



THÈSE

pour obtenir le titre de

Docteur de l'Université de Bretagne Occidentale

École Doctorale des Sciences de la mer

Spécialité : Mécanique des fluides

Présentée et soutenue le 12 Mars 2015 par

Sylvain DELACROIX

**Caractérisation de la génération et de la
propagation de bulles autour de la carène des
navires scientifiques**

Jury :

M Jérôme BROSSARD	Professeur à l'Université du Havre	Président du Jury
M Laurent DAVID	Professeur à l'Université de Poitiers	Rapporteur
M Jean-Marc FOUCAUT	Professeur à l'École Centrale de Lille	Rapporteur
M Philippe DRUAULT	Maitre de Conférence à l'UPMC	Examineur
M Nourredinne LATRACHE	Maitre de Conférence à l'UBO	Examineur
M Olivier PERELMAN	Ingénieur DGA TH	Invité
M Jean-Yves BILLARD	Professeur à l'École Navale	Directeur de thèse
M Grégory GERMAIN	Chercheur IFREMER	Co-directeur de thèse

Table des matières

Remerciements	5
Avant-propos	7
1 Introduction	9
1.1 Flotte océanographique et acoustique sous-marine	9
1.1.1 L’Ifremer et sa flotte	9
1.1.2 Principes de l’acoustique sous-marine	10
1.2 Phénomène de Bubble Sweep-down	13
1.2.1 Perturbation des signaux acoustiques par les nuages de bulles	13
1.2.2 Expériences et solutions actuelles	15
1.3 Vague d’étrave, entraînement d’air et génération de bulles	19
1.3.1 Vague d’étrave	19
1.3.2 Entraînement d’air par un jet plongeant	21
1.3.3 Application à l’entraînement d’air par une vague déferlante	24
2 Analyse de la génération de bulles à partir de mesures en mer	35
2.1 Acoustique et rétrodiffusion des bulles	37
2.2 Méthode d’analyse	38
2.2.1 Analyse des données de navigation	38
2.2.2 Analyse des données acoustiques	40
2.3 Résultats : Corrélations entre conditions de navigation et présence de bulles	45
2.3.1 Étude des bulles observées par la <i>Thalassa</i>	45

2.3.2	Comparaison entre la <i>Thalassa</i> et le <i>Pourquoi pas?</i>	54
2.4	Conclusion	62
3	Montage expérimental et techniques développées	69
3.1	Moyens d'essais	71
3.1.1	Bassin de circulation de Boulogne-sur-Mer	71
3.1.2	Montage spécifique avec générateur de mouvement	72
3.2	Instrumentation	74
3.3	Méthodologie	78
3.3.1	Lois de similitudes et effets d'échelle	78
3.3.2	Paramètres d'essais	80
3.3.3	Calcul des mouvements	82
3.3.4	Synchronisation des mouvements avec la houle	84
3.3.5	Configurations d'essais	86
4	Analyse de la génération de bulles en bassin de circulation	91
4.1	Phénomènes observés	91
4.1.1	Mécanismes d'entraînement d'air	91
4.1.2	Fréquence des nuages de bulles	96
4.2	Méthode de détection de bulles	98
4.3	Caractérisation des mécanismes de génération de bulles	104
4.3.1	Configuration 1 : Courant	104
4.3.2	Configuration 2 : Courant et houle	105
4.3.3	Configuration 3 : Courant et Mouvements	106
4.3.4	Configuration 4 : Courant, houle et mouvements	106
4.4	Étude paramétrique de la génération de bulles	108
4.4.1	Influence des caractéristiques de la houle	108
4.4.2	Influence de la dynamique du navire	110
4.4.3	Influence de la synchronisation	112
4.4.4	Discussion	113
4.5	Conclusion	116

5	Analyse de l'écoulement autour de l'étrave	123
5.1	Caractérisation de l'écoulement incident	125
5.1.1	Écoulement sans générateur de houle	127
5.1.2	Écoulement avec générateur immergé sans houle	128
5.1.3	Écoulement avec générateur et houle	129
5.1.4	Comparaison des intensités turbulentes	131
5.2	Caractérisation de l'écoulement autour de l'étrave du <i>Pourquoi pas ?</i> .	132
5.2.1	Plans de mesures	132
5.2.2	Analyse des champs de vitesses instantanées	135
5.2.3	Analyse des champs de vitesses moyennes	141
5.2.4	Analyse en moyenne de phase	143
5.2.5	Analyse fréquentielle	151
5.3	Conclusion	156
6	Influence de la forme d'étrave	163
6.1	Analyse de l'entraînement d'air	165
6.2	Analyse de l'écoulement	169
6.2.1	Analyse des champs de vitesse moyens	169
6.2.2	Analyse en moyenne de phase	171
6.2.3	Analyse fréquentielle	174
6.3	Conclusion	176
7	Conclusions et Perspectives	181
7.1	Résumé des travaux réalisés	181
7.2	Perspectives	185
	Références.	187
	A Résistance à l'avancement	193
	B Caractérisation de la houle	197
	Résumé	205

TABLE DES MATIÈRES

Remerciements

Je tiens tout d'abord à remercier mes directeurs de thèse, pour m'avoir fait confiance et m'avoir accompagné tout au long de ce projet. Merci à Jean-Yves BILLARD de m'avoir ouvert les portes de l'IRENAV et merci pour nos séances de travail extrêmement enrichissantes. Merci Grégory GERMAIN pour ton énorme implication et ton aide quotidienne. Je remercie également l'Ifremer et la DGA pour le co-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, ainsi qu'Olivier PERLMAN qui a suivi ces travaux pour DGA TH et fourni de nombreux conseils pour les essais en bassin.

La mise en place d'essais complexes nécessite un travail d'équipe, et je suis particulièrement reconnaissant envers tous les membres du bassin Ifremer de Boulogne-sur-Mer qui forment une équipe soudée, efficace et extrêmement accueillante. Merci donc à Christelle LEPRETRE, Benoît GAURIER, Jean-Valérie FACQ, Thomas BACHETTI et encore une fois Grégory.

Je remercie également les différentes équipes d'Ifremer Brest avec qui j'ai pu travaillé, notamment Sarah DUDUYER, Henri FLOCH et Marc NOKIN qui m'ont fourni toutes les informations nécessaires concernant la flotte océanographique. Merci à toute l'équipe acoustique pour l'aide que j'ai pu recevoir concernant l'utilisation et l'analyse des données des sonars, en particulier à Xavier LURTON et Laurent BERGER dont les aides ont été précieuses.

Merci également à Yves VERIN pour m'avoir permis d'embarquer sur IBTS et m'avoir encouragé à analyser une grande quantité de données de ces campagnes.

Je n'oublie pas les stagiaires qui ont contribué à ces travaux, merci à Charles, Justine, Aymeric et Florent pour votre implication et les résultats que vous avez obtenus.

Par ailleurs ces trois années de travail à Boulogne-sur-Mer ont été très agréables grâce aux rencontres que j'ai pu faire, au sein de l'Ifremer ou ailleurs. Merci donc à Astrid, Martin, Xo, Raph, Paul, Elkhadim, ainsi qu'aux assidus du Beach Volley, d'Out'Grimp et du Rugby Club Boulonnais.

Merci également à mes amis de longue date, sur qui je sais que je peux compter à tout moment, avec une mention spéciale pour Adrien sans qui je ne serai peut être pas en train de clôturer ce manuscrit.

Enfin je tiens à remercier tous les membres de ma famille, et en particulier mes parents pour leur soutien infailible sur tous les projets que j'entreprends.
Last but not least merci à mon Anaïs pour toute l'énergie que tu me donnes.

Avant-propos

L'océan est un milieu sauvage et hostile que les hommes tentent d'approprier depuis la nuit des temps. Les ressources que ces eaux préservent y sont précieuses. Dans un contexte économique et écologique complexe, l'exploitation de ces ressources est un enjeu majeur. La connaissance des populations sous-marines, des fonds et des sous-sols marins ou encore des énergies marines est en constante progression, ce qui permet une meilleure exploitation de ces ressources.

L'Ifremer possède un rôle important face à toutes ces thématiques. En particulier grâce aux campagnes réalisées par ses navires océanographiques, durant lesquelles divers systèmes acoustiques sont employés. Dans certaines conditions de navigation ces études sont perturbées par le passage de bulles sous la coque, réduisant fortement la productivité des navires. L'élimination ou la réduction de ce phénomène serait une avancée considérable pour la bonne tenue des campagnes acoustiques. Cependant, les outils permettant d'étudier cette problématique lors de la conception des navires sont très limités et n'ont pas donné entière satisfaction. Il est donc nécessaire de poursuivre les recherches dans cette direction.

Dans ce contexte, 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, ont mis en place un projet d'étude ayant plusieurs objectifs :

- une meilleure compréhension de la génération et de la propagation des bulles autour de la carène des navires ;
- le développement d'une méthode permettant l'étude expérimentale de ce phénomène ;
- la recherche de solutions afin d'améliorer le comportement des futurs navires de la flotte, et la recherche d'éventuelles modifications pour les navires actuels.

D'autre part, les navires militaires et les études du SHOM (Service Hydrographique et Océanographique de la Marine) sont également affectés par le passage de bulles sous la coque. Ce projet débute donc avec la présente thèse co-financée par l'Ifremer et la DGA (Délégation Générale de l'Armement). Durant cette thèse, plusieurs aspects de la problématique ont été étudiés et sont décrits dans ce manuscrit.

Les navires océanographiques et leurs équipements acoustiques sont présentés dans le premier chapitre, tout comme le phénomène d'entraînement des bulles d'air autour de la carène provoquant la perturbation des études acoustiques. L'expérience de plusieurs navires et les solutions actuellement utilisées pour limiter le phénomène sont aussi détaillées. La dernière section de l'introduction est consacrée à l'étude bibliographique des phénomènes de vagues d'étrave et d'entraînement d'air par des jets plongeants puis par des vagues déferlantes.

Le second chapitre est consacré à l'étude des conditions d'apparition du phénomène en mer. Les données acoustiques provenant de divers campagnes ont été analysées afin de corréliser les conditions de navigation avec les échos des nuages de bulles sous la coque. Ces analyses ont permis de comparer le comportement des deux principaux navires hauturiers de l'Ifremer, la *Thalassa* et le *Pourquoi pas ?*.

La suite du manuscrit est consacrée à l'étude expérimentale du phénomène. Le troisième chapitre présente la méthodologie développée au bassin de houle et courant de Boulogne-sur-Mer. Les spécificités du montage expérimental sont décrites, tout comme l'instrumentation mise en œuvre. Suite à une description des effets d'échelle à prendre en considération, les calculs des paramètres d'essais sont présentés.

Le quatrième chapitre présente les analyses réalisées sur la génération et la dynamique des bulles en bassin. Après une description des phénomènes observés, les mécanismes de génération de nuages de bulles sont caractérisés. De plus, une étude paramétrique a été réalisée afin de comprendre l'influence de chaque paramètre d'essai sur la génération des nuages de bulles en bassin.

Pour compléter cette étude, l'analyse de l'écoulement autour de l'étrave est présentée dans le cinquième chapitre. La méthode de Particles Image Velocimetry a été employée afin de mesurer des champs de vitesse autour de l'étrave du *Pourquoi pas ?*.

Enfin, une seconde forme de type étrave inversée a été étudiée afin de débiter la recherche de solution pour limiter le phénomène. La comparaison des générations de bulles et des caractéristiques de l'écoulement entre cette forme et le *Pourquoi pas ?* est présentée dans le sixième chapitre.

Ce manuscrit sera clôturé par un résumé des résultats obtenus, et des perspectives envisagées.

Chapitre 1

Introduction

Sommaire

1.1	Flotte océanographique et acoustique sous-marine . . .	9
1.1.1	L’Ifremer et sa flotte	9
1.1.2	Principes de l’acoustique sous-marine	10
1.2	Phénomène de Bubble Sweep-down	13
1.2.1	Perturbation des signaux acoustiques par les nuages de bulles	13
1.2.2	Expériences et solutions actuelles.	15
1.3	Vague d’étrave, entraînement d’air et génération de bulles	19
1.3.1	Vague d’étrave	19
1.3.2	Entraînement d’air par un jet plongeant	21
1.3.3	Application à l’entraînement d’air par une vague déferlante	24

1.1 Flotte océanographique et acoustique sous-marine

1.1.1 L’Ifremer et sa flotte

L’Ifremer (Institut Français de Recherche pour l’Exploitation de la MER) est investi depuis 1984 d’une très large variété de missions. Parmi celles-ci on peut souligner le développement de la connaissance des océans et de leurs ressources, la surveillance du milieu marin et le développement durable des activités maritimes. Dans cette optique, l’Ifremer opère une part très significative de la flotte océanographique française. Cette flotte se divise en quatre navires côtiers (*l’Europe*, le *Gwen*

1.1. FLOTTE OCÉANOGRAPHIQUE ET ACOUSTIQUE SOUS-MARINE

Drez, la *Thalia* et l'*Haliotis*) et quatre navires hauturiers (l'*Atalante*, la *Thalassa*, le *Pourquoi pas ?* et le *Suroît*, dont des photographies sont présentées sur la figure 1.1).



FIGURE 1.1 – Navires Hauturiers de l’Ifremer : l’*Atalante*, la *Thalassa*, le *Suroît* et le *Pourquoi pas ?*

L’*Atalante*, le *Pourquoi pas ?* et le *Suroît* sont des navires pluridisciplinaires capables de mener à bien des missions d’hydrographie, de géoscience, d’océanographie physique, chimique et biologique et de mettre en œuvre les équipements scientifiques de l’institut (par exemple le submersible habité du type Nautilo et le robot téléopéré Victor 6000). La *Thalassa* est quand à elle principalement dédiée aux études halieutiques et à l’océanographie physique.

Ces navires sont également employés à travers le globe pour des besoins de surveillance, d’expertise pour le compte de l’État ou de valorisation auprès de partenaires industriels. Les données collectées lors de programmes nationaux et internationaux sont compilées et sauvegardées dans des bases de données, afin d’être diffusées vers les communautés scientifiques et les acteurs du monde professionnel.

Lors de la plupart des missions, de nombreuses informations sont obtenues grâce à l’utilisation de l’acoustique sous-marine à travers des équipements de type sonar (Sound Navigation And Ranging).

1.1.2 Principes de l'acoustique sous-marine

La mer est un milieu opaque : la lumière ne peut s'y propager que sur des distances de quelques dizaines de mètres. Les ondes électromagnétiques utilisées dans la plupart des systèmes de télécommunication y sont dissipées très rapidement. L'observation du contenu de l'océan est donc difficile et nécessite de recourir aux ondes acoustiques. Ces ondes -vibrations mécaniques du milieu de propagation- sont capables de se propager sur de grandes distances et de véhiculer en retour une information après réflexion sur un obstacle pouvant être situé à plusieurs kilomètres. Les navires de recherche océanographique utilisent donc des équipements acoustiques particuliers, sondeurs et sonars, pour localiser et identifier les bancs de poissons comme pour caractériser la nature des fonds. De tels équipements sont également employés sur les navires militaires et les bateaux de pêche.

Le principe d'un équipement de détection acoustique est simple. Une courte impulsion sonore est émise dans l'eau à partir du transducteur. Lorsqu'elle rencontre un obstacle, une partie de l'énergie est absorbée tandis que l'autre est diffusée. Une part de cette énergie est ainsi réfléchi vers le transducteur, cette énergie est dite rétrodiffusée. On utilise alors le temps écoulé entre l'émission et la réception, le niveau du signal réfléchi et sa direction pour obtenir des informations relatives à la distance de la cible, sa position ou sa forme et son importance.

