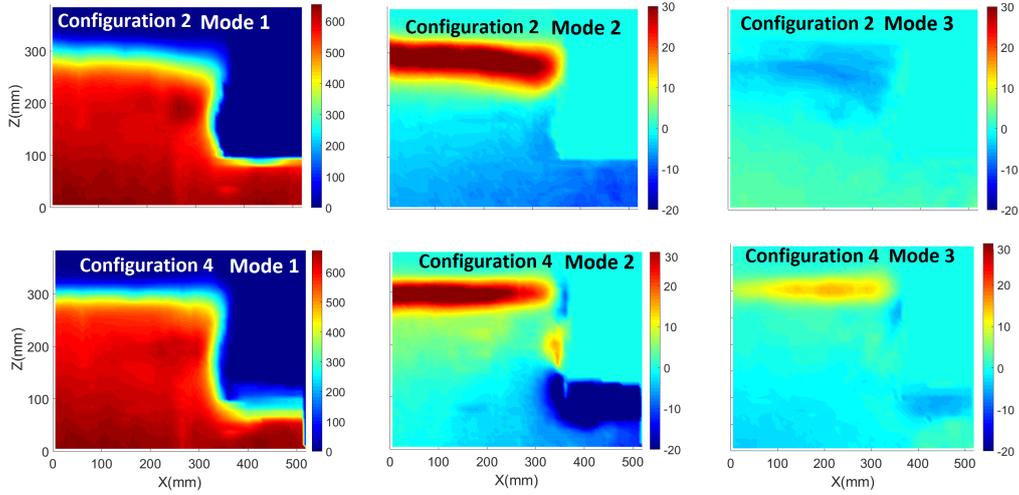


FIGURE 3.26 – Représentation des trois premières fonctions propres spatiales $\sqrt{\lambda^{(n)}}\Phi_{v_1}^{(n)}(\mathbf{X})$ avec n variant de 1 à 3. Une carte de couleur similaire est imposée pour les modes 2 et 3.

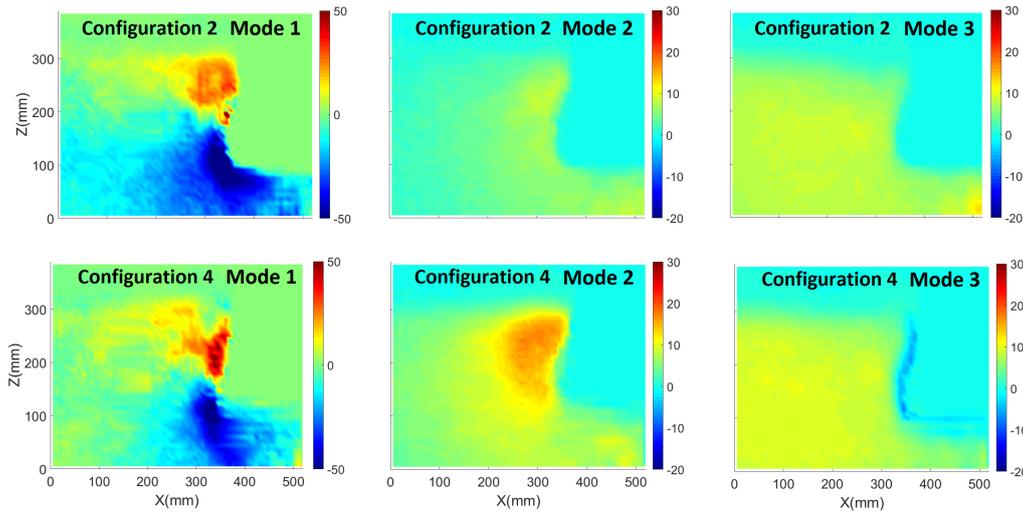


FIGURE 3.27 – Représentation des trois premières fonctions propres spatiales $\sqrt{\lambda^{(n)}}\Phi_{v_2}^{(n)}(\mathbf{X})$ avec n variant de 1 à 3. Une carte de couleur similaire est imposée pour les modes 2 et 3.

Des commentaires similaires peuvent être effectués sur la représentation des fonctions propres POD liées à la composante verticale de vitesse w (voir figure 3.27). Dans ce cas, le premier mode POD est lié à l'écoulement incident (uniquement dû au courant, la composante moyenne de la houle étant nul) et le deuxième mode est lié au mouvement de l'étrave pour laquelle la composante x - est proche de zéro.

À partir de ces résultats, on note que le premier mode correspond à la composante de l'écoulement moyen et le deuxième mode permet une identification claire des zones affectées par la houle et/ou les mouvements du navire. D'autre part, la composante verticale de l'écoulement moyen souligne les zones où l'interaction entre l'écoulement et le modèle est prononcée. Cette zone, proche de la coque, est la zone où la génération des nuages de bulles est initiée.

En conclusion, et d'après l'analyse des coefficients temporels POD et des modes spatiaux et de leur contenu énergétique, les trois premiers modes POD sont suffisants pour caractériser le champ moyen de l'écoulement à chaque instant. Ce résultat permet d'identifier les zones où se déroulent les principaux échanges d'énergie. Il est similaire au résultat obtenu précédemment dans (Druault *et al.*, 2012, 2014), même si la nature instable de la surface libre diffère considérablement des études précédentes.

Procédure de calcul de moyenne de phase

Les résultats ci-après sont présentés en terme de moyenne de phase pour laquelle la composante de vitesse verticale est étudiée. La moyenne de phase est calculée en réajustant la phase à partir du signal de houle mesuré par la sonde résistive. Pour chaque période de houle, l'image correspondant au pic de houle au niveau de l'étrave (phase 5 sur la figure 3.28) est détectée et ajoutée pour calculer la moyenne de phase. Pour chaque phase de 1 à 9 sur la figure 3.28, nous calculons la moyenne de la position de l'interface eau-air pour toutes les images correspondant à la phase associée et nous appliquons le masque de surface libre résultant sur la moyenne des champs de vitesse pour toutes les images dans cette même phase. Nous savons que l'interface eau-air n'est pas toujours au même endroit dans chaque phase, mais nous supposons que la variation de cette interface est négligeable (quelques mm dans un plan PIV de 400mm de largeur). Chaque image de 1 à 9 dans les prochaines figures de ce chapitre correspond à la moyenne des champs de vitesse de toutes les périodes et correspond aux phases fournies dans la figure 3.28. Pour des raisons de clarté, la phase 10 n'est pas présentée mais elle a été prise en compte lors de l'analyse.

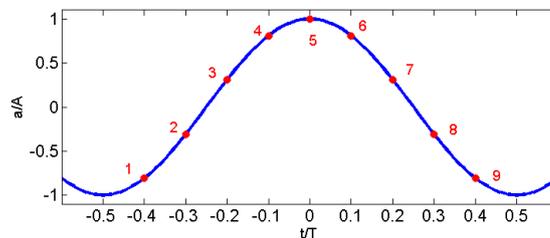


FIGURE 3.28 – Décomposition du temps le long d'un signal de houle régulière pour le calcul de la moyenne de phase.

3.3.2 Analyse de l'écoulement

Cette sous-section présente les résultats des analyses de l'écoulement autour des étraves. Elle est divisée en deux parties. La première partie est consacrée à l'analyse de l'écoulement dans le plan de symétrie du $Pp ?$ et de l' EI où une analyse POD a été proposée. C'est dans cette zone que nous avons le plus de détails sur le début du processus de déferlement de la vague d'étrave (voir figure 3.29 gauche). L'objectif est donc de corrélérer l'écoulement avec la génération des nuages de bulles.

La deuxième partie se concentre uniquement sur la caractérisation de l'écoulement autour du $Pp ?$ pour étudier la propagation des nuages de bulles. Dans cette partie, une analyse directe des mesures PIV (sans POD) est effectuée dans un plan placé à 100mm de l'axe de symétrie sur le côté du bateau où les nuages de bulles peuvent être observés et suivis (voir figure 3.29 droite).

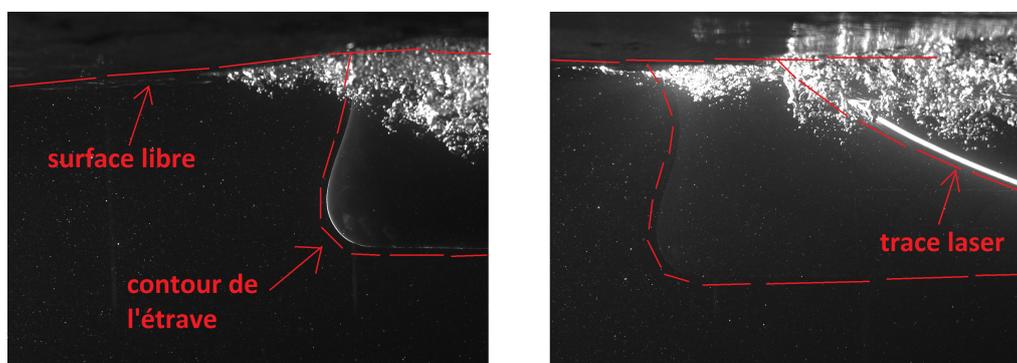


FIGURE 3.29 – Illustration des images prises dans le plan $y=0\text{mm}$ (gauche) et $y=100\text{mm}$ (droite) où un nuage de bulle est généré autour de l'étrave classique du $Pp ?$.

3.3.2.1 Ecoulement vs Génération de nuages de bulles

La figure 3.30 présente les champs de vitesse avec des lignes de courant déduits de la moyenne de phase pour les configurations 2 et 4 autour du $Pp ?$. On observe que le mouvement de l'étrave (voir figure 3.30 droite) affecte fortement le champ moyen, surtout au-dessus du bulbe de l'étrave. Dans cette zone, les vitesses ascendantes sont élevées et la vitesse maximale mesurée est de $0,18\text{m/s}$ pour la configuration 4 et de $0,1\text{m/s}$ pour la configuration 2. En effet, en comparant les deux représentations, la présence d'une moyenne verticale est assez prononcée près de la coque dans la configuration 4 par rapport aux résultats de la configuration 2, pour laquelle la composante verticale est uniquement due à la houle incidente. Par conséquent, le mouvement de la coque entraîne le fluide vers le haut.

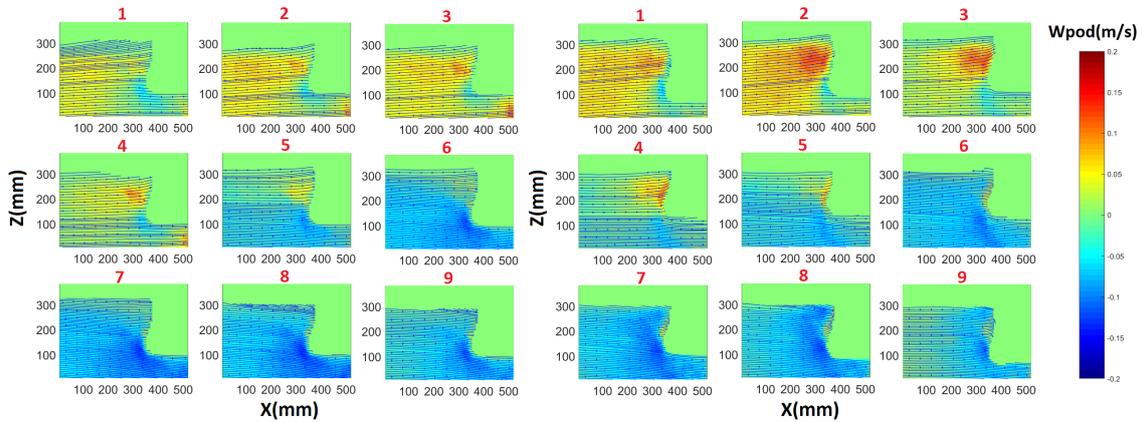


FIGURE 3.30 – Représentation des neuf champs de vitesse déduits de la projection du champ de vitesse sur les trois premiers modes POD pour la **configuration 2 (gauche)** et la **configuration 4 (droite)** autour du $Pp \ ?$. La carte de couleurs correspond à la composante de vitesse verticale W_{pod} .

La même analyse POD a été effectuée autour de l'étrave inversée pendant la même durée de l'expérience qui est de 180s. La figure 3.31 présente les champs de vitesse moyens pour la configuration 2 et 4 respectivement autour de l'étrave inversée. Dans ce cas et contrairement au cas de $Pp \ ?$, il n'existe pas de zone de séparation avec une vitesse verticale positive au-dessus du bulbe de l'étrave et une vitesse verticale négative en dessous de celle-ci. L'écoulement est presque uniforme autour de l'étrave inversée pour la configuration 2, à l'exception de la zone sous l'étrave (phases 6 à 9). La vitesse maximale mesurée est de 0,08m/s pour cette configuration. Les vitesses verticales plongeantes sont élevées en contact avec l'étrave. Ceci est dû à la géométrie de l'étrave inversée qui permet de générer des lignes de courant plongeantes (voir la figure 3.31), plus prononcées qu'autour de l'étrave classique de $Pp \ ?$. En ce qui concerne la configuration 4, l'écoulement est toujours presque uniforme pendant les phases 1 à 5 avec une légère augmentation des vitesses ascendantes dans la zone de contact entre la houle et le modèle dans les phases 3 et 4. La vitesse maximale mesurée est de 0,12m/s.

3.3. CARACTÉRISATION DE L'ÉCOULEMENT

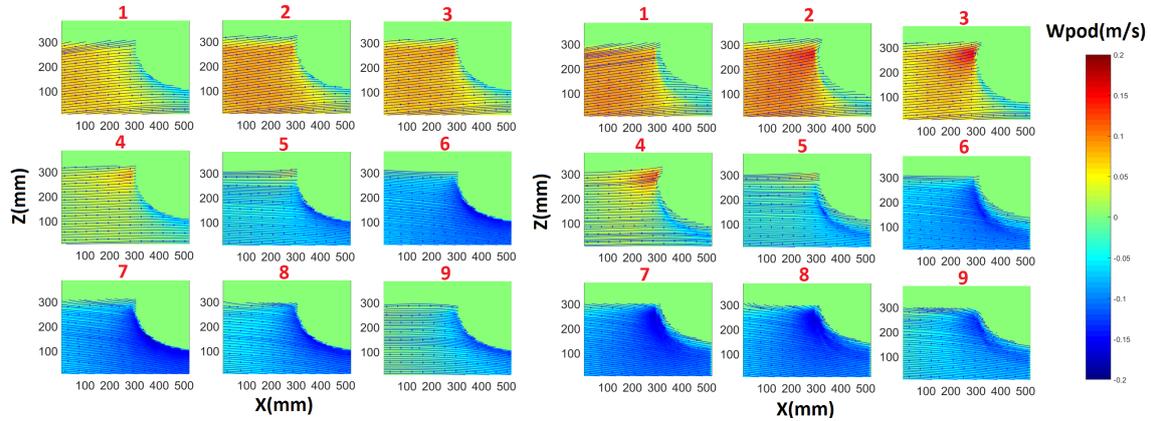


FIGURE 3.31 – Représentation des neuf champs de vitesse déduits de la projection du champ de vitesse sur les trois premiers modes POD pour **configuration 2 (gauche)** et la **configuration 4 (droite)** autour de l'**EI**. La carte de couleurs correspond à la composante de vitesse verticale W_{pod} .

Pour confirmer ces observations, la figure 3.33 présente l'évolution de la différence des vitesses verticales $d\omega = w_2 - w_1$. Cette différence de vitesse est calculée entre deux points X_1 (loin de l'étrave) et X_2 (proche de l'étrave) situés autour du $Pp?$ et de l'étrave inversée pour les configurations 2 et 4 (voir figure 3.32), notées respectivement w_1 et w_2 . Pour les deux modèles, la distance entre l'étrave et X_2 est $dX_2=50\text{mm}$, la distance entre le bas du modèle et le point X_1 ou X_2 est $dZ = 150\text{mm}$, et la distance entre X_1 et X_2 est $dX_1=200\text{mm}$.

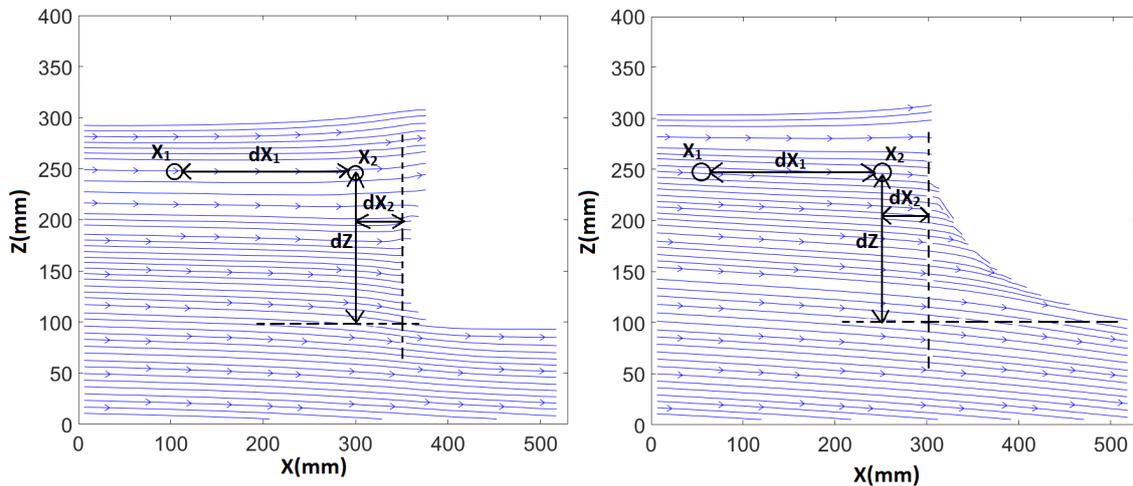


FIGURE 3.32 – La position des deux points X_1 et X_2 autour du $Pp?$ (à gauche) et de l'**EI** (à droite).

3.3. CARACTÉRISATION DE L'ÉCOULEMENT

Les variations de $d\omega$ sont plus élevées autour de l'étrave classique du $Pp?$ en particulier pour la configuration 4. Dans ce cas, $(d\omega_{config4})_{Pp?}$ oscille entre $d\omega_{moy} \pm d\omega_{RMS} = 0.02 \pm 0.06 \text{ m/s}$. $d\omega_{moy} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (d\omega_m)_n$ et $d\omega_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N |(d\omega_m)_n|^2}$ correspondent respectivement à la moyenne et à l'écart type de $d\omega$ avec $N = 1530$ le nombre de champs de vitesse instantanés. Pour la configuration 2 autour du $Pp?$, $(d\omega_{config2})_{Pp?}$ oscille entre $0.02 \pm 0.03 \text{ m/s}$. Cette différence est presque négligeable autour de l'étrave inversée. Elle oscille entre $(d\omega_{config2})_{étrave\ inversée} = 0.01 \pm 0.01 \text{ m/s}$ pour la configuration 2 et entre $(d\omega_{config4})_{étrave\ inversée} = -0.02 \pm 0.03 \text{ m/s}$ pour la configuration 4.

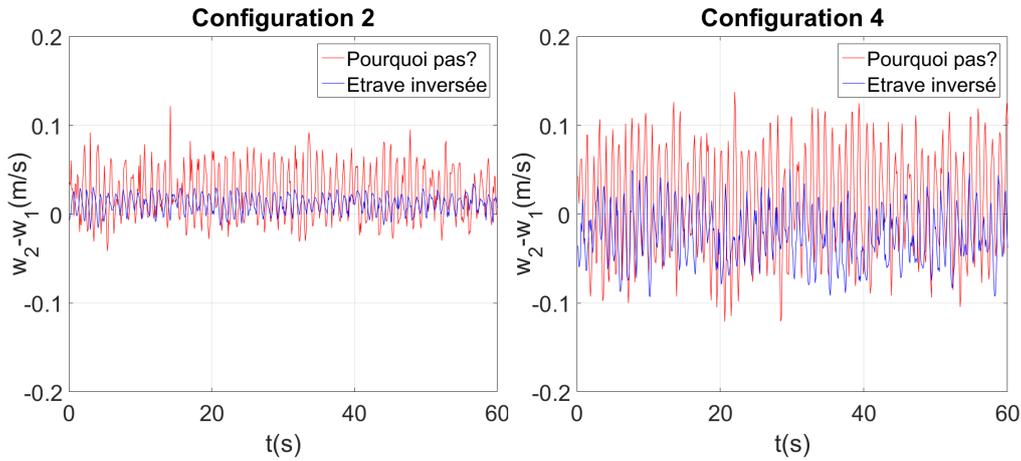


FIGURE 3.33 – Évolution de la différence de vitesse verticale $d\omega = w_2 - w_1$ entre les points X_1 et X_2 pour les configurations 2 et 4 autour du $Pp?$ et de l' EI .

Les différentes valeurs de $d\omega_{moy}$, $d\omega_{RMS}$ et de la fréquence d'occurrence des nuages de bulles f/f_0 pour les deux configurations autour des deux modèles d'étraves sont résumées dans le tableau 4.1. Deux comparaisons peuvent être réalisées : i) une comparaison entre les configurations 2 et 4 pour le même modèle d'étrave et ii) une comparaison entre les deux modèles d'étraves pour la même configuration. Pour i), on note que les valeurs sont toujours plus importantes pour la configuration 4 par rapport à la configuration 2 autour du $Pp?$, comme autour de l'étrave inversée. Pour ii), on note que les valeurs autour du $Pp?$ sont presque deux fois plus élevées que les valeurs autour de l'étrave inversée pour la configuration 2, comme pour la configuration 4. Les deux comparaisons indiquent que la combinaison entre la houle et les mouvements du navire est à l'origine d'une fréquence d'occurrence élevée des nuages de bulles, mais également à des variations élevées des champs de vitesse moyenne près de l'étrave. Ces observations confirment que les mouvements de l'étrave conduisent à un entraînement d'écoulement ascendant autour du $Pp?$. En fonction de l'intensité de cet écoulement, l'interaction résultante avec la surface libre génère une vague d'étrave plus ou moins intense, qui elle-même est à l'origine

de la génération des nuages de bulles.

		f/f_0	$d\omega_{moy}(m/s)$	$d\omega_{RMS}(m/s)$
Pourquoi pas ?	config 2	0.48	0.02	0.03
	config 4	0.57	0.02	0.06
Inverted Bow	config 2	0.18	0.01	0.01
	config 4	0.37	-0.02	0.03

TABLE 3.4 – Les différentes valeurs de la moyenne $d\omega_{moy}$, de l'écart type $d\omega_{RMS}$ et de la fréquence d'occurrence des nuages de bulles f/f_0 pour la configuration 2 et 4 autour du $Pp?$ et de l' EI .

En conclusion, on note que l'évasement de l'étrave du $Pp?$ est à l'origine des vitesses ascendantes élevées concentrées au-dessus du bulbe de l'étrave. L'intensité de l'écoulement est élevée dans cette région. L'interaction entre la houle incidente et l'étrave génère des vagues intenses et donc un nombre important de nuages de bulles. D'autre part, la géométrie de l'étrave inversée est à l'origine d'une interaction entre la houle incidente et l'étrave qui permet de générer des vagues moins intenses et donc moins de génération de nuages de bulles.

3.3.2.2 Ecoulement vs Propagation de nuages de bulles

Dès que le nuage de bulle est généré, il est propagé le long de la carène. Dans cette section, l'écoulement est étudié dans la zone de propagation des nuages de bulles. D'après les résultats de la section 2.2.1 qui ont montré que le phénomène de *Bubble Sweep-down* est prédominant autour de l'étrave classique du $Pp?$, nous analysons la propagation des nuages de bulles uniquement autour de ce modèle dans le plan $y=100\text{mm}$.

La présence de bulles d'air est clairement identifiée dans plusieurs images PIV. Même si les bulles peuvent affecter localement les champs de vitesses instantanés, ces perturbations locales ne suffisent pas pour modifier largement les analyses statistiques (Dussol *et al.*, 2016; Mallat *et al.*, 2015). Ainsi, nous supposons que les bulles se comportent comme des marqueurs PIV lors des analyses de l'écoulement moyen. L'objectif de l'analyse ici est de caractériser l'écoulement dans la zone où les nuages de bulles sont propagés en profondeur loin de la surface libre afin de comprendre le lien entre le champ d'écoulement hydrodynamique et la propagation des nuages de bulles. Une analyse en moyenne de phase appliquée directement sur les données PIV est donc proposée pour les périodes de houle avec et sans bulles. Une période de houle avec bulles est définie comme étant une période où un nuage de bulle est détecté sur au moins quatre images successives (soit une durée de 0.47s). Une période de houle sans bulles est définie comme étant une période où il n'y a pas de génération de nuage de bulles. Une vérification directe du passage ou non

d'un nuage de bulles est ensuite réalisée sur les images brutes PIV pour confirmer la détection des périodes de houles avec et sans bulles.

Pour la configuration 2, 136 périodes de houle ont été identifiées sans présence de nuages de bulles. L'amplitude moyenne de houle pour toutes ces périodes est de 38mm. La figure 3.34 à droite présente la moyenne de phase de la vitesse verticale obtenue pour ces 136 périodes de houles. On peut noter que les vitesses verticales positives pendant l'élévation de la surface libre sont élevées dans la zone de contact entre la forme et la surface avec une vitesse maximale mesurée d'environ $0,20m/s$. Des vitesses plongeantes sont rencontrées après le pic de houle avec une vitesse maximale mesurée d'environ $-0,19m/s$.

Au cours du même séquence d'essai, 17 périodes de houles avec présence de nuages de bulles ont été rencontrées. L'amplitude moyenne de houle pour toutes ces périodes est de 48mm. Dans ce cas, des vitesses ascendantes et plongeantes très élevées peuvent être identifiées dans la figure 3.34 à gauche. L'écoulement moyen a une vitesse verticale négative avec une composante plongeante pendant le pic de houle en phase 5. Les valeurs les plus élevées (phase 3) et les plus petites valeurs (phase 8) sont significatives. La présence de l'étrave génère une vitesse verticale maximale de $0,23m/s$ et une vitesse minimale de $-0,31m/s$.

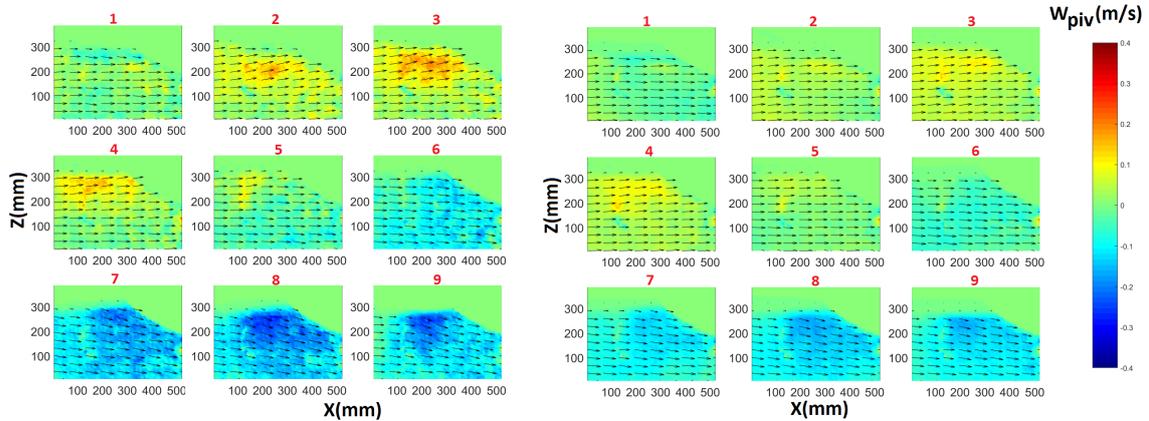


FIGURE 3.34 – Moyenne de phase de vitesse verticale **avec bulles (gauche)** et **sans bulles (droite)** autour du Pp ? dans le plan $y = 100mm$ (configuration 2). La carte de couleur correspond à la composante de vitesse verticale W_{piv} .

Ces observations révèlent que la génération des nuages de bulles est principalement conditionnée par les vitesses ascendantes de l'écoulement (phase 3) avant la formation de nuages de bulles entre les phases 5 et 7 (Mallat *et al.*, 2015, 2016a). Ces vitesses ascendantes sont l'origine de la vague d'étrave, provoquant la formation de bulles qui se propagent dans l'écoulement pendant les phases 8 et 9.

3.3. CARACTÉRISATION DE L'ÉCOULEMENT

La même analyse PIV a été effectuée pour la configuration 4 avec courant, houle et mouvements du navire. La figure 3.35 présente les moyennes de phase des vitesses verticales avec et sans génération de bulles respectivement. La combinaison entre la houle et les mouvements du navire est à l'origine de génération des vitesses verticales ascendantes et descendantes, plus importantes comparées à celles de la configuration 2. Les vitesses verticales maximales et minimales mesurées sont de $0,26m/s$ et de $-0,33m/s$ pour les périodes de houles avec bulles. Dans ce cas, 30 périodes de houles avec génération de bulles ont été identifiées avec une amplitude moyenne de houle de 49mm.

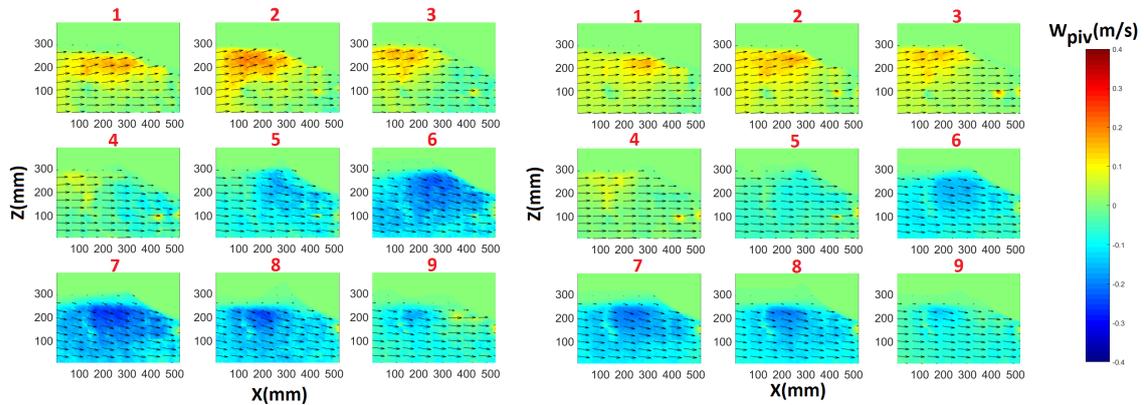


FIGURE 3.35 – Moyenne de phase de vitesse verticale **avec bulles (gauche)** et **sans bulles (droite)** autour du Pp ? dans le plan $y = 100mm$ (**configuration 4**). La carte de couleur correspond à la composante de vitesse verticale W_{piv} .