L'essentiel des efforts de recherche et d'industrialisation dans le domaine de l'acoustique sous-marine est lié à des applications militaires et notamment la détection, la localisation et l'identification des sous-marins et des mines.

Néanmoins, il existe aussi de nombreuses applications civiles pour l'acoustique sous-marine, dont certaines sont illustrées sur la figure 1.3, parmi lesquelles :

- les sondeurs bathymétriques, spécialisés dans la mesure de la hauteur d'eau ;
- les sondeurs et sonars de pêche, destinés à la localisation de bancs de poissons ;
- les sonars latéraux, servant à l'imagerie acoustique du fond ;
- les sondeurs multifaisceaux de cartographie, utilisé à bord des navires océanographiques pour le relevé précis des fonds marins ;
- les sondeurs profileurs de sédiments, liés à l'étude de la structure interne des fonds marins ;
- les systèmes à effet Doppler utilisant le changement de fréquence des échos par rapport au signal émis, pour mesurer soit la vitesse du sonar (et de son porteur) par rapport à un milieu fixe (loch Doppler), soit celle de l'eau par rapport à un instrument fixe (courantomètre Doppler).

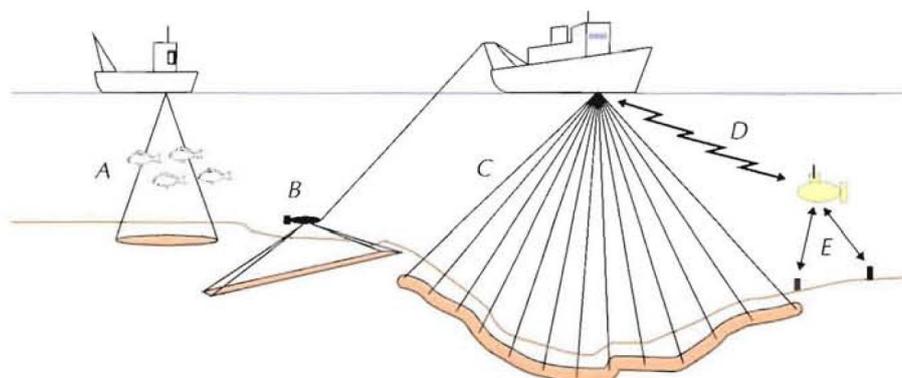


FIGURE 1.2 – Extrait de Lurton (1998) - Quelques applications civiles : A : sondeur de bathymétrie ou de pêche, B : sonar latéral, C : sondeur multifaisceaux, D : transmission de données, E : positionnement acoustique

Différentes applications de l'acoustique sous-marine par l'Ifremer sont illustrées sur la figure 1.3. On retrouve par exemple la cartographie sous-marine et l'étude de la nature des fonds marin. Certaines campagnes sont dédiées à la recherche de cibles particulières comme des gisements de gaz, ou des épaves importantes (Titanic, Terra Nova, etc). Enfin, les techniques d'acoustique sous-marine permettent une évaluation de la biomasse, notamment par les réflexions importantes des espèces possédant une vessie natatoire.

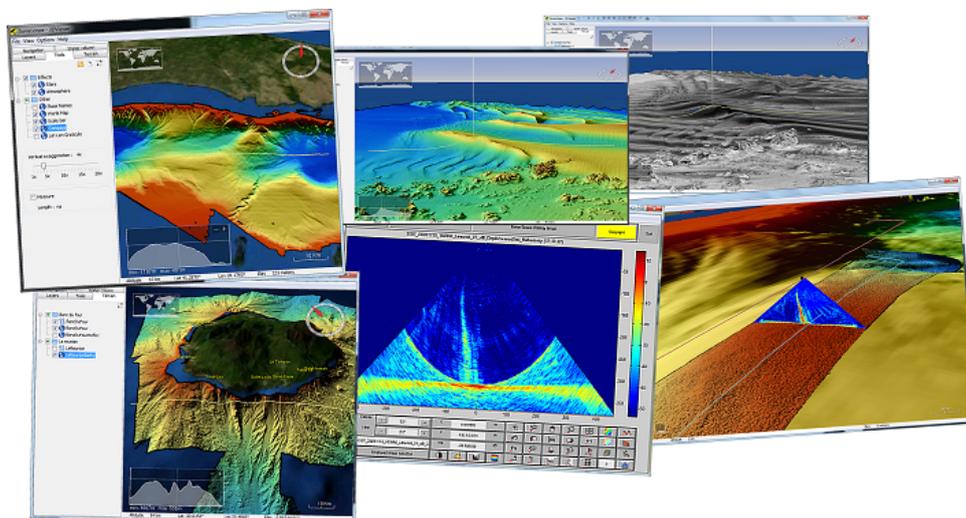


FIGURE 1.3 – Exemples d'application des sonars

1.2 Phénomène de Bubble Sweep-down

1.2.1 Perturbation des signaux acoustiques par les nuages de bulles

Sur tous les navires de surface, l'écoulement turbulent autour de l'étrave (principalement dû à la vague d'étrave) est une source de production de bulles d'air. Par ailleurs, des bulles d'air peuvent être naturellement présentes dans la couche de surface de l'océan, à des densités et des profondeurs variables en fonction des conditions environnementales. Certaines de ces bulles sont emportées dans l'écoulement autour de la carène et sont entraînées sous la coque. L'entraînement des bulles d'air par l'écoulement jusqu'au niveau de l'emplacement des transducteurs acoustiques est connu sous le nom de "Bubble Sweep-down". Dans certaines conditions de navigation, des nuages de bulles de forte densité sont entraînés sous la carène du navire.

Ces bulles d'air passant sous les transducteurs sont la source de plusieurs effets indésirables :

- la diffusion et/ou l'absorption des signaux émis dans la couche de bulles ;
- un niveau de bruit supplémentaire provoqué par l'éclatement des bulles ;
- le masquage des transducteurs de réception.

L'atténuation du signal peut alors rendre toute étude bathymétrique impossible, tout comme l'étude de la biomasse dans la colonne d'eau. La figure 1.4 montre un exemple d'échogramme présentant de nombreuses réflexions des signaux acoustiques par les bulles dans la couche de surface.

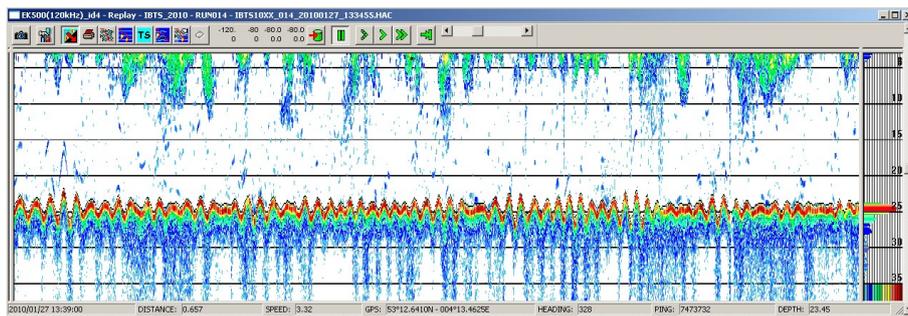


FIGURE 1.4 – Exemple de la rétrodiffusion du signal acoustique induite par la présence de bulles d'air en surface

Le mécanisme de *Bubble Sweep-down* peut être séparé en deux événements distincts. Le premier est la formation de bulles soit par interaction naturelle de la houle et du vent avec la surface libre, soit par l'aération du milieu engendrée par le navire.

Le second est le transport des bulles par l'écoulement le long de la carène. Chacun de ces événements implique des mécanismes complexes. La formation de bulles se produit en continu à la surface de l'océan dès lors que les forces environnementales génèrent des échanges avec l'atmosphère. Les courants de surface peuvent être supérieurs à la flottabilité des bulles, et entraîner celles-ci en profondeur dans la colonne d'eau. La présence de matière solide à la surface de la bulle peut de plus en empêcher la dissolution dans l'eau environnante. Pour ces raisons, des populations de bulles pré-existent à des densités suffisamment grandes pour nuire à l'utilisation des sonars. Des bulles sont également générées par le mouvement du navire lui-même, principalement par l'impact entre l'étrave et la surface libre. Des vidéos synchronisées avec les acquisitions acoustiques ont permis de montrer que la dégradation des performances acoustiques est bien liée au passage de nuages de bulles sous la coque. Même si certains navires rencontrent le phénomène de *Bubble Sweep-down* en eau relativement calme et en l'absence de tangage, les mouvements du navire ont tendance à augmenter la production de bulles, entraînées vers l'emplacement des sonars en suivant les lignes de courant.

La présence de bulles sous la coque dépend donc de nombreux facteurs. Les conditions météorologiques, et l'historique de celles-ci, sont responsables de l'aération naturelle à des profondeurs variables. Le phénomène de *Bubble Sweep-down* est donc inévitable à partir de certaines conditions de mer. Cependant pour des états de mer raisonnables, de nombreux facteurs sont susceptibles d'influer sur la génération des bulles et l'interaction de celles-ci avec les ondes acoustiques. La forme de la coque, l'emplacement des transducteurs, la dynamique du navire sont autant de paramètres à prendre en compte. De ce fait, l'apparition et l'impact du phénomène n'est pas le même sur tous les navires océanographiques. Certains navires sont perturbés pour des états de mer relativement faibles, ce qui diminue fortement leur productivité. La réduction ou le retardement du phénomène de *Bubble Sweep-down* permettrait d'améliorer la qualité des mesures et de limiter la perte de jours de mer pour la prospection acoustique. Cette problématique dépasse le cadre des navires de recherche de l'Ifremer, l'ensemble de la flotte scientifique étrangère souffrant également de ce phénomène.

1.2.2 Expériences et solutions actuelles

La problématique du passage de nuages de bulles sous les équipements acoustiques est un phénomène qui est rencontré, à des degrés différents, sur la grande majorité des navires scientifiques. Depuis plus de 30 ans, des recherches ont été conduites par divers instituts à travers le monde afin de mieux appréhender ce phénomène. Ces recherches proviennent essentiellement de l'expérience des performances des sonars après le déploiement des navires.

C'est le cas notamment de l'institut américain NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration). Hotaling *et al.* (2001) décrivent notamment les travaux entrepris afin d'optimiser la forme d'étrave des navires pour réduire le phénomène de *Bubble Sweep-down*. Rolland et Clark (2010) comparent des solutions adoptées par différents navires de recherches. L'expérience de navires équipés de quille, de gondole ou encore d'appendices de type déflecteur ont été comparés (cf. figure 1.5), en prenant également en compte les effets indésirables comme l'ajout de poids ou de résistance à l'avancement. La simple modification de l'étrave en forme de type "section en U" permet d'envisager un bon compromis entre une réduction du *Bubble Sweep-down* et une faible augmentation de la résistance à l'avancement.



FIGURE 1.5 – Extrait de Rolland et Clark (2010) - Différents types d'implantation des sonars afin de réduire l'influence du phénomène de *Bubble Sweep-down*

Toutes ces expériences ont abouti à des recommandations dont la majorité des architectes navals s'accorde afin de limiter au mieux le phénomène. Le cahier des charges du navire de recherche britannique *Discovery* stipule les recommandations suivantes :

- un tirant d'eau le plus grand possible ;
- un rapport Largeur/Tirant d'eau le plus petit possible en prenant en compte les exigences en termes de stabilité et de surface de pont ($B/T < 3$) ;

- le coefficient de bloc doit être le plus petit possible ($C_b < 0,55$);
- les formes de la partie avant doivent être de préférence de type "section en U".
L'angle de pénétration doit être le plus petit possible et la largeur de l'étrave réduite au maximum;
- les bulbes d'étrave sont à proscrire.

Pour ce navire (cf. figure 1.7), il a été choisi de ne pas installer de tunnels de propulseurs d'étrave classiques, mais des propulseurs à jet. Le tirant d'eau est important (6,5 m) et la partie avant est très fine et étendue avec une étrave verticale.

Le nouveau navire de recherche allemand *Sonne* (cf. figure 1.8) a également été conçu en prenant très au sérieux la problématique du *Bubble Sweep-down*. Une forme de type "entaillée" a été dessinée afin de piéger l'écoulement des nuages de bulles et d'éviter leur propagation sous la coque. Les performances de ces navires sont attendus avec grand intérêt.

De nombreuses solutions ont donc été envisagées par les ingénieurs du monde entier pour limiter la présence de bulles sous les transducteurs des navires scientifiques. Cependant ces solutions peuvent entraîner des contraintes importantes, notamment lors de la construction des navires. Il est donc important de valider ces solutions avant de les mettre en pratique. Le problème majeur du phénomène de *Bubble Sweep-down*, dû à sa complexité, réside dans le manque d'outil adéquat à l'étude de la génération et de la propagation des bulles autour de l'étrave d'un navire.

En effet, les simulations numériques de ce type d'écoulement diphasique sont toujours en développement. Les principales difficultés proviennent des différences d'échelles entre la génération de bulles, gouvernée par les tension de surface, et l'écoulement global autour du navire. Moraga *et al.* (2008) ont développé un modèle permettant de localiser les régions de fort taux de vide, utilisant les distributions de bulles observées lors de déferlements de vague par Deane et Stokes (2002). Ma *et al.* (2011) décrivent un modèle de sous-maillage couplé avec un modèle RANS (Reynolds Average Navier Stokes) diphasique permettant d'obtenir une prédiction numérique quantitative de la distribution du taux de vide autour de la carène d'un navire. Ces recherches ont été réalisées par mer calme, sans houle ni mouvements du navire. De même, les études expérimentales réalisées par Waniewski (1999); Waniewski *et al.* (2001) ou Tavakolinejad (2010) afin d'étudier l'entraînement d'air par les vagues d'étrave ne prennent pas en compte l'état de mer, pourtant significatif pour le phénomène de *Bubble Sweep-down*.

Par conséquent le positionnement des sonars est actuellement réalisé principalement à partir de l'étude des lignes de courant. C'est notamment à partir de ce type d'information que Rolland et Clark (2010) valident la forme d'étrave en U. Les effets d'échelle étant très importants, la génération de bulles est très faible, voire inexistante lors des essais en bassin de traction, même en présence de houle. La dynamique des bulles est souvent simulée par injection de colorant au niveau de l'étrave. C'est

1.2. PHÉNOMÈNE DE BUBBLE SWEEP-DOWN

ce qui a été réalisé lors de la conception du *Pourquoi pas ?* (cf. figure 1.6) et du *Discovery* (cf. figure 1.7). Les formes du *Sonne* ont également été validées à partir de l'étude des lignes de courant (cf. figure 1.8)

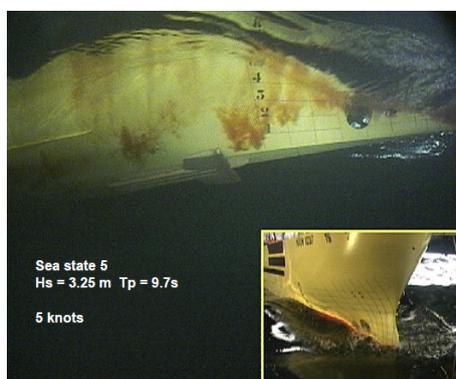


FIGURE 1.6 – Illustration des essais réalisés lors de la conception du *Pourquoi pas ?* Injection de colorant afin de simuler la dynamique des bulles



FIGURE 1.7 – Visualisation de la forme d'étrave du *Discovery*. Illustration des essais réalisés lors sa conception, avec à nouveau la méthode d'injection de colorant.

Von Bröckel (2014), à travers l'expérience de plusieurs navires allemands, montre que les conclusions d'essais en bassin ne sont pas toujours vérifiées au réel. De même, malgré la validation de l'emplacement de la gondole suite aux essais (installation supposée réduire significativement le phénomène), les premières campagnes à la mer du *Pourquoi pas ?* ont montré que la productivité des campagnes acoustiques est rapidement affectée par la présence de nuages de bulles lorsque les conditions de navigation se dégradent.

1.2. PHÉNOMÈNE DE BUBBLE SWEEP-DOWN



FIGURE 1.8 – Illustration des essais réalisés lors de la conception du *Sonne*

Ce projet de recherche est donc motivé par le besoin de développer des outils permettant d'étudier le phénomène dès la conception des navires. Avant de présenter les travaux réalisés, la section 1.3 est consacrée aux recherches bibliographiques concernant les événements rencontrés lors du mécanisme de *Bubble Sweep-down*, notamment les vagues d'étrave, l'entraînement d'air et la génération de bulles.

1.3 Vague d'étrave, entraînement d'air et génération de bulles

Cette partie bibliographique a pour but de présenter différents modèles existants, permettant de caractériser analytiquement les vagues d'étrave des navires, l'entraînement d'air par un jet plongeant puis par une vague déferlante. On cherchera par la suite à appliquer ces modèles pour le navire océanographique *Pourquoi pas ?*.

1.3.1 Vague d'étrave

L'étude de la génération d'un champ de vague par l'avancement d'un navire est historiquement importante (Gotman, 2007). Dès la fin du XIX^e siècle, William Froude propose une méthode d'extrapolation de la résistance à l'avancement d'une maquette à un navire réel. La résistance est divisée en une résistance de friction, facilement calculable, et une résistance résiduelle dont l'évaluation est rendu possible en respectant la similitude de Froude. Cette résistance résiduelle provient principalement de la formation de vague. Quelques années plus tard, Lord Kelvin démontre que le sillage généré par un navire (appelé depuis *sillage de Kelvin*) est formé de deux composantes : transverse et divergente (cf. figure 1.9). Puis Michell fut le premier (1898) à développer une formule analytique pour le calcul de la résistance à l'avancement par formation de vagues. Au cours du XX^e siècle, les recherches s'intensifient et le développement de nouvelles techniques permettent d'obtenir plus de détails sur la vague générée proche du navire.

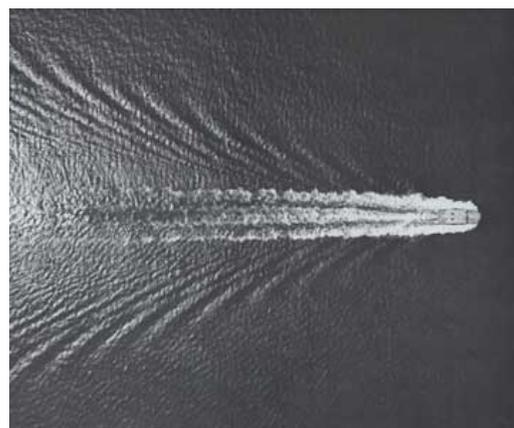
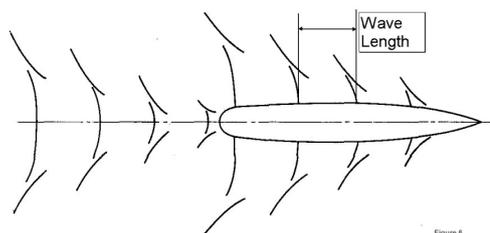


FIGURE 1.9 – Sillage de Kelvin

Le déferlement de la vague d'étrave est la cause principale de l'entraînement d'air autour de la carène à l'avant des navires. La quantité d'air entraînée, ainsi que la taille des bulles générées et la profondeur de pénétration, dépendent des caractéristiques de cette vague. L'existence de modèle permettant de prédire sa forme et sa stabilité (déferlement ou non) est par conséquent très intéressant pour l'étude de l'aération. Noblesse et Delhommeau ont réalisé toute une série d'étude (Noblesse *et al.*, 2008; Delhommeau *et al.*, 2009a; Noblesse *et al.*, 2010), afin de développer des expressions analytiques simples des propriétés de la vague d'étrave, en fonction de la géométrie et de la vitesse du navire.

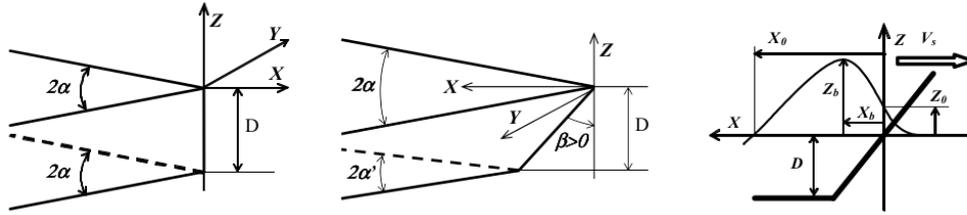


FIGURE 1.10 – Extrait de Noblesse *et al.* (2010). Paramètres pris en compte :

Les angles α et α' définissent l'évasement de l'étrave (flare), et l'angle β l'inclinaison (rake), D : tirant d'eau, V_s : Vitesse d'avance du navire, Z_0 : élévation d'eau à la proue, Z_b : Hauteur de la vague d'étrave, X_b : Distance entre la proue et la crête de la vague d'étrave et X_0 : Distance entre la proue et l'intersection de la vague d'étrave avec la surface libre plane moyenne.

La hauteur de la vague d'étrave est le paramètre déterminant pour la description du jet entraînant l'air. Elle peut être estimée par la formule suivante :

$$\frac{Z_b g}{V_s^2} \approx (\tan \alpha + \tan \alpha') \frac{1,1}{1 + F} \varsigma_b(F, \beta, \varphi) \quad (1.1)$$

$$\text{avec } F = \frac{V_s}{\sqrt{g D}} \quad \text{et} \quad \varphi \equiv \frac{\tan \alpha - \tan \alpha'}{\tan \alpha + \tan \alpha'}$$

La fonction ς_b qui prend notamment en compte l'influence de l'inclinaison de la proue peut être estimée par des tables fourni par Delhommeau *et al.* (2009b). On peut donc appliquer ce modèle pour estimer les caractéristiques de la vague d'étrave du *Pourquoi pas ?*. Les caractéristiques simplifiée de l'étrave de ce navire sont un tirant d'eau $D = 5,50$ m, et des angles $\alpha = 25^\circ$ et $\alpha' = 4^\circ$. Pour une vitesse de 8 nœuds, on a alors $F = 0,56$; $\varsigma_b = 0,9$ et la vague formée aura une hauteur de 0,88 m. Cette valeur sera utilisée pour caractériser le jet plongeant à l'étrave du navire, et en déduire l'entraînement d'air que cette vague provoque.

1.3.2 Entraînement d'air par un jet plongeant

L'entraînement d'air par des liquides est un phénomène très fréquemment rencontré, que ce soit dans des procédés naturels ou industriels. Par conséquent de nombreuses recherches ont été réalisées concernant les mécanismes d'entraînement d'air par un jet plongeant. Les différents mécanismes d'entraînement (jet visqueux/non visqueux) et les résultats de nombreuses études ont été résumés par Kiger et Duncan (2012). Les travaux de Chanson et Cummings permettent notamment d'estimer la quantité d'air entraînée par un jet, la taille des bulles résultantes ainsi que la profondeur de pénétration de ces bulles. Les principaux résultats de ces travaux, extraits sauf indication contraire de Chanson et Cummings (1994), sont exposés ci-dessous.

Vitesse critique d'entraînement

L'un des principaux aspects de l'étude de l'entraînement d'air par un jet plongeant est tout d'abord la détermination des conditions sous lesquelles cela se produit. L'énergie de l'écoulement doit être suffisante pour contrebalancer les tensions de surfaces et l'énergie potentielle due à la gravité. Il a été montré empiriquement que la vitesse d'impact du fluide (V) joue un rôle déterminant, ce qui a amené la majorité des auteurs à définir, en tant que critère d'entraînement d'air, une vitesse critique d'entraînement V_c . Les valeurs typiques de V_c sont comprises entre 0,8 et 1,2 m/s.

Pour des faibles vitesses de jet, c'est à dire des vitesses juste au dessus de la vitesse critique, l'entraînement d'air est causé par les ondulations de la surface du jet formant des petites poches d'air. Le phénomène est donc intermittent. Au contraire, pour des vitesses de jet élevées ($V > 8$ à 12 m/s) une couche d'air est entraînée par des forces de cisaillement, provoquant un entraînement d'air continu (cf. figure 1.11).



FIGURE 1.11 – Extrait de Chanson et Cummings (1994), Mécanismes d'entraînement d'air par un jet

Quantité d'air entraîné

La quantité d'air entraîné par un jet plongeant vertical peut être exprimée par une relation du type :

$$Q_{air} = K \times (V - V_c)^n \quad (1.2)$$

où K et n sont des constantes définies empiriquement dépendantes du régime du jet (laminaire ou turbulent).

En prenant en compte un angle entre le jet et la surface libre θ , le rapport entre le débit d'air entraîné Q_{air} et le débit du jet Q_w entraîné est estimé (Van De Sande et Smith, 1976) par :

$$\frac{Q_{air}}{Q_w} = K \times \frac{Fr^2}{(\sin \theta)^{1,2}} \quad (1.3)$$

où $Fr = V - V_c / \sqrt{g \times d}$ (d est l'épaisseur du jet, pour un jet plan, ou le diamètre pour un jet circulaire) et $K = 0,0004$ (Sene, 1988).

La concentration en air (appelée également taux de vide) dans la région proche de l'impact peut alors être déduite par :

$$C = \frac{Q_{air}/Q_w}{1 + Q_{air}/Q_w} \quad (1.4)$$

Taille des bulles générées par un jet plongeant

Sous l'impact du jet, il se forme une zone de forte recirculation où l'énergie est dissipée. Les poches d'air entraînées sont cassées en petites bulles transportées en profondeur par l'écoulement. Une analyse dimensionnelle indique qu'une bulle d'air se désagrège lorsque :

$$\frac{\rho_w \times v'^2 \times d_b}{2 \times \sigma} > We_c \quad (1.5)$$

où ρ_w est la densité de l'eau, v' représente la variation de la vitesse du jet sur une distance égale au diamètre de la bulle d_b ($v' = d_b \times dV/dy$), σ est la tension de surface et We_c est un nombre de Weber critique. Des études expérimentales ont montrées que le nombre de Weber critique est une constante proche de l'unité.

Avec ces hypothèses, la taille maximale d'une bulle générée par le jet est :

$$dm = \sqrt[3]{\frac{2 \times \sigma \times We_c}{\rho_w \times \frac{dV^2}{dy}}} \quad (1.6)$$

Une formule empirique en a été déduite pour des jets à haute vitesse :

$$\Rightarrow dm = K_3 \times \sqrt[3]{We_c} \times \left(\frac{\delta_{al}}{V}\right)^{2/3} \quad (1.7)$$

avec $K_3 = 0,0595 s^{-2/3}$ pour des jets plans, et où δ_{al} est l'épaisseur de la couche d'air formée par le jet (cf figure 1.11). Des photographies à haute fréquence acquises lors d'expériences réalisées par Chanson et Cumming suggèrent des valeurs de 1 à 5 mm pour δ_{al} à des vitesses de jet comprises entre 2 et 6 m/s.

Profondeur de pénétration des bulles

Les bulles entraînées atteignent une profondeur où la vitesse d'ascension des bulles contrebalance la vitesse verticale du jet d'eau. Pour des jets plans, la profondeur maximale de pénétration D obtenue est :

$$\frac{D}{d} = 0,0240 \times \left(\frac{V}{u_r}\right)^2 \times \frac{(\sin \alpha)^3}{(\tan \theta_3)^2} \times \left(1 + \sqrt{1 - 20,81 \times \left(\frac{u_r}{V}\right)^2 \times \frac{(\tan \theta_3)^3}{(\sin \alpha)^2}}\right)^2 \quad (1.8)$$

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 (cf figure 1.12).

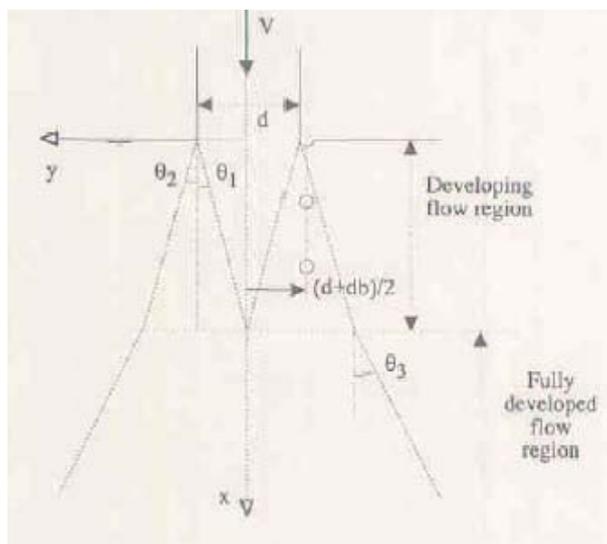


FIGURE 1.12 – Extrait de Chanson et Cummings (1994), Mécanismes d'entraînement d'air par un jet

Pour des bulles sphériques de diamètre compris entre 0,1 et 1 mm, u_r est donnée par la formule suivante (Comolet, 1979) :

$$u_r = \frac{g \times \rho_w}{18 \mu_w} d_b^2 \quad (1.9)$$

1.3.3 Application à l'entraînement d'air par une vague déferlante

Considérons une vague déferlante d'une hauteur H (cf. figure 1.13). Des analyses de photographies (Melville et Rapp (1985), Longuet-Higgins (1988)) ont montré que les principales caractéristiques du déferlement pouvaient être estimées comme suit : une hauteur de chute (H_c) entre 0,2 et 0,5 $\times H$, une épaisseur de jet entre 0,01 et 0,1 $\times H$, un angle de jet θ entre 15 et 45 degrés et une pente de surface libre ($\alpha - \theta$) entre 0 et 30 degrés. Des calculs de vagues déferlantes (Longuet-Higgins et Comolet, 1976) montrent que les composantes de la vitesse de la crête au point de déferlement $(V_0)_h$ et $(V_0)_v$ sont comprises respectivement entre 1,1 et 1,4 fois et entre 0,15 et 0,25 fois la vitesse de la vague. La vitesse d'impact du jet considéré est $V = \sqrt{V_0^2 + 2gH_c}$.

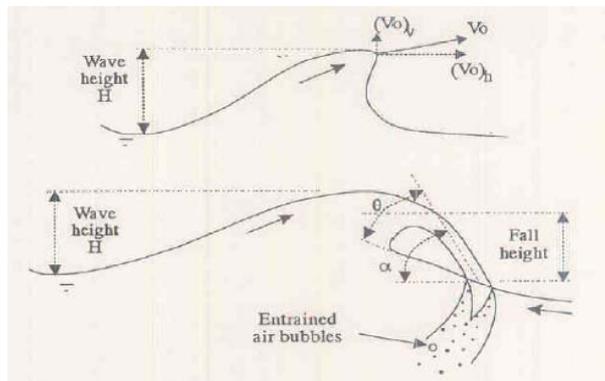


FIGURE 1.13 – Extrait de Chanson et Cummings (1994), Caractéristiques d'une vague déferlante

Chanson et Cumming comparent des mesures de bulles effectuées en mer (Johnson et Cooke (1979), Kolayev (1976)) avec les résultats du modèle développé et observent des valeurs du même ordre de grandeur, que ce soit pour la taille des bulles ou la profondeur de pénétration.