Afin d'établir un lien entre la vitesse de l'écoulement et la dynamique des nuages de bulles, la vitesse relative $W_{piv} - W_{nuage}$ est calculée où W_{piv} correspond à la moyenne des vitesses verticales PIV dans la zone du nuage de bulles et W_{nuage} est la vitesse verticale du nuage de bulles (voir figure 3.36). L'instant $t = 0$ correspond au pic de la houle au niveau de l'étrave. La vitesse relative est inférieure à $0,05m/s = 0,06U$, ce qui montre que la dynamique des nuage de bulles est principalement guidée par l'écoulement.

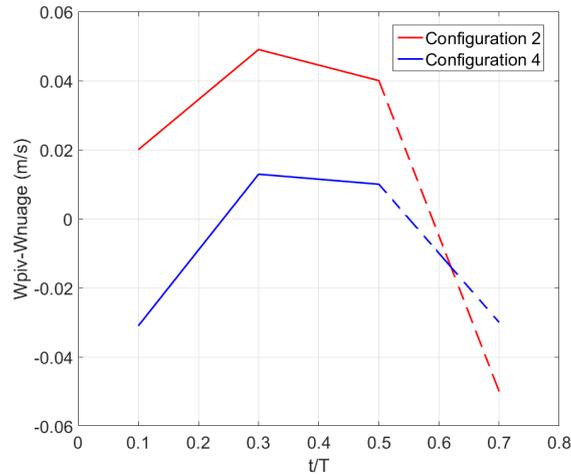


FIGURE 3.36 – La vitesse relative liée à la vitesse de l’écoulement et à la vitesse verticale des nuages de bulles autour du $Pp ?$. Les lignes pointillées présentent la zone où le calcul de la vitesse du nuage de bulle n’est pas entièrement validé.

3.4 Conclusion

Le phénomène de *Bubble Sweep-down* a été caractérisé autour de trois modèles de navires pour étudier les effets de la géométrie de l’étrave sur la génération de bulles. Grâce aux configurations expérimentales réalisées, deux mécanismes d’entraînement d’air ont été détectés autour des trois modèles. Le premier correspond au détachement tourbillonnaire et le second est l’entraînement d’air par déferlement de la vague d’étrave.

La fréquence d’occurrence des nuages de bulles pour quatre configurations et pour les trois modèles a été calculée. Les résultats ont montré que dans la configuration avec houle, la fréquence d’apparition des nuages de bulles est plus grande autour du $Pp ?$ par rapport aux étraves fine et inversée. C’est directement dû à l’évasement de l’étrave du $Pp ?$ qui est à l’origine de production des vagues intenses qui après déferlement, génèrent un nombre important de nuages de bulles.

Une méthode de traitement d’image par niveau de gris a été utilisée pour détecter et suivre l’évolution des nuages de bulles. Les propriétés de ces nuages en termes d’aire, de profondeur et de vitesse verticale ont été calculées puis comparées entre les trois modèles. Les résultats ont montré que les valeurs des propriétés physiques autour des étraves fine et inversée sont moins élevées que celles autour du $Pp ?$. Les nuages de bulles sont généralement plus petits et ne tendent pas à aller loin en profondeur pour ces deux modèles de navires.

Après avoir étudié la dynamique des nuages de bulles, une analyse de l'écoulement autour de l'étrave a été proposée. Un algorithme de détection automatique des oscillations de la surface libre sur les images brutes PIV a été développé et validé. Une analyse en Décomposition Orthogonale aux valeurs Propres (POD) a été ensuite effectuée pour extraire les champs de vitesse de l'écoulement moyen dans le plan correspondant à l'axe de symétrie du Pp ? et de l'étrave inversée. Les résultats ont montré que les mouvements du navire combinés à la houle augmentent non seulement la fréquence d'occurrence des nuages bulles, mais aussi l'amplitude de la composante ascendante de la vitesse verticale au-dessus du bulbe du Pp ?. En outre, la forme de l'étrave a une influence significative sur les propriétés hydrodynamiques de l'écoulement et sur l'interaction entre la houle incidente et l'étrave. Par conséquent, la géométrie de l'étrave est un paramètre très important agissant sur l'intensité des vagues d'étraves générées et donc sur la génération des nuages de bulles.

Une fois la relation entre l'écoulement hydrodynamique et la génération de bulle réalisée, une analyse des champs de vitesse a été effectuée directement sur les données PIV pour mettre en évidence la relation entre l'écoulement et la propagation des nuages de bulles. Les analyses en moyenne de phase avec et sans bulles autour du Pp ? ont montré que les champs de vitesses verticales ascendantes et plongeantes sont plus importants pour le cas avec bulles. L'amplitude moyenne de houle dans ce cas est globalement plus grande par rapport au cas sans bulles. La vitesse relative, calculée par rapport à la vitesse des nuage de bulles et à la vitesse de l'écoulement, indique que la dynamique des nuages de bulles est principalement guidée par l'écoulement.

Même si les effets d'échelle sont significatifs et que les résultats en terme de dynamique des nuages de bulles ne sont pas les mêmes au bassin et à l'échelle réelle, cette étude permet de quantifier le phénomène de *Bubble Sweep-down* autour de différentes géométries d'étraves et de comparer les performances de chaque géométrie face à ce problème. Les résultats globaux fournissent une base de données expérimentale intéressante pour les concepteurs de navires de coque et pourraient être utilisés pour la validation de futurs modèles numériques. Ces résultats permettent d'identifier les zones où l'interaction entre l'écoulement et l'étrave est prononcée, mais également les zones où les nuages de bulles sont générées et propagées.

Chapitre 4

Caractérisation fine du phénomène de bullage

Sommaire

4.1	Caractérisation 3D des nuages de bulles	90
4.1.1	Description du phénomène.	91
4.1.2	Méthode de reconstruction 3D des nuages de bulles	93
4.1.3	Reconstruction et évolution des nuages de bulles	94
4.2	Détection de bulles par sonde optique.	102
4.2.1	Paramètres caractéristiques d'une bulle	102
4.2.2	Caractérisation des bulles par sonde optique	105
4.3	Analyse Stéréo-PIV autour de l'étrave	117
4.4	Conclusions	121

Les études précédentes (Delacroix *et al.*, 2016b,c; Mallat *et al.*, 2018) et celles du chapitre 3 ont été réalisées afin de caractériser le phénomène de bullage en deux dimensions. Le laser utilisé ne permettait d'éclairer qu'un plan de mesure vertical autour de l'étrave et n'était pas suffisant pour assurer l'éclairage d'un plan horizontal requis pour une étude 3D. Les images ont été prises uniquement par une caméra derrière la fenêtre d'observation permettant la visualisation et la propagation des nuages de bulles d'air le long de la carène. La figure 4.1 présente cette configuration où un nuage de bulles est généré. La fréquence d'occurrence des nuages de bulles et la dynamique de ces nuages ont été étudiés. L'aire, la profondeur et la vitesse verticale des nuages de bulles ont été calculés après une détection des nuages puis une analyse par niveau de gris. Ces trois propriétés physiques ont été déterminées en 2D. Cependant, cette étude 2D est limitée en raison de la complexité du phénomène qui se produit en trois dimensions et des limites dues aux difficultés d'éclairage de la

zone d'étude. Le développement d'un protocole expérimental permettant d'identifier où les nuages de bulles (détectées dans l'étude 2D (figure 4.1)) sont vraiment situées dans la profondeur de champ est nécessaire pour obtenir une connaissance 3D du phénomène de *Bubble Sweep-down*. Ce développement a été rendu possible grâce à l'acquisition d'une source laser avec une énergie d'impulsion suffisante (200mJ) pour permettre une visualisation simultanée du phénomène dans le plan vertical et horizontal. Ce dispositif expérimental a été présenté dans la partie 2.6.2.

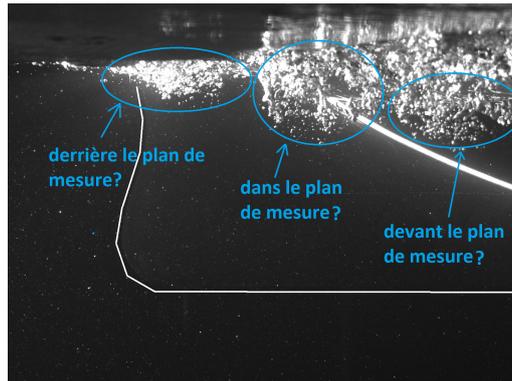


FIGURE 4.1 – Illustration d'un nuage de bulles généré autour du $Pp ?$ lors des études précédentes en 2 dimensions.

Ce chapitre est consacré à la caractérisation fine du phénomène de bullage autour de l'étrave classique du $Pp ?$ dans la configuration d'essai avec houle et mouvements du navire (Mallat *et al.*, 2017). La première partie présente la caractérisation 3D des nuages de bulles. L'évolution de l'angle de la vague d'étrave, paramètre important agissant sur la génération de bulles, est étudié lorsque le phénomène se produit. La reconstruction 3D et l'évolution de trois types de nuages de bulles sont présentées et analysées. Une fois la position des nuages de bulles identifiée dans les trois dimensions de l'espace, une étude spécifique sur la mesure des bulles à l'aide d'une sonde optique a été réalisée et présentée dans la deuxième partie. Le taux de vide, le diamètre ainsi que la vitesse de déplacement des bulles sont analysés. La dernière partie de ce chapitre se concentre sur l'analyse des mesures stéréo-PIV suivie d'une analyse appropriée de la décomposition orthogonale aux valeurs propres (POD) autour de l'étrave du $Pp ?$. Cette étude met en évidence le comportement de l'écoulement pendant des périodes de houle avec et sans génération de bulles.

4.1 Caractérisation 3D des nuages de bulles

Dans cette section, le phénomène de *Bubble Sweep-down* est d'abord décrit à partir des observations du comportement de la surface libre au niveau de l'étrave et de la génération et propagation des nuages de bulles. Ensuite, une reconstruction

3D de trois types de nuages de bulles est proposée et leur évolution dynamique est étudiée. Le dispositif expérimental utilisé pour l'étude 3D est présenté dans le chapitre 2. Trois caméras sont positionnées autour de l'étrave pour visualiser les nuages de bulles à partir de différents points de vue. Un plan laser horizontal de forte intensité lumineuse est utilisé pour éclairer la zone de génération et de propagation des nuages de bulles.

4.1.1 Description du phénomène

Les mesures ont été réalisées pendant trois minutes. Le modèle a été soumis au courant ($U = 0.75\text{m/s}$), ainsi qu'à la houle (amplitude de 33mm et fréquence $f_0 = 0.85Hz$) et aux mouvements de tangage et de pilonnement (2° de tangage et 20mm de pilonnement à $0.85Hz$). Grâce à cette configuration d'essai, l'entraînement d'air est principalement généré par déferlement de la vague d'étrave, provenant de l'interaction entre la houle incidente et celle réfléchiée sur l'étrave et/ou de l'impact entre l'étrave et la surface libre. Une vague déferlante est générée lorsque le pic de la houle interagit avec l'étrave lors des mouvements plongeants du navire. L'avant de la vague d'étrave avance considérablement en formant un creux à une distance d'environ 70mm de l'avant du navire (voir figure 4.2a). Après 0.23s , la vague d'étrave s'approche de la carène et un deuxième creux apparaît. La distance entre les deux creux est d'environ 125mm (voir figure 4.2b). A ce stade, l'entraînement d'air a lieu. Le nuage de bulles se propage de long de la carène et la vague d'étrave s'atténue jusqu'à sa disparition (voir figure 4.2c).

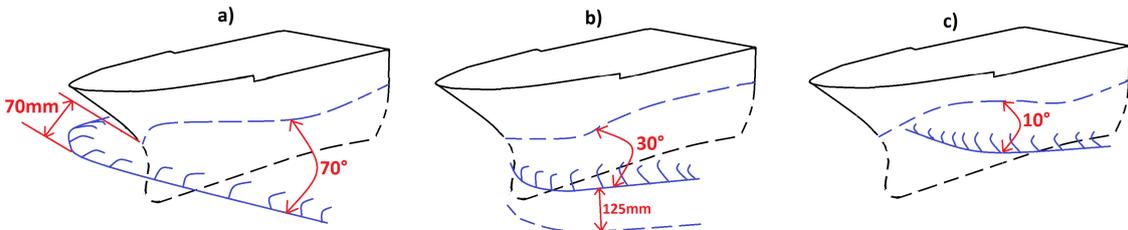


FIGURE 4.2 – Description du mécanisme de déferlement de la vague d'étrave.

La déformation de la surface libre au contact de la carène est donc un paramètre important à prendre en compte car il agit fortement sur la génération des bulles. Des méthodes optiques ont été développées pour caractériser cette déformation (Gomit *et al.*, 2013, 2015). La méthode optique de stéréo-réfraction (Gomit *et al.*, 2013) a été testée à partir d'essais spécifiques dans le bassin de circulation à houle et courant de l'Ifremer (voir Annexe C). Cette méthode s'appuie sur le déplacement apparent d'un motif aléatoire connu (la nappe laser) situé sous la surface, qui va servir comme référence, et observé par 2 points de vue différents. Ces mesures n'ont malheureusement pas permis de caractériser la surface libre. En effet, l'interaction

entre la houle et le courant est à l'origine d'apparition de rides, de clapots et des ondes capillaires au niveau de la surface libre qui ont rendu impossible la détection des particules PIV par les caméras positionnées au-dessus de la surface libre.

La combinaison entre la houle et les mouvements du navire est à l'origine d'une fréquence élevée d'occurrence des nuages de bulles. Dans ce cas, un nuage de bulles est généré toutes les deux ou trois vagues. La figure 4.3 présente les séquences d'image prises par les trois caméras pendant une période de houle avec génération d'un nuage de bulles. Chaque image brute de 1 à 9 correspond aux phases données dans la figure 4.3 (en haut à droite). Les images de la cam1 (au fond du bassin) et de la cam2 (au dessus de l'étrave) montrent que la vague d'étrave naît à l'avant de l'étrave en faisant un angle qui atteint près de 70° dans la phase 6. Le nuage de bulles est généré (phases 5 et 6) puis propagé (phases 7, 8 et 9) le long de la coque du navire comme on peut le voir sur les images de cam3. L'évasement de l'étrave du *Pp ?* est à l'origine d'une interaction intense entre la houle incidente et l'étrave ce qui génère des vagues à l'avant de l'étrave.

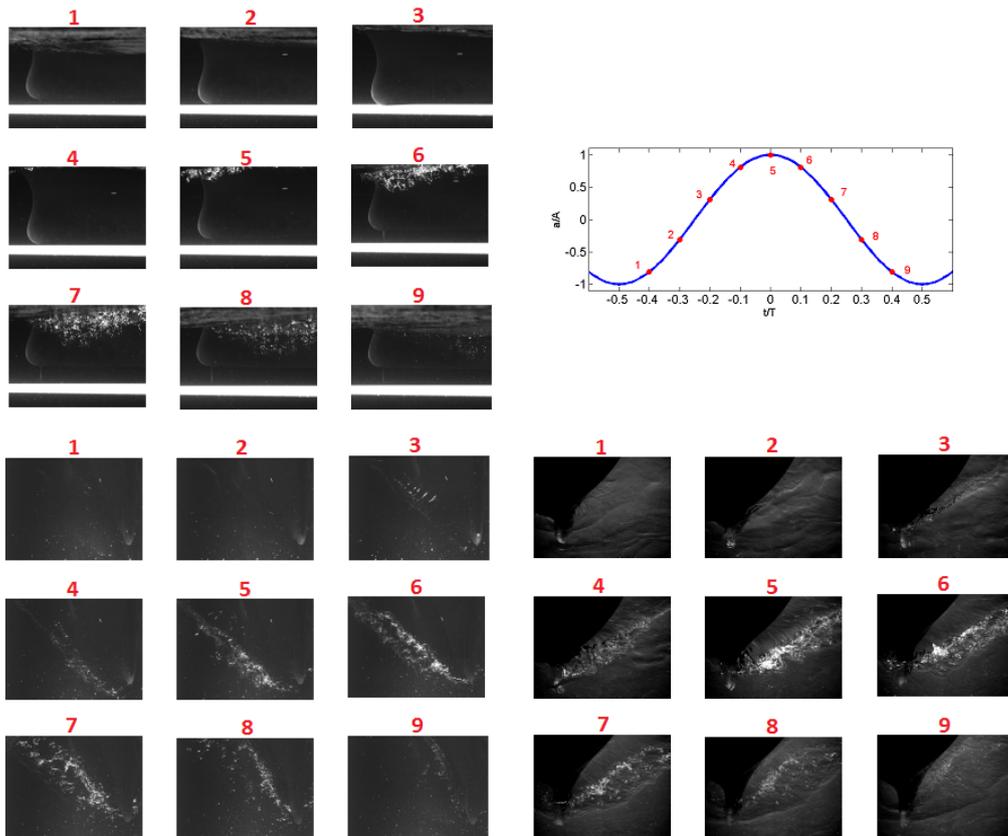


FIGURE 4.3 – Images prises par la cam1 (en bas à gauche), cam2 (en bas à droite) et cam3 (en haut à gauche) d'une période de houle avec generation de bulles. Haut à droite : les 9 phases d'une période de houle.

4.1.2 Méthode de reconstruction 3D des nuages de bulles

Comme mentionné en introduction de ce chapitre, les résultats des études précédentes ont été obtenus sans connaître la position horizontale des bulles (voir la figure 4.1). Or, une caractérisation précise du phénomène de *Bubble Sweep-down* implique de connaître la position exacte de l'ensemble des bulles dans le volume de mesure. La figure 4.4 montre un exemple de nuage de bulles pris par les cam1 et cam3 autour de l'étrave classique du *Pp ?*. La caméra installée au fond du bassin (cam1) permet de visualiser la position des nuages de bulles dans un plan horizontal. C'est l'information principale que nous n'avions pas dans les études précédentes en 2 dimensions. La combinaison des informations contenues dans les plans horizontaux et verticaux permet d'identifier la position des bulles dans le volume de mesure. Grâce à la caméra installée au fond du bassin, nous sommes maintenant capable de répondre aux trois questions sur la figure 4.1.

C'est à partir de la combinaison entre les images des cam1 et cam3 que le nuage de bulles est reconstruit en 3D dans la suite. Les images de la cam3 permettent d'étudier l'évolution du nuage de bulles dans les directions X et Z et les images de la cam1 permettent d'identifier l'évolution du nuage de bulles dans les directions X, Y.

Pour reconstruire le nuage de bulles en 3D, nous procédons comme suit :

- Les images brutes des cam1 et cam3 sont converties en images binaires, en tenant compte d'un premier niveau de gris (voir figure 4.4). Les images binaires permettent de détecter la surface libre et la position de l'étrave. Une première région du nuage de bulles est alors détectée. Une seconde boucle avec un deuxième seuil de niveau de gris est appliquée afin de maximiser la détection des bulles dans la région restreinte. Différents seuils ont été testés afin de détecter le nuage de bulles avec précision et il a été démontré que les variations de seuil ont très peu d'influence sur les résultats obtenus ;
- Pour plusieurs positions le long de la carène dans la direction du courant X_i , nous détectons les minima et les maxima de la zone blanche, par exemple : Z_{maxi} , Y_{mini} , Y_{maxi} (voir figure 4.4) ;
- A partir de cette détection, nous construisons une ellipse pour chaque position X. Les coordonnées du centre de l'ellipse est $(X_i, ((Y_{min})_i + (Y_{max})_i)/2, ((Z_{min})_i + (Z_{max})_i)/2)$. Les longueurs du grand axe et du petit axe sont $((Y_{min})_i + (Y_{max})_i)/2$ et $((Z_{min})_i + (Z_{max})_i)/2$ respectivement (voir la figure 4.5) ;
- Le volume du nuage de bulles est tracé avec les connexions des ellipses.

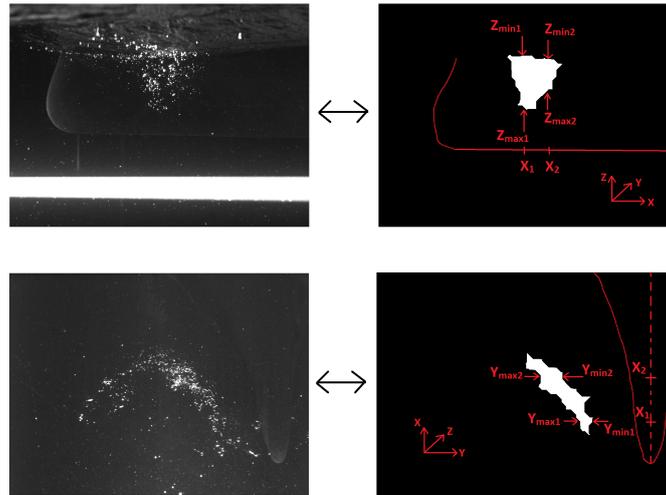


FIGURE 4.4 – La détection du même nuage de bulle vue par la caméra 3 (en haut) et par la caméra 1 (en bas).

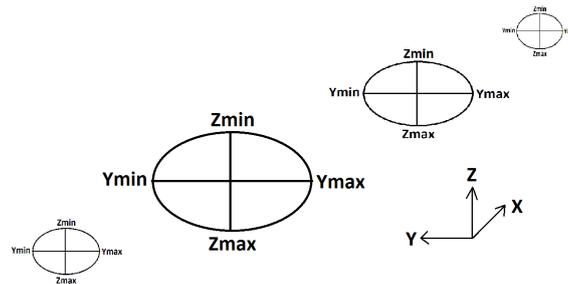


FIGURE 4.5 – La décomposition d’un nuage de bulles en ellipses pour ensuite reconstruire en 3D.

4.1.3 Reconstruction et évolution des nuages de bulles

En comparaison avec les études précédentes Delacroix *et al.* (2016c); Mallat *et al.* (2018), les mesures réalisées dans le cadre de ce travail permet de visualiser plus précisément le phénomène de *Bubble Sweep-down*. L’interaction entre la surface libre et l’étrave génère une vague plus ou moins intense qui est souvent l’origine de la génération d’un nuage de bulles. Par conséquent et en fonction de l’intensité de la vague d’étrave générée, différentes tailles de nuages de bulles sont observées.

Afin de caractériser le comportement 3D des nuages de bulles générés par déferlement des vagues d’étraves, trois nuages de différentes tailles ont été sélectionnés pendant la même séquence d’essai. Le premier est un nuage de bulles de faible intensité, le second est un nuage de bulles moyen et le troisième est un nuage de bulles

de forte intensité. Un nuage de faible intensité est défini comme étant un nuage de bulles avec un petit volume qui reste proche de la surface libre. Un nuage de forte intensité est défini comme étant un nuage de bulles de grand volume qui peut atteindre, en profondeur, le niveau du bas de la carène. Pour les figures 4.7, 4.8, 4.11, 4.12, 4.15 et 4.16 ci-après, chaque couleur correspond à la position du navire à un instant donné. Par exemple, le nuage de bulles bleu est généré lorsque le navire est dans sa position en couleur bleu.

4.1.3.1 Caractérisation d'un nuage de bulles de faible intensité

Pour les événements de faible intensité, la totalité du nuage de bulles peut être suivie à chaque instant (voir la figure 4.6). Les images de la cam3 montrent que la quantité d'air injectée dans l'écoulement est faible alors que celles de la cam1 montrent que le nuage est généré et propagé près de l'étrave. Ce nuage est reconstruit en 3D sur la figure 4.7. Il atteint une profondeur maximale de $0.65D$ (voir figure 4.8 à gauche où D correspond au tirant d'eau du $Pp?$ qui est de $0.18m$) et de $0.37B$ dans la direction transverse à l'écoulement incident (voir figure 4.8 à droite où B est la largeur du $Pp?$ qui est de $0.67m$).

La figure 4.9 montre l'évolution des trois composantes de vitesse de propagation du nuage de bulles. La vitesse est calculée à partir du centroïde de la région identifiée (déterminé à partir de la position du centre des nuages détectés). Les trois composantes $U_{petitnuage}$, $V_{petitnuage}$ et $W_{petitnuage}$ correspondent à la vitesse de propagation du nuage de bulles dans les directions X, Y et Z respectivement. L'instant $t = 0$ correspond à la première détection. La période de houle est divisée en deux processus : le processus de génération du nuage de bulles (entre la phase 1 et la phase 2 de la figure 4.6) et le processus de propagation du nuage de bulles (entre les phases 2 et 4 de la figure 4.6). Les deux processus sont séparés par une ligne verticale en pointillée sur la figure 4.9. Les vitesses $V_{petitnuage}$ et $W_{petitnuage}$ sont toujours négatives dans ce cas. La vitesse horizontale de déplacement du nuage de bulles est presque constante ($U_{petitnuage} = 0.73m/s$) entre les phases 2 et 4.

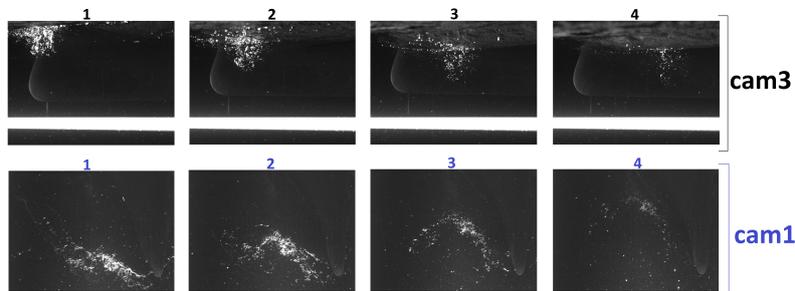


FIGURE 4.6 – Images prises par les cam1 et cam3 pendant une période de houle avec génération d'un nuage de bulles de faible intensité autour du $Pp?$.

4.1. CARACTÉRISATION 3D DES NUAGES DE BULLES

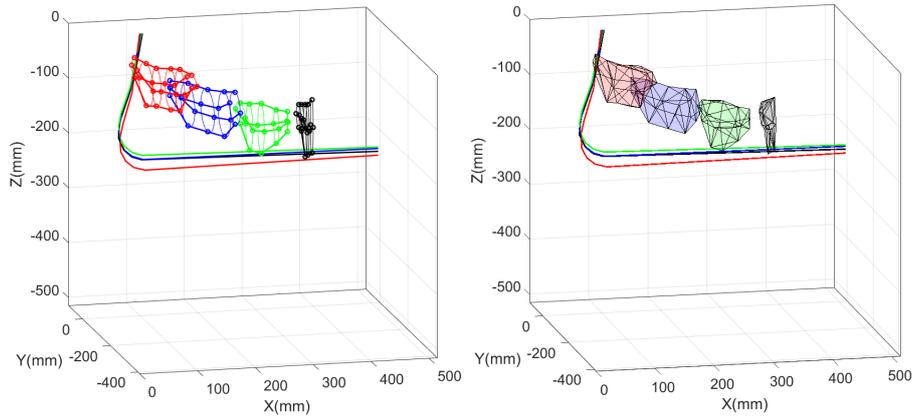


FIGURE 4.7 – Reconstruction 3D de l'évolution du nuage de bulles de faible intensité autour du Pp ?.

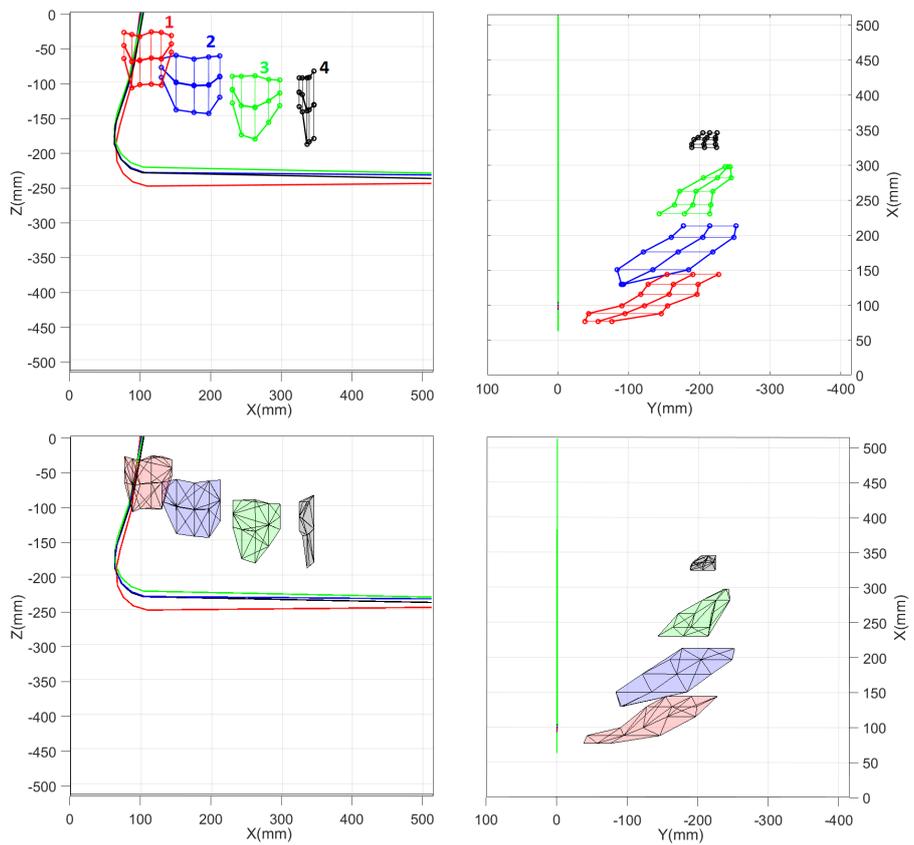


FIGURE 4.8 – Reconstruction de l'évolution du nuage de bulles de faible intensité autour du Pp ?. Vue X-Z (gauche) et vue Y-X (droite).

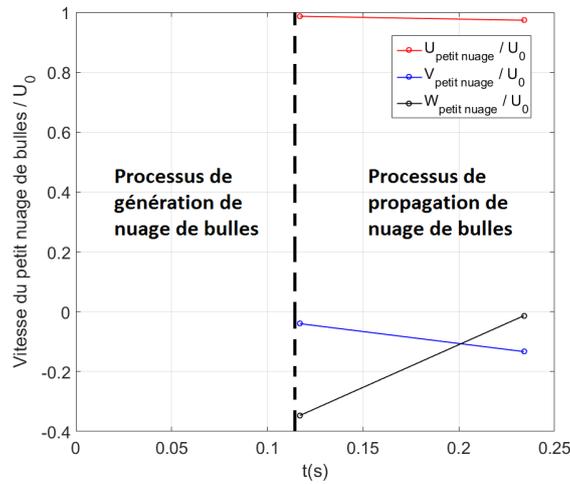


FIGURE 4.9 – Vitesse de propagation du nuage de bulles de faible intensité.