Pour que ce modèle soit intéressant pour l'étude de la génération de bulles autour de la carène des navires scientifiques, il faut pouvoir l'appliquer au déferlement d'une vague d'étrave. Afin de vérifier cela, les résultats observés par Tavakolinejad dans

sa thèse : "Air bubble entrainment by breaking bow waves simulated by a $2D + T$ technique" (Tavakolinejad, 2010) sont analysés ci-dessous.

La technique $2D+T$ (cf. figure 1.14) consiste à tracter dans un bassin une planche déformable, simulant sur une période donnée la forme d'un bord de la maquette d'un navire avançant à vitesse constante. Ce procédé permet de simuler un modèle équivalent de 21,03 m de longueur, à une vitesse de navire correspondant de 27,5 nœuds (5,44 m/s au modèle) dans un bassin de 14,80 m de long. Le modèle ainsi testé possède un tirant d'eau de 0,9 m. Il génère dans cette configuration une vague d'étrave possédant suffisamment d'énergie pour former un nuage de bulles important (cf. figure 1.15).

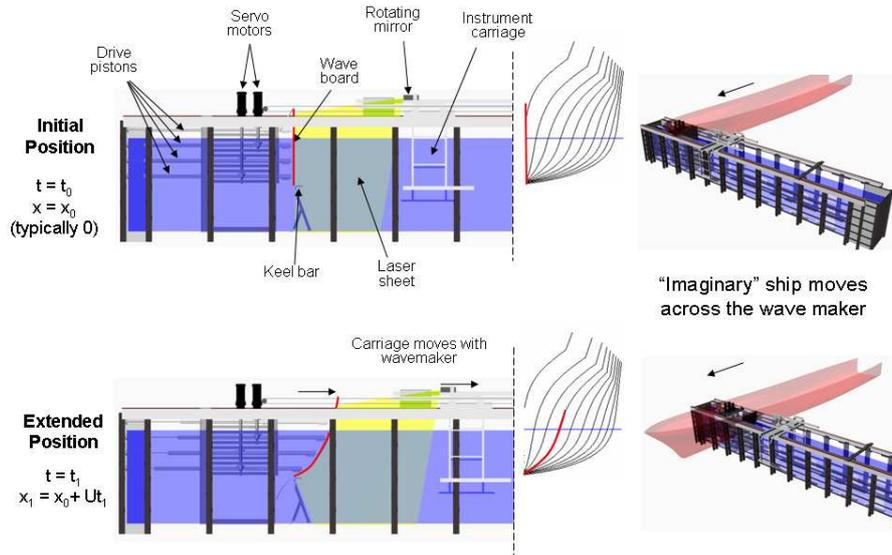


FIGURE 1.14 – Extrait de Tavakolinejad (2010), Système $2D + T$ de génération de vague d'étrave

La taille des bulles et le taux de vide sont mesurés par la technique de "shadowgraph measurement system" et peuvent être comparés avec les résultats du modèle développé par Chanson et Cumming.

Les profils de vague d'étrave fournis dans la thèse permettent d'estimer une hauteur de chute de 0,34 m. On peut donc calculer la vitesse du jet $V = \sqrt{V_0^2 + 2gH_c}$ (6,93 m/s). L'épaisseur du jet est estimé à 5 cm . Il sera considéré une vitesse critique d'entraînement d'air $V_c = 1,1$ m/s. Les photographies de la vague d'étrave suggèrent des angles $\theta = 30^\circ$ et $\alpha = 45^\circ$.

Le ratio d'air entraîné est donc $Q_{air}/Q_w = K \times Fr^2 / (\sin\theta)^{1,2} = 0,06$. Ce qui correspond à une concentration d'air $C = 6\%$ au niveau de l'impact du jet.

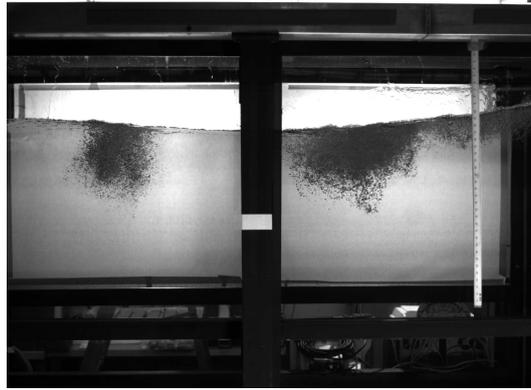


FIGURE 1.15 – Extrait de Tavakolinejad (2010), Nuages de bulles générés par la technique $2D + T$

Le nombre de Weber critique est obtenu de Sevik et Park (1988) ($We_c = 1,26$). L'épaisseur de la couche d'air générée par le jet est estimé à $\delta_{al} = 5$ mm. On peut alors déduire la taille maximale des bulles générées par cette vague :

$$dm = K_3 \times \sqrt[3]{We_c} \times \left(\frac{\delta_{al}}{V} \right)^{2/3} = 0,52 \text{ mm} \quad (1.10)$$

Ces résultats peuvent être comparés aux nuages de bulles obtenus dans Tavakolinejad (2010). La figure 1.16 représente la distribution en taille de bulle obtenue à une profondeur de 12 cm sous la surface libre non perturbée :

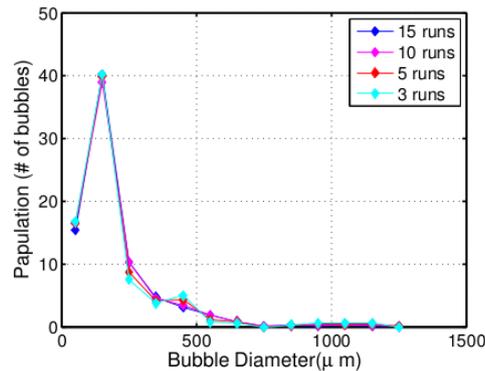


FIGURE 1.16 – Extrait de Tavakolinejad (2010), Distribution en taille des bulles

L'auteur constate que la quantité de bulles d'un diamètre supérieur à 0,52 mm est extrêmement limitée, ce qui corrobore le résultat du diamètre maximal des bulles du

modèle de Chanson et Cumming. Le taux de vide obtenu par le modèle (6%) paraît cohérent avec les valeurs typiques observées dans la littérature. En effet, certains modèles numériques (Carrica *et al.*, 1999) simulant l'écoulement d'air autour de la carène supposent, suite aux travaux de Lamarre et Melville (1994), un taux de vide d'environ 10% au niveau du jet provoqué par la vague d'étrave. Cependant les valeurs mesurées dans Tavakolinejad (2010), présentées sur la figure 1.17 sont étonnement bien plus faible, proches de 0,04% :

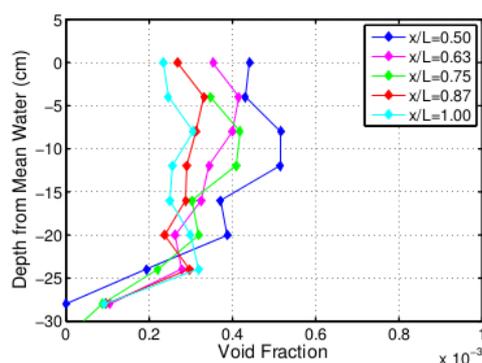


FIGURE 1.17 – Extrait de Tavakolinejad (2010), Taux de vide dans le nuage de bulles en fonction de la profondeur

Une deuxième étude expérimentale sur l'entraînement d'air par la vague d'étrave peut être utilisée en comparaison du modèle de Chanson et Cumming. Il s'agit également d'une thèse, réalisée par Waniewski : "Air entrainment by bow waves" Waniewski (1999). Dans une configuration plus classique, une vague d'étrave est générée par une plaque simulant l'étrave d'un navire (cf.figure 1.18).

La taille des bulles et le taux de vide sont mesurés par des sondes IVFM (*Impedance Void Fraction Meter*). Différentes configurations sont testées en faisant varier un nombre de Froude calculé à partir du tirant d'eau. L'auteur s'intéresse directement à la forme du jet plongeant provoquant l'entraînement d'air. Pour un nombre de Froude proche de 3, l'épaisseur du jet est de 4 cm et la vitesse d'impact est de 2,3 m/s.

On obtient, avec ces caractéristiques de jet, un diamètre maximal des bulles de 1,07 mm et un taux de vide de 0,35% grâce au modèle de Chanson et Cumming. Les résultats observés dans la thèse de Waniewski sont présentés sur les graphiques de la figure 1.19.

Le taux de vide mesuré par des sondes IVFM semble plus cohérent avec ce qui est usuellement admis dans la littérature, avec des valeurs dépassant 10 % au niveau de l'impact. En revanche la concentration d'air calculée par le modèle est cette fois



FIGURE 1.18 – Extrait de Waniewski (1999), Simulation de la vague d'étrave

faible (0,35%) à cause d'une vitesse du jet relativement réduite (2,3 m/s). Cette concentration correspond aux mesures réalisées à plus de 4 cm de profondeur (zone où $\alpha < 1\%$).

En ce qui concerne la taille des bulles, on mesure des bulles d'une taille de l'ordre de plusieurs millimètres. On constate également que le nombre de bulles diminue très rapidement avec la profondeur et que pour $z = -4$ cm, la taille des bulles est majoritairement limitée à quelques millimètres. Le système de mesure ne permet pas d'avoir une précision suffisante, mais on peut supposer que dans le nuage généré, à plus de 4 cm de profondeur, seules les bulles inférieures au mm subsistent.

Dans les deux configurations d'études expérimentales prises en comparaison du modèle développé par Chanson et Cummings, la prédiction de la taille maximale des bulles pouvant subsister sous la surface semble bonne. En revanche, l'estimation du taux de vide n'est pas cohérente avec les résultats obtenus par Tavakolinejad.

Le calcul de la profondeur de pénétration des bulles nécessite de connaître l'angle de diffusion du jet θ_3 . Chanson et Cummings (1994) donnent un angle de 14° pour des jets circulaires verticaux. Cela n'est pas le cas ici et la profondeur peut varier de plusieurs mètres pour un angle variant de quelques degrés. Le calcul de la profondeur de pénétration n'est donc pas valable sans l'obtention de plus amples informations concernant cet angle.

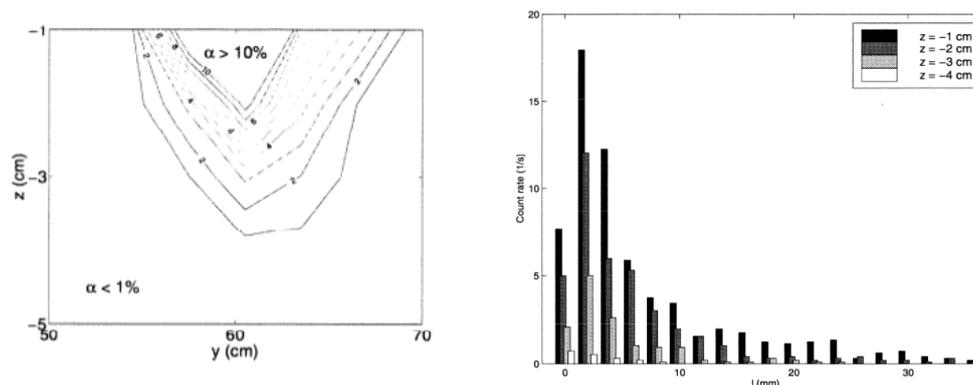


FIGURE 1.19 – Extrait de Waniewski (1999), Moyenne temporelle du taux de vide local sous le jet et distribution en taille des bulles

Le modèle de Chanson et Cumming peut tout de même être appliqué au *Pourquoi pas ?* dont la hauteur de vague d'étrave a été calculée dans la section 1.3.1. Les valeurs de la hauteur de chute du jet, de son épaisseur et de la vitesse d'impact sont calculées à partir des observations décrites en début de cette section. Les valeurs de α et θ sont prises égales à celles observées dans Tavakolinejad (2010).

A une vitesse de 8 nœuds, la concentration en air obtenue au niveau de l'impact est de 4,4% et la taille maximale des bulles générées correspond à un diamètre de 0,56 mm. Pour indication la vitesse d'élévation d'une bulle de cette taille est de 0,15 m/s, et pour un angle θ_3 de 30° , la profondeur de pénétration maximale serait de 6,15 m, proche de la profondeur des transducteurs.

Conclusion de l'étude bibliographique

Les modèles décrits ci-dessus permettraient idéalement d'obtenir de nombreuses informations : à partir de la vitesse d'avance d'un navire et de la géométrie de son étrave, on peut obtenir les caractéristiques de la vague générée et estimer les propriétés du jet plongeant responsable de l'entraînement d'air. La connaissance de ces propriétés permet alors d'en déduire la quantité d'air entraînée, la taille des bulles générées ainsi que la profondeur de pénétration de celles-ci.

Les comparaisons effectuées avec les mesures d'entraînement d'air par vague d'étrave montrent que la taille des bulles est bien prédite par le modèle. En revanche il est difficile de savoir si la concentration en air calculée est cohérente tant les valeurs mesurées divergent. De plus, le calcul de la profondeur de pénétration n'est pour le moment pas crédible.

Malgré les défauts existants, ces calculs permettent de comprendre l'influence de certains paramètres sur l'entraînement d'air :

- la concentration d'air entraîné augmente avec la vitesse du jet, mais la taille des bulles diminuent, dû au cisaillement plus important que cela induit ;
- plus l'angle entre le jet et la surface libre est grand, moins la quantité d'air entraîné est importante.

En étudiant l'influence de la forme de l'étrave sur la vague générée et sur le jet plongeant, on peut estimer les conséquences en terme de génération de bulles à l'avant des navires.

L'entraînement d'air par la vague d'étrave décrit ci-dessus n'est valable qu'en eau calme. C'est également le cas des modèles numériques diphasiques en cours de développement. La présence de la houle change considérablement les choses. L'air est-il toujours entraîné par le déferlement des vagues d'étrave ? Les vagues d'étrave sont-elles accentuées par les mouvements du navire, et ces mouvements sont-ils suffisamment importants pour que l'air soit entraîné sous la coque ?

Au cours de cette thèse on cherchera tout d'abord à mieux comprendre les conditions d'apparition des bulles en mer. Pour cela des données de sonars de la flotte seront analysées (Chapitre 2). On cherchera à corréler les détections des échos des signaux acoustiques par les bulles avec les conditions de navigation. Une méthode expérimentale sera ensuite développée, afin de reproduire de telles conditions en bassin de circulation (Chapitre 3). L'influence de la houle et des mouvements du navire sur la génération des bulles sera alors prise en compte. La génération et la dynamique des bulles en bassin seront étudiées (Chapitre 4), tout comme l'écoulement autour de l'étrave (Chapitre 5), pour différentes configurations d'essais. Enfin, les conséquences d'une modification de la forme d'étrave seront présentées (Chapitre 6).