4.1.3.2 Caractérisation d'un nuage de bulles moyen

Un deuxième type de nuage de bulles est présenté ici. Comparé avec le cas précédent du nuage de bulles de faible intensité, les images de la cam3 sur la figure 4.10 montrent que la quantité d'air injectée dans l'écoulement est plus importante. Contrairement au cas précédent où le nuage de bulles reste proche de l'étrave, les images de la cam1 sur la figure 4.10 montrent que la vague déferle à l'avant de l'étrave en faisant un angle qui atteint près de 70° dans la phase 6, ce qui permet de générer un nuage de bulles un peu plus éloigné de l'étrave.

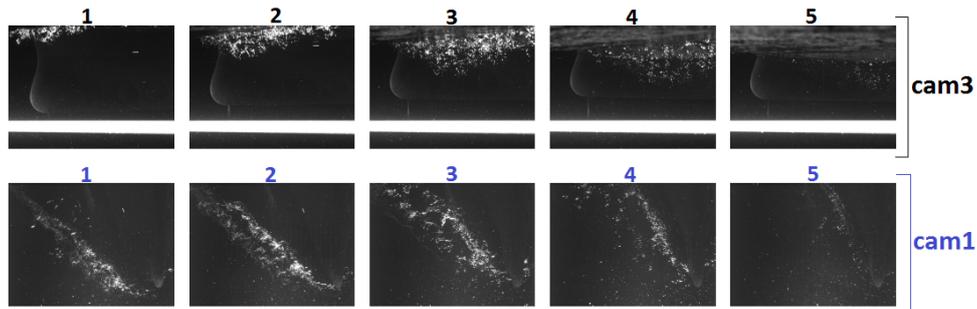


FIGURE 4.10 – Images prises par les caméras 1 et 3 pendant une période d'onde avec un nuage de bulle moyen autour de l'arc classique de Pp?.

La reconstruction 3D présentée en figure 4.11 montre que le nuage atteint une profondeur maximale de $0.83D$ (voir la figure 4.12 à gauche). Le nuage de bulles atteint une valeur maximale d'environ $0,48B$ dans la profondeur de champ (voir la figure 4.12 à droite). Comme pour le nuage de bulles de faible intensité, le processus de génération du nuage de bulles moyen se déroule entre les phases 1 et 2. Le nuage

4.1. CARACTÉRISATION 3D DES NUAGES DE BULLES

est ensuite propagé de la phase 2 jusqu'à la phase 5 (voir figure 4.10), donc avec une persistance dans l'écoulement plus longue.

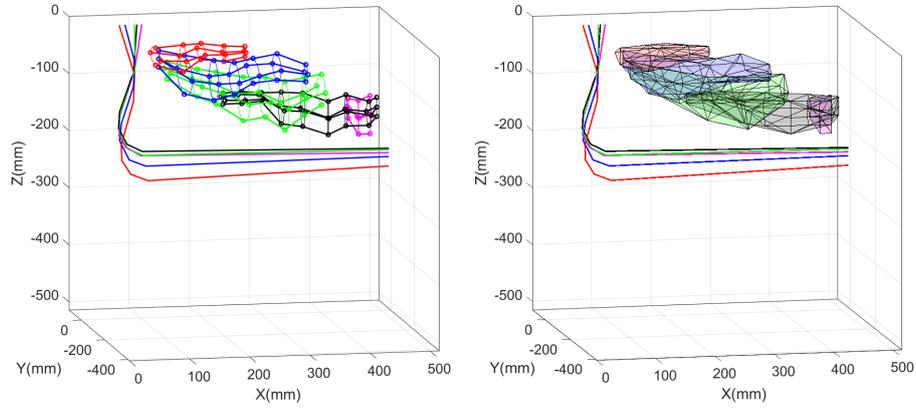


FIGURE 4.11 – Reconstruction 3D de l'évolution d'un nuage de bulles moyen autour du Pp ?.

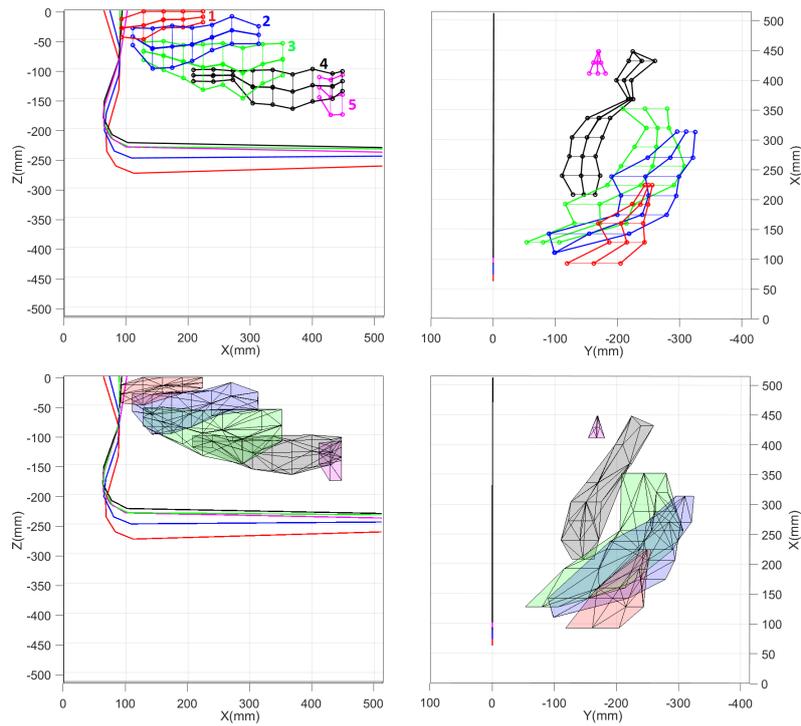


FIGURE 4.12 – Reconstruction de l'évolution d'un nuage de bulles moyen autour du Pp ?. Vue X-Z (gauche) et vue Y-X (droite).

La figure 4.13 montre l'évolution des composantes de vitesse de propagation du nuage de bulles moyen. La composante $W_{nuagemoyen}$ est toujours négative dans ce

cas et la composante $V_{nuagemoyen}$ positive (jusqu'à $0.25U_0$) au début du processus de propagation. Le nuage de bulles moyen tend à aller plus loin en profondeur et sur les côtés du bateau. La vitesse horizontale du nuage de bulles oscille entre $U_{nuagemoyen} = 0.6m/s$ et $U_{nuagemoyen} = 0.73m/s$ entre les phases 2 et 5.

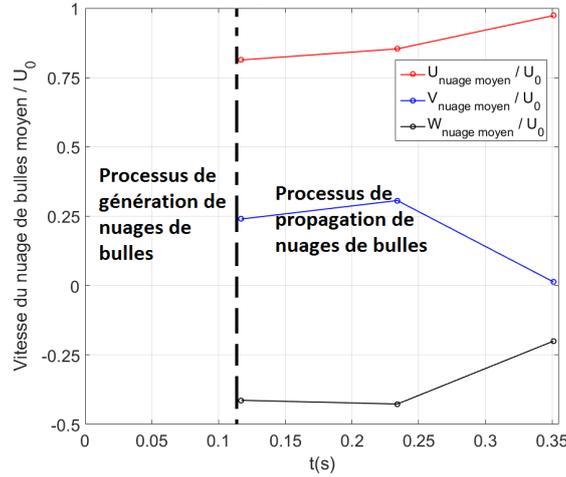


FIGURE 4.13 – Vitesse de propagation du nuage de bulles moyen.

4.1.3.3 Caractérisation d'un nuage de bulles de forte intensité

Pour les événements les plus importants rencontrés durant cette séquence d'essai, il est difficile de suivre la totalité du nuage de bulles à chaque instant (voir la figure 4.14). Les images de la cam1 sur la figure 4.14 montrent que la vague déferle bien à l'avant de l'étrave en faisant un angle qui atteint près de 90° dans la phase 3, ce qui permet de générer des bulles loin de l'étrave. Les images de la cam3 montrent que la quantité d'air injectée dans l'écoulement est très importante. La reconstruction 3D présentée dans la figure 4.15 montre que le nuage de bulles atteint une profondeur maximale de $1.1D$ (voir figure 4.16 à gauche) et une valeur maximale d'environ $0.6B$ dans le plan horizontal (voir figure 4.16 à droite).

4.1. CARACTÉRISATION 3D DES NUAGES DE BULLES

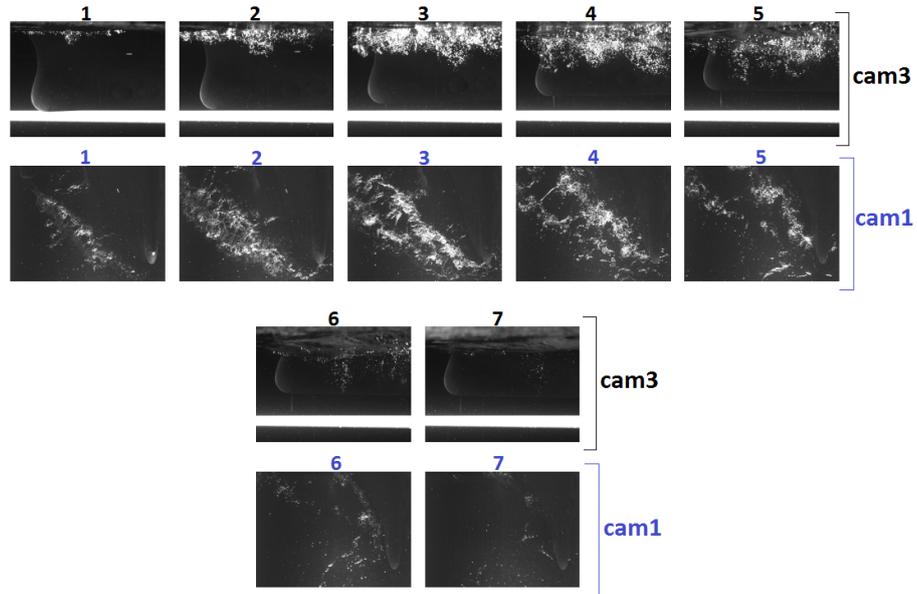


FIGURE 4.14 – Images prises par les caméras 1 et 3 pendant une période de houle où un nuage de bulles de forte intensité est rencontré.

Le processus de génération du nuage de bulles se déroule de la phase 1 jusqu'à la phase 4. Le nuage est ensuite propagé de la phase 4 jusqu'à la phase 7 (voir figure 4.14). La méthode de reconstruction 3D est moins adaptée dans ce cas puisque la taille des images n'est pas adaptée à ces événements extrêmes. Par conséquent, la position du centre du nuage est mal détectée et la détermination de la vitesse de propagation du nuage n'est pas entièrement validée.

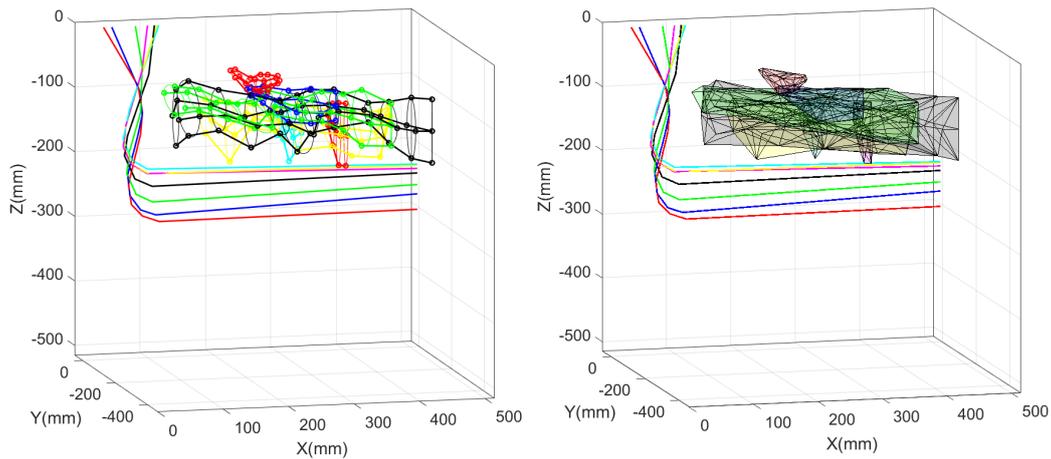


FIGURE 4.15 – La reconstruction en 3D de l'évolution d'un nuage de bulles de forte intensité autour du Pp ?.

4.1. CARACTÉRISATION 3D DES NUAGES DE BULLES

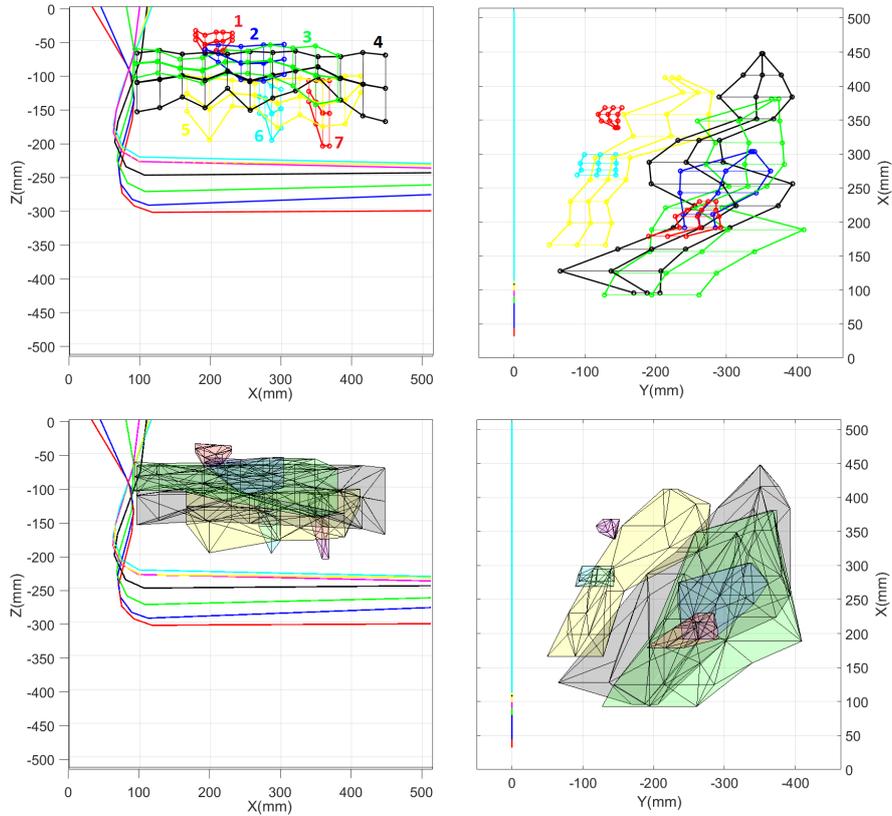


FIGURE 4.16 – Reconstruction de l'évolution d'un nuage de bulles de forte intensité autour du Pp ? Vue X-Z (gauche) et vue Y-X (droite).

Ces observations montrent que la méthode de reconstruction 3D des nuages de bulles permet une bonne caractérisation du phénomène de *Bubble Sweep-down* autour de l'étrave. Nous sommes maintenant en mesure de suivre l'évolution du nuage de bulles dans la profondeur de champ (direction Y) grâce à la caméra placée au fond du bassin. Nous n'avions pas accès à cette information dans les précédentes études 2D Delacroix *et al.* (2016b,c). La caractérisation du nuage de bulles dans cette direction est nécessaire et permet de déterminer si les nuages de bulles se propagent sous la coque du navire.

Trois types de nuages de bulles ont été caractérisés dès le processus de génération jusqu'au processus de propagation. La méthode de reconstruction est efficace pour les nuages de bulle de faible intensité et les nuages de bulle moyens. La totalité de ces deux types de nuages peut être suivie une fois le nuage généré. Pour les nuages de bulles de grande intensité, la méthode est moins adaptée car il est difficile de suivre l'évolution du nuage à chaque instant. Le processus de génération des nuages de bulles de grande intensité prend plus de temps que celui des deux autres nuages de bulles.

La vitesse de propagation des nuages montre que les nuages d'intensité faible à moyenne ont quasiment le même comportement dans les directions X et Z. Nous trouvons une valeur d'environ $0.8U_0$ pour la composante longitudinal et d'environ $-0.4U_0$ pour la composante vertical. En ce qui concerne la composante de la vitesse transversale V, la propagation du nuage de bulles dans la profondeur du champ est plus rapide pour le nuage moyen comparée aux nuages de faible intensité.

Pour les nuages moyens et les plus intenses où des vagues d'étraves conséquentes sont générées, les nuages ont tendance à aller plus loin non seulement en profondeur, mais aussi étalé en largeur permettant une propagation le long de la coque et à proximité des transducteurs. Les mesures acoustiques peuvent être perturbées dans ces cas en raison de la fréquence d'occurrence élevée des nuages de bulles, en particulier dans cette configuration avec houle et mouvements du navire Mallat *et al.* (2018).

Les résultats de cette partie ont permis d'identifier les régions où la génération puis la propagation des nuages de bulles ont lieu. Ces résultats ont été utilisés pour déterminer le positionnement d'une sonde à fibres optiques pour caractériser localement les bulles de manière individuelle et non pas le nuage de bulles dans sa globalité.

4.2 Détection de bulles par sonde optique

Des essais en collaboration avec l'IRENAV de Brest ont été réalisés sur la maquette du *Pp ?* pour mesurer les bulles générées par déferlement de la vague d'étrave à l'aide d'une sonde optique. Le montage expérimental de cette étude est détaillé dans le chapitre 2. La première partie de cette section présente les différents paramètres d'une bulle à étudier et à analyser. La deuxième partie est consacrée à la présentation des résultats obtenus, à savoir la fréquence d'apparition des bulles, les vitesses ainsi que les diamètres des bulles.

4.2.1 Paramètres caractéristiques d'une bulle

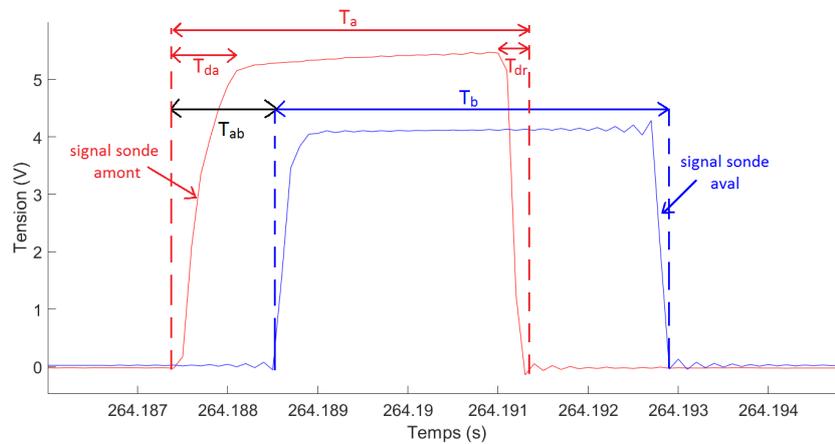
Le taux de vide, la vitesse et le diamètre des bulles sont les principaux paramètres à identifier et à analyser. La figure 4.17 présente un exemple de signal d'une bulle détectée par sonde optique où les différents paramètres sont détaillés. Pour une détection d'une bulle sur les deux sondes (bulle associée), deux signaux sont présentés : le premier signal rouge correspond à la sonde amont et le deuxième à la sonde aval. Pour les signaux des sondes amont et aval, l'axe des abscisses correspond au temps en secondes et l'axe des ordonnées correspond à la tension du signal en Volts. La sonde optique est étalonnée de sorte à avoir 0 Volt dans l'eau et 5 Volt dans l'air (détection d'un passage de bulle).

4.2. DÉTECTION DE BULLES PAR SONDE OPTIQUE

Le temps de transit (décalage temporel T_{ab} sur la figure 4.17) est défini comme la différence entre les temps indiquant le début de la détection du gaz entre chaque sonde. Ainsi, la vitesse de bulle obtenue est $V_b = L_{ab}/T_{ab}$ où L_{ab} correspond à la distance entre les pointes amont et aval de la sonde ($L_{ab} = 1.15\text{mm}$).

En général, une bulle ne traverse pas la pointe de mesure par son centre. Ainsi, on ne s'attend pas à ce que la bulle coupe la pointe le long de son diamètre, mais le long d'une longueur plus courte, appelée longueur de corde. La longueur de corde L_c de chaque bulle a été obtenue en tant que le produit de la vitesse de la bulle et son temps de résidence T_a sur la pointe amont ($L_c = V_b.T_a$). Cela a permis de déterminer la distribution de la longueur de cordes de bulles.

Enfin, nous définissons une longueur de latence représentative de la taille de la plus petite structure de gaz qui peut être détectée par la sonde avec une bonne précision. Cette longueur est le produit de la vitesse de déplacement de l'interface et le temps de démouillage T_{da} sur la pointe amont ($L_{Latence} = V_b.T_{da}$). Elle est obtenue pour un démouillage de la sonde (liquide-air) en interface plane par une translation contrôlée de la sonde. Pour la sonde considérée, la longueur de latence vaut 0.5mm. Au delà d'une vitesse d'interface de 0.2m/s, la longueur de la latence est constante pour une sonde donnée.



T_a : temps de résidence sonde amont

T_b : temps de résidence sonde aval

T_{ab} : décalage temporel entre sonde amont et sonde aval

T_{da} : temps de démouillage sonde amont

T_{dr} : temps de remouillage sonde amont

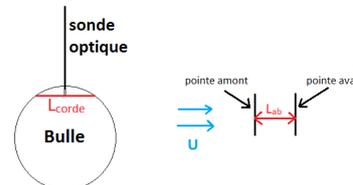


FIGURE 4.17 – Exemple de signaux enregistrés suite au passage d'une bulle sur les deux sondes.

Incertitudes de mesure

Le taux de vide sur une pointe de la sonde est $\alpha = \frac{\sum T_r}{T}$ avec T_r le temps de résidence sur la pointe et T le temps d'acquisition total. Pour un seuil variant entre 0 et 100%, l'incertitude sur le temps de résidence vaut le temps de résidence $\pm \frac{1}{2}$ temps de démouillage, sachant que le temps de remouillage est plus faible que le temps de démouillage.

$$\Delta\alpha = \pm \frac{1}{2} \cdot \frac{T_d}{T}$$

$$\frac{\Delta\alpha}{\alpha} = \pm \frac{1}{2} \frac{T_d}{T \cdot \alpha} = \pm \frac{1}{2} \frac{T_d}{T_r}$$

$$\frac{\Delta\alpha}{\alpha} = \pm \frac{1}{2} \frac{T_d}{T_r}$$

Le temps de démouillage est $\frac{L_l}{V_b}$ et le temps de résidence est $\frac{L_c}{V_b}$. L'incertitude sur α vaut donc $\frac{\Delta\alpha}{\alpha} = \pm \frac{1}{2} \frac{L_l}{L_c}$ pour un seuil entre 0 et 100%. Pour des bulles sphériques, la longueur de corde moyenne vaut $L_c = \frac{2}{3}d_m$, ce qui résulte une incertitude sur α

$$\text{de } \frac{\Delta\alpha}{\alpha} = \pm \frac{\frac{1}{2} L_l}{\frac{2}{3} d_m} = \pm \frac{3L_l}{4d_m}.$$

Pour un diamètre moyen de bulles de 4mm : $\frac{\Delta\alpha}{\alpha} = \pm 9\%$

La vitesse d'une bulle qui perce les 2 pointes de la sonde optique vaut $V_b = \frac{L_{ab}}{T_{ab}}$. L'incertitude sur le décalage temporel est $\pm \frac{2}{f_s}$ où $f_s = 10kHz$ la fréquence d'acquisition de la sonde optique. L'incertitude sur la vitesse de bulle vaut donc $\frac{\Delta V_b}{V_b} = \frac{\Delta l_{ab}}{l_{ab}} + \frac{\Delta T_{ab}}{T_{ab}} = \pm \frac{2}{f_s \cdot T_{ab}} = \pm \frac{2V_b}{f_s \cdot L_{ab}}$.

$$\frac{\Delta V_b}{V_b} = \pm \frac{2V_b}{f_s \cdot L_{12}}$$

Pour $f_s = 10kHz$ et $V_b = 0.75m/s$, $\frac{\Delta V_b}{V_b} = \pm 13\%$; V_b est l'ordre de grandeur de la vitesse des bulles.

La longueur de corde de la bulle est $L_c = T_r \cdot V_b = L_{ab} \cdot \frac{T_r}{T_{ab}}$. L'incertitude sur la longueur de la corde vaut donc $\frac{\Delta L_c}{L_c} = \frac{\Delta T_r}{T_r} \pm \frac{\Delta T_{12}}{T_{12}}$.

$$\frac{\Delta T_r}{T_r} = \pm \frac{T_d}{2.T_r} \pm \frac{2}{f_s.T_r} = \pm \frac{\Delta \alpha}{\alpha} \pm \frac{2.V_b}{f_s.L_c}$$

$$\frac{\Delta T_{12}}{T_{12}} = \pm \frac{\Delta V_b}{V_b}$$

$$\frac{\Delta L_c}{L_c} = \pm \frac{\Delta \alpha}{\alpha} \pm \frac{2.V_b}{f_s.L_c} \pm \frac{\Delta V_b}{V_b}$$

Pour une fréquence d'acquisition de sonde $f_s = 10Khz$, une vitesse de bulle $V_b = 0.75m/s$ et une longueur de corde $L_c = 4mm$, l'incertitude sur le taux de vide α , V_b et L_c vaut $\frac{\Delta \alpha}{\alpha} = \pm 3.75\%$, $\frac{\Delta V_b}{V_b} = \pm 13\%$, $\frac{\Delta L_c}{L_c} = \pm 20.5\%$ respectivement.

4.2.2 Caractérisation des bulles par sonde optique

Dans cette partie, nous présentons les résultats obtenus en terme de fréquence d'occurrence de bulle, de vitesse et de diamètre des bulles associées. Certains cas particuliers de détection de bulles sont analysés, à savoir une détection d'une petite bulle, d'une grosse bulle, de 2 bulles avec des tailles similaires mais des vitesses différentes, d'une bulle à un grand décalage temporel et enfin une détection successive de 3 bulles.

Les figures 4.18 et 4.19 présentent le même nuage de bulle pris par la cam2 derrière la vitre et la cam1 au fond du bassin. On signale que pour ce cas, l'acquisition a été réalisée avec une nappe laser horizontale au dessous de la carène, ce qui nous a permis de corréler la détection de bulle par sonde optique avec l'identification visuelle (voir figure 4.18). Cependant, le signal sur l'oscilloscope en sortie du module optoélectronique est bruité et on aperçoit des pics dus à la lumière très intense émise par le laser et non pas suite à une détection de bulle. Nous avons essayé de diminuer la puissance du laser mais le problème persiste. Nous avons donc arrêté le laser et monté un projecteur derrière la vitre pour éclairer la zone autour de la maquette. Avec ce système d'éclairage, les bulles sont beaucoup moins nettes mais il n'y a plus de perturbation. Les pics sur le signal de l'oscilloscope correspondent alors à des

détections de bulles.

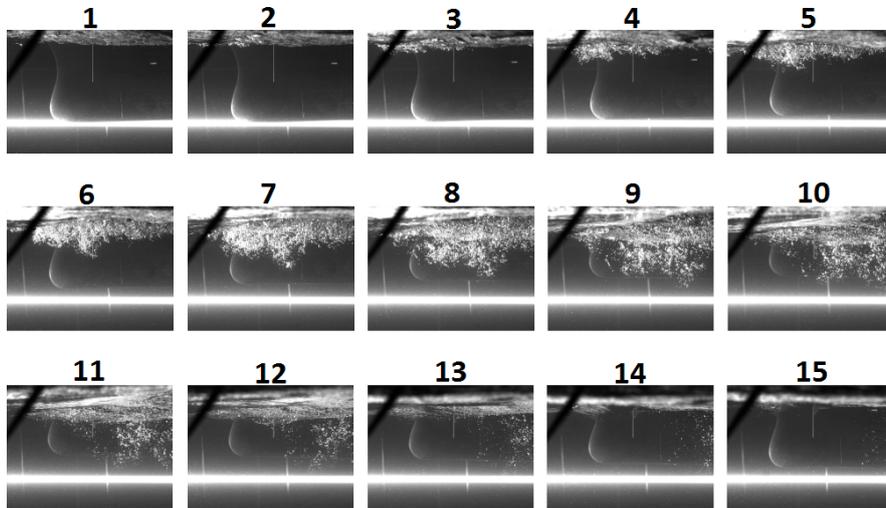


FIGURE 4.18 – Images de la cam2 derrière la vitre pour une période de houle avec un nuage de bulles généré et une nappes laser horizontale au-dessous de la carène.

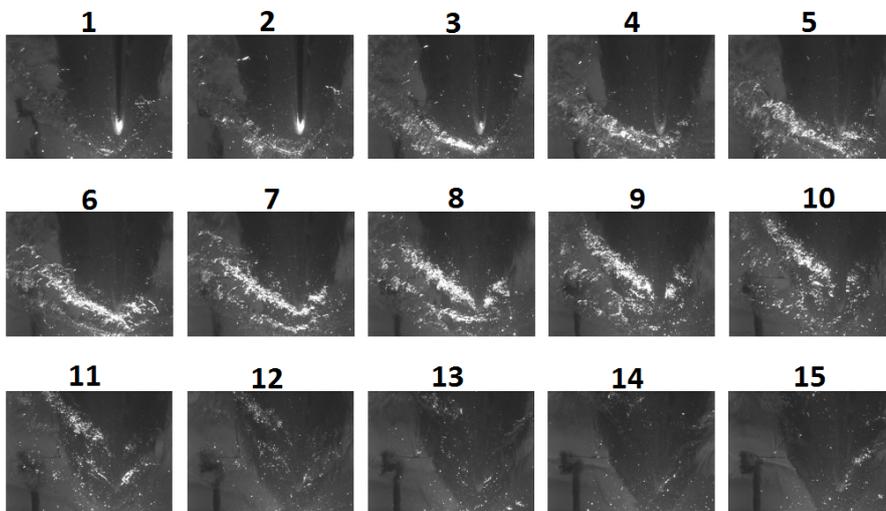


FIGURE 4.19 – Images de la cam1 au fond du bassin pour une période de houle avec un nuage de bulles généré et une nappes laser horizontale au-dessous de la carène.

4.2.2.1 Fréquence d'occurrence des bulles

La figure 4.20 présente le signal complet d'une acquisition de 1 heure pour les conditions d'essais correspondant à une vitesse de courant de 0.75m/s et une houle

4.2. DÉTECTION DE BULLES PAR SONDE OPTIQUE

de 33mm d'amplitude et de 0.85Hz de fréquence. La couleur rouge correspond au signal de la sonde amont et la couleur bleu au signal de la sonde aval. Afin de mieux visualiser les pics, les périodes de non détection ont été supprimées sur la figure 4.21.

Trois cas de détections des bulles ont été rencontrés. Le premier correspond à une détection sur la sonde amont S1 uniquement. Le deuxième correspond à une détection sur la sonde aval S2 uniquement. Le troisième correspond à une détection sur les deux sondes. Dans ce cas, une bulle "associée" BA est détectée. La fenêtre temporelle en ms utilisée pour T_{ab} pour l'association des bulles est $0.8 < T_{ab} < 12$ ms.

La fréquence d'occurrence de bulles, calculée comme étant le nombre de détection de bulles divisé par une tranche de temps de 600s pour chaque période P de 1 à 6, est présentée sur la figure 4.22.

Pour les caméras, nous n'avons que 10 minutes d'acquisition. Nous ne pourrions déterminer s'il s'agit bien d'une détection de bulle que pour les 10 premières minutes d'acquisition. La figure 4.23 présente un exemple de visualisation de bulle détectée par la sonde optique. Trois instants pendant les 10 premières minutes sont présentés. Pour chaque instant, l'image de cam1 et de cam2 montrent le passage de bulle au niveau des pointes de la sonde. Le cercle rouge dans les images de la cam1 au fond du bassin correspondent à la position des pointes de la sonde.

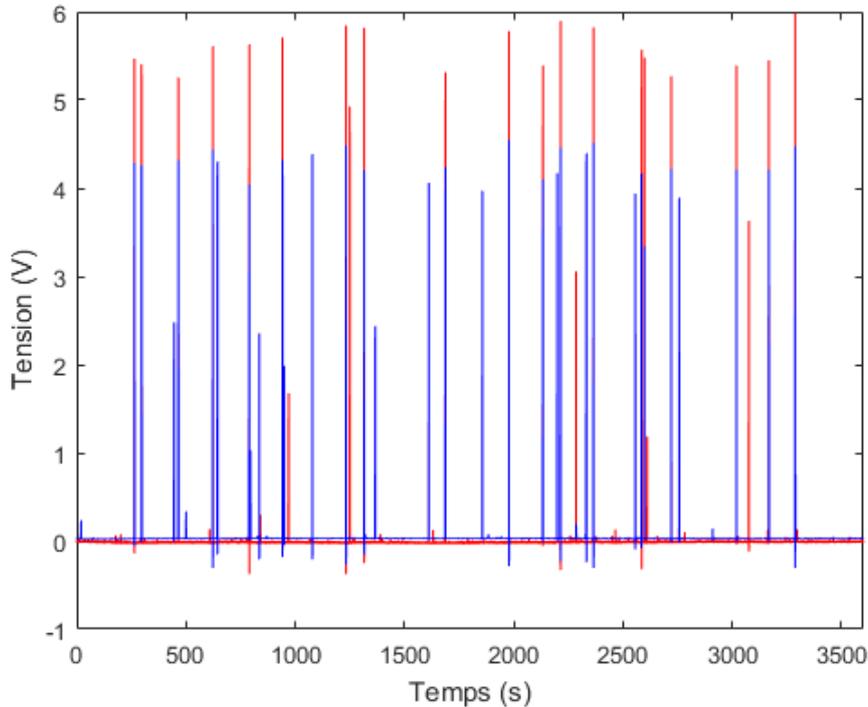


FIGURE 4.20 – Signal complet de l'acquisition.

4.2. DÉTECTION DE BULLES PAR SONDE OPTIQUE

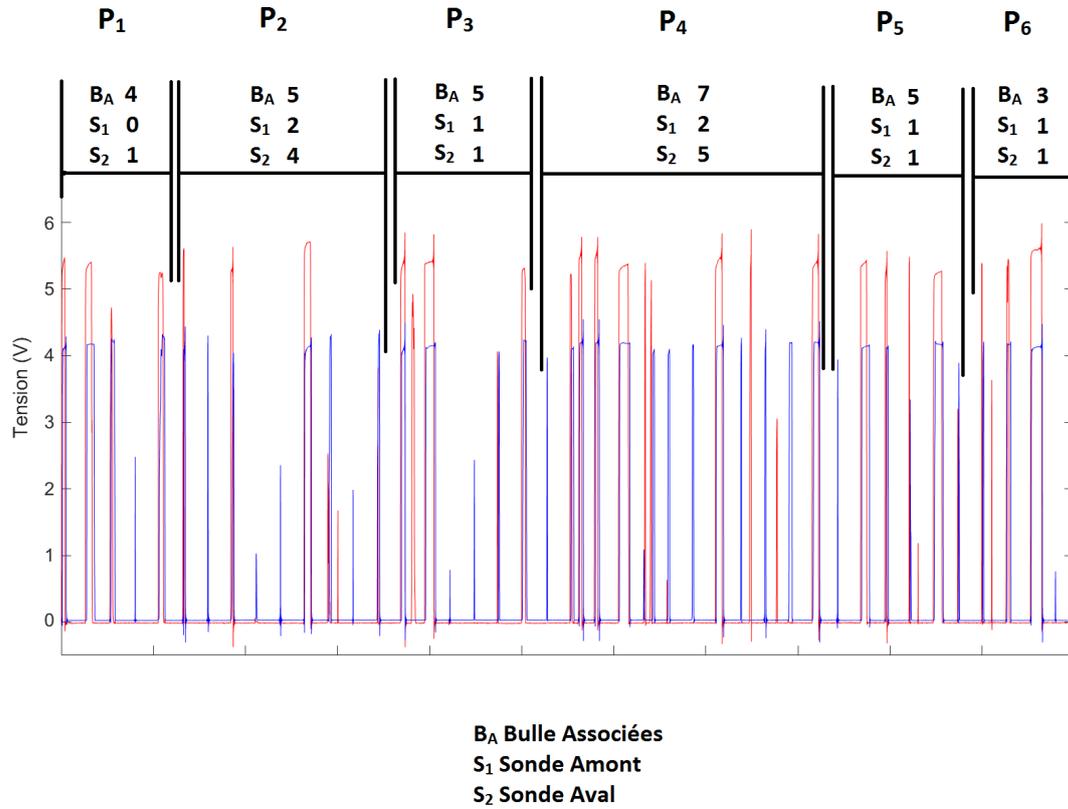


FIGURE 4.21 – Signal brut après élimination des phases sans détection.

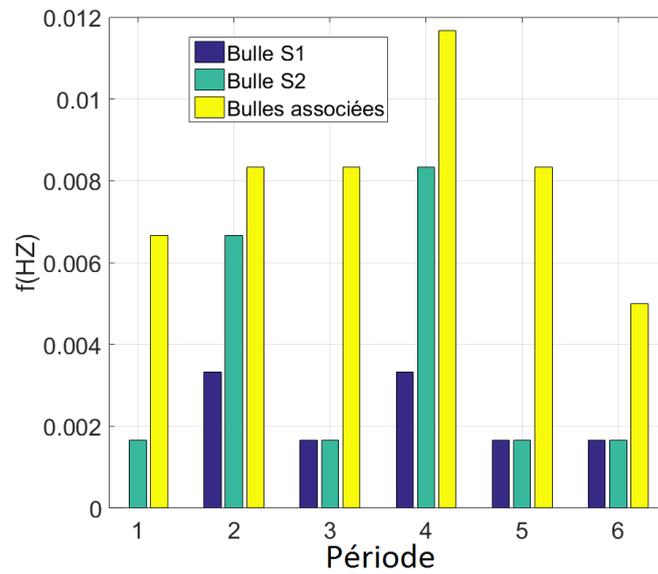


FIGURE 4.22 – Fréquence d'occurrence des bulles par période de 10 minutes.

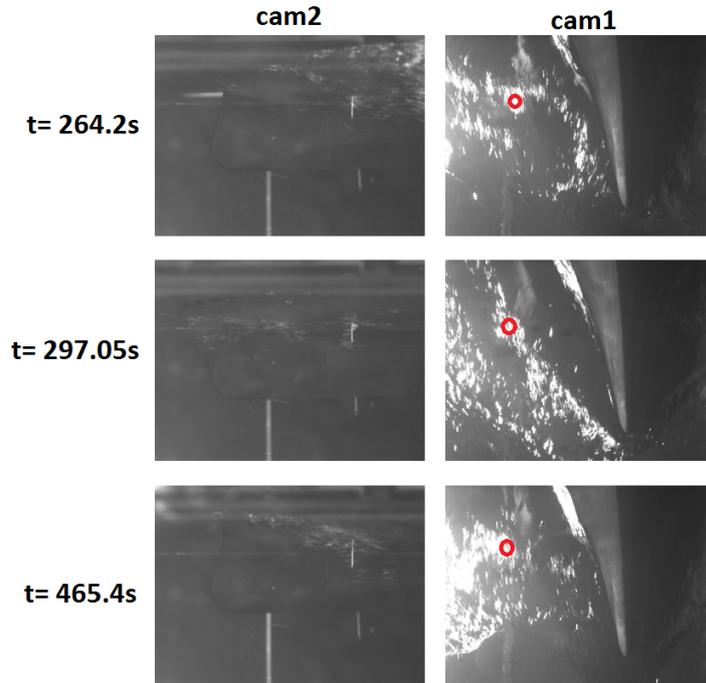


FIGURE 4.23 – Images des cam1 et cam2 au moment d’une détection d’une bulle à trois instants différents.

Pour les 60 minutes d’acquisition, nous détectons 49 bulles avec la sonde optique. La fréquence d’occurrence des bulles pour l’acquisition totale est donc $f = 49/3600 = 0.014\text{Hz}$, tandis que les études précédentes (Delacroix *et al.* (2016b); Mallat *et al.* (2018)) montrent que la fréquence d’occurrence des nuages de bulles par déferlement de vague d’étrave est de 0.55Hz . Nous n’avons donc que 49 nuages sur les 1800 nuages où une bulle du nuage pourrait percer une des deux pointes de la sonde optique, soit 2.7%. Ceci est vrai dans le cas où une seule bulle est détectée par nuage. Cependant, on peut avoir plus qu’une détection dans le même nuage de bulles (voir figure 4.24), ce qui rend difficile la corrélation entre la fréquence d’occurrence des nuages de bulles et la fréquence d’occurrence de bulle sur les pointes de la bisonde.

Cette analyse montre que ce type de mesure intrusive et ponctuel n’est pas idéal pour notre problématique de détermination de la fréquence d’occurrence des nuages de bulles. La complexité du phénomène de bullage par déferlement de la vague d’étrave est à l’origine de la génération d’un grand nombre de bulles assez dispersées dans les 3 dimensions de l’espace. Il est donc difficile de trouver une position de la sonde où le % des bulles détectées soit élevé. Cependant, ce type de mesure permet d’accéder à certaines caractéristiques particulières d’une bulle.

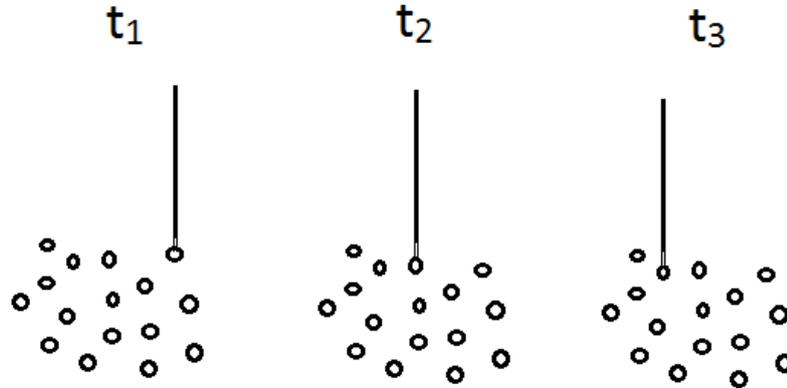


FIGURE 4.24 – Détection de 3 bulles dans le même nuage de bulles.

4.2.2.2 Vitesse et diamètre des bulles

La détection d'une bulle associée sur les deux pointes de la sonde nous permet de calculer la vitesse de la bulle ainsi que la longueur de la corde de celle-ci. En revanche, les détections sur une seule pointe, que ce soit la pointe amont ou la pointe aval, permettent uniquement de déterminer le taux de vide au niveau de chaque pointe.

Le tableau ci-après présente les différents paramètres de 25 bulles associées détectées pendant une durée d'acquisition de 1 heure. Pour chaque bulle associée, le décalage temporel T_{ab} , la vitesse, le temps de résidence sur la pointe amont T_a , la longueur de corde L_{corde} , le temps de démouillage sur la pointe amont T_{da} , et la longueur de Latence $L_{Latence}$ sont présentés.

Nous obtenons des taux de vide de 0.003% et de 0.004% sur les pointes amont et aval respectivement. La vitesse moyenne des bulles obtenue est de 0.81m/s et la longueur de corde moyenne est de 3.96mm. La figure 4.26 présente l'histogramme de vitesse et de longueurs de corde. Une distribution similaire en taille de bulles a été obtenu par Park *et al.* (2016) lors de l'injection de bulles dans la couche limite turbulente d'un navire afin de réduire la trainée.

4.2. DÉTECTION DE BULLES PAR SONDE OPTIQUE

Temps(s)	Niveau Tension (Volts)		T_{ab} (ms)	V_{bulle} (m/s)	T_a (ms)	L_{corde} (mm)		T_{da} (ms)	$L_{Latence}$ (mm)
	sonde amont	sonde aval				sonde amont	sonde amont		
264,2	5,1	4	1	1,15	3,7	4,3	0,7	0,805	
297,03	5,2	4	1,6	0,7188	7,6	5,5	0,9	0,64692	
297,06	4,6	4,1	0,9	1,2778	2,9	3,7	2	2,5556	
465,4	5,1	4,18	2,4	0,4792	7	3,4	4	1,9168	
790,1	5,4	4	3,1	0,371	4,5	1,7	1,5	0,5565	
941,9298	2,01	4,2	1,4	0,8214	0,7	0,575	0,9	0,73926	
1233	5,2	4	1,2	0,9583	5,1	4,9	0,5	0,47915	
1316	5,2	4	2,2	0,5227	11,2	5,9	1,3	0,67951	
1316,1	1,8	0,76	1,5	0,7667	0,1	0,076	0,2	0,15334	
1611	4	4	1,5	0,7667	1,1	0,843	0,8	0,61336	
1688	5,1	4,1	1,6	0,7188	4,6	3,3	1,4	1,00632	
1978,415	5	4	1,3	0,8846	2,3	2	0,8	0,70768	
1978,425	5,35	4	1	1,15	3,7	4,3	1	1,15	
1978,5	5,2	4	1,2	0,9583	11,1	10,6	1,2	1,14996	
2133,5918	5	3,9	8,7	0,1322	0,9	0,11897	1,8	0,23796	
2214,618	5,3	4	1,6	0,7188	7,8	5,6	1,1	0,79068	
2365,34	5,2	4	1,7	0,6765	7,4	5	1,1	0,74415	
2584,184	5,25	4	2,2	0,5227	7,7	4	0,9	0,47043	
2585,564	5,15	4	1,1	1,0455	2,3	2,4	1	1,0455	
2598,342	5,1	3,2	2,3	0,5	1,6	0,8	1,3	0,65	
2720	5,1	4	1,8	0,6389	10,2	6,5	1,8	1,15002	
2757	3,1	3,8	1,1	1,0455	0,8	0,83636	0,5	0,52275	
3019	5,1	4	1,8	0,6389	1,2	0,76667	0,7	0,44723	
3167	5,3	4	0,9	1,2778	3,4	4,3	1,4	1,78892	
3287	5,4	4	0,8	1,4375	12,3	17,7	0,9	1,29375	

FIGURE 4.25 – Récapitulatif des paramètres des bulles associées.

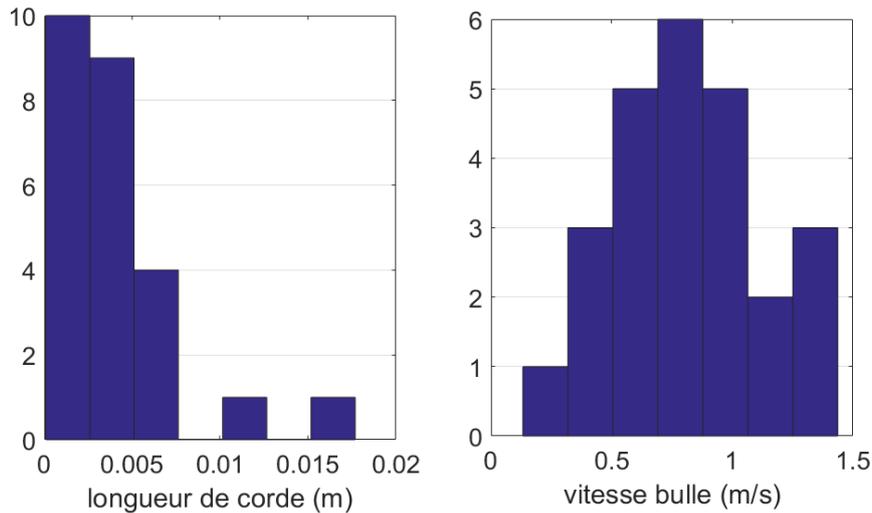


FIGURE 4.26 – Histogramme de vitesse et de longueurs de corde des bulles associées.

La figure 4.27 résume les résultats du tableau en forme de graphes pour les différents paramètres des 25 bulles associées. La vitesse de bulles est tracée en fonction du décalage temporel T_{ab} , de la longueur de corde L_{corde} et du temps de résidence T_a sur la sonde amont.

4.2. DÉTECTION DE BULLES PAR SONDE OPTIQUE

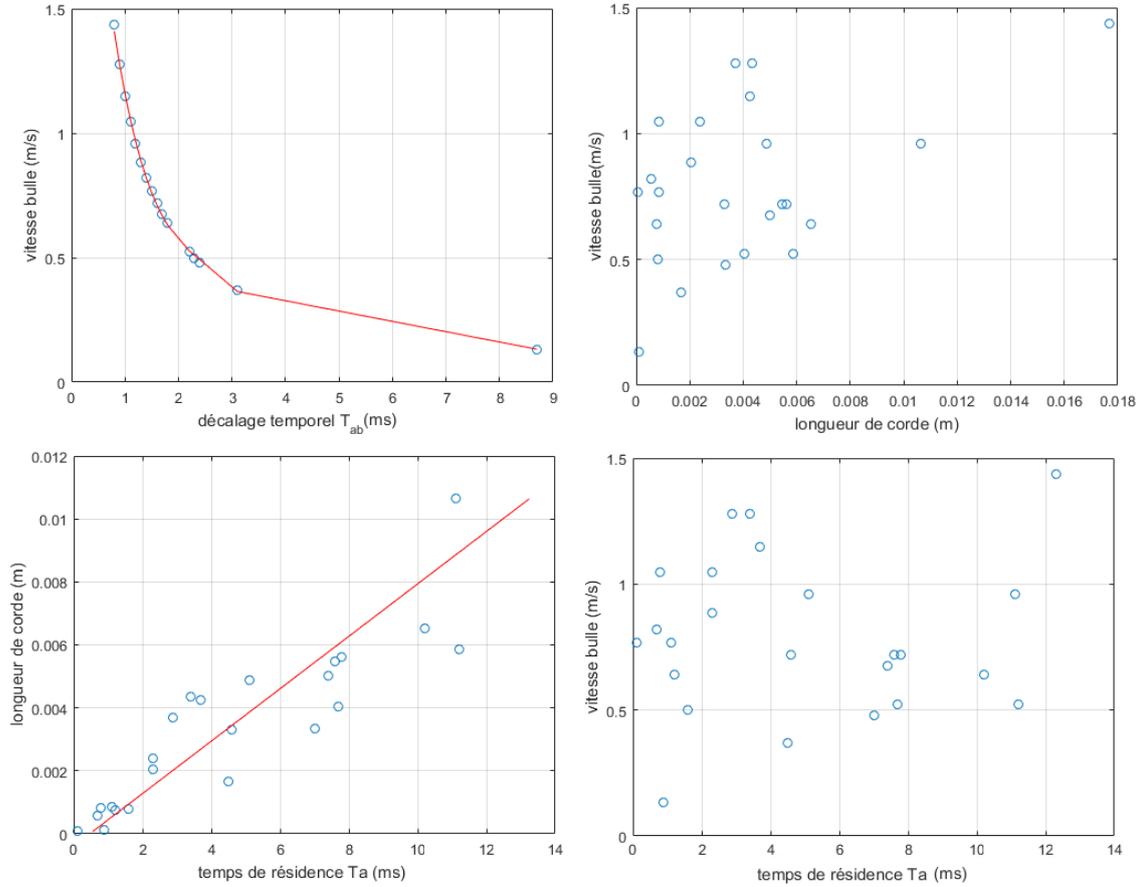


FIGURE 4.27 – Caractéristiques des bulles détectées.

Sur le graphe qui présente les vitesses des bulles en fonction des longueurs de corde (figure 4.27 en haut à droite), les bulles détectées à 10,6mm et 17,6mm de longueur de corde ne correspondent pas à des anomalies. En effet, pour la bulle de 10,6mm, le décalage temporel T_{ab} est de 1.2ms ($V_{bulle} = 0,958m/s$) et le temps de résidence T_a sur la sonde amont est de 11.1ms. En ce qui concerne la bulle de 17,6mm, le décalage temporel T_{ab} est de 0.8ms ($V_{bulle} = 1,4m/s$) et le temps de résidence T_a sur la sonde amont est de 12.3ms (voir figure 4.29 gauche). On peut penser que la sonde est dans un nuage de bulles dense et n'est pas capable de discriminer des bulles isolées (voire on peut avoir de la coalescence). D'autre part, une détection de petite bulle est identifiée. La bulle détectée de longueur de corde de $76\mu\text{m}$ a une vitesse de $0,76\text{m/s}$ et un temps de résidence de 0.1ms (voir figure 4.29 droite) sachant qu'une bulle ne perce pas forcément la pointe de la sonde par son diamètre, les petites bulles détectées (la bulle ayant le diamètre de $76\mu\text{m}$ par exemple) sont probablement des détections "partielles" qui est dû à un démouillage partiel (voir figure 4.28) où la bulle perce à peine la pointe de la sonde. De même, une autre petite bulle est détectée pour une longueur de corde de $119\mu\text{m}$, une vitesse de $0,13\text{m/s}$ et

un temps de résidence de 0.9ms.

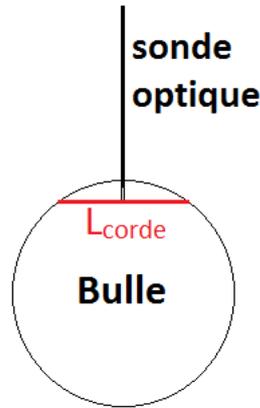


FIGURE 4.28 – Détection partielle d’une bulle.

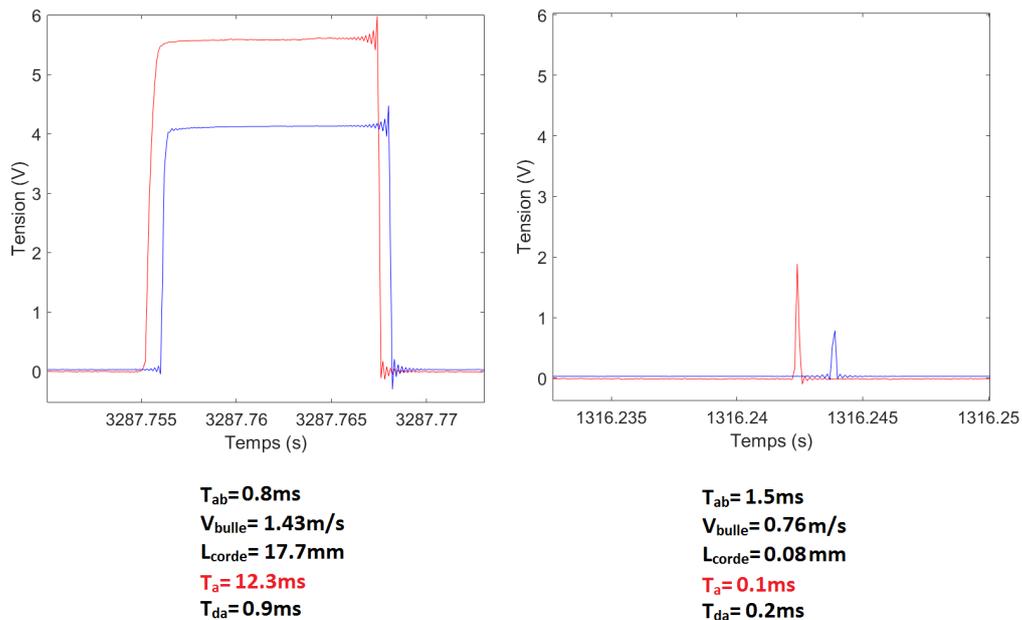


FIGURE 4.29 – Bulles à 17mm (gauche) et à 76 μm (droite).

Une détection de bulle à grand décalage temporel T_{ab} est identifiée (voir figure 4.30). On note un décalage temporel de 8.7ms qui est à l’origine d’une petite vitesse de bulle de 0.13m/s avec une longueur de corde de 0.12mm suite au temps de résidence T_a de 0.9ms sur la sonde amont.

Nous pouvons avoir, pour deux bulles de longueurs de cordes de même grandeur, des vitesses de bulle différentes (voir figure 4.31). Nous notons des vitesses de 0.52m/s et 1.15m/s pour des bulles à 4mm et 4.3mm de longueur de corde respectivement.

4.2. DÉTECTION DE BULLES PAR SONDE OPTIQUE

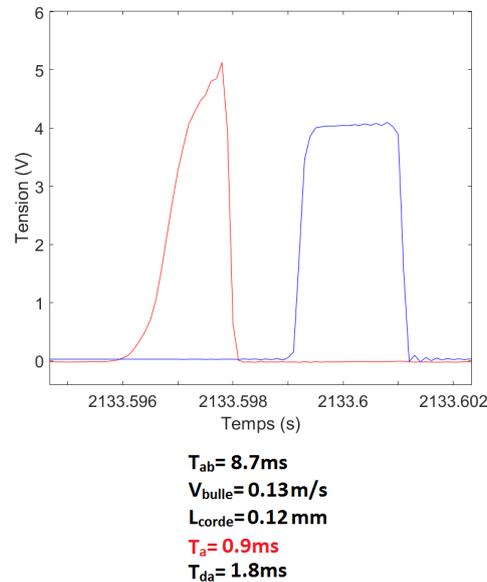


FIGURE 4.30 – Exemple de détection d’une bulle avec un grand décalage temporel T_{ab} .

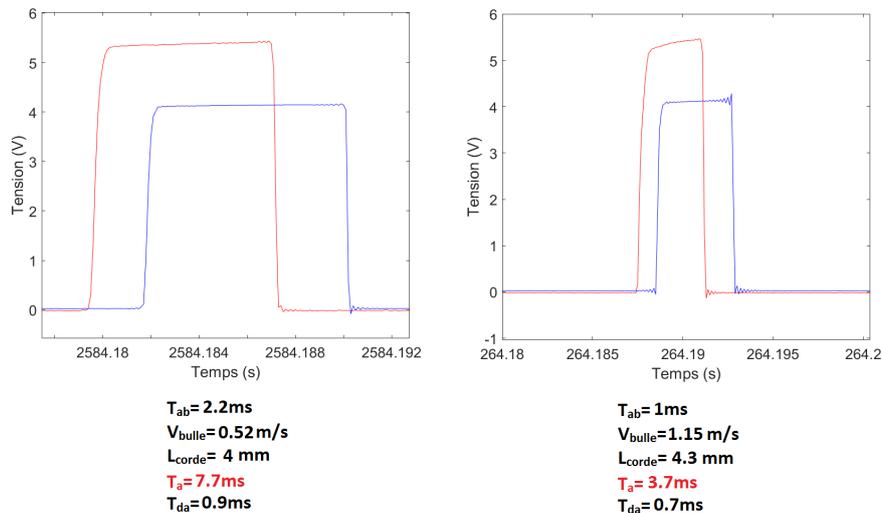


FIGURE 4.31 – Bulles de 4mm de diamètre et 0.52m/s de vitesse (gauche). Bulle de 4.3mm de diamètre et 1.15m/s de vitesse (droite).

Finalement, nous pouvons avoir une détection successive de bulles associées (voir figure 4.32). Trois bulles sont détectées avec des vitesses de l’ordre de 0.9m/s mais avec des longueurs de corde variant entre 2 et 10mm. Il est possible que dans certains cas, l’hypothèse d’une bulle associée soit non valide et que les sondes ne détectent pas le passage d’une bulle unique, mais de deux bulles.

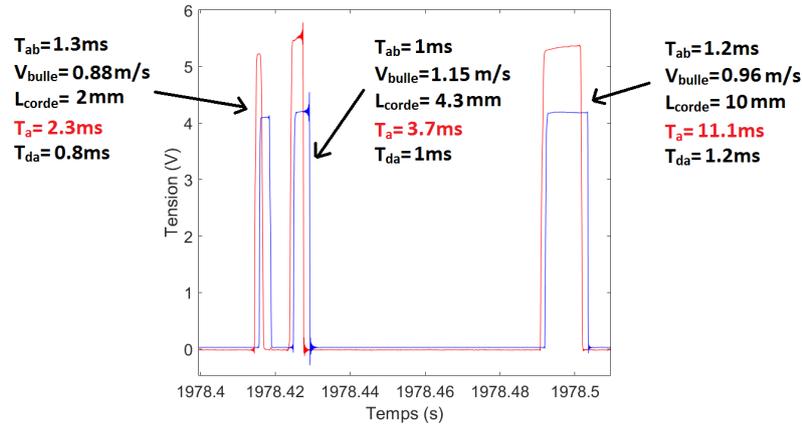


FIGURE 4.32 – Exemple de détection successive de 3 bulles.