Chapitre 2

Analyse de la génération de bulles à partir de mesures en mer

Sommaire

2.1	Acoustique et rétrodiffusion des bulles	37
2.2	Méthode d'analyse	38
2.2.1	Analyse des données de navigation	38
2.2.2	Analyse des données acoustiques	40
2.3	Résultats : Corrélations entre conditions de navigation et présence de bulles	45
2.3.1	Étude des bulles observées par la <i>Thalassa</i> .	45
2.3.2	Comparaison entre la <i>Thalassa</i> et le <i>Pourquoi pas ?</i>	54
2.4	Conclusion	62

La dynamique des navires est donc source d'entraînement d'air et de génération de bulles. Ces bulles sont susceptibles d'être entraînées dans l'écoulement sous la coque, où sont installés les transducteurs. L'interférence de ces bulles avec les ondes acoustiques diminuant fortement la productivité des navires scientifiques, de nombreuses recherches ont été dédiées à cette problématique. L'effet des bulles sur les estimations de la biomasse aquatique par la technique d'écho-intégration -technique développée par Dragesund et Olsen (1965), et depuis couramment adoptée dans le domaine de la recherche halieutique- est étudié depuis plus de 30 ans (Dalen et Løvik, 1981),. Le but de ces recherches était de trouver une formule empirique permettant de prédire l'atténuation des signaux acoustiques en fonction des conditions météorologiques. De même, Novarini et Bruno (1982) étudient l'effet d'une couche de bulles sur la propagation du son dans l'eau de mer. Quelques années plus tard, New (1992) expose les progrès réalisés en océanographie grâce au développement de l'utilisation

des ADCP (*Acoustic Doppler Current Profilers*) sur les navires scientifiques. Cependant, New indique la persistance par mauvais temps de perturbations causées par le passage de nuages de bulles. Plus récemment, Trevorrow (2003) développe un modèle analytique permettant de déterminer l'influence des bulles sur les performances des sonars à hautes fréquences, confirmant une forte dégradation des données pour certaines conditions météorologiques. Enfin, Shabangu *et al.* (2014) comparent l'atténuation des signaux acoustiques provenant de différents types d'installations des transducteurs. La conclusion de ces travaux consiste souvent à recommander l'installation des transducteurs le plus profond possible, notamment grâce à l'utilisation de quilles rétractables.

L'implantation de tels appendices n'étant pas toujours réalisable -notamment pour l'installation des antennes basses fréquences d'une longueur de plusieurs mètres- de meilleurs moyens permettant de limiter le phénomène de *Bubble Sweep-down* sont toujours recherchés pour les futurs navires océanographiques. Pour cela, il est nécessaire de bien comprendre les conditions de génération de bulles en mer afin de pouvoir comparer les navires et les solutions choisies (gondole, forme de carène etc). Cependant, les paramètres susceptibles de jouer un rôle sur le phénomène sont nombreux : le vent, l'état de mer, la vitesse et les mouvements du navire, la profondeur ou l'orientation du navire par rapport au vent sont autant d'éléments à prendre en compte. Du fait de cette complexité, les conditions d'apparition des bulles en mer sont relativement mal comprises.

Ce chapitre est consacré au développement d'une méthode d'analyse des données acoustiques provenant des sonars, afin de caractériser l'apparition du phénomène de *Bubble Sweep-down*. Cette méthode est tout d'abord développée à partir de données provenant de la *Thalassa*. L'étude est facilitée pour ce navire par l'abondance des bases de données issues de campagnes annuelles notamment en Manche et Mer du Nord. Les corrélations entre les conditions de navigation et la détection des bulles sous la coque sont exposées. Enfin, cette analyse a été répétée pour des données acoustiques provenant du *Pourquoi pas ?*, permettant de comparer les conditions d'apparition du phénomène de bullage pour les deux navires.

2.1 Acoustique et rétrodiffusion des bulles

La diffusion acoustique dans le milieu de propagation se produit lorsque l'énergie émise rencontre une variation de l'impédance acoustique. On détermine la proportion réfléchie de l'amplitude des ondes incidentes par un coefficient r , qui dépend exclusivement des impédances acoustiques Z_e du milieu de propagation (l'eau de mer ici) et Z_r du milieu réfléchissant, tel que :

$$r = \frac{Z_r - Z_e}{Z_r + Z_e} \quad (2.1)$$

Plus la différence d'impédance acoustique est importante, plus la réflexion est forte. Cette impédance acoustique dépend en grande partie de la masse volumique ρ . La masse volumique de l'air étant très faible ($\rho_{air} = 1,2 \text{ kg/m}^3$) par rapport à celle de l'eau de mer (légèrement supérieure à $\rho_{eau} = 1000 \text{ kg/m}^3$), la réflexion des ondes acoustiques par des bulles d'air est significative.

On appellera cible un objet de dimension finie qui présente une discontinuité d'impédance dans l'eau. Chaque cible possède des propriétés réfléchissantes caractéristiques que l'on exprime par un indice de réflexion TS (Target Strength) (MacLennan *et al.*, 2002), tel que :

$$TS = 10 \log(\sigma_{bs}) \quad (2.2)$$

où σ_{bs} est appelé section efficace de rétrodiffusion, et peut être obtenue par :

$$\sigma_{bs} = \frac{R^2 I_{bs}(R) 10^{\alpha R/10}}{I_{inc}} \quad (2.3)$$

où R représente la distance entre le transducteur et la cible, $I_{bs}(R)$ est l'intensité de l'onde rétrodiffusée au niveau du transducteur, I_{inc} est l'intensité de l'onde incidente sur la cible et enfin, α est le coefficient d'amortissement du son qui dépend de la fréquence de l'onde, de la température, de la salinité et de la pression hydrostatique dans l'eau de mer. σ_{bs} s'exprime en m^2 .

Pour un volume V , on définit l'indice de rétrodiffusion volumique par :

$$S_v = 10 \log\left(\frac{\sum \sigma_{bs}}{V}\right) \quad (2.4)$$

C'est cette valeur exprimée en dB, que l'on calcule par écho-intégration avec le logiciel *Movies 3D* (cf. paragraphe 2.2.2). Dans cette étude, on cherchera à détecter la rétrodiffusion par les bulles sous les sondeurs en considérant que les échos dans une couche d'eau juste sous la coque (détectés par un seuil adéquat de l'indice de rétrodiffusion volumique) sont uniquement dus au passage de bulles sous la coque.

2.2 Méthode d'analyse

On cherche à quantifier les perturbations des données acoustiques en fonction des conditions de navigation. Le principe de la méthode d'analyse consiste à délimiter des périodes durant lesquelles les conditions de navigation sont stables, évitant ainsi les moments où le navire tourne, ralentit, accélère ou passe dans son propre sillage. Ces périodes doivent être suffisamment courtes pour que les conditions météorologiques (vent et houle) ne changent pas. On détermine alors les échos des bulles sous la coque pour chacune de ces périodes. L'ensemble de ces périodes enrichit alors une base de données permettant une étude statistique du passage de bulles sous la coque en fonction des différentes conditions de navigation.

2.2.1 Analyse des données de navigation

La première étape de cette analyse consiste à déterminer des périodes où les conditions de navigation sont stables. Sur la *Thalassa*, cette étape est facilitée par l'utilisation du logiciel *Casino+* qui permet d'enregistrer automatiquement les données des différentes centrales d'acquisition. Ce livre de bord électronique permet en effet d'acquérir, toutes les 30 secondes, les données de navigation et notamment de position, de cap, de vitesse ou encore la direction et la force du vent. À partir de ces données, des critères sont déterminés sur les variations maximales et l'écart type de la vitesse et du cap afin de déterminer les périodes stables. Cette première délimitation est présentée pour les critères de vitesse sur la figure 2.1.

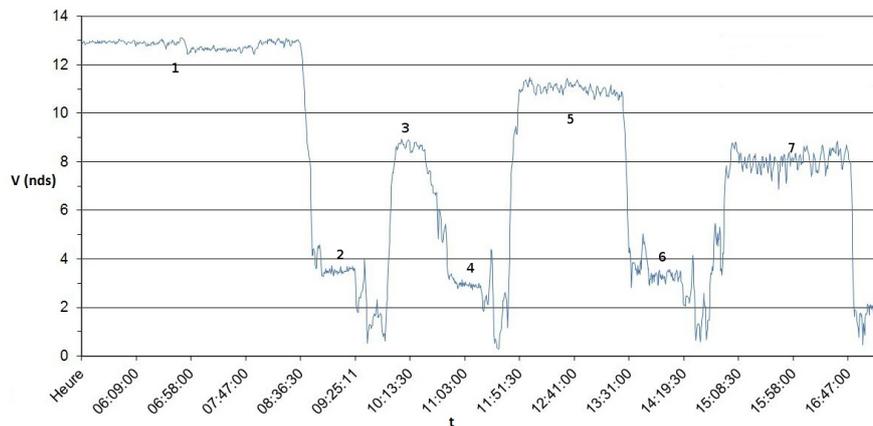


FIGURE 2.1 – Identification des périodes stables pour le critère de vitesse du navire

Ces périodes sont découpées en tranches de 20 minutes. Cette durée a été choisie suite à une étude de convergence, réalisée afin d'obtenir un compromis entre un nombre de périodes de tangage suffisant et des variations météorologiques suffisamment faibles.

2.2. MÉTHODE D'ANALYSE

Les moyennes et écarts types des différents paramètres sont ensuite calculés sur ces périodes. L'orientation par rapport au vent est également calculée à partir des données du cap et de la direction du vent (cf figure 2.2). On calcule également sur ces périodes les moyennes et écarts types des mouvements de tangage, de pilonnement et de roulis du navire. Pour cela, on utilise directement les données de la centrale inertielle du navire. Ces données sont enregistrées à une fréquence de 10 Hz au format NetCDF.

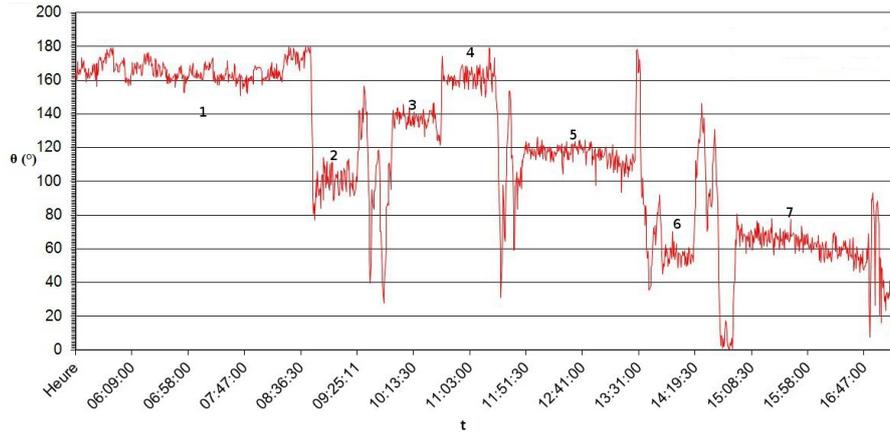


FIGURE 2.2 – Identification des périodes stables pour le critère de d'orientation par rapport au vent

La suite de l'étude consiste à déterminer un indice de bullage sur ces périodes de mesures, afin de pouvoir relier la génération de bulles avec les conditions de navigation ainsi relevées.

2.2.2 Analyse des données acoustiques

Dans ce paragraphe, nous cherchons à déterminer un indice permettant de représenter le passage de bulles sous la coque du navire. Nous utiliserons les logiciels développés par l'Ifremer pour le traitement des données de sondeurs, et chercherons à caractériser la rétrodiffusion par les bulles.

Movies et Écho-Intégration

Les logiciels *Movies+* et *Movies 3D* ont été développés par l'Ifremer pour l'acquisition et à l'exploitation scientifique des données provenant des sondeurs de la flotte océanographique (Trenkel *et al.*, 2009). Ils équipent une grande partie des navires affrétés par l'Ifremer et permettent notamment d'acquérir en temps réel des données sur la colonne d'eau sous le navire, d'archiver ces données et de les rejouer en temps différé. Ces logiciels sont notamment utilisés pour l'évaluation de la biomasse des poissons pélagiques ou pour l'étude des écosystèmes pélagiques en général. Pour notre cas d'étude ils permettent de visualiser et de quantifier les perturbations des signaux dues à la présence de bulles. Un exemple de perturbation des données acoustiques est illustré sur la figure 2.3, où une vue issue des données de *Movies 3D* des réflexions détectées par un sonar latéral est représentée. Les zones rouges correspondent aux densités de bulles les plus élevées (les zones blanches correspondent aux zones non perturbées).

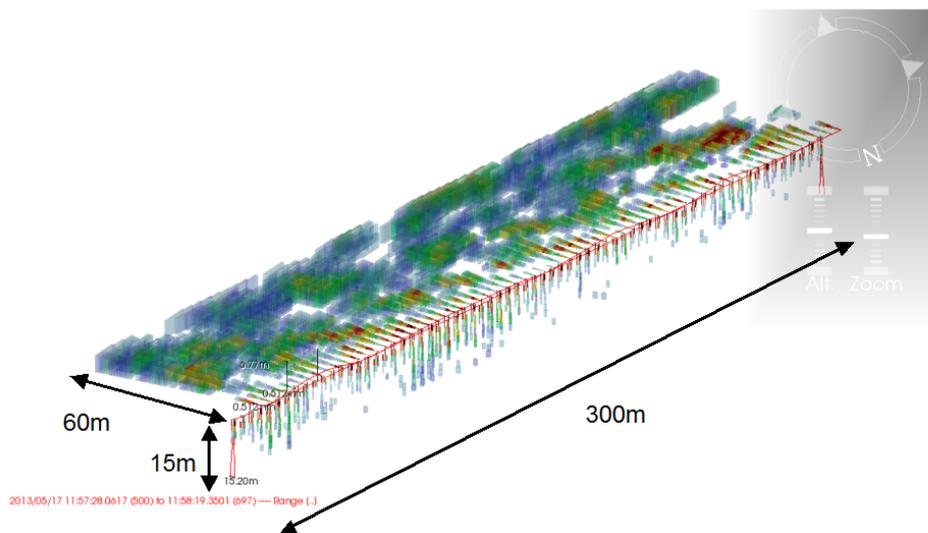


FIGURE 2.3 – Illustration de perturbations acoustiques enregistrées durant la campagne IBTS 2013 par un sonar latéral conjointement à un sondeur vertical classique. Le traitement des données est effectué avec *Movies 3D*.

Ces logiciels possèdent également des fonctions d'écho-intégration permettant de calculer l'indice de rétrodiffusion volumique S_v . On utilise ici l'écho-intégration par tranche de type distance. C'est-à-dire que l'on quantifie l'énergie réfléchie dans une couche définie à une distance donnée du transducteur, pour une épaisseur donnée. La définition de ces couches est illustrée sur la figure 2.4 (issue de *Movies+*). Quatre couches ont ici été définies (appelées par la suite couche 1 à 4) à 2, 4, 6 et 8 m sous le sondeur pour des épaisseurs de 2 m. L'indice S_v est ensuite calculé par cellule, définie par l'épaisseur de la couche et par son ESDU (Elementary Sampling Distance Unit). Cette ESDU peut être définie en mille nautique, ou en nombre de ping (impulsion du sonar). Il a été choisi de réaliser l'écho-intégration pour chaque ping afin d'obtenir la meilleure précision possible sur les variations de S_v . Les seuils (minimal et maximal) utilisés lors de l'écho-intégration sont respectivement de -100 dB et 0 dB. Seuls les échos entre ces valeurs seront pris en compte lors des calculs.

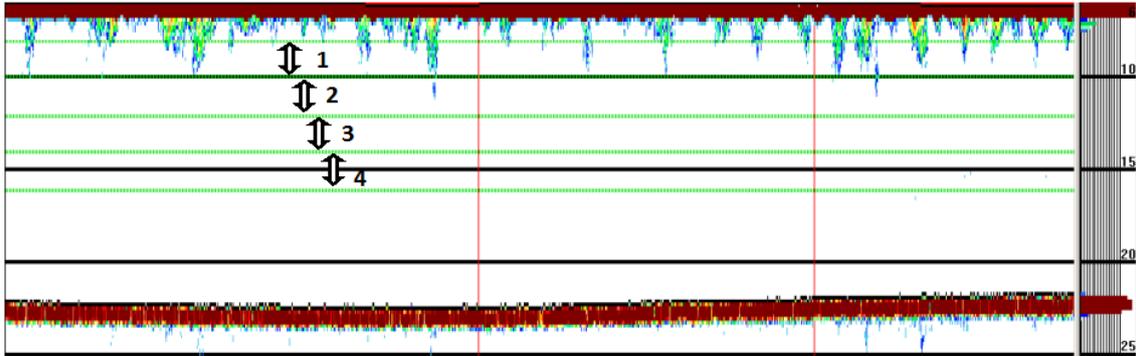


FIGURE 2.4 – Définition des couches pour l'écho-intégration. Les couches 1 à 4 sont délimitées par les lignes vertes horizontales. La couche 1 débute à 2 m sous le sonar et chaque couche possède une épaisseur de 2 m.