Les résultats montrent que les bulles détectées suite aux déferlements de la vague d'étrave autour du Pp ? ont une vitesse qui varie entre 0.1 et 1.4m/s, avec un nombre important de bulles à 0.8m/s. La vitesse moyenne des bulles est de l'ordre de la vitesse du courant, ce qui nous permet de confirmer que les bulles sont principalement emportées par le courant. En ce qui concerne les tailles des bulles, nous identifions des petites bulles de quelque mm de longueur de corde comme nous identifions de grosses bulles qui vont jusqu'à 17mm de diamètre. La longueur de corde moyen des bulles détectées étant de 4mm.

Une autre méthode de calcul de vitesse des bulles a été développée. Cette méthode est basée sur la détection de la présence des bulles sur les images brutes. Il s'agit de détecter les bulles sur chaque paire d'image PIV afin d'obtenir leur caractéristiques physiques (coordonnées, aires, diamètres) pour pouvoir ensuite les corréler et déterminer leurs vitesses. La figure 4.33 présente un exemple d'une image brute avec des bulles (a). Les bulles sont ensuite détectées en bleu sur l'image (b). Un masque est appliqué sur la surface libre et la trace laser et les coordonnées de l'ensemble des bulles exploitables sont déterminées (c).

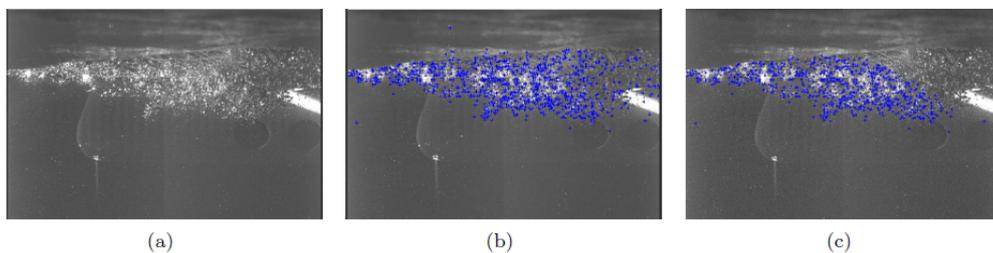


FIGURE 4.33 – (a) : Image brute, (b) : Détection des bulles (points bleus), (c) : Application d'un masque au niveau de la surface libre et de la trace laser.

Le calcul des vitesses des bulles s'effectue localement en analysant le déplacement de chaque bulle les unes après les autres. Il s'agit pour cela de définir une fenêtre de détection en fonction des vitesses moyennes de l'écoulement longitudinal de 0.75m/s et transversal de ± 0.3 m/s. Le plan de mesure ayant une calibration de (528×396) mm^2 pour une discrétisation de (1600×1200) $pixels^2$, le déplacement d'une particule dans l'écoulement (correspondant aux vitesses moyennes de l'écoulement) est de l'ordre de 3 pixels suivant l'axe horizontal et de ± 1.5 pixels suivant l'axe vertical. On définit ensuite les intervalles de détection entre -1 et +6 pixels à l'horizontale et entre -4 et +4 pixels à la verticale entre 2 images consécutives (2 pulses laser). La méthode consiste à détecter la bulle sur l'image (b) à partir des coordonnées de la bulle sur l'image (a) comme présenté sur la figure 4.34. Le calcul des vitesses s'effectue ensuite à partir des coordonnées des deux positions successives et du pas de temps Δt entre les deux images ($\Delta t = 1200 \mu s$). Les diamètres sont calculés suite à la détection des contours à partir d'un seuillage. Ils correspondent aux diamètres équivalents basés sur l'air apparente du contour détecté. Les résultats ont montré que les vitesses moyennes longitudinale et verticale des bulles sont de l'ordre de 0.5m/s et -0.13m/s respectivement. En ce qui concerne la taille des bulles, le diamètre des bulles détectées varie entre 0.7 et 5mm. Le diamètre moyen est de l'ordre de 3mm.

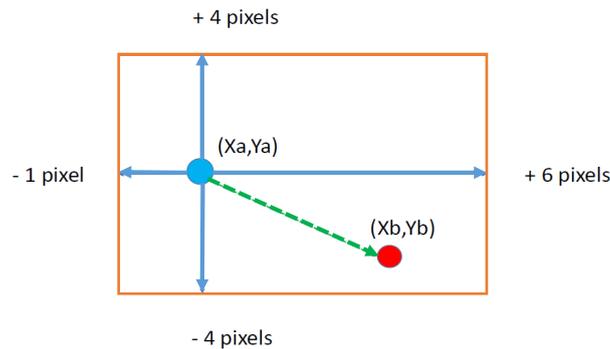


FIGURE 4.34 – Fenêtre d'interrogation pour la détection de la bulle $(X_b; Y_b)$ sur l'image (b) à partir des coordonnées de la bulle $(X_a; Y_a)$ sur l'image (a).

Cette méthode de corrélation est fiable lorsque le pas de temps Δt n'est pas trop élevé et quand les particules de l'écoulement sont espacées. Cependant, indépendamment de la méthode, la détection des bulles entre deux images PIV n'est pas efficace à 100%. La figure 4.35 montre un agrandissement d'une zone de détection de bulles sur une paire d'images (images a et b). Les centres des bulles sont repérés par des points bleus et un cercle rouge lorsque ceux-ci sont détectés sur la deuxième image. On peut apercevoir une bulle se "diviser" entre les deux instants, on peut aussi voir la présence de bulles détectées sur l'image (b) qui n'ont pas été détectées sur l'image (a). On relève donc plusieurs problèmes de déformation géométrique, de séparation et de disparition des bulles entre les deux images. Ces erreurs de détection

engendrent un pourcentage de bulles détectées sur les deux images de l'ordre de 90%.

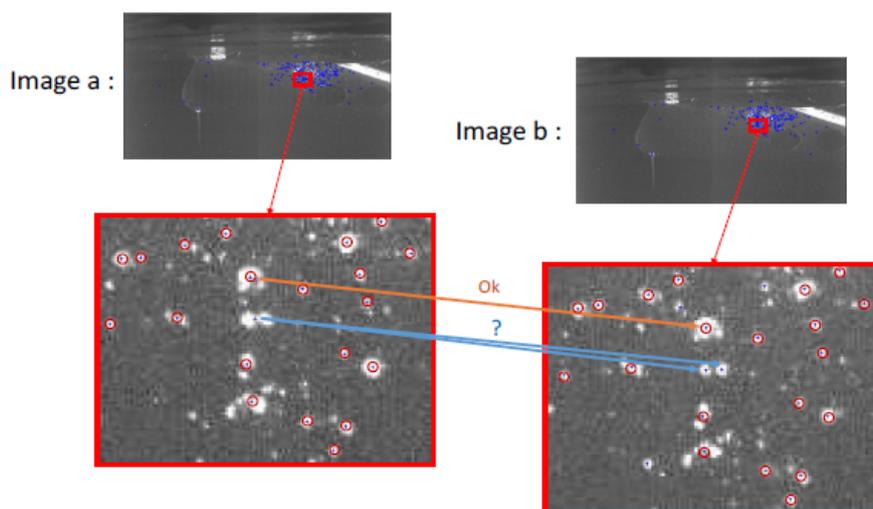


FIGURE 4.35 – Visualisation de la détection des bulles sur les deux images a et b.

Les deux méthodes de détection des bulles (par sonde optique et par visualisation sur les images brutes) sont fiables. Cependant, la détection des bulles par sonde optique présente un avantage sur la connaissance de la position de la bulle dans les trois dimensions de l'espace, ce qui n'est pas le cas pour la méthode de visualisation. Pour cette dernière, la vitesse et la taille moyenne des bulles sont moyennées sur la hauteur du nuage de bulles. Ainsi, toutes les bulles détectées sur chaque image brute sont pris en compte dans le calcul, ce qui n'est pas le cas pour la méthode de détection par sonde optique où la mesure est ponctuel. Ceci pourrait expliquer la différence entre la vitesse et le diamètre moyen obtenus par les deux méthodes.

4.3 Analyse Stéréo-PIV autour de l'étrave

Des mesures Stéréo-PIV ont été effectuées dans le plan correspondant à l'axe de symétrie de la maquette du Pp ?. Afin de surmonter les perturbations dues à l'apparition d'une surface libre oscillante, de bulles et de nombreuses réflexions, l'interface eau-air est détectée par la méthode de détection de la surface libre présentée dans le chapitre 3. En raison de la difficulté à analyser les champs de vitesse instantanée, une analyse POD est effectuée. L'objectif étant de reconstruire le champ de vitesse moyenne de chaque champ PIV afin d'identifier l'écoulement qui est significativement responsable de l'entraînement d'air.

4.3. ANALYSE STÉRÉO-PIV AUTOUR DE L'ÉTRAVERE

L'analyse POD proposée ici est un outil de décontamination qui permet de lisser les champs de vitesse. Elle est effectuée à partir de $Nt = 2550$ champs instantanés longitudinaux (U_{pod}), transversaux (V_{pod}) et verticaux (W_{pod}), du champ de vitesse sur un plan de $n_x \times n_z = 93 \times 69$ points. Le contenu énergétique des trois premiers modes POD représente environ 82% de l'énergie totale. Les premières fonctions propres spatiales POD ainsi que les premiers coefficients temporels sont analysés de manière similaire au chapitre 3 et aux travaux de Druault *et al.* (2012, 2014). La projection de chaque champ de vitesse instantané sur les trois premiers modes POD permet d'obtenir un champ d'écoulement dominant instantané qui correspond au champ de vitesse moyen.

Les figures 4.36 et 4.37 montrent les trois composantes du champ de vitesse sans et avec génération de bulles respectivement. Une période de houle avec bulles est définie comme une période où la génération d'un nuage de bulles est observée suite au déferlement de la vague d'étrave. Les périodes de houles sans bulles sont les périodes où aucun nuage de bulles est observé. Les trois composantes U_{pod} , V_{pod} et W_{pod} correspondent à la vitesse de l'écoulement dans les directions X, Y et Z respectivement. Chaque image de 1 à 9 correspond à la moyenne des champs de vitesse pour toutes les périodes sans ou avec génération de bulles et correspond aux phases de 1 à 9 fournies dans la figure 4.3.

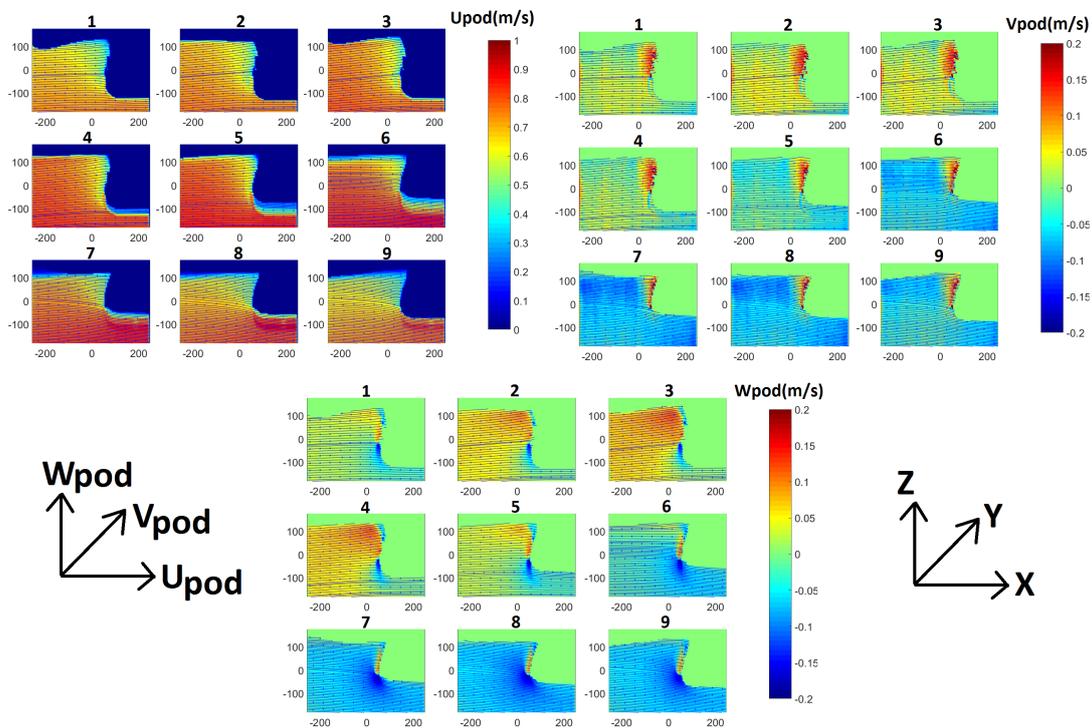


FIGURE 4.36 – Représentation des neuf champs de vitesse (sans génération de bulles) déduits de la projection du champ de vitesse sur les trois premiers modes POD.

4.3. ANALYSE STÉRÉO-PIV AUTOUR DE L'ÉTRAVE

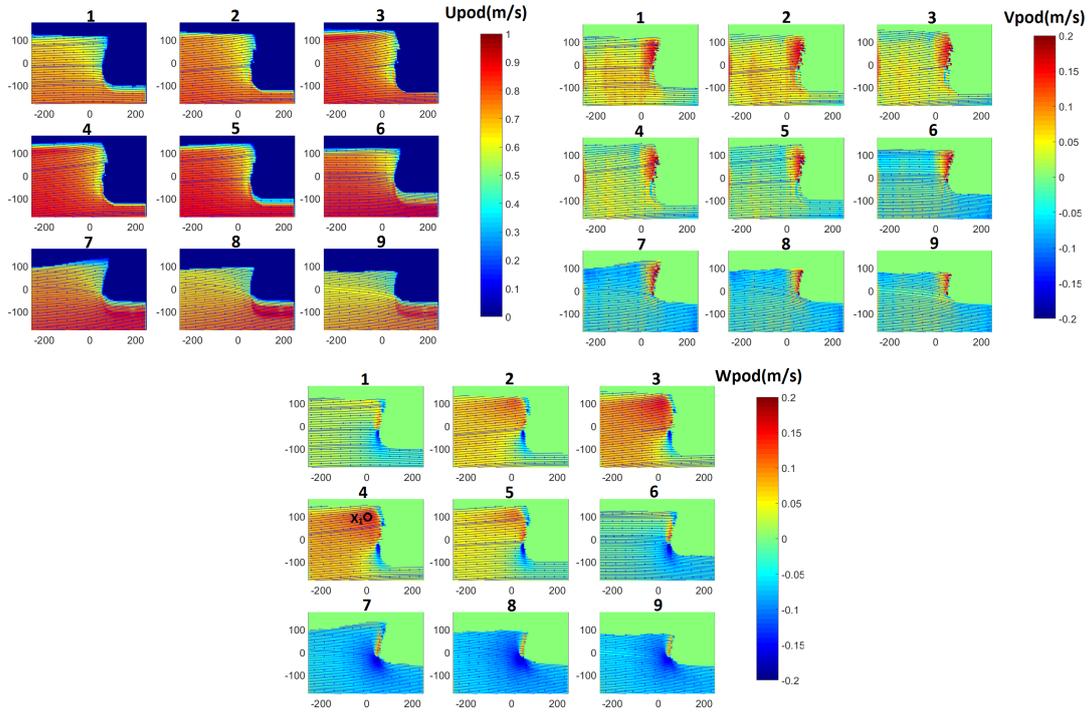


FIGURE 4.37 – Représentation des neuf champs de vitesse (avec génération de bulles) déduits de la projection du champ de vitesse sur les trois premiers modes POD.

Les vitesses verticales (W_{pod}) positives pendant l'élévation de surface sont élevées dans la zone de contact entre l'étrave et la surface pour le cas bullé. La vitesse maximale mesurée au-dessus du bulbe de l'étrave dans la phase 4 est d'environ $0,2\text{m/s}$. En ce qui concerne la composante de vitesse transversale (V_{pod}), une vitesse négative d'environ $-0,06\text{m/s}$ est répartie d'une façon homogène dans le plan dans les phases 7, 8 et 9 du cas sans génération de bulles. Pour le cas bullé, une vitesse transversale positive d'environ $0,07\text{m/s}$ est répartie d'une façon homogène dans tout le plan dans les phases 1, 2 et 3. Enfin, les valeurs de la composante de vitesse longitudinale (U_{pod}) oscillent entre $0,5$ et $0,8$ m/s pour les deux cas. Les champs de vitesse horizontale U_{pod} et transversale V_{pod} sont presque similaires entre les périodes de houle avec et sans bulles.

Pour confirmer ces observations, nous nous intéressons à la figure 4.38 qui présente l'évolution temporelle des trois composantes de vitesse u_1 , v_1 et w_1 au point X_1 situé au-dessus du bulbe de l'étrave comme indiqué sur la figure 4.37. Les cercles correspondent aux cas bullés. La figure 4.38 montre que la variabilité des champs de vitesse peut être élevée. Par exemple, un nuage de bulles peut être généré pour une vitesse horizontale de $0,5\text{m/s}$, comme pour une vitesse horizontale de $0,8\text{m/s}$, ce qui montre que l'occurrence du phénomène de bullage est parfois aléatoire. La figure 4.39 montre l'évolution temporelle des trois composantes de vitesse au point

X_1 dans la phase 4 pour les cas avec bulles (à gauche) et sans bulles (à droite). Les trois composantes de vitesse sont plus importantes pour les cas bullés, en particulier pour la composante de vitesse verticale w_1 . Des valeurs moyennes de 0.15m/s et 0.09m/s sont obtenues pour la composante verticale w_1 avec et sans bulles respectivement. En ce qui concerne la composante de vitesse transversale v_1 , il n'existe pas de différence notable entre les deux cas. Une valeur moyenne de 0,06m/s pour les cas bullés et 0,05m/s pour les cas sans génération de bulles sont obtenues. Les composantes de vitesse moyenne $\overline{u_1}$, $\overline{v_1}$ et $\overline{w_1}$ extraites au point X_1 dans la phase 4 sont résumées dans le tableau 4.1.

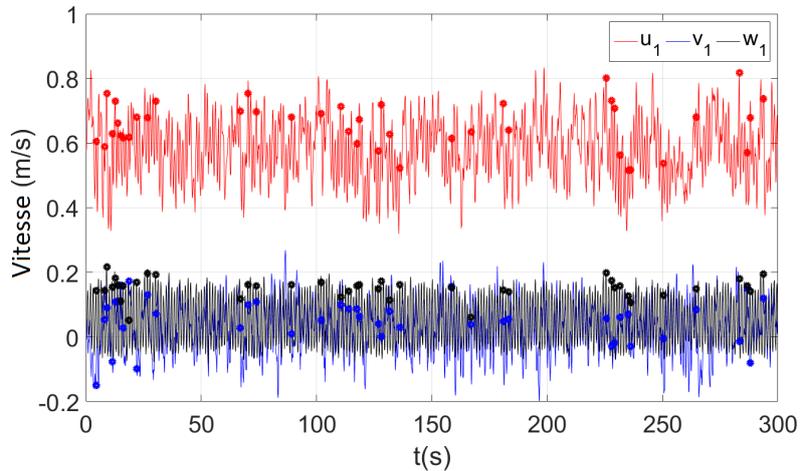


FIGURE 4.38 – Evolution des trois composantes de la vitesse au point X_1 .

	$\overline{u_1}(m/s)$	$\overline{v_1}(m/s)$	$\overline{w_1}(m/s)$
Avec bulles	0.68	0.06	0.15
Sans bulles	0.64	0.05	0.09

TABLE 4.1 – Les différentes valeurs des composantes de la vitesse moyenne au point X_1 dans la phase 4 pour les cas bullés et non bullés.

Ces observations révèlent que la génération de bulles est principalement conditionnée par la vitesse verticale ascendante (w_1) de l'écoulement (phase 4) concentrée au-dessus du bulbe de l'étrave. Les vitesses ascendantes élevées sont à l'origine des vagues d'étraves intenses, provoquant la génération de bulles entre les phases 5 et 7 qui sont ensuite entraînées puis propagées par l'écoulement entre les phases 7 et 9.

Les résultats présentés dans cette section permettent de caractériser l'écoulement autour de l'étrave et sont complémentaires à la visualisation 3D du phénomène de bullage dans la partie 4.1. Ces mesures sont représentatives de l'écoulement à l'échelle réelle grâce au respect de la similitude de Froude malgré certaines différences qui peuvent survenir sur la dynamique des bulles en raison des effets Webber.

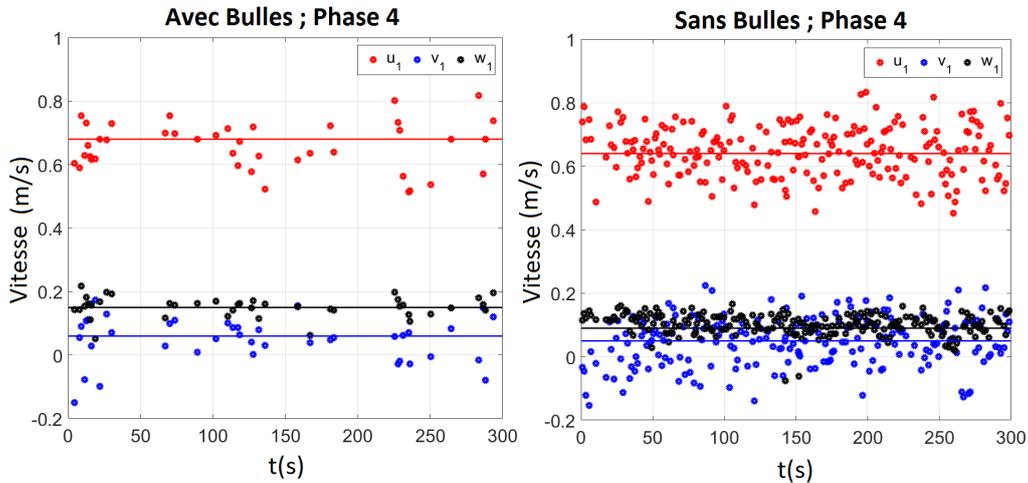


FIGURE 4.39 – Evolution des trois composantes de la vitesse au point X_1 dans la phase 4. À gauche : cas bullés. Droite : cas non bullés. Les lignes horizontales correspondent à la moyenne de chaque évolution temporelle de composante de vitesse.

4.4 Conclusions

Une étude sur le phénomène de *Bubble Sweep-down* autour du Pp ? à l'échelle 1/30 a été réalisée permettant une caractérisation 3D du phénomène. Trois caméras synchronisées situées autour de l'étrave ont permis de visualiser le phénomène de bullage à partir de différents points de vue. Une méthode de reconstruction 3D a été proposée pour suivre l'évolution des nuages de bulles générés puis propagés autour du navire.

Cette étude a permis une visualisation et une caractérisation fine du phénomène par rapport aux études 2D où nous n'avions pas accès au comportement des nuages de bulles dans la profondeur du champ. Les images de la caméra installée au fond du bassin montrent que les vagues déferlent à l'avant de l'étrave, créant un angle important avec l'étrave qui atteint près de 70° pendant la génération de bulles.

Trois types de nuages de bulles de différentes tailles ont été étudiés. Les résultats montrent que pour les nuages de bulles de faible à moyenne intensité, la totalité du nuage est identifié depuis la génération jusqu'à la propagation. Les vitesses de propagation horizontale et verticale de ces nuages sont similaires. Cependant, le nuage de bulles moyen se propage plus rapidement dans le plan horizontal. En ce qui concerne les nuages de bulles les plus intenses, la méthode de reconstruction est moins adaptée car il est difficile de suivre l'ensemble du nuage à chaque instant, les nuages couvrant l'ensemble de la zone étudiée.

Malgré la complexité du phénomène, les résultats de la caractérisation 3D des nuages de bulles ont permis d'améliorer notre connaissance du processus de génération et de propagation des bulles autour de l'étrave. En se basant sur ces résultats, des essais complémentaires ont été effectués en utilisant une sonde optique pour mesurer localement et ponctuellement la fraction de vide, la taille des bulles et la vitesse autour de la coque du navire. Les résultats obtenus ont montré que la longueur de corde moyenne des bulles suite aux déferlements de la vague d'étrave est de 4mm. La vitesse moyenne des bulles est de l'ordre de 0.8m/s qui est de l'ordre de la vitesse de courant. Nous constatons que ce type de mesure intrusive n'est pas idéal pour notre problématique pour la détermination de la fréquence d'occurrence de bulles et de taux de vide. Comme la mesure est ponctuelle, il est difficile de choisir une position pour la sonde où le pourcentage de passage de bulles est important. Il peut y avoir un déferlement intense de la vague d'étrave qui est à l'origine d'un gros nuage formé d'un grand nombre de bulles assez dispersées dans les 3 dimensions de l'espace sans avoir de bulle qui traverse les pointes de la sonde. Les bulles générées par le phénomène de déferlement de la vague d'étrave ont une dynamique 3D assez complexe qui nécessite une mesure de taux de vide volumique et non ponctuel. Une autre méthode de calcul de vitesse des bulles basée sur la détection des bulles sur les images brutes a été développée. Les résultats ont montré que les vitesses moyennes longitudinale et verticale des bulles sont de l'ordre de 0.5m/s et -0.13m/s respectivement. En ce qui concerne la taille des bulles, le diamètre moyen des bulles détectées est de l'ordre de 3mm.

Pour compléter la caractérisation fine du phénomène, des mesures Stereo-PIV suivies d'une analyse POD ont été effectuées dans l'axe de symétrie du modèle. Les périodes de houles avec et sans bulles ont été analysées. Les résultats révèlent que les vitesses transversales sont assez similaires pour les cas avec et sans bulles, où la vitesse horizontale est de l'ordre de la vitesse du courant. La génération de bulles est donc principalement conditionnée par la vitesse verticale ascendante de l'écoulement avant la formation des nuages de bulles. Ces vitesses ascendantes sont à l'origine de la création de la vague d'étrave, provoquant la formation de bulles qui sont entraînées par l'écoulement.

Chapitre 5

Conclusion générale et perspectives

5.1 Conclusion générale

La présence des bulles d'air générées par déferlement de la vague d'étrave et entraînées le long de la carène des navires est connue sous le nom de *Bubble Sweep-down*. L'apparition de ce phénomène contrarie considérablement les performances des équipements acoustiques dont les bases sont installées sous la coque du navire. Il est donc primordial d'étudier ce phénomène et de proposer des solutions afin de minimiser l'aération autour des étraves. Ces travaux de thèse ont permis de caractériser finement ce phénomène et l'écoulement généré autour de différentes formes d'étraves dans un bassin de circulation à houle et courant.

Le premier chapitre de cette thèse présente le contexte général de cette étude. La flotte océanographique ainsi que l'acoustique sous-marine de l'Ifremer sont présentés. Le phénomène de *Bubble Sweep-down* et les solutions proposées afin de le minimiser sont ensuite abordés.

La suite de ce chapitre est consacrée à une étude bibliographique sur l'entraînement d'air par déferlement de la vague d'étrave et sur les mesures de la distribution en taille des bulles générées. Une attention particulière a été portée à l'étude de la vague d'étrave en raison de ses caractéristiques qui ont une importance non négligeable sur la génération de bulles. L'étude bibliographique a permis de démontrer que les outils expérimentaux et numériques développés jusqu'à présent pour étudier l'écoulement diphasique autour des étraves sont limités. En effet, ils ne sont valables qu'en eau calme. La présence de la houle et des mouvements du navire influent d'une manière significative sur l'apparition du phénomène. Ce dernier a été étudié dans un bassin de circulation à houle et courant où l'influence de la houle et des mouvements du navire sur la génération de bulles ont été pris en compte.

Le second chapitre de ce manuscrit présente les matériels et méthodes nécessaires afin de reproduire et caractériser le phénomène de *Bubble Sweep-down* dans le bassin de circulation à houle et courant. Un montage particulier avec l'utilisation d'un générateur de houle et de mouvements du navire a été réalisé. Ce montage permet d'étudier indépendamment l'influence de la houle et des mouvements du navire sur le phénomène. Les protocoles expérimentaux de toutes les études réalisées dans cette thèse sont présentés dans ce chapitre.

Une attention particulière a été portée aux lois de similitudes utilisées et aux effets d'échelles, dus à une différence importante d'un facteur 100 pour le nombre de Reynolds et d'un facteur 1000 pour le nombre de Webber entre les essais en bassin et le réel. Afin de mieux comprendre l'influence des effets d'échelles sur les conditions d'apparition et la dynamique des nuages de bulles, le phénomène de bullage a été étudié autour du navire *Thalassa* à deux échelles différentes, $1/22$ et $1/30$. Il a été montré que les fréquences d'occurrence des nuages de bulles sont élevées (de l'ordre de $0.8f_0$ où f_0 est la fréquence de la houle et/ou des mouvements du navire) autour des deux échelles pour les configurations avec mouvements du navire. La dynamique des nuages de bulles autour de la *Thalassa* a ensuite été étudiée pour les deux échelles. Les nuages de bulles générés dans la configuration avec courant et houle sont relativement petits et restent proche de la surface. En revanche, dès que le mouvement du navire est établi, de gros nuages de bulles sont générées et entraînés en profondeur. En guise de comparaison entre les deux échelles, nous avons observé que les nuages de bulles autour de la *Thalassa* aux échelles $1/22$ et $1/30$ se comportent de la même manière pour les configurations d'essais sans mouvements du navire. Dès que le mouvement du navire est pris en compte, une légère augmentation des propriétés physiques adimensionnées (aire, profondeur, vitesse verticale) du nuage de bulle autour de la *Thalassa* $1/30$ est observée.

Le troisième chapitre présente une étude 2D du phénomène de bullage. Le phénomène a été caractérisé autour de trois modèles de navires (*Pourquoi pas ?*, étrave inversée et étrave fine) afin d'étudier l'influence de la géométrie de l'étrave sur la génération des nuages de bulles. Deux mécanismes d'entraînement d'air ont été détectés autour des trois modèles d'étraves. Le premier correspond au détachement tourbillonnaire et le second est l'entraînement d'air par déferlement de la vague d'étrave. Nous avons montré que la fréquence d'occurrence des nuages de bulles dans la configuration avec houle est deux fois plus grande autour du *Pourquoi pas ?* qu' autour les étraves fine et inversée. L'évasement de l'étrave du *Pourquoi pas ?* est à l'origine de la production de vagues intenses qui, après déferlement, génère un nombre important de nuages de bulles.

Les propriétés physiques des nuages de bulles en termes d'aire, de profondeur et de vitesse verticale ont été calculées autour des trois modèles. Les résultats ont montré que les nuages de bulles sont généralement petits et ne tendent pas à aller loin en profondeur autour des étraves fines et inversée. En revanche, les propriétés physiques des nuages de bulles atteignent des valeurs importantes autour du *Pourquoi pas ?*.

Ces perturbations sont suffisantes pour perturber les mesures acoustiques.

Bien que les effets d'échelle soient significatifs et la dynamique des nuages de bulles différente en bassin et à l'échelle réelle, cette étude permet de quantifier le phénomène de *Bubble Sweep-down* autour de différentes géométries d'étraves et de comparer leur efficacité face à ce problème.

La deuxième partie de ce chapitre est consacrée à l'étude de l'écoulement autour des étraves. Un algorithme de détection automatique des oscillations de la surface libre a été développé puis validé. Une analyse en Décomposition Orthogonale aux valeurs Propres (POD) a ensuite été effectuée pour extraire le champ moyen de la vitesse. Nous avons montré que les mouvements du navire combinés à la houle augmentent non seulement la fréquence d'occurrence des nuages bulles, mais aussi l'amplitude de la composante ascendante de la vitesse verticale au-dessus du bulbe du *Pourquoi pas ?*. La forme de l'étrave a montré une influence significative sur l'écoulement et sur l'interaction entre la houle incidente et l'étrave. D'autre part, une relation entre l'écoulement et la propagation des nuages de bulles a été effectuée. Les analyses en moyenne de phase avec et sans bulles autour du *Pourquoi pas ?* ont montré que les vitesses verticales ascendantes et plongeantes sont plus importantes pour les périodes de houles avec génération de nuages de bulles.

Les résultats globaux de ce chapitre fournissent une base de données expérimentale intéressante pour les concepteurs des coques de navires et pourraient être utilisés pour la validation de futurs modèles numériques. Ces résultats permettent d'identifier les zones où l'interaction entre l'écoulement et l'étrave est prononcée mais aussi la position des bulles générées et propagées.

Enfin, le dernier chapitre de cette thèse est consacré à une étude fine du phénomène de bullage autour du *Pourquoi pas ?*. Un protocole expérimental spécifique a été développé afin de caractériser le phénomène en 3D. Cette étude a permis une meilleure caractérisation du phénomène par rapport aux études 2D. Il a été montré par exemple que les vagues déferlent à l'avant de l'étrave, créant un angle important avec l'étrave qui atteint près de 70° pendant une période de houle avec génération de bulles. Trois types de nuages de bulles de différentes tailles ont été étudiés. Les résultats ont montré que les vitesses de propagation horizontale et verticale des nuages d'intensité faible à moyenne sont similaires. Cependant, le nuage de bulles moyen se propage plus rapidement dans le plan horizontal. Les nuages de bulles de forte intensité tendent à entourer totalement la coque.

La caractérisation 3D des nuages de bulles a permis de déterminer l'emplacement d'une sonde à fibre optique afin de mesurer localement et ponctuellement la fraction de vide, la taille et la vitesse des bulles autour de la coque du navire. La longueur de corde moyenne des bulles générées suite aux déferlements de la vague d'étrave est de 4mm. La vitesse moyenne est de l'ordre de 0.8m/s qui est proche de la vitesse de courant. Nous avons constaté que ce type de mesure intrusive n'est pas idéal pour notre problématique. En effet, il peut y avoir un déferlement intense de la vague d'étrave qui sera à l'origine d'un gros nuage constitué d'un grand nombre de bulles

assez dispersées dans les trois dimensions de l'espace sans avoir de bulle qui traverse les pointes de la sonde. Les bulles générées par le phénomène de déferlement de la vague d'étrave ont une dynamique 3D assez complexe qui nécessite une mesure de taux de vide volumique et non ponctuel. Les mesures de surface libre présentées en Annexe C n'ont malheureusement pas permis de caractériser convenablement l'interaction entre la houle et la carène.

Enfin afin de compléter la caractérisation 3D du phénomène, des mesures Stereo-PIV suivies d'une analyse POD ont été effectuées dans l'axe de symétrie du *Pourquoi pas ?*. Les résultats révèlent que les vitesses transversales sont du même ordre de grandeur pour les cas avec et sans bulles, où la vitesse horizontale est de l'ordre de la vitesse du courant. La génération de bulles est donc principalement conditionnée par la vitesse verticale ascendante de l'écoulement avant la formation des nuages de bulles. Ces vitesses ascendantes sont à l'origine de la vague d'étrave, provoquant la formation de bulles qui sont entraînées par l'écoulement le long de la carène.

Ces travaux ont permis d'avancer d'une manière significative sur les quatre objectifs principaux de cette thèse, précisés en introduction :

- étudier l'influence de la géométrie des étraves sur le phénomène de génération et de propagation des nuages de bulles,
- caractériser et quantifier le phénomène de bullage à partir d'une étude 3D spécifique autour de l'étrave,
- mesurer la vitesse et la taille des bulles générées suite au déferlement de la vague d'étrave,
- étudier l'influence des effets d'échelles sur le phénomène de bullage.

La méthode expérimentale ainsi que les analyses développées pendant ces travaux ont fait l'objet de réalisation des essais sur une carène de type BHO2M à l'échelle 1/30 pour la société PIRIOU (Germain *et al.*, 2016). Ces essais ont permis de déterminer si la carène optimisée sera ou non sujette au phénomène de *Bubble Sweep-down* de façon plus importante que les navires de recherche de l'Ifremer. Des recommandations ont été faites sur la modification du design de la carène (augmentation de la longueur à la flottaison et/ou tirant d'eau) pour réduire les mouvements du navire par mer formée, ce qui favorise une aération moins importante du milieu.

L'ensemble de ces travaux a été valorisé à travers :

- 3 présentations à des congrès (Mallat *et al.*, 2015, 2016a,b),
- 3 papiers dans des revues scientifiques (Dussol *et al.*, 2016; Mallat *et al.*, 2018, 2017).

5.2 Perspectives

Les essais réalisés au cours de ces travaux de thèse ont consisté à reproduire les conditions de navigation et l'état de mer rencontrés dans une campagne en mer où le phénomène de *Bubble Sweep-down* a été observé. Durant cette campagne, la vitesse du navire correspondait à 8 nœuds, la longueur d'onde à 109m, la hauteur significative de vague à $H_s=2.8\text{m}$ et la période de houle à $T=8.4\text{s}$. Les paramètres d'essais de houle et de courant dans le bassin à l'échelle 1/30 ont été fixés à une vitesse de courant de 0.75m/s, une amplitude de houle de 33mm et une fréquence de houle de 0.85Hz. Le montage expérimental développé pour reproduire le phénomène de *Bubble Sweep-down* a permis d'étudier l'influence de la houle et/ou des mouvements du navire sur la génération de bulles. Une étude paramétrique autour des trois modèles d'étraves pourrait être réalisée en prenant en compte différentes hauteurs et fréquences de houle. L'influence des caractéristiques des mouvements du navire et de la vitesse du courant pourrait être également étudiée. Plusieurs déphasages entre la houle incidente et les mouvements du navire pourraient être testés. Cette étude permettra d'étudier l'influence de chaque paramètre sur le phénomène de génération de bulles autour de chaque modèle d'étrave.

En ce qui concerne l'étude 3D du phénomène de bullage, des essais pourraient être réalisés autour des étraves inversée et fine afin d'étudier l'influence de la géométrie de la carène sur la propagation horizontale des nuages de bulles. Des mesures Stéréo-PIV pourraient être également réalisées afin d'étudier l'écoulement autour de ces deux modèles d'étraves. Cette étude permettra de trouver un lien entre l'écoulement hydrodynamique dans les trois dimensions de l'espace et la génération des nuages de bulles. Cette étude pourra être utilisée afin de valider des modèles numériques d'écoulement diphasique et d'entraînement d'air autour des étraves de navires.

Des mesures de bulles à l'aide d'une sonde à fibres optiques pourraient être réalisées à différents endroits autour des étraves fine et inversée. Grâce à ces mesures, les vitesses, les diamètres et la fraction de vide des bulles générées seront calculés. Ces mesures permettront d'étudier l'influence de la géométrie de l'étrave sur les caractéristiques physiques des bulles générées par déferlement de la vague d'étrave.

Le phénomène physique de l'aération autour des carènes nécessite une meilleure compréhension par une prise en compte adaptée des effets d'échelle entre le réel et les essais en bassin. Pour ce faire, une étude complète autour des deux échelles du navire *Thalassa* pourrait être réalisée. Cette étude se divisera entre une caractérisation 3D des nuages de bulles, des mesures des bulles à l'aide de la sonde optique et enfin l'étude de l'écoulement autour des deux étraves.

Enfin, le développement d'un modèle diphasique numérique permettra de quantifier le phénomène en fonction des conditions de navigation et des caractéristiques d'étrave.

Bibliographie

- ADRIAN, R. J. (2005). Twenty years of particle image velocimetry. *Experiments in Fluids*, 39:159–169.
- BASSLER, C. C., REED, A. M. et BROWN, A. J. (2010). Characterization of physical phenomena for large amplitude ship roll motion. In *29th American Towing Tank Conference*.
- BIRVALSKI, M., TUMMERS, M. J., DELFOS, R. et HENKES, R. (2014). PIV measurements of waves and turbulence in stratified horizontal two-phase pipe flow. *International Journal of Multiphase Flow*, 62:161–173.
- BOUCHERON, R., PERELMAN, O., GOMIT, G., FRECHOU, D., CHATELLIER, L., DAVID, L., HUBERT, C. et RICHON, J. B. (2014). Mesure de déformée de surface libre par techniques optiques. *14èmes Journées de l’Hydrodynamique*.
- BOUHOUBEINY, E. (2012). *Caractérisation de l’écoulement autour de structures souples et poreuses : Application aux engins de pêche*. Thèse de doctorat, Université Pierre et Marie Curie.
- CARRICA, P. M., DREW, D., BONETTO, F. et LAHEY JR, R. T. (1999). A poly-disperse model for bubbly two-phase flow around a surface ship. *International Journal of Multiphase Flow*, 25:257–305.
- CARTELLIER, A. et ACHARD, J. L. (1991). Local phase detection probes in fluid/fluid two-phase flows. *Rev. Sci. Inst.*, 62(2):297–303.
- CARTMILL, J. W. et SU, M. Y. (1993). Bubble size distribution under saltwater and freshwater breaking waves. *Dynamics of Atmosphere and Oceans*, 20:25–31.
- CASTRO, A. M. et CARRICA, P. (2013). Bubble size distribution prediction for large-scale ship flows : Model evaluation and numerical issues. *International Journal of Multiphase Flow*, 57(2):131–150.
- CASTRO, A. M., LI, J. et CARRICA, P. (2016). A mechanistic model of bubble entrainment in turbulent free surface flows. *International Journal of Multiphase Flow*, 86(2):35–55.

- CHANSON, H., AOKI, S. et HOQUE, A. (2006). Bubble entrainment and dispersion in plunging jet flows : Freshwater vs. Seawater. *Journal of Coastal Research*, 22(3):664–677.
- CHANSON, H. et CUMMINGS, P. D. (1993). Prediction of bubble entrainment due to storm waves. *25th IAHR Congress*.
- CHANSON, H. et CUMMINGS, P. D. (1994). Effects of plunging breakers on the gas contents in the ocean. *Marine Technology Society Journal*, 28(3):22–32.
- CHANSON, H. et JAW-FANG, L. (1997). Plunging jet characteristics of plunging breakers. *Coastal Engineering*, 31:125–141.
- CHEN, J. H. et CHANG, C. C. (2006). A moving PIV system for ship model test in a towing tank. *Ocean Engineering*, 33(14-15):2025–2046.
- CHRISTOPHER, E. B. et CHAPLIN, R. (2010). Bubble size measurements in breaking waves using optical fiber phase detection probes. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 35(2):388–401.
- COMOLET, R. (1979). Sur le mouvement d’une bulle de gaz dans un liquide. *La Houille Blanche*, 1:31–42.
- COOPER, E. B. (2012). The future RRS Discovery. *Ocean Challenge*, 19:9–10.
- CUMMINGS, P. D. (1996). *Aeration due to breaking waves*. Thèse de doctorat, University of Queensland.
- CUMMINGS, P. D. et CHANSON, H. (1997a). Air entrainment in the developing flow region of plunging jet. Part 1 : Theoretical development. *Journal of Fluids Engineering*, 119:598–602.
- CUMMINGS, P. D. et CHANSON, H. (1997b). Air entrainment in the developing flow region of plunging jet. Part 2 : Experimental. *Journal of Fluids Engineering*, 119:603–608.
- DALEN, J. et LØVIK, A. (1981). The influence of wind-induced bubbles on echo integration surveys. *J. Acoust. Soc. Am.*, 69(6):1653–1659.
- DE KAT, J. O. and Paulling, J. R. (2001). Prediction of extreme motions and capsizing of ships and offshore vehicles. *Proc. of the 20th OMAE Conference, Rio de Janeiro*.
- DEANE, G. B. (1997). Sound generation and air entrainment by breaking waves in the surf zone. *J. Acoust. Soc. Amer*, 102:2671–2689.

- DEANE, G. B. et STOKES, M. D. (1999). Air entrainment processes and bubble size distributions in the surf zone. *J. Phys. Oceanogr.*, 29:1393–1403.
- DEANE, G. B. et STOKES, M. D. (2002). Scale dependance of bubble creation mechanisms in breaking waves. *Nature*, 418:839–844.
- DEBORD, F. J. et MUSATOW, M. (1989). Final report phase ii model test of the oceanographic ship agor 23. *In Arctec Offshore Corporation*.
- DELACROIX, S. (2015). *Caractérisation de la génération et de la propagation de bulles autour de la carène des navires scientifiques*. Thèse de doctorat, Université de Bretagne Occidentale.
- DELACROIX, S., GERMAIN, G., BERGER, L. et BILLARD, J.-Y. (2016a). Bubble sweep-down occurrence characterization on research vessels. *Ocean Engineering*, 111:34–42.
- DELACROIX, S., GERMAIN, G., GAURIER, B. et BILLARD, J.-Y. (2016b). Experimental study of bubble sweep-down in wave and circulating tank. part i : Experimental set-up and observed phenomena. *Ocean Engineering*, 120:78–87.
- DELACROIX, S., GERMAIN, G., GAURIER, B. et BILLARD, J.-Y. (2016c). Experimental study of bubble sweep-down in wave and circulating tank. part ii : Bubble clouds characterization. *Ocean Engineering*, 120:88–99.
- DELHOMMEAU, G., GUILBAUD, M., DAVID, L., YANG, C. et NOBLESSE, F. (2009a). Boundary between unsteady and overturning ship bow wave regimes. *Journal of Fluid Mechanics*, 620:167.
- DELHOMMEAU, G., NOBLESSE, F., KIM, H. Y. et YANG, C. (2009b). Flow about a ship bow with rake and flare. table.
- DI FELICE, F. (2008). Underwater SPIV probe for towing tank applications. *In 25th ITTC - Volume III*.
- DI FELICE, F. et PEREIRA, F. (2008). Developments and applications of PIV in naval hydrodynamics. *Topics Appl. Physics*, 112:475–503.
- DI MASCIO, A., BROGLIA, R. et MUSCARI, R. (2007). On the application of the single-phase level set method to naval hydrodynamic flows. *Computer & fluids*, 36:868–886.
- DINER, N. et MARCHAND, P. (1996). Acoustique et pêche maritime, présentation et application. *Editions Ifremer*.

- DOMMERMUTH, D. G., O'SHEA, T. T., WYATT, D. C., SUSSMAN, M., WEYMOUTH, G. D., YUE, D. K. et HAND, R. (2006). The numerical simulation of ship waves using cartesian-grid and volume-of-fluid methods. *In 26th Symposium on Naval Hydrodynamics, Rome (Italie)*.
- DONG, R. R., KATZ, J. et HUANG, T. T. (1997). On the structure of bow waves on a ship model. *Journal of Fluid Mechanics*, 346:77–115.
- DORING, M., OGER, G., ALESSANDRINI, B. et FERRANT, P. (2004). SPH simulations of floating bodies in waves. *ASME 23rd International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering. Vancouver, British Columbia, Canada*.
- DRAGESUND, O. et OLSEN, S. (1965). On the possibility of estimating year-class strength by measuring echo-abundance of 0-group fish. *Fiskeridirektoratets Skrif-ter, Serie Havunderskelser*, 13(8):48–75.
- DRUAULT, P., BOUHOUBEINY, E. et GERMAIN, G. (2012). Pod investigation of the unsteady turbulent boundary layer developing over porous moving flexible fishing net structure. *Exp. Fluids*, 53:277–292.
- DRUAULT, P., BOUHOUBEINY, E. et GERMAIN, G. (2014). Phase-averaged mean properties of turbulent flow developing around fluttering sheet of net. *Ocean Eng.*, 82:160–168.
- DRUAULT, P., DELVILLE, J. et BONNET, J. (2005). Proper orthogonal decomposition of the mixing layer flow into coherent structures and turbulent gaussian fluctuations. *C.R Mecanique*, 333:824–829.
- DUSSOL, D., DRUAULT, P., MALLAT, B., DELACROIX, S. et GERMAIN, G. (2016). Automatic dynamic mask extraction for PIV images containing an unsteady interface, bubbles, and a moving structure. *C.R. Mecanique*, 344:464–478.
- FONTAINE, E., FALTINSEN, O. M. et COINTE, R. (2000). New insight into the generation of ship bow waves. *Journal of Fluid Mechanics*, 421(1):15–38.
- GERMAIN, G., MALLAT, B., GAURIER, B., FACQ, J.-V. et BACCHETTI, T. (2016). Caractérisation du phénomène de bullage sur carène BHO2M. *Rapport technique 19CSMBL16, Laboratoire Comportement des Structures en Mer, Ifremer, France*.
- GOMIT, G., CHATELLIER, L., CALLUAUD, D. et DAVID, L. (2013). Free surface measurement by stereo-refraction. *Experiments in Fluids*, 54(6):1–11.
- GOMIT, G., CHATELLIER, L., CALLUAUD, D., DAVID, L., FRÉCHOUR, D., BOUCHERON, R., PERELMAN, O. et HUBERT, C. (2015). Large-scale free surface measurement for the analysis of ship waves in a towing tank. *Experiments in Fluids*, 56:1–13.

- GOTMAN, A. S. (2007). A history of ship resistance evaluation. *The Journal of Ocean Technology*, 2(1):74–96.
- GUILBAUD, M., DAVID, L., DELHOMMEAU, G. et NOBLESSE, F. (2008). Etude expérimentale et théorique de la vague d'étrave des navires. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 5(5):629–640.
- GUILCHER, P. M., DUCROZET, G., DORING, M. et FERRANT, P. (2006). Numerical simulations of wave-body interactions using a modified SPH solver. *International Offshore and Polar Engineering Conference ISOPE, San Francisco, USA*.
- HOLMES, P., LUMLEY, J. et BERKOOZ, G. (1996). Turbulence, coherent structures, dynamical systems and symmetry. *In Cambridge monograph on mechanics eds*.
- HOTALING, J. H., MEEHAN, J. M. et KARAFIATH, G. (2001). Fisheries research vessel hull and propeller design to maximize hydroacoustic survey efficiency. *In 24th UJNR Marine Facilities Panel*.
- HWANG, P. A., HSU, Y.-H. L. et WU, J. (1990). Air bubbles produced by breaking wind waves : A laboratory study. *J. Phys. Oceanogr*, 20:19–28.
- JOHNSON, B. D. et COOKE, R. C. (1979). Bubble populations and spectra in coastal waters : a photographic approach. *Journal of Geophysical Research*, 84(C7):3761–3766.
- KANG, D., GHOSH, S., REINS, G., KOO, B., WANG, Z. et STERN, F. (2012). Impulsive plunging wave breaking downstream of a bump in a shallow water flume - Part I : Experimental observations. *Journal of Fluids and Structures*, 32:104–120.
- KARAFIATH, G., HOTALING, J. et MEEHAN, J. (2001). Fisheries research vessel hydrodynamic design minimizing bubble sweepdown. *In Oceans Conference*.
- KIGER, K. T. et DUNCAN, J. H. (2012). Air-Entrainment mechanisms in plunging jets and breaking waves. *Annu. Rev. Fluid Mech.*, 44:563–592.
- KIM, W. J., VAN, S. H. et KIM, D. H. (2001). Measurements of flows around modern commercial ship models. *Experiments in Fluids*, 31:567–578.
- KIMMOUN, O. et BRANGER, H. (2005). Propriétés cinématiques des vagues déferlantes sur une plage inclinée. *10èmes Journées de l'Hydrodynamique*.
- KOLAYEV, P. A. (1976). Investigation of the concentration and statistical size distribution of wind-producing bubbles in the near-surface ocean layer. *Oceanology*, 15:659–661.

- KORNELIUSSEN, R. J., DINER, N., ONA, E., BERGER, L. et FERNANDES, P. G. (2008). Proposals for the collection of multifrequency acoustic data. *ICES Journal of Marine Science*, 65(6):982–994.
- KRACHT, W. et FINCH, J. A. (2009). Bubble break-up and the role of frother and salt. *Int. J. Miner. Process.*, 92:153–161.
- LAMARRE, E. et MELVILLE, W. K. (1994). Void-fraction measurements and sound-speed fields in bubble plumes generated by breaking waves. *J. Acoust. Soc. Am.*, 96(6):3605–3616.
- LANDRINI, M., COLAGROSSI, A., GRECO, M. et TULIN, M. P. (2012). The fluid mechanics of splashing bow waves on ships : A hybrid bem-SPH analysis. *Ocean Engineering*, 53:11–127.
- LARRARTE, F. (1993). Etude expérimentale et théorique des profils de vagues générés par les carènes. *4èmes Journées de l’Hydrodynamique, Nantes, France*.
- LE TOUZÉ, D., MARSH, A., OGER, G. et FERRANT, P. (2010). SPH simulation of green water and ship flooding scenarios. *Journal of Hydrodynamics*, 22(5):231–236.
- LEE, J. Y., PAIK, B. G. et LEE, S. J. (2009). PIV measurements of hull wake behind a container ship model with varying loading condition. *Ocean Engineering*, 36(5):377–385.
- LEE, S. J., KOH, M. S. et LEE, C. M. (2003). PIV velocity field measurements of flow around a kriso 3600teu container ship model. *Journal of Marine Science and Technology*, 8(2):76–87.
- LEIFER, I. et de LEEUW, G. (2006). Bubbles generated from wind-steepened breaking waves : 1. bubble plume bubbles. *J. Geophys. Res.*, 11(5):377–385.
- LONGO, J., SHAO, J., IRVINE, M. et STERN, F. (2005). Phase-average nominal wake for surface ship in regular head waves.
- LONGUET-HIGGINS, M. S. (1988). Mechanisms of wave breaking in deep water. *Kluwer Academic Publishers*, 238:1–30.
- LONGUET-HIGGINS, M. S. et COKELET, E. D. (1976). The deformation of steep surface waves on water : 1. a numerical method of computation. *Proc. R. Soc. Lond.*, 350:1–26.
- LURTON, X. (1998). Acoustique sous-marine, présentation et application. *Editions Ifremer*.

- MA, J., OBERAI, A. A., HYMAN, M. C., DREW, D. A. et LAHEY JR, R. T. (2011). Two-fluid modeling of bubbly flows around surface ships using a phenomenological subgrid air entrainment model. *Computers & Fluids*, 52:50–57.
- MACLENNAN, D. N., FERNANDES, P. G. et DALEN, J. (2002). A consistent approach to definitions and symbols in fisheries acoustics. *ICES Journal of Marine Science*.
- MAKIHARJU, S. A., GABILLET, C., PAIK, B.-G., CHANG, N., PERLIN, M. et CECIO, S. (2013). Time-resolved two-dimensional x-ray densitometry of a two-phase flow downstream of a ventilated cavity. *Exp Fluids*, 54:1561.
- MALLAT, B., GERMAIN, G., DELACROIX, S., DRUAULT, P., DUSSOL, D. et BILLARD, J.-Y. (2015). PIV measurements around a bow ship. *Workshop on Non-Intrusive Measurements for unsteady flows and aerodynamics, Poitiers, France*.
- MALLAT, B., GERMAIN, G., DRUAULT, P. et BILLARD, J.-Y. (2016a). Experimental study of the bubble sweep-down phenomenon on two ship models. *31st Symposium on Naval Hydrodynamics, Monterey, CA, USA*.
- MALLAT, B., GERMAIN, G., GAURIER, B. et BILLARD, J.-Y. (2016b). A 3D visualization of the bubble sweep-down phenomenon around a 1/30 scale ship model. *15èmes Journées de l’Hydrodynamique, Brest, France*.
- MALLAT, B., GERMAIN, G., GAURIER, B. et BILLARD, J.-Y. (2017). A 3D study of the bubble sweep-down phenomenon around a 1/30 scale ship model. *Submitted to European Journal of Mechanics - B/Fluids*.
- MALLAT, B., GERMAIN, G., GAURIER, B., DRUAULT, P. et BILLARD, J.-Y. (2018). Experimental study of the bubble sweep-down phenomenon on three three bow designs. *Ocean Engineering*, 148:361–375.
- MARRONE, S., BOUSCASSE, B., COLAGROSSI, A. et ANTUONO, M. (2012). Study of ship wave breaking patterns using 3d parallel SPH simulations. *Computers & Fluids*.
- MC DONOUGH, J. J. et GREEN, G. (2005). Investigating the unknown : Converting the usns capable to explore the worlds oceans. *In Oceans Proceedings of MTS/IEEE*.
- MEDWIN, H. (1970). In-situ acoustic measurements of bubble populations in coastal ocean waters. *J. Geophys. Res.*, 75:599–611.
- MEDWIN, H. et CLAY, C. (1998). Fundamentals of acoustical oceanography. *Academic Press*.
- MELVILLE, W. K. et RAPP, R. F. (1985). Momentum flux in breaking waves. *Nature*, 317:514–516.

- MILLER, N. et MITCHIE, R. E. (1970). Measurement of local voidage in liquid/gas two-phase flow systems,. *J. British Nuclear Energy Soc.*, 9:94–100.
- MORAGA, F. J., CARRICA, P. M., DREW, D. A. et LAHEY, R. T. J. (2008). A sub-grid air entrainment model for breaking bow waves and naval surface ships. *Computer & Fluids*, 37:281–298.
- MORI, N., SUZUKI, T. et KAKUNO, S. (2007). Experimental study of air bubbles and turbulence characteristics in the surf zone. *J. Geophys. Res.*, 112:C05014.
- NEW, A. L. (1992). Factors affecting the quality of shipboard acoustic doppler current profiler data. *Deep-Sea Research*, 39(11/12):1985–1996.
- NOBLESSE, F., DELHOMMEAU, G., GUILBAUD, M., HENDRIX, D. et YANG, C. (2008). Simple analytical relations for ship bow waves. *J. Fluid Mech.*, 600:105–132.
- NOBLESSE, F., DELHOMMEAU, G., KIM, H. Y. et YANG, C. (2009). Thin-ship theory and influence of rake and flare. *Journal of Engineering Mathematics*, 64:49–80.
- NOBLESSE, F., DELHOMMEAU, G. et YANG, C. (2010). Vague d'étrave et fonction de green. *12èmes Journées de l'Hydrodynamique*.
- NOBLESSE, F., DELHOMMEAU, G., YANG, C., KIM, H. Y. et QUEUTEY, P. (2011). Analytical bow waves for fine ship bows with rake and flare. *Journal of Ship Research*, 55:1–18.
- NOBLESSE, F., HENDRIX, D., FAUL, L. et SLUTSKY, J. (2006). Simple analytical expressions for the height, location, and steepness of a ship bow wave. *Journal of ship research*, 50:360–370.
- NOVARINI, J. C. et BRUNO, D. R. (1982). Effects of the sub-surface bubble layer on sound propagation. *J. Acoust. Soc. Am.*, 72(2):510–514.
- OGER, G., DORING, M., ALESSANDRINI, M. et FERRANT, P. (2006). Two-dimensional SPH simulations of wedge water entries. *Journal of Computational Physics*, 213(2):803–822.
- OGILVIE, T. F. (1972). The wave generated by a fine ship bow. Rapport technique, Department of naval architecture and marine engineering Université de Michigan.
- OLIVIERI (2004). Froude number and scale effects and froude number 0.35 wave elevations and mean-velocity measurements for bow and shoulder wave breaking of surface combatant dtmb 5415. Rapport technique, Université de l'Iowa (USA).
- OLIVIERI, A., PISTANI, F. et DI MASCIO, A. (2003). Vreaking wave at the bow of a fast displacement ship model. *Journal of marine science and technology*, 8:68–75.

- PAIK, B. G., KIM, J., PARK, Y. H., KIM, K. S. et YU, K. K. (2007). Analysis of wake behind a rotating propeller using PIV technique in a cavitation tunnel. *Ocean Engineering*, 34(3-4):594–604.
- PARK, H. J., OISHI, Y., TASAKA, Y. et MURAI, Y. (2016). Void waves propagating in the bubbly two-phase turbulent boundary layer beneath a flat-bottom model ship during drag reduction. *Experiments in Fluids*, 57.
- RAFFEL, M., WERELEY, C. E. et KOMPENHANS, J. (2007). Particle Image Velocimetry - A practical guide. *Springer, Heidelberg*.
- ROLLAND, D. et CLARK, P. (2010). Reducing bubble sweep-down effects on research vessels. In *OCEANS'10 IEE Sydney*.
- ROTH, G. I., MASCENIK, D. T. et KATZ, J. (1999). Measurements of the flow structure and turbulence within a ship bow wave. *Physics of Fluids*, 11:3512.
- SANJOU, M., NEZU, I. et TODA, A. (2010). PIV studies on turbulence structure in air/water interface with wind-induced water waves. In *9th International Conference on Hydrodynamics, Shanghai*, volume 22, pages 349–353.
- SENE, K. J. (1988). Air entrainment by plunging jets. *Chem. Eng. Science*, 43:2615–2623.
- SERDULA, C. D. et LOEWEN, M. R. (1988). Experiments investigating the use of fiber-optic probes for measuring bubble-size distributions. *IEEE J. Ocean. Eng.*, 23:385–399.
- SEVIK, M. et PARK, S. H. (1988). The splitting of drops and bubbles by turbulent fluid flow. *J. Fluids Eng.*, pages 53–60.
- SHABANGU, F. W., ONA, E. et YEMANE, D. (2014). Measurements of acoustic attenuation at 38kHz by wind-induced air bubbles with suggested correction factors for hull-mounted transducers. *Fisheries Research*, 151:47–56.
- SIROVICH, L. (2006). Turbulence and the dynamics of coherent structures. part i : Coherent structures. In *Appl. Math XLV*, pages 561–571.
- STANDING, R. G. (1974). Phase and amplitude discrepancies in the surface wave due to a wedge-ended hull form. *Journal of Fluid Mechanics*, 62:625–642.
- STERN, F. (2008). Unsteady PIV measurements in IIHR towing tank for PMM. In *25th ITTC - Volume III*.
- TAMASHIMA, M., MATSUI, S. et OGURA, M. (1983). Quantitative measurements with small models of ships in a circulating water channel. *Experiments in Fluids*, 1(1):135–142.