Pour le cas de la *Thalassa*, les données traitées proviennent du sondeur mono-faisceau ER60, pour les fréquences suivantes : 18, 38, 70, 120 et 200 kHz.

Détection des bulles

Pour chaque période de mesure définie précédemment, la présence de bulle sera quantifiée par les fluctuations de S_v par la méthode suivante inspirée des travaux de Trevorrow (2003).

Selon Medwin et Clay (1998), la section efficace de rétrodiffusion par unité de volume (s_v) d'un nuage de bulles, en négligeant les diffusions multiples, peut être calculée par :

$$s_v(f, z) = \int_0^\infty \sigma_{bs}(a, f) \cdot n(a, z) da \quad (2.5)$$

où $n(a, z)$ est la distribution en taille des bulles dans le nuage et σ_{bs} est la section efficace de diffusion d'une bulle seule :

$$\sigma_{bs}(a, f) = \frac{a^2}{((f_R/f)^2 + 1)^2 + \delta^2} \quad (2.6)$$

avec δ la constante d'amortissement (prise égale à $k \cdot a$ -avec k le nombre d'onde- en négligeant les effets d'amortissement visqueux et thermique) et f_R la fréquence de résonance pour un rayon de bulle a_R donné par :

$$f_R = \frac{\sqrt{3\gamma P_0/\rho}}{2\pi a_R} \quad (2.7)$$

avec γ le rapport des capacités thermiques ($\simeq 1,4$ pour l'air), P_0 la pression statique dans la bulle ($P_0 = P_{atm} + \rho g z$) et ρ la densité de l'eau de mer.

Afin de relier S_v à une densité de bulles, une expression de la distribution en taille des bulles doit être utilisée. La génération de bulles dans l'océan a été le sujet de nombreux travaux, souvent motivés par une meilleure compréhension des échanges gazeux entre l'océan et l'atmosphère. Il est couramment admis que le déferlement naturel des vagues peut générer des nuages de bulles possédant un taux de vide de près de 10% juste sous la surface (Lamarre et Melville, 1994). En revanche, ce taux de vide diminue fortement avec la profondeur. Deane et Stokes (1999, 2002) ont développé un système optique permettant de mesurer des bulles pour des rayons supérieurs à 200 μm . Deux mécanismes contrôlant la taille des bulles ont été identifiés. Pour les bulles les plus grosses, d'un rayon supérieur à 1 mm, la densité est proportionnelle aux rayons des bulles à la puissance $(-10/3)$. Les bulles les plus petites ont une densité suivant une loi en puissance $(-3/2)$. Thorpe *et al.* (2003); Thorpe (2005) décrivent le fait que les petites bulles, d'un rayon inférieur à 1 mm sont stabilisées par les tensions de surface, tandis que les bulles plus grosses sont fragmentées par les contraintes de cisaillement induites par le déferlement. Au contraire les bulles trop petites, d'un rayon inférieur à environ 30 μm , sont également instables. La majorité du contenu gazeux passe rapidement en solution, la bulle étant finalement dissoute complètement. Dans ce cas, la distribution en taille des bulles diminue lorsque le rayon diminue. Cependant la vitesse ascensionnelle des petites bulles est très faible.

Celles-ci sont donc plus persistantes dans la colonne d'eau et sont plus susceptibles d'être entraînées en profondeur. Il est donc approprié d'utiliser une distribution de bulles incluant des rayons compris entre 30 μm et 1 mm. Vagle et Farmer (1998) ont déterminé par mesure acoustique que la densité de bulles de rayon supérieur à 20 μm peut être décrite pour une profondeur de 0,5 m par la relation suivante :

$$n(a) = n_0 \cdot \exp(-a/34) \quad (2.8)$$

où a est en μm .

Trevorrow (2003) utilise ce spectre en prenant en compte une décroissance exponentielle de la valeur $n_0(z)$ avec la profondeur :

$$n(a, z) = n_0(z) \cdot \exp(-a/34), \quad \text{avec } n_0(z) = n_0 \cdot \exp(-z/d) \quad (2.9)$$

Avec une telle distribution, l'équation (2.5) devient :

$$s_v(f, z) = n_0(z) \int_{20}^{1000} \sigma_{bs}(a, f) \cdot \exp(-a/34) da \quad (2.10)$$

Par conséquent, des mesures de S_v permettent une estimation de $n_0(z)$ et la détermination du taux de vide ("Void Fraction") :

$$VF = \int_{20}^{1000} \frac{4}{3} \pi a^3 n(a, z) da \quad (2.11)$$

Un seuil adéquat est alors recherché pour la détection des bulles. Un seuil de $S_v = -50$ dB pour la fréquence de 120 kHz sépare de manière efficace les échos de bulles des rétrodiffusions (de plus faible intensité) que pourraient causer les différents types de plancton. Pour une profondeur de 9 m (profondeur moyenne de la couche 1), le taux de vide correspondant à -50 dB est de $2,2 \cdot 10^{-10}$. Un indice de rétrodiffusion volumique plus faible correspondrait à une densité de bulle insignifiante. Pour la suite, un ping sera dit "bullé" si le S_v correspondant est supérieur au seuil défini (ici -50 dB). Enfin, le pourcentage de pings bullés est calculé pour chaque période stable.

L'influence de la fréquence du sonar sur la détection des bulles est présentée sur la figure 2.5. Le graphique de gauche représente, pour chaque fréquence, le pourcentage de pings bullés en fonction de la moyenne de la vitesse du vent. Chaque point correspond à une période de mesure.

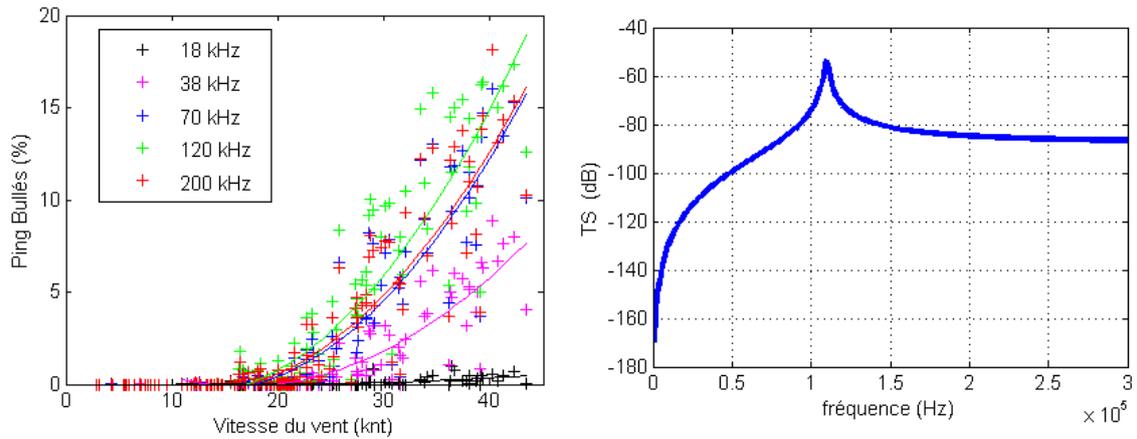


FIGURE 2.5 – [Gauche] Influence de la fréquence du sonar sur la détection des bulles : Pings bullés en fonction de la vitesse du vent dans la couche entre 2 et 4 m sous la coque. [Droite] TS en fonction de la fréquence pour une bulle de $50 \mu\text{m}$ de rayon à 9 m de profondeur

L'occurrence de la détection des bulles est la plus élevée pour une fréquence de 120 kHz et légèrement plus faible pour les fréquences de 70 et 200 kHz. Cette détection est réduite pour 38 kHz et très faible pour 18 kHz. Cette évolution peut être expliquée par la distribution en taille des bulles à cette profondeur, caractérisée par une majorité de bulles de rayons inférieurs à $100 \mu\text{m}$. Ces bulles possèdent une fréquence de résonance élevée, comme on peut le voir sur le graphique de droite où est représenté l'indice de réflexion TS en fonction de la fréquence pour une bulle de $50 \mu\text{m}$. La fréquence de résonance pour cette taille de bulle est proche de 120 kHz.

Le sondeur ER60 à 120 kHz semble donc le plus approprié pour étudier le passage des bulles sous la coque. Dans la section suivante, les résultats sont présentés pour cette fréquence uniquement.

2.3 Résultats : Corrélations entre conditions de navigation et présence de bulles

2.3.1 Étude des bulles observées par la *Thalassa*

Le navire et les bases de données

La *Thalassa* (cf.figure 2.6) est l'un des quatre navires de recherche hauturiers de l'Ifremer. Ses missions sont principalement axées sur la recherche halieutique, notamment pour l'écologie des populations et l'évaluation des espèces exploitées. Pour cela, en plus des appareils de pêche classiques, la *Thalassa* est équipée de six sondeurs mono-faisceaux Simrad ER60 (pour des fréquences de 18, 38, 70, 120, 200 et plus récemment de 333 kHz) et d'un sondeur multifaisceaux Simrad ME70 d'une gamme de fréquence comprise entre 70 et 120 kHz (Trenkel *et al.*, 2008). Tous ces équipements sont calibrés régulièrement afin de fournir des mesures absolues de la rétrodiffusion dans la colonne d'eau et des fonds marins. Les transducteurs des différents appareils sont installés relativement proche les uns des autres afin d'observer autant que possibles les mêmes scènes (Korneliussen *et al.*, 2008).

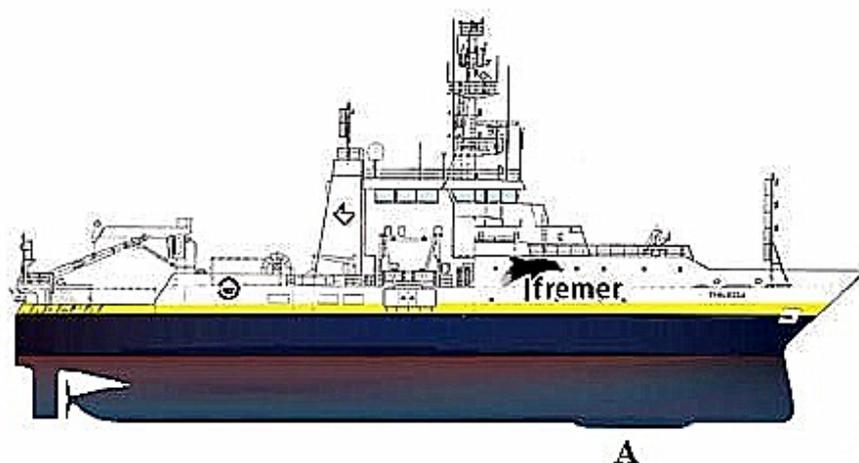


FIGURE 2.6 – La *Thalassa* / A : Position des sondeurs

2.3. RÉSULTATS : CORRÉLATIONS ENTRE CONDITIONS DE NAVIGATION ET PRÉSENCE DE BULLES

Les caractéristiques principales de la *Thalassa* sont les suivantes :

- Longueur hors-tout 73,65 m
- Largeur 14,90 m
- Tirant d'eau maxi 6,1 m
- Déplacement maxi 3022 t
- Jauge brute 2803 UMS
- Vitesse 11 - 14.7 nds

Le tirant d'eau moyen en opération est de 5,6 m, et la profondeur des transducteurs est d'environ 6 m.

Dans le cadre du programme *International Bottom Trawl Survey* (IBTS), le Laboratoire Ressources Halieutiques du centre Ifremer de Boulogne-sur-Mer mène chaque année pendant un mois la campagne IBTS, en Manche Orientale et en mer du Nord. Réalisée en collaboration avec six partenaires européens et coordonnée par le *Conseil International pour l'Exploration de la Mer* (CIEM), cette campagne permet notamment de calculer un indice d'abondance des principales espèces de poissons exploitées dans cette zone.

Des données acoustiques provenant de trois campagnes IBTS, entre 2010 et 2013, ont été exploitées pour cette étude. Durant ces périodes, les activités de la *Thalassa* ont été principalement concentrées en Manche Orientale (voir la route de la *Thalassa* durant la première semaine de la campagne IBTS 2013 sur la figure 2.7). Cette zone de travail est caractérisée par des faibles fonds (profondeur moyenne de 50 m, et toujours inférieure à 150 m). La valeur maximale du vent rencontré est de 72,1 nœuds. La hauteur significative de la houle, définie comme la moyenne des hauteurs du tiers de vagues les plus grandes, est comprise entre 0,5 et 3,5 m avec une période maximale de 9 s.



FIGURE 2.7 – Route de la *Thalassa* durant la première semaine de la campagne IBTS 2013 en Manche

Influence des paramètres de navigation sur la génération des bulles

En suivant la méthode décrite dans la section précédente, une base de données est obtenue contenant des informations sur les conditions de navigation et sur le passage de bulles sous la coque pour chaque période stable. Ces données sont illustrées dans le tableau 2.1, où sont indiqués le minimum, la moyenne et le maximum (rencontrés sur toute la base de données) de la vitesse du vent (W) et celle du navire (V), l'écart type en tangage (σT), pilonnement (σP) et roulis (σR), la moyenne et l'écart type de S_v et le pourcentage de pings bullés (PB) dans la couche 1.

	W (nds)	V (nds)	σT (°)	σP (m)	σR (°)	S_v (dB)	σS_v (dB)	PB (%)
min	3	6	0,1	0,0	0,3	-97,6	2,6	0
moy	21	11	0,6	0,2	0,9	-87,2	9,7	2,9
max	43	13	2,6	0,9	2,4	-67,8	21,2	17,5

TABLE 2.1 – Minimum, moyenne et maximum des paramètres principaux sur toutes les périodes stables

Afin de déterminer les paramètres majeurs entraînant le passage de bulles sous la coque, les corrélations entre chacun de ces paramètres et le pourcentage de pings bullés ont été étudiées. La figure 2.8 représente le pourcentage de pings bullés en fonction de l'écart type du tangage.

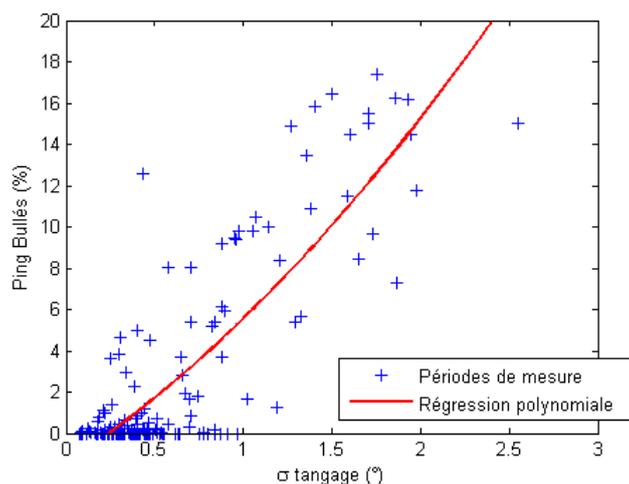


FIGURE 2.8 – Influence du tangage sur la génération de bulles. Pings bullés dans la couche 1 (2-4 m sous la coque) en fonction du tangage, pour toutes les périodes de mesures stables. La courbe en rouge représente une régression polynomiale du 2nd ordre.