- TAVAKOLINEJAD, M. (2010). *Air bubble entrainment by breaking bow waves simulated by a 2D+T technique*. Thèse de doctorat, University of Maryland.
- THORPE, S. A. (2005). *The turbulent ocean*. Cambridge University Press.
- THORPE, S. A., OSBORN, T. R., JACKSON, J. F. E., HALL, A. J. et LUEK, R. G. (2003). Measurements of turbulence in the upper ocean mixing layer using auto-sub. *J. Phys. Oceanogr.*, 33(1):122–145.
- TRENKEL, V. M., BERGER, L., BOURGUIGNON, S., DORAY, M., FABLET, R., MASS, J., MAZAURIC, V., PONCELET, C., QUEMENER, G., SCALABRIN, C. et VILLALOBOS, H. (2009). Overview of recent progress in fisheries acoustics made by ifremer with examples from the bay of biscay. *Aquat. Living Resour.*, 22:433–445.
- TRENKEL, V. M., MAZAURIC, V. et BERGER, L. (2008). The new fisheries multi-beam echosounder me70 : description and expected contribution to fisheries research. *ICES Journal of Marine Science*, 65:645–655.
- TREVORROW, M. V. (2003). Measurements of near-surface bubble plumes in the open ocean with implications for high-frequency sonar performance. *J. Acoust. Soc. Am.*, 114(5):2672–2684.
- VAGLE, S. et FARMER, D. (1998). A comparison of four methods for bubble size and void fraction measurements. *IEEE J. Ocean. Eng.*, 23(3):211–222.
- VAN DE SANDE, E. et SMITH, J. M. (1976). Surface entrainment of air by high velocity water jets. *Chem. Eng. Science*, 28:1161–1168.
- VON BRÖCKEL, K. (2014). Echo sounders versus air bubbles in research vessels. *Hydro International*, pages 14–17.
- WANIEWSKI, T. A. (1999). *Air entrainment by bow waves*. Thèse de doctorat, California Institute of Technology.
- WANIEWSKI, T. A., BRENNEN, C. E. et RAICHLIN, F. (2001). Measurements of air entrainment by bow waves. *Journal of Fluids Engineering*, 23:57–63.
- WANIEWSKI, T. A., BRENNEN, C. E. et RAICHLIN, F. (2002). Bow wave dynamics. *Journal of ship research*, 46:1–15.
- WATANABE, Y., SAEKI, H. et HOSKING, R. J. (2005). Three-dimensional vortex structures under breaking waves. *Journal of Fluid Mechanics*, 545:291–328.

Annexe A

Effet d'échelles sur le bullage

A.1 Caractérisation du bullage

Dans cette partie, les mêmes analyses effectuées autour du Pp ? et l'étrave inversée dans le chapitre 3 sont réalisés autour des deux échelles de la *Thalassa*, 1/22 et 1/30. La fréquence d'occurrence ainsi que la dynamique des nuages de bulles sont analysés.

A.1.1 Fréquence d'occurrence des nuages de bulles

Les deux mécanismes d'entraînement d'air sont toujours observés pour cette forme d'étrave à l'échelle 1/22 comme à l'échelle 1/30. Les fréquences d'occurrence de bulles pour les quatre configurations ont été calculées pour les deux échelles et sont présentées sur la figure A.1.

La fréquence d'occurrence de bulles par détachement tourbillonnaire reste toujours inférieure à $0.12f_0$ (échelle 1/22) et $0.12f_1$ (échelle 1/30) pour les quatre configurations. Cette fréquence est nulle pour la configuration 4 autour de la *Thalassa* 1/22. La fréquence d'occurrence de bulles par déferlement est $0.28f_0$ dans le cas avec courant et houle pour l'échelle 1/22 et $0.2f_1$ pour l'échelle 1/30. Les fréquences de déferlement obtenues pour les configuration 3 et 4 sont toujours supérieures à $0.88f_0$ (échelle 1/22) et $0.81f_1$ (échelle 1/30). La fréquence autour de la *Thalassa* 1/22 atteint une valeur importante de $0.91f_0$ pour la configuration avec courant, houle et mouvements.

Les fréquences d'occurrence pour les configurations 3 et 4 autour des deux échelles sont importantes. Un nuage de bulle est généré quasiment pour chaque période de houle. Ce résultat est dû à l'importance des mouvements de ce navire en terme de pilonnement et de tangage. En guise de comparaison, les mouvements de pilonne-

ment et de tangage de la *Thalassa* 1/22 sont deux fois plus grandes que ceux du Pourquoi pas?.

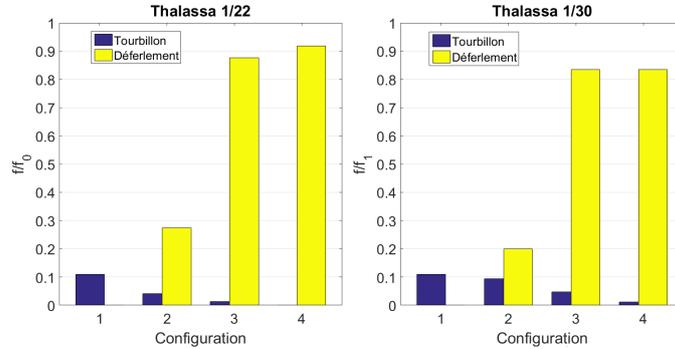


FIGURE A.1 – Fréquence d’occurrence des nuages de bulles autour de la *Thalassa* à l’échelle 1/22 et 1/30.

A.1.2 Dynamique des nuages de bulles

Les calculs de l’évolution des propriétés des nuages de bulles ont été effectués pour les configurations 2, 3 et 4. En raison de beaucoup de réflexions observées sur les images obtenues suite à cette campagne d’essais, les nuages de bulles ne sont pas traités d’une façon automatique comme dans le chapitre 2. Pour chaque configuration, le plus gros nuage observé pour chaque échelle a été présenté et analysé en terme d’aire du nuage, de profondeur et de vitesse verticale.

Les figures A.4, A.7 et A.10 présentent l’évolution des propriétés des nuages de bulles dimensionnés pour les configurations 2, 3 et 4 et pour les 2 échelles 1/22 et 1/30. L’instant $t=0$ correspond au pic de la houle incidente au niveau de l’étrave. L’adimensionnalisation est réalisée comme ci-dessous :

- A_{22} et A_{30} sont les aires définies par les tirants d’eau et les longueurs $l = 0.2L_{pp}$ des échelles 1/22 et 1/30 respectivement. $A_{22} = 150000mm^2$ et $A_{30} = 80000mm^2$.
- Z_{22} et Z_{30} sont les tirants d’eau des maquettes aux échelles 1/22 et 1/30 respectivement. $Z_{22} = 247000mm$ et $Z_{30} = 181mm$.
- U_{22} et U_{30} sont les vitesses du courant pour les échelles 1/22 et 1/30 respectivement. $U_{22} = 870mm/s$ et $U_{30} = 750mm/s$.

A.1.2.1 Configuration 2 : courant et houle

Dans cette configuration avec courant et houle, les nuages de bulles observés (figure A.2 et A.3) sont peu intenses. Le comportement de ces nuages autour des

A.1. CARACTÉRISATION DU BULLAGE

deux échelles est quasiment le même avec une légère augmentation des valeurs des propriétés physiques adimensionnées pour l'échelle 1/30 (voir figure A.4). L'aire des nuages de bulles atteint une valeur maximale autour de $0.28A_{30}$ et une profondeur maximale de pénétration de $0.6Z_{30}$ autour de l'échelle 1/30. Les nuages de bulles ne passent jamais sous la coque.

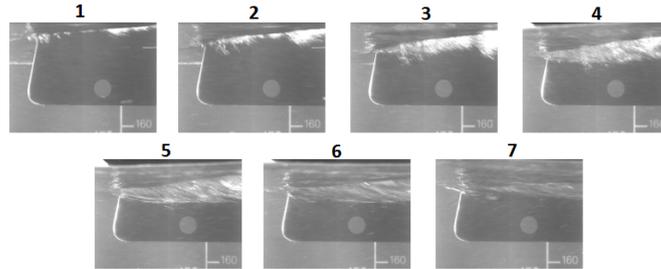


FIGURE A.2 – Images d'une période de houle avec bulles pour la configuration 2 autour de la *Thalassa* 1/22.

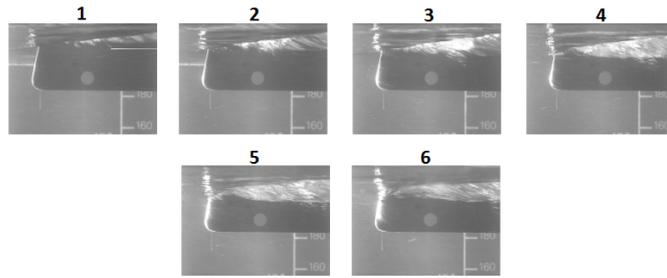


FIGURE A.3 – Images d'une période de houle avec bulles pour la configuration 2 autour de la *Thalassa* 1/30.

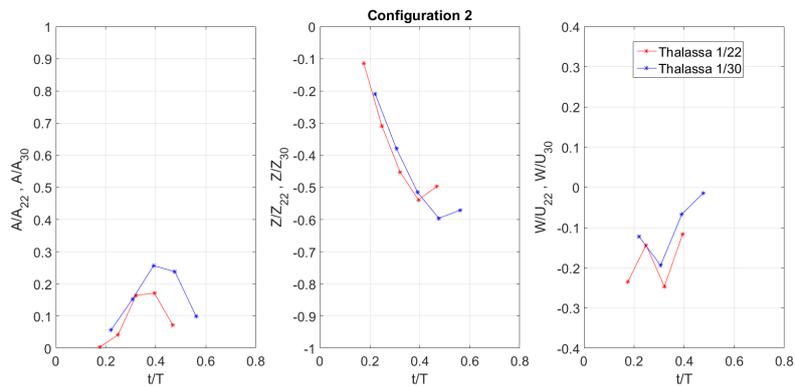


FIGURE A.4 – Evolution des propriétés (aire, profondeur et vitesse verticale) du nuage de bulle dans la configuration 2 avec courant et houle.

A.1.2.2 Configuration 3 : courant et mouvements

Dans cette configuration avec courant et mouvement du navire, les nuages de bulles observés (figure A.5 et A.6) sont très différents des nuages de bulles observés pour la configuration 2 avec courant et houle (figure A.2 et A.3). Les propriétés des nuages de bulle pour les deux échelles sont beaucoup plus importantes. On observe une augmentation de l'aire du nuage de bulles adimensionnée autour de l'échelle 1/30 comparée avec l'échelle 1/22. Les aires des nuage de bulles atteignent des valeurs maximales de $0.7A_{30}$ et de $0.45A_{22}$ pour les échelles 1/30 et 1/22 respectivement. Les profondeurs maximales autour des 2 échelles atteignent les mêmes valeurs maximales de $0.9Z_{22}$ et de $0.9Z_{30}$ respectivement. Les vitesses adimensionnalisées des nuages de bulles autour de l'échelle 1/30 sont légèrement plus importantes et la vitesse maximale atteint une valeur de $-0.33U_{22}$.

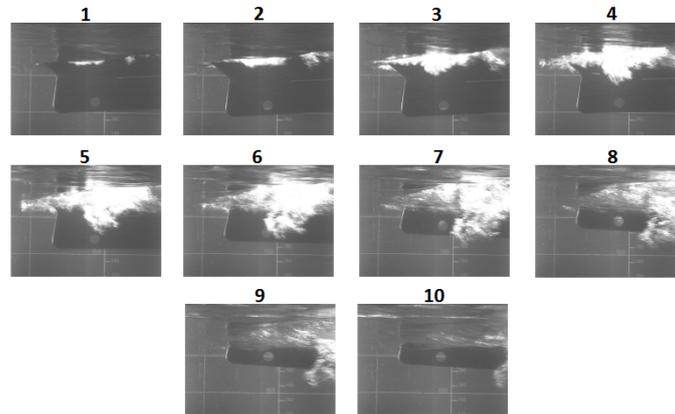


FIGURE A.5 – Images d'une période de houle avec bulles pour la configuration 3 autour de la *Thalassa* 1/22.

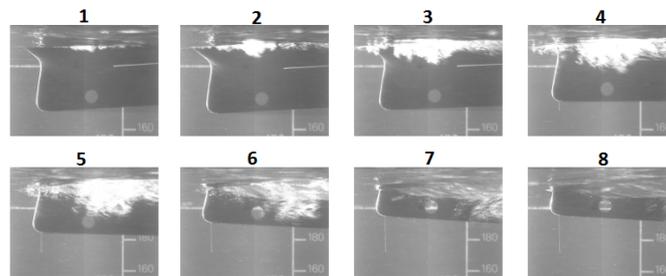


FIGURE A.6 – Images d'une période de houle avec bulles pour la configuration 3 autour de la *Thalassa* 1/30.

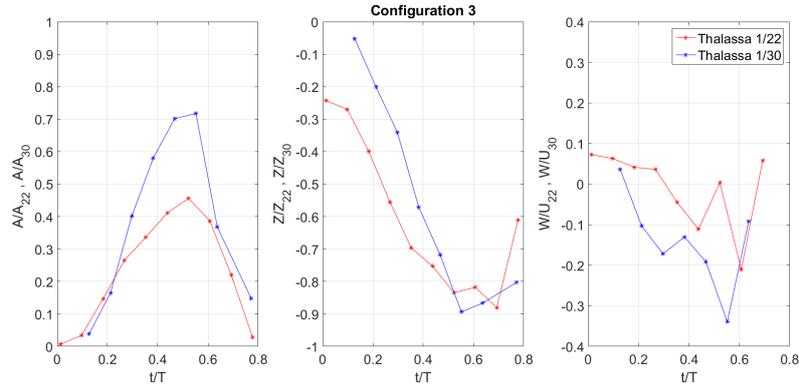


FIGURE A.7 – Evolution des propriétés (aire, profondeur et vitesse verticale) du nuage de bulle dans la configuration 3 avec courant et mouvements du navire.

A.1.2.3 Configuration 4 : courant, houle et mouvements

Dans cette configuration avec courant, houle et mouvement du navire, les nuages de bulles observés (figure A.8 et A.9) sont très similaires de ceux des nuages de bulles observées dans la configuration 3 avec courant et mouvements du navire (figure A.5 et A.6). Les aires des nuage de bulles atteignent des valeurs maximales de $0.7A_{30}$ et de $0.45A_{22}$ pour les échelles 1/30 et 1/22 respectivement. Les profondeurs maximales autour des 2 échelles atteignent des valeurs maximales de $0.78Z_{22}$ autour de la *Thalassa* 1/22 et de $0.9Z_{30}$ autour de la *Thalassa* 1/30.

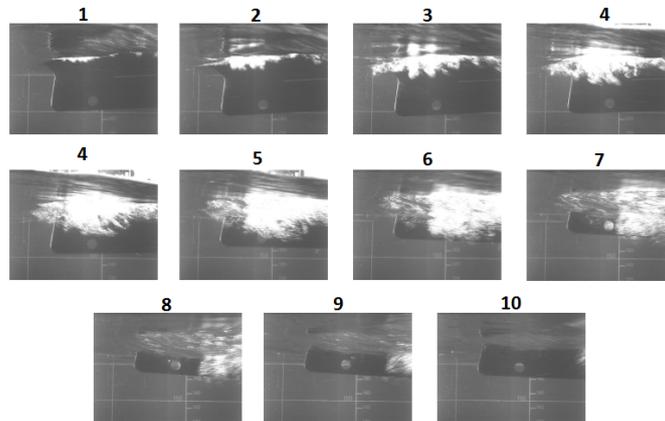


FIGURE A.8 – Images d'une période de houle avec bulles pour la configuration 4 autour de la *Thalassa* 1/22.

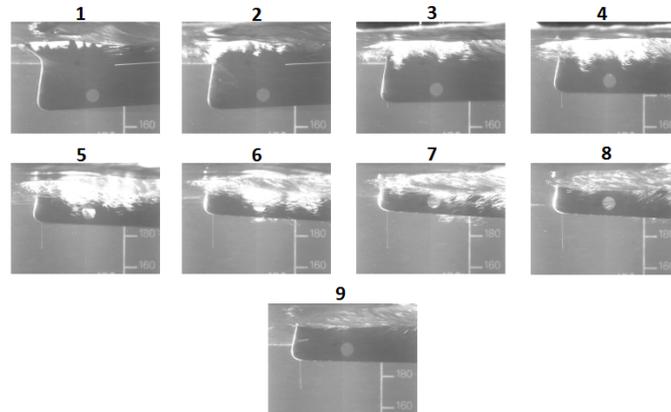


FIGURE A.9 – Images d’une période de houle avec bulles pour la configuration 4 autour de la *Thalassa* 1/30.

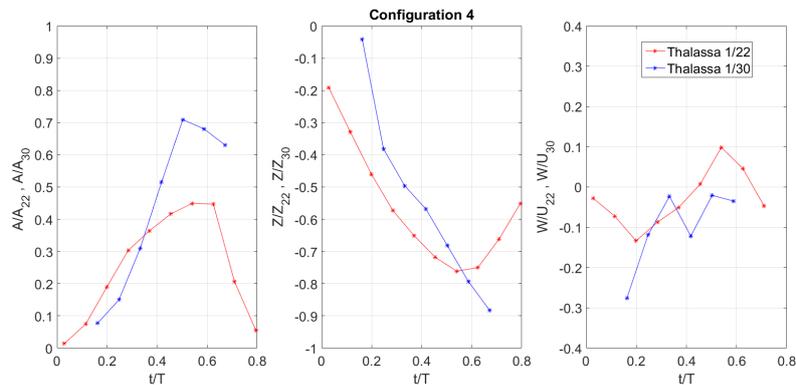


FIGURE A.10 – Evolution des propriétés (aire, profondeur et vitesse verticale) du nuage de bulle dans la configuration 4 avec courant, houle et mouvements du navire.

Ces analyses montrent que pour la configuration avec houle uniquement, les nuages générés autour des deux maquettes de la *Thalassa* aux échelles 1/22 et 1/30 sont peu intenses et proches de la surface libre. En revanche, les nuages de bulles sont plus grands et entrainés en profondeur pour les configurations avec mouvements du navire.

A.2 Conclusion

Le navire *Thalassa* a été étudié en bassin de circulation à deux échelles différentes, 1/22 et 1/30. Les techniques abordées dans le chapitre 2 ont été appliquées, ce qui a permis d’étudier l’influence des effets d’échelle sur la génération de bulles. La fréquence d’occurrence des nuages des bulles et la dynamique des bulles ont été

détaillées pour trois configurations de base avec et sans mouvements du navire.

Le résultat primordial concerne l'observation de la génération des nuages de bulles. Les fréquences d'occurrence pour les configurations avec mouvements du navire autour des deux échelles sont importantes. On observe un nuage de bulle généré pour chaque tangage maximal. Ce résultat est dû à l'importance des mouvements de pilonnement et de tangage de ce navire qui sont deux fois plus grands que ceux du Pp?. Pour la configuration avec houle seulement, la fréquence d'occurrence est légèrement plus importante autour de l'échelle 1/22.

En revanche et vu l'importance des amplitudes de mouvement du navire *Thalassa*, les nuages de bulles générés dans les configurations avec mouvements sont très intenses et entraînés en profondeur. En guise de comparaison entre les deux échelles, nous avons observé que les nuages de bulles autour de la *Thalassa* 1/22 et 1/30 se comportent de la même manière pour la configuration sans mouvements. Dès que le mouvement du navire est pris en compte, une légère augmentation des propriétés physiques adimensionnées du nuage de bulle autour de la *Thalassa* 1/30 est observée.

A.2. CONCLUSION

Annexe B

Effet de la turbulence

Des essais ont été réalisés sur la maquette de Pp ? dans le bassin de circulation à houle et courant de l'Ifremer pour mesurer la résistance à l'avancement. Les résultats obtenus ont été comparés avec des données provenant d'essais en bassin de traction. Les comparaisons ont montrées que l'écoulement est bien représentatif de l'échelle réelle, surtout pour une vitesse de 8 nœuds, correspondant à la vitesse du courant utilisé pour la grande majorité des essais effectués au cours de la thèse de S.Delacroix.

Ces essais ont été réalisés en imposant une vitesse de courant dans le bassin, avec le générateur de houle relevé et donc avec une intensité turbulente relativement faible correspondant à environ 3%. Lorsque le générateur de houle est immergé dans le bassin et situé en amont, le taux de turbulence de l'écoulement s'élève à 15%. L'étude présentée ici consiste à réaliser des essais pour mesurer la résistance à l'avancement sur la maquette de Pp?, mais cette fois, en immergeant le batteur à houle dans le bassin. Le but étant d'étudier les effets de la turbulence de l'écoulement incident (paramètre non négligeable sur le phénomène de bullage) sur la résistance à l'avancement.

B.1 Caractéristiques de l'écoulement incident

Afin de mesurer la résistance à l'avancement avec batteur immergé et comparer les résultats avec le cas du batteur relevé, des mesures de vitesse du courant sont nécessaires. Pour cela, des mesures LDV sans maquette ont été réalisées dans le bassin pour différents vitesses de courant et pour différents points de mesures.

Pour chaque vitesse de courant, six points de mesure LDV ont été réalisés en variant la profondeur de $z=-50$ jusqu'à $z=-300$ mm. Pour chaque point de mesure, l'acquisition LDV dure 3 minutes. La vitesse prise en compte est la moyenne des vitesses mesurées de $z=-50$ jusqu'à $z=-200$ mm, sachant que le tirant d'eau de la ma-

B.2. RÉSISTANCE À L'AVANCEMENT

quette du Pp? au 1/30 est de 18 cm. Les résultats de mesures LDV pour différentes vitesses de courant sans et avec batteur immergé sont présentés dans le tableau B.1.

Indicateur	Sans Batteur (IT=3%)				Avec Batteur (IT=15%)			
	U_{min}	U_{max}	U_{moy}	RMS	U_{min}	U_{max}	U_{moy}	RMS
306	0.3757	0.3809	0.38	0.0182	0.3002	0.3324	0.31	0.0559
457	x	x	0.56	x	0.4640	0.4908	0.47	0.0856
609	x	x	0.75	x	0.6303	0.6643	0.64	0.1159
760	x	x	0.94	x	0.7567	0.8315	0.78	0.1399
800	0.9975	1.0097	0.99	0.0451	0.8095	0.8801	0.82	0.1473
836	x	x	1.03	x	0.8467	0.9088	0.86	0.1477
911	x	x	1.13	x	0.9092	0.9884	0.93	0.1617
987	x	x	1.22	x	0.9809	1.0541	0.99	0.1738
1063	x	x	1.31	x	1.0797	1.1557	1.11	0.1768
1138	x	x	1.41	x	1.1706	1.2569	1.19	0.1868
1210	1.5166	1.5239	1.5	0.07	x	x	x	x

TABLE B.1 – Vitesse du courant U (m/s) sans et avec batteur pour différents indicateurs de veine.

B.2 Résistance à l'avancement

Après avoir mesuré la vitesse du courant avec batteur immergé, des mesures de résistance à l'avancement ont été réalisés sur la maquette du Pp? et sur l'étrave inversée (figure B.1) sans et avec batteur. Le protocoles théorique pour le calcul de la résistance à l'avancement est détaillé ci-dessous.

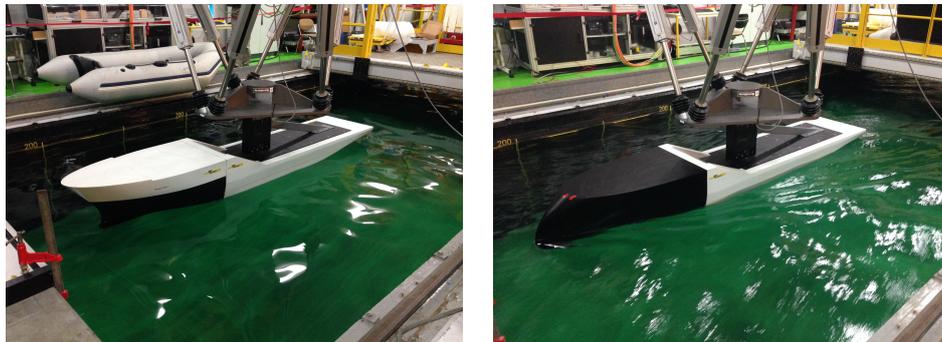


FIGURE B.1 – Maquette du Pp? (gauche) et l'étrave inversée (droite).

La résistance à l'avancement R_T est divisée en deux composantes : la résistance

de frottement R_F et la résistance résiduelle R_W , principalement composé de la résistance par génération de vague : $R_T = R_F + R_W$

Le coefficient de résistance à l'avancement est défini par :

$$C_T = \frac{R_T}{0.5\rho S U^2} = C_F + C_W \quad (\text{B.1})$$

avec ρ la densité de l'eau, S la surface mouillée et U la vitesse d'avance.

Les étapes à suivre sont les suivantes :

- dans le bassin, on mesure à l'aide d'une balance la force de l'eau sur la maquette, i.e la résistance totale de la maquette R_{Tm} et on calcule C_{Tm}
- on détermine à l'aide d'un calcul empirique le coefficient de la résistance visqueuse de la maquette C_{Fm} . On applique la formule :

$$C_F = \frac{0.075}{(\log(R_e) - 2)^2} \quad (\text{B.2})$$

- on soustrait C_{Fm} de C_{Tm} et on obtient le coefficient de la résistance de vague de la maquette C_{Wm} qui est directement transposable au navire réel :

$$C_{Wm} = C_{Tm} - C_{Fm} = C_{Wr} \quad (\text{B.3})$$

- on détermine le coefficient de la résistance visqueuse réel C_{Fr} par la formule de C_F en remplaçant le nombre de Reynolds par sa valeur réel
- on obtient le coefficient de résistance totale réel C_{Tr} en additionnant le coefficient de résistance des vagues réel et le coefficient de résistance visqueux réel :

$$C_{Tr} = C_{Fr} + C_{Wr} \quad (\text{B.4})$$

- enfin on calcule la résistance à l'avancement réelle du navire R_{Tr} en utilisant l'équation (1).

D'après les résultats de mesures, la résistance à l'avancement sur les maquettes du Pp? et de l'étrave inversée semble très peu influencée par la variation du taux de turbulence (figure B.2). Afin d'essayer de mieux comprendre ce résultat, des mesures de couche limite au niveau de l'étrave de Pp? sans et avec batteur immergé ont été réalisées.

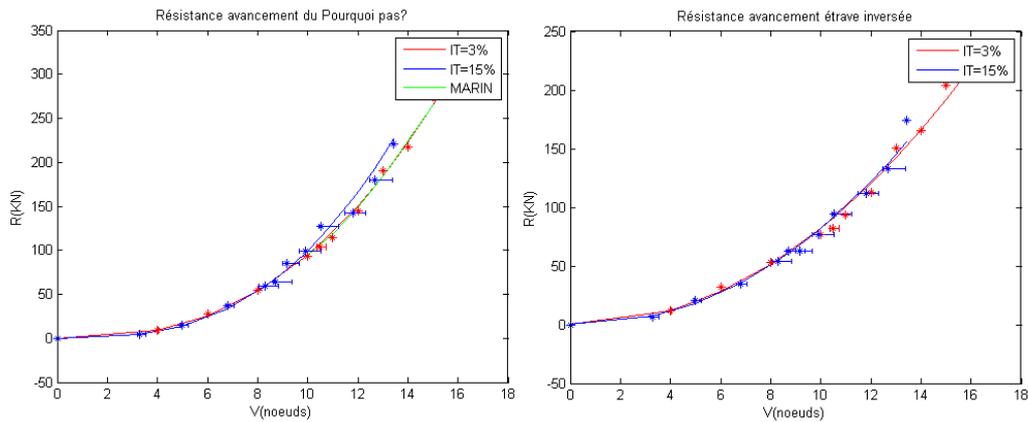


FIGURE B.2 – Résistance avancement avec et sans batteur en fonction de la vitesse du Pp? (à gauche) et de l'étrave inversée (à droite).

B.3 Mesures de couche limite

Des mesures de couche limite à partir du système LDV (figure B.3) ont été réalisés sur la maquette de Pp? au niveau de l'étrave avec et sans batteur immergé et pour différents points en variant X (coordonnée dans le sens du courant), Y (coordonnée transverse dirigée vers les murs du bassin), et Z (coordonnée verticale le long de la profondeur).

L'origine ($X=0, Y=0, Z=0$) est au niveau de la surface libre juste au dessus de l'étrave (dans le même axe verticale du bas de l'étrave (figure B.4)). La vitesse du courant est d'environ 0.8m/s. Les mesures ont été réalisées pour deux profondeurs correspondant à $Z=-60$ et $Z=-120$ mm et pour des valeurs en X correspondant à -10, 50, 100, 150, et 200mm. Pour chaque valeur de X, plusieurs points de mesures ont été considérés en variant Y de -10 jusqu'à 500mm et pour les deux profondeurs $Z=-60$ et $Z=-120$ mm (figure B.4).

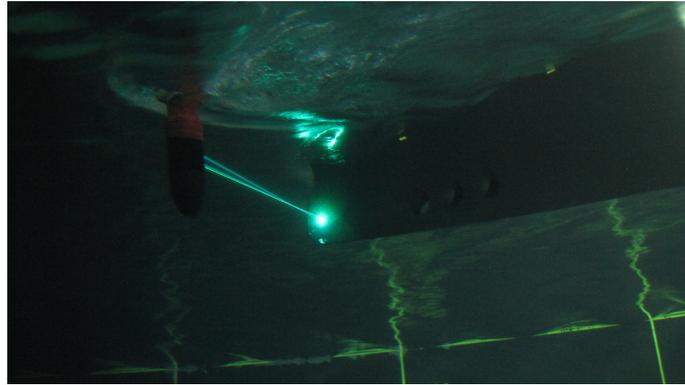


FIGURE B.3 – Mesure de couche limite de la maquette de Pp ? avec le Système LDV.

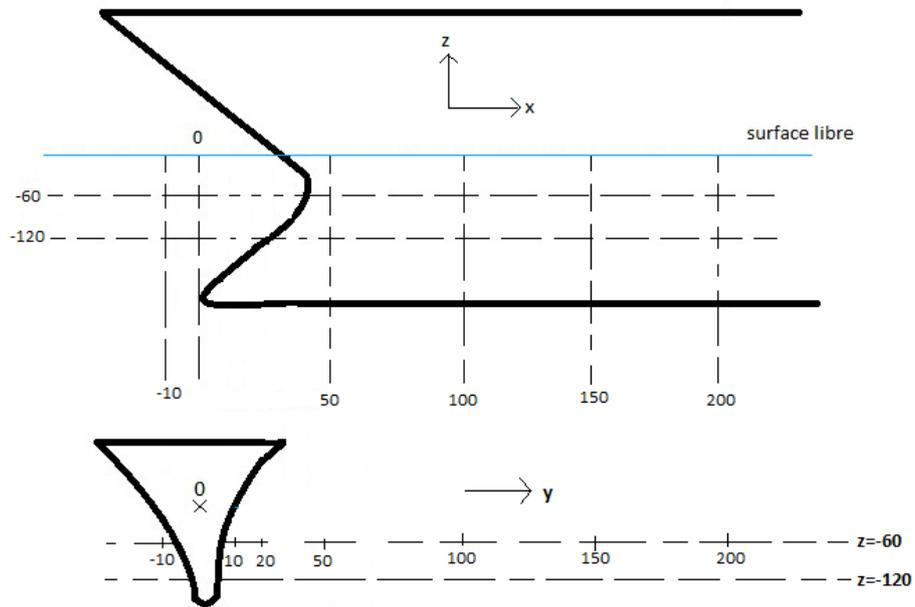


FIGURE B.4 – Points de mesures LDV sur la maquette de Pp ? en X et Z vu du coté (schéma du haut) et en Y vu de face (schéma du bas).

L'analyse des données de mesures de la couche limite de la maquette de Pp ? (figure B.5) montre que le développement de la couche limite débute au même endroit. L'écoulement autour de l'étrave est quasiment le même pour les deux taux de turbulence.

B.3. MESURES DE COUCHE LIMITE

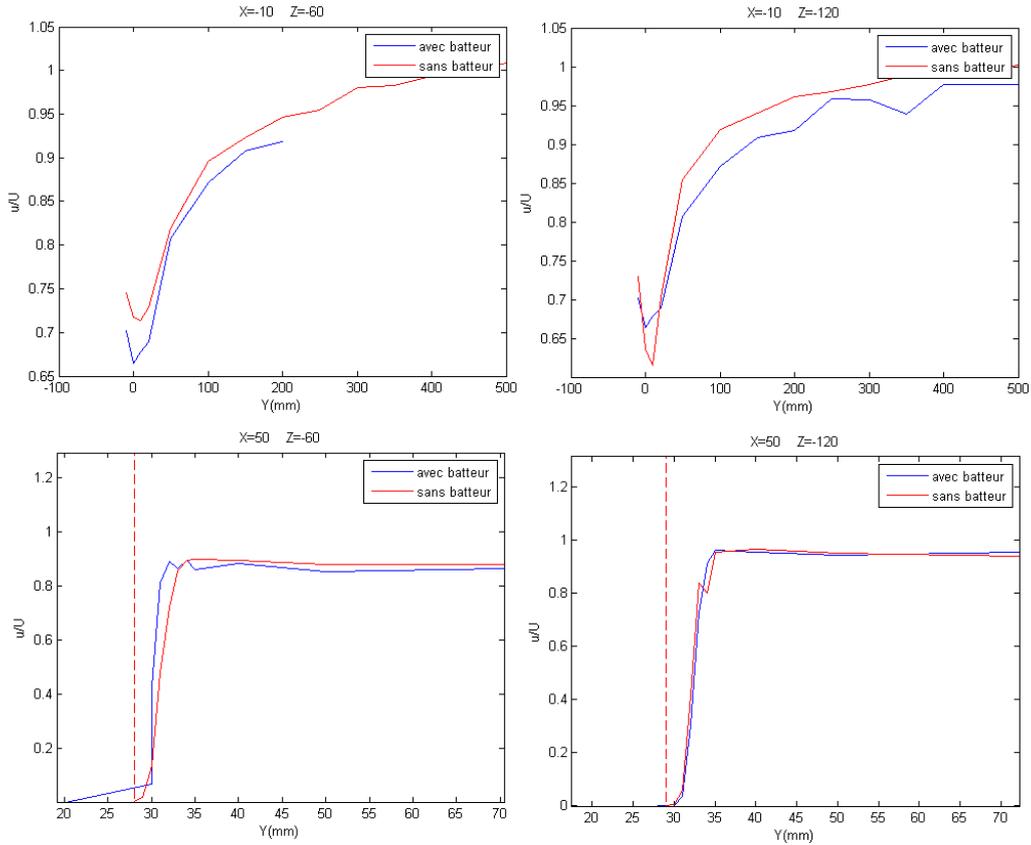


FIGURE B.5 – Vitesse adimensionnée en fonction de Y pour $X=-10$ mm et $Z=-60$ mm (Haut Gauche), $X=-10$ mm et $Z=-120$ mm (Haut Droite), $X=50$ mm et $Z=-60$ mm (Bas Gauche) et $X=50$ mm et $Z=-120$ mm (Bas Droite).

L'épaisseur $\delta_{0.99}$ de la couche limite correspond à la distance de l'étrave où la vitesse longitudinale atteint 99% de la vitesse à l'infini U_0 . Elle vaut environ 6mm comme il paraît dans la figure B.6 où $\frac{u}{U}(Y = 29\text{mm}) = 0.001$ et $\frac{u}{U}(Y = 35\text{mm}) = 0.96$.

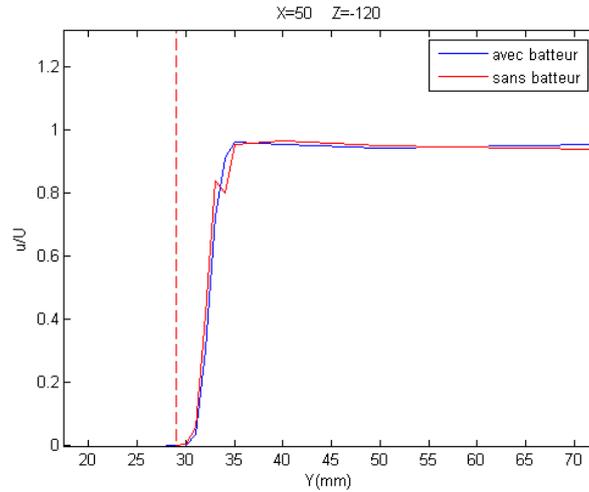


FIGURE B.6 – Figure zoomé de la vitesse adimensionnée en fonction de Y pour $X=50$ mm et $Z=-120$ mm ; la ligne verticale pointillée en rouge correspond à la position de la paroi.

B.4 Conclusion

Une campagne d'essais spécifique sur la carène du Pp ? a été réalisée pour quantifier l'influence d'un écoulement turbulent sur la résistance à l'avancement. Les résultats obtenus ont montrés que cette dernière est très peu influencée par les fluctuations locales de vitesses présentes dans l'écoulement incident. Des mesures complémentaires de couche limite ont été réalisés. Les résultats de ces mesures ont montré une influence locale du taux de turbulence sur le développement de la couche limite au niveau de l'étrave en terme de gradients de vitesse qui sont plus élevés avec batteur que sans batteur. Pourtant, l'allure de l'écoulement est quasiment la même pour les deux taux de turbulence ce qui confirme le résultat obtenu sur la résistance à l'avancement.

Annexe C

Mesure de surface libre par moyens optiques

Les travaux de thèse de S. Delacroix ont montré que l'amplitude de la vague d'étrave et la déformation de la surface libre (élévation de la surface) au contact de la maquette sont des paramètres importants à prendre en compte car ils agissent fortement sur la génération des bulles. Il est donc important de caractériser la déformation de la surface libre de façon précise par des méthodes non intrusives. Des essais spécifiques ont été réalisés pour la mesure de la surface libre par méthode optique. Dans un premier temps les essais ont été réalisés sans maquette à partir d'une méthode optique de stéréo-réfraction (Gomit *et al.*, 2013), et dans un deuxième temps avec maquette au niveau de la vague d'étrave. La première partie consiste à rappeler la méthode optique de stéréo-réfraction en quelques mots et à présenter le dispositif expérimental spécifique pour la mesure de la surface libre. La deuxième partie présente un récapitulatif de tous les cas testés ainsi que les paramètres pris en compte. Enfin, nous présentons les limites de la méthode dans le bassin d'essais d'Ifrémer.

C.1 Méthode basée sur la stéréo-réfraction

Cette méthode optique s'appuie sur le déplacement apparent d'un motif aléatoire connu situé sous la surface, qui va servir comme référence, et observé par 2 points de vue différents. Dans notre configuration, ce motif est une nappe laser. Deux caméras situées au dessus de la surface libre, C1 et C2, fournissent des déplacements apparents du motif sous 2 angles de vues différents, et une caméra située sous le bassin, C3, fournit une image non déformée, dite de référence, du motif (figure C.1). Cette méthode permettra de caractériser à la fois la forme de la surface (hauteur et normale à la surface) et la vitesse 2C-2D au niveau de la nappe laser.

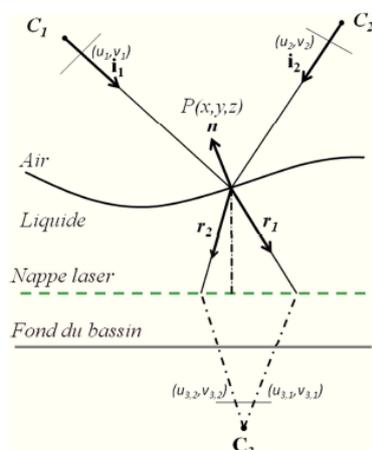


FIGURE C.1 – Système de stéréo-réfraction

A noter que des essais ont été d'abord réalisés sans maquette et en plaçant un damier physique au fond du bassin (voir figure C.2) pour mesurer la déformation de la surface libre. Les petits carrés de la mire font 20mm de côté et la caméra est placée à 135cm au dessus de la surface libre. Un projecteur sur le bord du bassin a été installé pour mieux éclairer le fond. L'idée ici c'est de prendre une image de référence au repos (sans courant ni houle) et pouvoir la comparer à une autre image dans laquelle la surface libre est déformée suite au passage de la houle. Les mesures avec houle uniquement sont propres avec quelques images présentant des zones inexploitable. En revanche pour la configuration avec courant et houle, le courant vient perturber la surface libre ce qui rend le damier invisible.

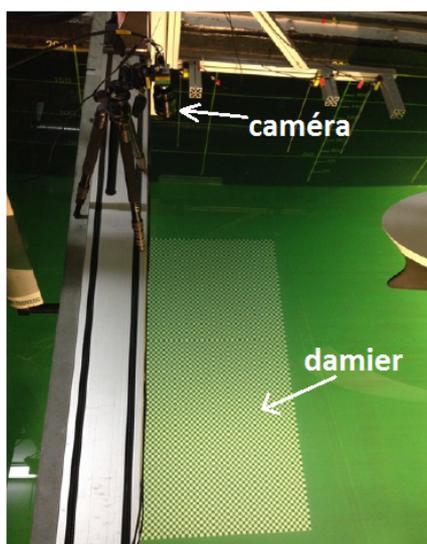


FIGURE C.2 – Dispositif expérimental avec le damier au fond du bassin.

C.1.1 Dispositif expérimental pour la mesure de la surface libre

Le dispositif expérimental est présenté dans la figure C.3. Des vues du haut et du côté sont présentées sur les schémas des figures C.4 et C.5. Il est composé d'un système PIV, de 3 sondes à houle et de 3 caméras digitales. Le détail de l'instrumentation est présenté ci dessous.

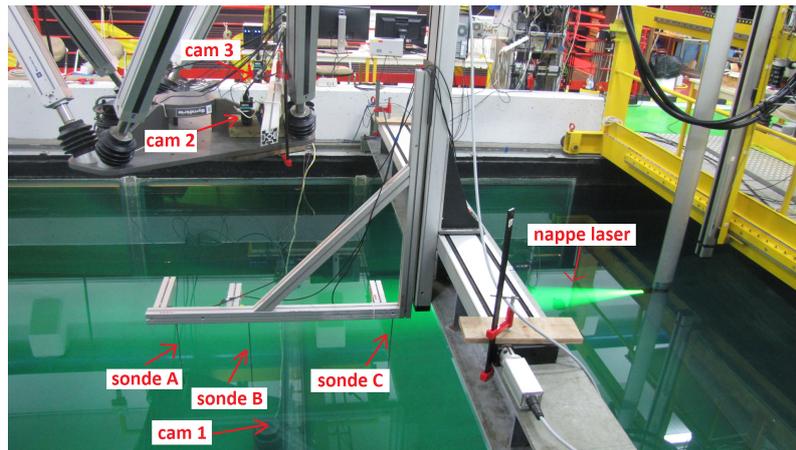


FIGURE C.3 – Photo du dispositif expérimental dans le bassin d'essais

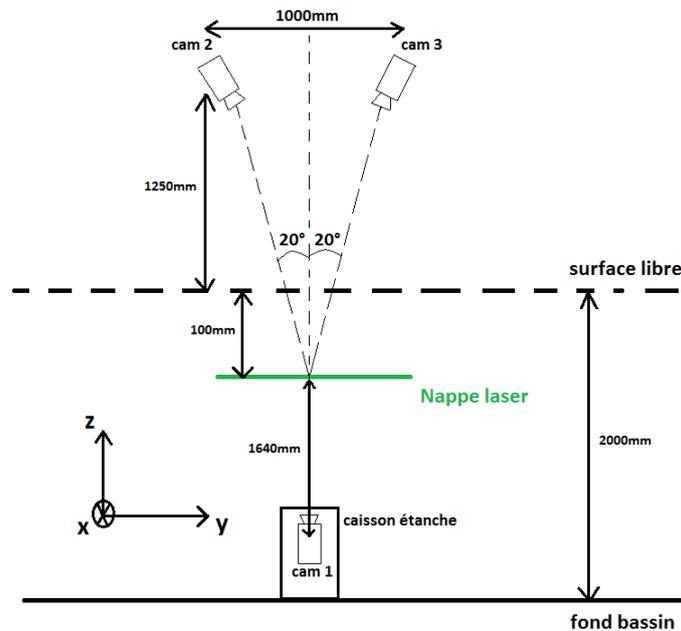


FIGURE C.4 – Schéma du dispositif expérimental dans le plan YZ

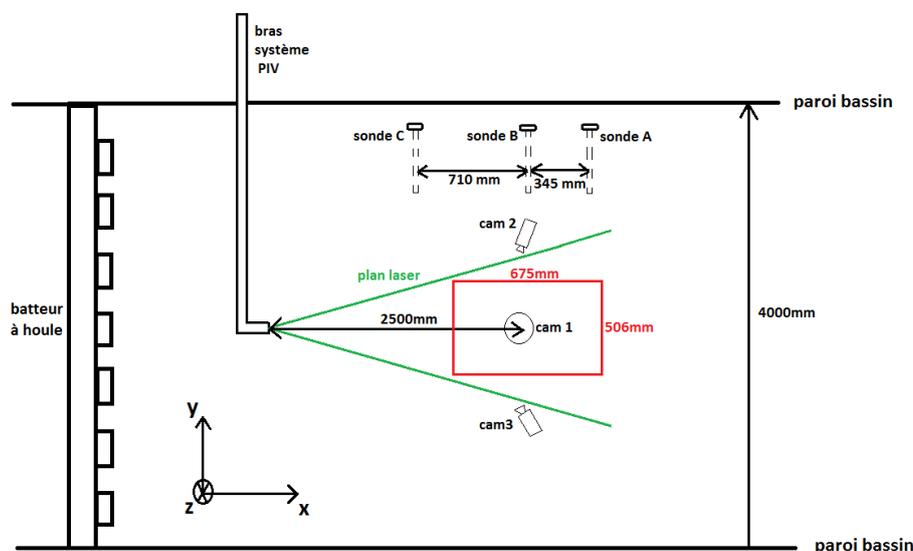


FIGURE C.5 – Schéma du dispositif expérimental dans le plan XY

C.1.1.1 Les caméras

Trois caméras digitales (Hi-sense CCD camera $1600 \times 1200 \text{ pixels}^2$) synchronisées au système laser permettent d'obtenir la position des particules dans le plan en ces 2 instants. La première caméra (cam 1) est installée dans un caisson étanche au fond du bassin. Son objectif est de 20 mm. La distance entre le capteur CCD de la cam 1 et la surface libre est 1740 mm. La deuxième et la troisième caméra (cam 2 et cam 3) sont installées sur un système de fixation sur l'hexapode au dessus de l'eau et forment un angle de 20° avec la normale à la surface libre. La distance entre les capteurs CCD de ces 2 caméras et la surface libre est 1250 mm et ont 25 mm comme objectif focale. Des exemples d'images des 3 caméras pour deux configurations (houle seul et courant + houle) sont présentées ci-dessous (figure C.6 et figure C.7).



FIGURE C.6 – Configuration houle seul ($A=75\text{mm}$, $f=0.85\text{Hz}$). cam1 (gauche), cam2 (milieu), cam3 (droite)



FIGURE C.7 – Configuration Courant ($V=0.8\text{m/s}$) + Houle ($A=75\text{mm}$, $f=0.85\text{Hz}$). cam1 (gauche), cam2 (milieu), cam3 (droite)

C.1.1.2 Le plan laser

L'écoulement a été mesuré grâce à la technique PIV 2D classique. Pour ces mesures, le bassin a étéensemencé par des particules de billes de verre argentées de $10\ \mu\text{m}$ de diamètre. Un laser à impulsion de type Nd-YAG (Neodymium-doped Yttrium Aluminium Garnet de $200\ \text{mJ}$ pour une longueur d'onde de $532\ \text{nm}$) et un système optique composé principalement de lentilles cylindriques permettent de générer un plan lumineux à 2 instants successifs avec un intervalle de temps très faible. Le plan laser est horizontal. La distance entre la sortie de la nappe et l'axe central de la cam 1 est de $2500\ \text{mm}$. Les mesures détaillées par la suite ont été réalisées pour 2 distances entre la nappe laser et la surface libre ; l'une à $100\ \text{mm}$ et l'autre à $140\ \text{mm}$. Une calibration est réalisée pour chaque hauteur afin de déterminer les dimensions physiques des plans PIV et la déformation d'image. Pour cela, nous avons utilisé un réglé avec des graduations des 2 cotés que nous avons fixé sur une poutre de façon à ce qu'il traverse le plan laser. Les facteurs d'échelles et les dimensions des champs PIV pour ces 2 hauteurs et pour les 3 caméras sont présentés dans le tableau ci-dessous (figure C.8). Le champ PIV commun aux 3 caméras pour $Z_{\text{nappe}} = -100\ \text{mm}$ est de $675 \times 506\ \text{mm}^2$ (zone en rouge dans la figure C.5) et de $664 \times 498\ \text{mm}^2$ pour $Z_{\text{nappe}} = -140\ \text{mm}$. Toutes les mesures ont été réalisées à une fréquence PIV de $15\ \text{Hz}$ et pour un temps inter-frame de $1200\ \mu\text{s}$. Les acquisitions sont de 60 secondes chacune. Le nombre d'images pour chaque caméra et pour chaque acquisition est donc 900 images.

<u>Znappe (mm)</u>	-100			-140		
Caméra	1	2	3	1	2	3
facteur d'échelle	57.19	57.04	57.5	56.12	56.48	59.63
Champ PIV(mm ²)	677.2x507.9	675.4x506.6	680.8x510.6	664.5x498.3	668.8x501.6	706x529.5

FIGURE C.8 – Dimensions champs PIV pour les 3 caméras et pour 2 hauteurs séparant la nappe laser de la surface libre.

C.2. RÉCAPITULATIF DES ESSAIS

C.1.1.3 Les sondes à houle

Trois sondes à houle (sonde A, sonde B, sonde C) de type résistive ont été utilisées. Ces sondes sont constituées de deux tiges en acier rigides et parallèles de 35 cm de long, de 3 mm de diamètre et espacées de 10 mm. La sonde B est placée au même niveau des 3 caméras (sur l'axe y). La distance entre la sonde A et B est de 345 mm et la distance entre la sonde B et C est de 710 mm.

C.2 Récapitulatif des essais

Deux séries d'essais ont été réalisées. La première est pour $Z_{nappe} = -100\text{mm}$ et la deuxième est pour $Z_{nappe} = -140\text{mm}$. Pour chaque série, 2 configurations ont été pris en compte, la première c'est avec houle seulement et la deuxième est avec courant et houle. La vitesse du courant était fixe à 0.8 m/s. Les fréquences des houles testés sont de 0.7, 0.85, 1, 1.5 et 2 Hz. Les amplitudes de houles (consigne logiciel batteur à houle) sont de 25, 50 et 75 mm. Le tableau ci dessous (figure C.9) résume tous les mesures réalisées avec les paramètres pris en compte.

vitesse courant [m/s]	Consigne batteur		Amplitude moyenne			Moyenne 3 sondes [mm]	Znappe [mm]
	fréquence [Hz]	Amplitude [mm]	Sonde A [mm]	Sonde B [mm]	Sonde C [mm]		
-	0.85	25	27.5497	27.6654	25.1441	26.7864	-100
-	1	25	27.1244	27.1573	28.1875	27.48973333	-100
-	1.5	25	24.3	25.4162	25.1654	24.96053333	-100
-	2	25	22.1054	18.8795	21.373	20.78596667	-100
-	0.85	50	52.979	55.581	50.0547	52.87156667	-100
-	1	50	53.7721	54.3224	55.6923	54.5956	-100
-	1.5	50	45.1713	45.0862	39.8164	43.35796667	-100
-	0.7	75	58.1451	59.882	52.6255	56.8842	-100
0.8	0.85	75	35.343	34.3619	34.7047	34.8032	-100
-	0.7	25	27.371	28.4655	24.8339	26.89013333	-140
-	0.85	25	-	-	-	-	-140
-	1	25	-	-	-	-	-140
-	1.5	25	-	-	-	-	-140
-	0.7	50	53.4881	55.6276	48.5876	52.56776667	-140
-	0.85	50	-	-	-	-	-140
-	1	50	-	-	-	-	-140
-	1.5	50	-	-	-	-	-140
-	0.7	75	80.6791	84.2174	71.1723	78.6896	-140
-	0.85	75	79.6937	83.0301	77.3204	80.01473333	-140
-	1	75	74.6421	73.3514	72.7531	73.5822	-140
0.8	0.7	25	14.6325	12.7308	12.8289	13.3974	-140
0.8	0.85	25	12.8957	11.1721	13.2944	12.45406667	-140
0.8	1	25	7.2453	6.5895	6.9945	6.9431	-140
0.8	1.5	25	2.7975	3.1871	3.3432	3.10926667	-140
0.8	0.7	50	27.1977	27.7008	26.9464	27.28163333	-140
0.8	0.85	50	24.1117	23.0597	22.1952	23.1222	-140
0.8	1	50	17.5486	16.6765	14.6758	16.3003	-140
0.8	1.5	50	3.4608	3.2983	3.1651	3.30806667	-140
0.8	0.7	75	42.4608	43.0293	42.0114	42.52035	-140
0.8	0.85	75	44.8618	45.687	45.7737	45.44083333	-140
0.8	1	75	23.9325	23.2615	21.4849	22.89296667	-140

FIGURE C.9 – Récapitulatif des mesures réalisées

C.3 Analyse des données de l'Ifremer

La mesure de surface libre par moyen optique de stéréo-réfraction est composée de 4 étapes : la calibration des caméras, la transformation des images, la corrélation d'images et la reconstruction. Les quatre étapes sont détaillées dans Gomit *et al.* (2013).

C.3.1 Limite de la méthode au bassin d'Ifremer

La méthode de stéréo-réfraction présente quelques limites détaillées ci-dessous :

- Il est nécessaire que les particules PIV soient bien visualisées et nombreuses dans l'image sans être déformées et allongées (voir figure C.10 droite) pour que les images des caméras du dessus soient bien corrélées avec les images de la caméra du dessous.
- Les particules de billes de verres argentées réfléchissent la lumière ce qui permet de visualiser les particules, mais une taille de $15\mu\text{m}$ est petite pour notre champ de vision qui fait $600 \times 500 \text{mm}^2$. Il est donc nécessaire d'avoir des particules plus grandes, par exemple des particules polyamide de $56\mu\text{m}$ de diamètre.
- Lorsque le générateur de houle est immergé dans le bassin et situé en amont, le taux de turbulence dans le flux entrant s'élève à 15%. Suite à cela, des ondes capillaires apparaissent en surface (voir figure C.10 gauche) et c'est difficile d'identifier les particules PIV par la caméra au dessus de la surface libre.
- Afin de mieux éclaircir et visualiser les particules PIV, il est important de placer la nappe laser le plus proche possible de la surface libre en prenant en compte les hauteurs de vagues maximales générées. Il ne faut pas que les creux des houles croisent la nappe laser ce qui rend la corrélation impossible et peut causer la dégradation du capteur optique de la caméra une fois la faisceau laser se dirige vers le capteur.

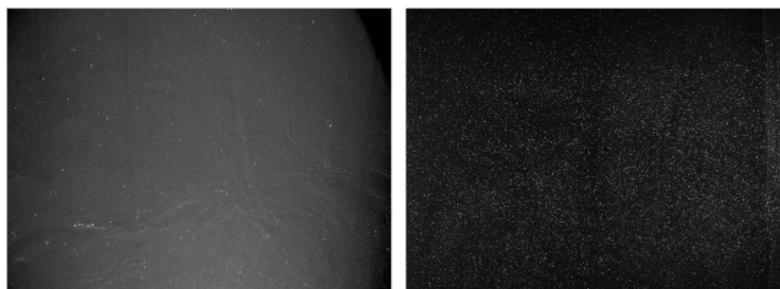


FIGURE C.10 – Image acquise par l'Ifremer (gauche), image acquises dans le cadre de la thèse de G. Gomit (droite)

C.4 Conclusion

La mesure de la surface libre par méthode optique de stéréo-réfraction a été testée au bassin d'essais de l'Ifremer afin de caractériser la déformation de la surface libre. Cette méthode comporte 4 étapes : la calibration des caméras, la transformation des images, la corrélation des images et enfin la reconstruction de la surface. L'étape cruciale de la méthode est la calibration des caméras pour laquelle une mire 2D est indispensable.

Dans le bassin de circulation de l'Ifremer et dès que le courant est établi, les particules PIV ne peuvent pas être détectées par les caméras positionnées au-dessus de la surface à cause de l'apparition des rides, des clapots et des ondes capillaires suite à la turbulence générée en surface. Ces particules sont parfois allongées et déformées ce qui rend impossible la corrélation des images. Pour le cas avec houle seul sans courant, les images sont de qualité moyenne. Par ailleurs, une plus grande taille de particules PIV est recommandé afin d'améliorer la qualité des images et ainsi la corrélation.

Résumé

Les navires de recherche océanographiques de l'Ifremer utilisent des équipements acoustiques de type SONAR afin d'étudier les ressources marines et de caractériser la nature des fonds. Dans certaines conditions de navigation, un entrainement d'air est généré sous la surface libre suite à l'interaction de la houle avec la coque et/ou l'interaction des mouvements du navire avec la surface libre. Des bulles d'air sont ainsi formées et entraînées par l'écoulement sous la coque du navire, ce qui contrarie très fortement les performances des équipements acoustiques et limite les conditions de mer exploitables pour la prospection acoustique. L'objectif de cette thèse est de caractériser finement le phénomène de génération de bulles autour de navires dans un bassin de circulation à houle et courant.

En tout premier lieu, cette thèse a permis d'étudier l'influence de la géométrie de l'étrave sur le phénomène de bullage. La fréquence d'occurrence et la dynamique des nuages de bulles ont été analysées en 2D autour de trois modèles d'étraves pour différentes configurations d'essais. Ensuite, une étude fine du phénomène a été réalisée et a permis une caractérisation 3D des nuages de bulles générés et propagés autour de la carène du *Pourquoi pas ?*. Les bulles ont été caractérisées à l'aide d'une sonde optique. Ces mesures ont permis de calculer les diamètres, les vitesses et le taux de vide des bulles générées par déferlement de la vague d'étrave. Enfin, des mesures PIV2D2C et Stéréo-PIV autour des différents modèles d'étraves ont permis de corréler l'écoulement hydrodynamique avec la génération de bulles.

Les résultats obtenus permettent d'identifier les zones où l'interaction entre l'écoulement et l'étrave est prononcée mais aussi la position des bulles générées et propagées. Ils fournissent une base de données intéressante pour les concepteurs de coques des navires et pourraient être utilisés pour la validation de futurs modèles numériques.

Abstract

The oceanographic research ships of Ifremer use acoustic equipments "SONAR" to study marine resources and to characterize seabeds. Under certain environmental conditions, air entrainment is generated below the free surface due to the interaction between waves and hull and/or the interaction of the ship motions with the free surface. Air bubbles are formed and driven by the flow under the ship hull, which hinders the performance of the acoustic equipment and limits the exploitable sea conditions for acoustic prospecting. The objective of this work is to characterize the phenomenon of bubble generation around different bow models in a wave and current circulating tank.

First, this PhD thesis allowed us to study the influence of the bow geometry on the phenomenon. The occurrence frequency and the dynamic of bubble clouds were analyzed in 2D around three bow models for different tested configurations. In the second stage, a detailed study of the phenomenon was carried out and allowed a 3D characterization of the bubble clouds generated and propagated around the hull. An optical probe was used to measure diameters, velocities and void fraction of bubbles generated by breaking bow waves. Finally, PIV2D2C and Stereo-PIV measurements around the different bow models allowed to correlate the hydrodynamic flow field with bubble generation.

The obtained results allow to identify the zones where the interaction between the flow and the bow is pronounced and then the position of the bubbles generated and propagated. These results provide an interesting database for ship hull designers and could be used for the validation of future numerical models.