2.3. RÉSULTATS : CORRÉLATIONS ENTRE CONDITIONS DE NAVIGATION ET PRÉSENCE DE BULLES

L'influence du mouvement de tangage sur la génération de bulles est significative. Pour obtenir une valeur précise de cette corrélation, le coefficient de détermination R^2 est calculé :

$$R^2(X, Y) = \left(\frac{COV(X, Y)}{\sigma(X)\sigma(Y)} \right)^2 \quad (2.12)$$

où $\sigma(X)$ est l'écart type de la variable X, et la covariance entre les deux variables X et Y est définie (avec $E(X)$ l'espérance) par :

$$COV(X, Y) = E[(X - E(X))(Y - E(Y))] \quad (2.13)$$

Comme attendu, la corrélation entre le tangage et la détection des bulles est élevée : $R^2 = 0,72$. Les bulles sont toujours présentes pour un écart type de tangage supérieur à 1° .

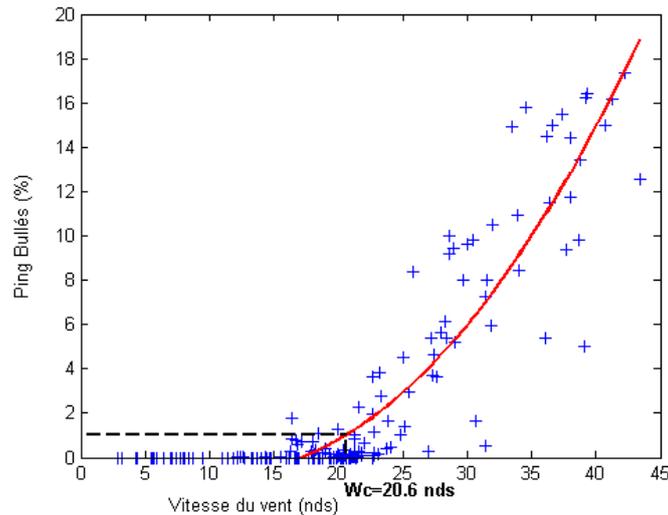


FIGURE 2.9 – Influence du vent sur la génération de bulles. Pings bullés dans la couche 1 (2-4 m sous la coque) en fonction de la vitesse du vent. Détermination de la vitesse de vent critique W_c

La corrélation entre la vitesse du vent et la génération de bulles est encore plus élevée. La figure 2.9 représente le pourcentage de pings bullés en fonction de la vitesse du vent. Le coefficient de détermination est cette fois $R^2 = 0,84$. Une vitesse de vent critique (W_c) est définie, correspondant à la valeur du vent au delà de laquelle l'observation de bulles sous la coque devient non négligeable. Cette valeur est obtenue lorsque la courbe de la meilleure régression polynomiale du second ordre atteint un pourcentage de pings bullés de 1%. Pour la couche d'étude comprise entre 2 et 4 m sous le sonar, la vitesse du vent critique est de $W_c \approx 21$ nœuds.

2.3. RÉSULTATS : CORRÉLATIONS ENTRE CONDITIONS DE NAVIGATION ET PRÉSENCE DE BULLES

Ces calculs ont été répétés pour les trois autres couches de profondeurs définies au paragraphe 2.2.2 (cf. figure 2.4). Les graphiques de pourcentage de pings bullés en fonction du vent pour chacune de ces couches sont représentés sur la figure 2.10.

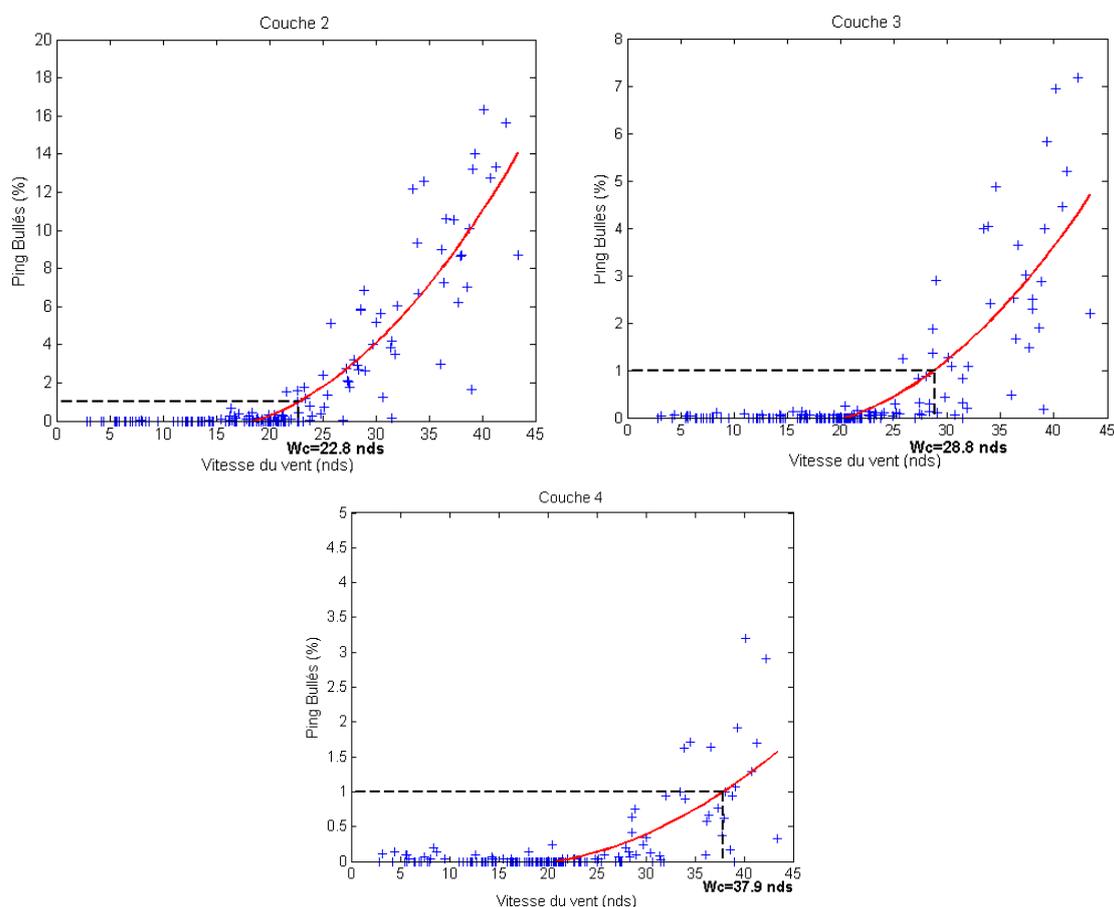


FIGURE 2.10 – Influence de la profondeur sur la génération des bulles : pings bullés en fonction du vent pour les couches 2, 3 et 4 (4-6 m, 6-8 m et 8-10 m sous le sonar)

La forme des courbes est similaire à celle de la première couche avec un pourcentage de pings bullés nul pour des vents faibles puis une croissance rapide avec la vitesse du vent. En revanche, les pourcentages de pings bullés observés diminuent avec la profondeur. Le pourcentage de pings bullés maximal observé dans la couche 4 est seulement de 3% pour une vitesse du vent de plus de 40 nœuds. Logiquement, la vitesse du vent critique augmente avec la profondeur, comme indiqué dans le tableau 2.2. Ces observations confirment l'intérêt de l'installation des transducteurs le plus profond possible. Un tirant d'eau important, ou l'installation des sonars sur quille ou sur gondole, pourront augmenter la vitesse de vent critique et permettre de travailler pour des états de mer plus élevés, ce qui est le but recherché afin d'augmenter la productivité des navires scientifiques.

2.3. RÉSULTATS : CORRÉLATIONS ENTRE CONDITIONS DE NAVIGATION ET PRÉSENCE DE BULLES

Couche	Distance (m)	Profondeur Moyenne (m)	PB max (%)	Wc (nds)
1	2-4	9	18	21
2	4-6	11	16	23
3	6-8	13	7	29
4	8-10	15	3	38

TABLE 2.2 – Distance sous le sonar, profondeur moyenne, maximum du pourcentage de pings bullés et vitesse de vent critique pour les quatre couches étudiées

Le tangage et la force du vent sont donc les facteurs les plus importants de la génération des bulles. L'influence des paramètres secondaires (la vitesse, l'orientation par rapport au vent, le pilonnement et le roulis) sera discutée dans le paragraphe 2.3.2, en prenant en compte les résultats de l'analyse des données du *Pourquoi pas ?*.

Les paramètres de vent et de tangage sont également corrélés entre eux. Les périodes durant lesquelles l'écart type du tangage est supérieur à 1° correspondent à chaque fois à des vitesses de vent de plus de 25 nœuds. Il est donc difficile de statuer sur les causes et les conséquences, mais la plus forte corrélation entre le pourcentage de pings bullés et la vitesse du vent tend à montrer que ce facteur est prépondérant. De plus, d'importants pourcentages de pings bullés (plus de 10%) peuvent être observés pour des valeurs de tangage relativement faible (d'écart type $< 0,5^\circ$). Ces observations renforcent le doute sur l'origine de ces bulles. Sont-elles générées par la dynamique du navire, ou sont-elles créées naturellement par le déferlement des vagues et la turbulence de surface? Pour répondre à cette question, un sondeur horizontal a été utilisé lors de la campagne IBTS 2013, afin d'étudier la génération des bulles sous la surface libre hors de l'influence du navire.

Analyse des bulles d'origine naturelle

Lors de certaines campagnes halieutiques, un sondeur horizontal (également de type ER60) peut être installé dans un puits situé au centre du navire afin de couvrir la zone aveugle des autres sondeurs et réduire les possibles erreurs dans les estimations de population effectuées avec les sondeurs verticaux. Ce sonar, orienté vers tribord (voir le schéma de la figure 2.11), a été spécifiquement mis en place lors de la campagne IBTS 2013. Cet équipement permet d'étudier la génération naturelle de bulles dans la colonne d'eau, à une certaine distance du navire.

L'objectif ici est de distinguer les bulles naturellement présentes sous la surface de celles générées par la dynamique du navire. Pour cela, l'analyse du sondeur horizontal doit être rigoureuse. Tout d'abord une couche d'étude doit être déterminée suffisamment loin du navire pour ne pas prendre en compte les réflexions des bulles générées par la vague d'étrave. Il est bien connu en hydrodynamique navale que

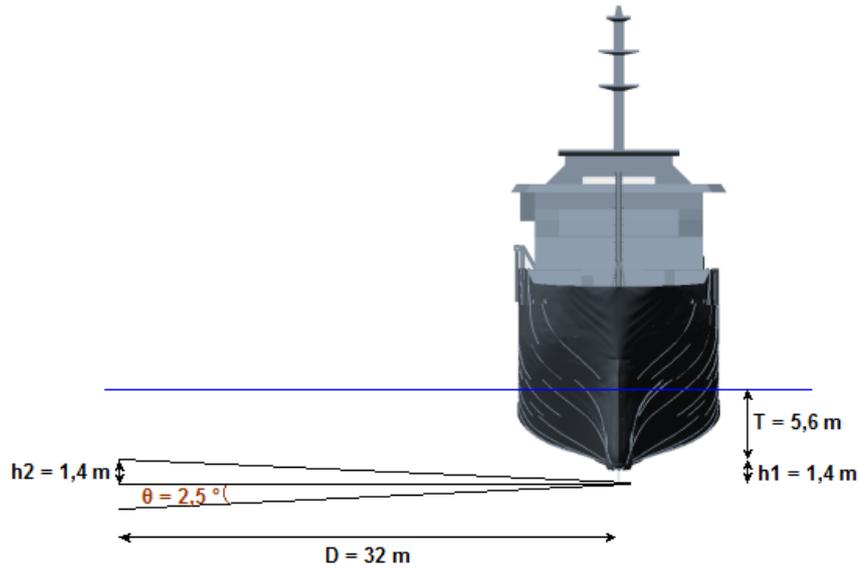


FIGURE 2.11 – Schéma de la couche étudiée par le sondeur horizontal

l'avancée de l'étrave d'un navire génère un sillage faisant un angle constant de $19,5^\circ$ par rapport au cap (cf. sillage de Kelvin au paragraphe 1.3.1). En prenant en compte la largeur du navire (14,90 m), ce sillage de bulles serait à une distance de 20 m du sondeur horizontal positionné au centre du navire. Il faut également prendre en compte le fait que les signaux acoustiques peuvent être réverbérés par la surface libre ou les fonds marins, surtout en cas de gîte. Les creux de houle facilitent d'autant plus ce type d'échos. Pour cette raison, les données ont été filtrées afin de ne prendre en compte que des pings correspondant à un angle de roulis compris entre 0° et 2° vers le fond. En considérant tous ces éléments, une couche a été choisie entre 30 et 32 m de distance par rapport au sondeur. Dans cette couche, la profondeur minimale atteinte (en considérant l'ouverture du faisceau à -3 dB) est de 5,6 m pour un angle de roulis de 0° , tandis que la profondeur maximale est de 9,5 m pour un roulis de 2° .

La profondeur moyenne visée par le sondeur horizontal est de 7 m, alors que la profondeur moyenne de la première couche d'étude sous le sondeur vertical est de 9 m. Il a été montré dans le paragraphe 2.2.2 qu'un seuil de -50 dB correspond à un taux de vide $VF = 2,2 \cdot 10^{-10}$ pour une profondeur de 9 m. En fixant $d = 1$ m (Trevorrow, 2003) dans l'expression de la distribution de bulles utilisée (équation 2.9), n_0 est obtenu et la distribution en taille des bulles à 7 m de profondeur est déterminée :

$$n(a, 7) = n_0 \cdot \exp(-7/d) \cdot \exp(-a/34) \quad (2.14)$$

2.3. RÉSULTATS : CORRÉLATIONS ENTRE CONDITIONS DE NAVIGATION ET PRÉSENCE DE BULLES

Le taux de vide est alors plus élevé, et correspond donc à un indice de rétrodiffusion volumique supérieur : $S_{v7} = -41,5$ dB.

La même analyse que celle du paragraphe précédent a été appliquée, avec ce nouveau seuil de détection, permettant de prendre en compte la différence de profondeur entre ces deux couches. Le pourcentage de pings bullés ainsi obtenu est présenté sur la figure 2.12 (graphique de gauche). La détection de bulles est faible, avec un pourcentage de pings bullés inférieur à 2% pour des vents proches de 25 nœuds. La quantité de bulles présentes sous la coque du navire est donc significativement plus élevée que celle présente naturellement sous la surface à la même profondeur. Il y a donc bien une augmentation du phénomène générée par la dynamique du navire.

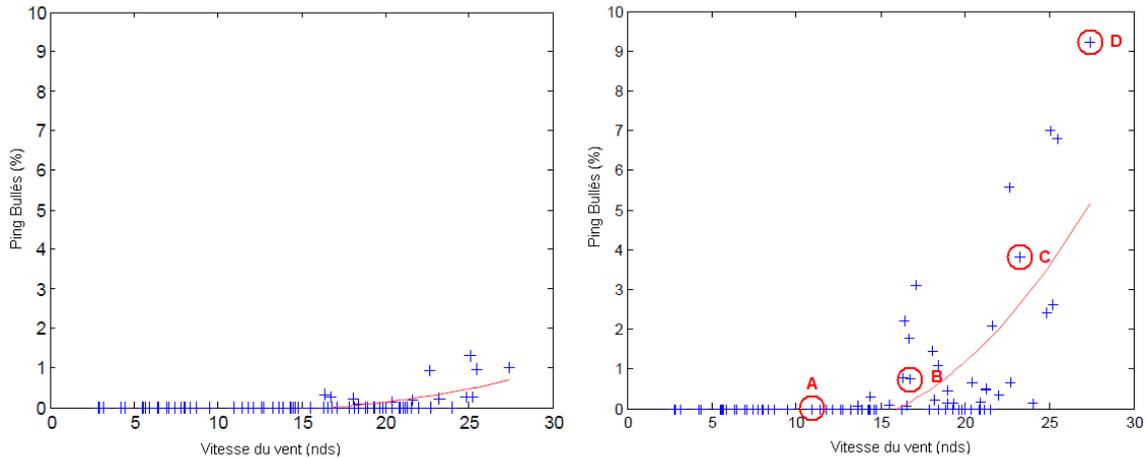


FIGURE 2.12 – Influence du vent sur l’aération naturelle : Pings bullés en fonction de la vitesse du vent pour le sondeur horizontal. [Gauche] avec un seuil de détection $S_{v7} = -41,5$ dB. [Droite] avec un seuil de détection $S_v = -50$ dB.

Cependant l’aération naturelle peut tout de même être observée par le sondeur horizontal. En prenant le seuil initial $S_v = -50$ dB, l’évolution de la détection des bulles en fonction de la force du vent est similaire à celle observée dans la première couche sous le navire (graphique de droite de la figure 2.12). Les quatre périodes marquées en rouge correspondent aux images A, B, C et D de la figure 2.13, représentant des échogrammes issus de *Movies+*. L’axe horizontal représente l’avancée du navire (1 mille nautique entre deux lignes verticales), et l’axe vertical représente la profondeur (graduée de 10 à 40 m par intervalle de 5 m). Le seuil de visualisation sur ces échogrammes est de -50 dB. Les vitesses moyennes du vent sur ces périodes sont respectivement 11, 17, 23 et 27 nœuds. Aucune détection de bulles n’est visible sur l’image A, correspondant à un vent faible. Avec l’augmentation de la vitesse du vent, les perturbations apparaissent d’abord seulement proche du navire (image B), puis ces perturbations s’accroissent et sont présentes à plus de 30 m du navire et sont donc dues à une aération naturelle.

2.3. RÉSULTATS : CORRÉLATIONS ENTRE CONDITIONS DE NAVIGATION ET PRÉSENCE DE BULLES

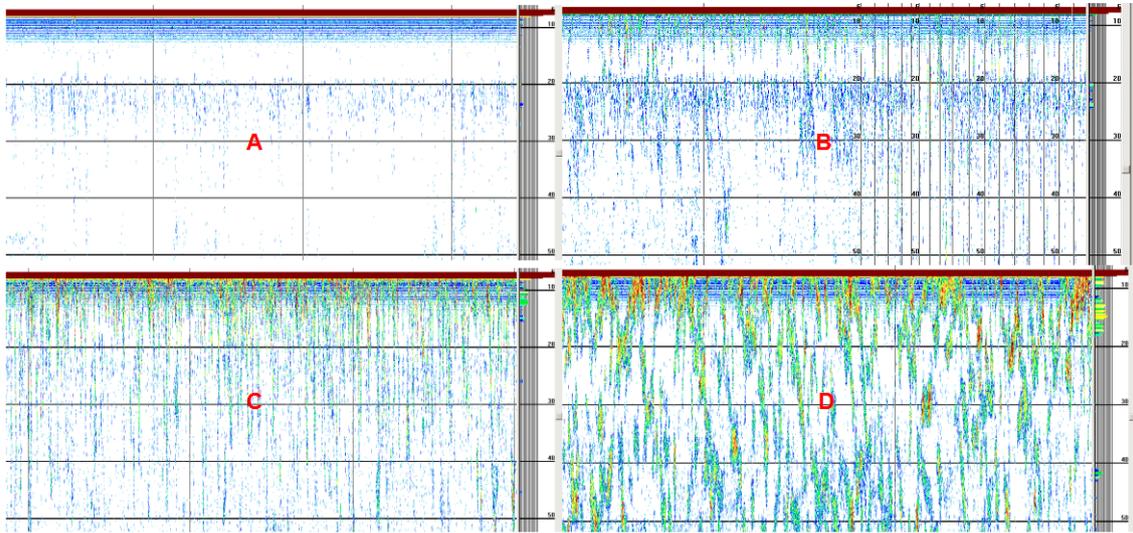
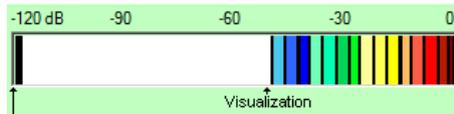


FIGURE 2.13 – Visualisation de la détection des bulles par le sondeur horizontal pour quatre vitesses de vent. $W=11$; 17 ; 23 and 27 nœuds pour les périodes A, B, C and D respectivement



Ces analyses indiquent que la densité de bulles mesurées sous la coque du navire est similaire à celle rencontrée loin du navire, mais dans une couche moins profonde (d'une différence de 2 m). La présence du navire est donc responsable d'une génération de bulles plus importante et de l'entraînement de bulles plus en profondeur. De plus, il doit être spécifié ici que la méthode de détection sous la coque sous-estime la quantité de bulles. En effet une partie significative des bulles restent juste sous la carène (à moins de 2 m sous les sondeurs), où les calculs d'écho-intégration ne sont pas possibles à cause de la zone aveugle des sondeurs.

2.3.2 Comparaison entre la *Thalassa* et le *Pourquoi pas ?*

Le *Pourquoi pas ?* est un navire océanographique qui a été financé à 55% par l'Ifremer et à 45% par la Marine Nationale avec une utilisation répartie de 180 jours par an pour l'Ifremer et de 150 jours par an pour la Marine. Il s'agit d'un navire polyvalent équipé pour les travaux en route et optimisé pour les travaux en chantier ("au point fixe"). Le *Pourquoi pas ?* peut ainsi mener à bien des missions d'hydrographie, hauturière ou côtière, de géosciences, d'océanographie physique, chimique et biologique et mettre en œuvre les équipements scientifiques de l'Institut.

Les caractéristiques principales du *Pourquoi pas ?* sont les suivantes :

- Longueur hors-tout 107,60 m
- Largeur 20,00 m
- Tirant d'eau maxi 6,9 m
- Déplacement maxi 6600 t
- Jauge brute 7854 UMS
- Vitesse 11 - 14 nds

Il faut préciser ici que le tirant d'eau en opération est largement réduit par rapport au tirant d'eau maximal de 6,9 m. Le tirant d'eau (hors gondole) est souvent compris entre 5 m et 5,50 m, ce qui est relativement faible pour un navire de cette taille. Par conséquent même avec l'utilisation de la gondole, la profondeur des sondeurs est d'environ 6 m, et donc sensiblement équivalente à celle des sondeurs de la *Thalassa*.

La position de la gondole est indiquée sur la figure 2.14, de même que le positionnement des différents équipements acoustiques sur celle-ci. On retrouve notamment des sondeurs mono-faisceaux de type Simrad EA600 pour les trois fréquences de 12, 38 et 200 kHz. Les fréquences de 12 et de 38 kHz n'étant pas adaptées à la méthode de détection des bulles (cf figure 2.5), les comparaisons entre le *Pourquoi pas ?* et la *Thalassa* seront effectuées à partir des données du 200 kHz.

Le *Pourquoi pas ?* a la particularité d'avoir été conçu pour réaliser efficacement de nombreux travaux en station. L'Ifremer l'utilise donc le plus souvent pour des campagnes pluridisciplinaires de longue durée sur des zones "de chantiers", telles que les sources hydrothermales, ou des zones de failles. Le navire réalise d'abord une reconnaissance à moyenne échelle avec un sonar remorqué, puis peut déployer les engins sous-marins habité (*Nautile*) ou télé-opéré (*Victor 6000*) sur la zone repérée. Pour les missions d'hydrographie ou d'océanographie hauturière, c'est essentiellement le Service Hydrographique et Océanographique de la Marine (SHOM) qui en est le principal utilisateur. Ces campagnes étant souvent confidentielles, les bases de données accessibles des sondeurs mono-faisceaux du *Pourquoi pas ?* sont donc beaucoup plus réduites que pour la *Thalassa*. De plus, les données acoustiques ne sont pas enregistrées au même format (de type .RAW pour les EA600 et .HAC,

2.3. RÉSULTATS : CORRÉLATIONS ENTRE CONDITIONS DE NAVIGATION ET PRÉSENCE DE BULLES

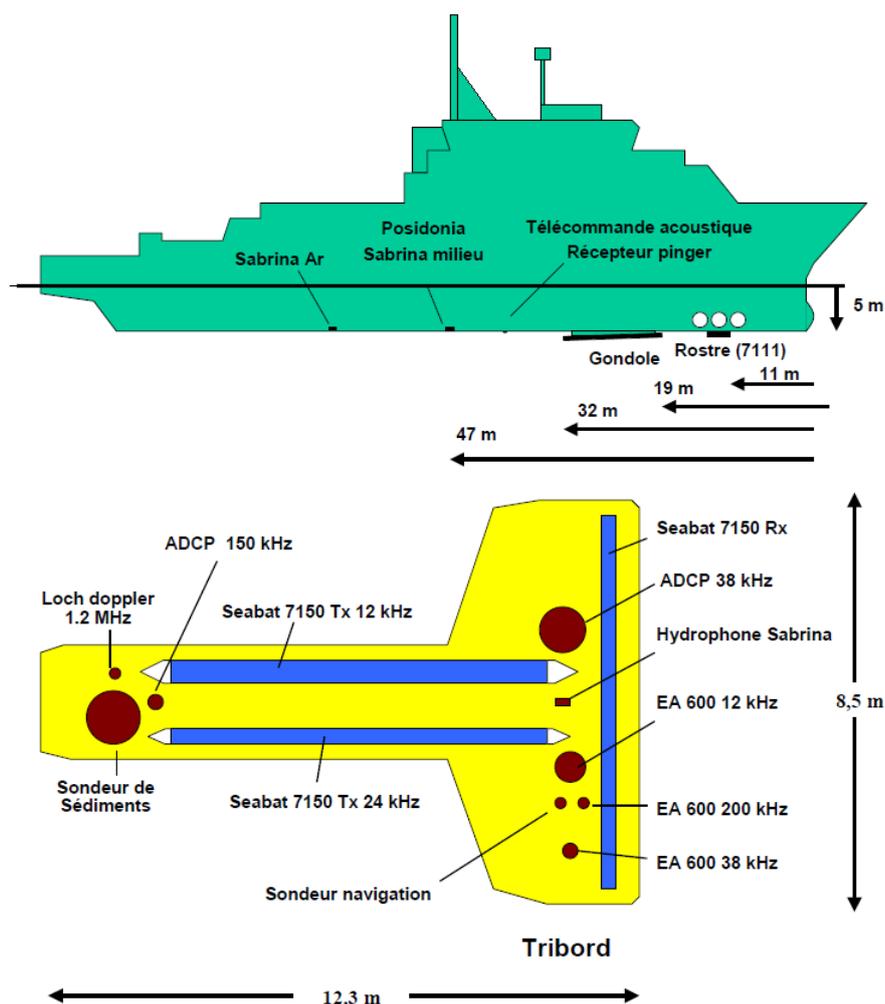


FIGURE 2.14 – [Haut]Illustration de la position de la gondole sous le navire. [Bas] Positionnement des différents équipements acoustiques sur la gondole.

lisible par Movies, pour les ER60). Le logiciel CASINO+ n'étant pas utilisé sur le *Pourquoi pas ?*, les données de navigations sont également sous un format différent (de type NetCDF) et nécessitent un pré-traitement afin de pouvoir appliquer la méthode d'analyse développée pour la *Thalassa*.

Les données traitées dans notre travail proviennent d'un transit valorisé ayant eu lieu entre Brest et Pointe à Pitre en Novembre 2009. Lors de cette campagne les conditions météorologiques rencontrées ont été très variable, avec des vents mesurés entre 0 et 73 nœuds. Les graphiques de pourcentage de pings bullés en fonction du vent et du tangage sont présentés sur la figure 2.15.

Les points et droites en rouge correspondent au *Pourquoi pas ?*, tandis que les données de la *Thalassa* sont représentées en bleu. On peut voir que l'initiation du

2.3. RÉSULTATS : CORRÉLATIONS ENTRE CONDITIONS DE NAVIGATION ET PRÉSENCE DE BULLES

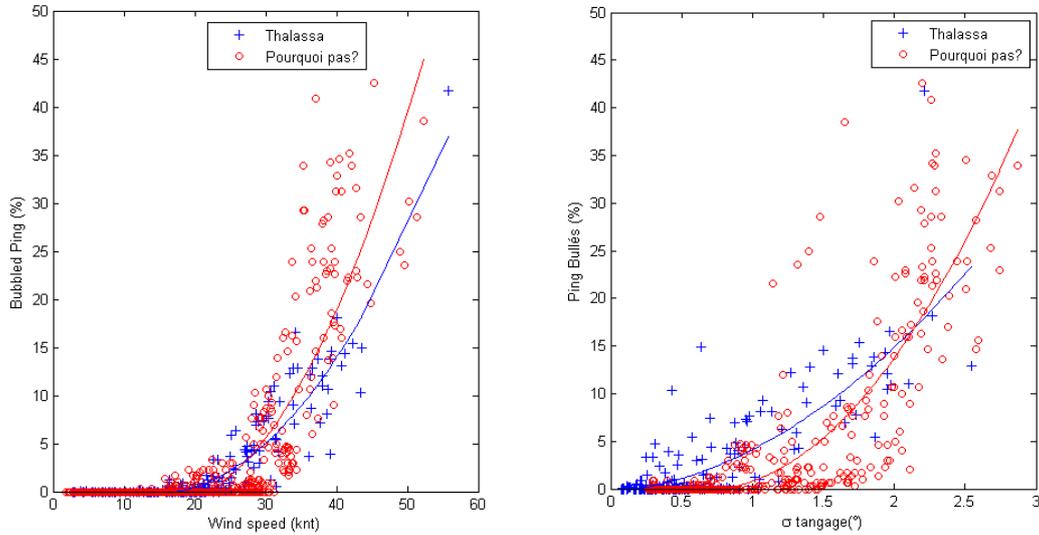


FIGURE 2.15 – Comparaison de la détection des bulles entre la *Thalassa* (en bleu) et le *Pourquoi pas ?* (en rouge). [Gauche] Pourcentage de pings bullés en fonction du vent. [Droite] Pourcentage de pings bullés en fonction du tangage.

phénomène a lieu pour des vitesses de vent similaires voir légèrement plus élevées pour le *Pourquoi pas ?*. En rappelant que la détection des bulles est plus faible pour la fréquence de 200 kHz, on obtient pour le *Pourquoi pas ?* $W_{c,200\text{ kHz}} = 24$ nœuds. Pour la *Thalassa*, on a $W_{c,200\text{ kHz}} = 22$ nœuds (contre $W_c = 21$ nœuds pour la fréquence de 120 kHz). De même pour des écart-types de tangage de moins de 1° , l'aération détectée est souvent négligeable pour le *Pourquoi pas ?* alors que la *Thalassa* est tout de même affectée sur quelques périodes. En revanche au delà d'un vent de 30 nœuds ou d'un écart-type de tangage de plus de $1,5^\circ$, le pourcentage de pings bullés augmente très rapidement, et atteint des valeurs de plus de 20% pour le *Pourquoi pas ?*. Ces valeurs ne sont presque jamais atteintes pour la *Thalassa* et correspondent à des perturbations rendant les données totalement inutilisables.

Influence des paramètres secondaires

On a vu que le tangage et la vitesse du vent sont les deux paramètres principaux provoquant le phénomène de génération de bulles. Les figures 2.16 à 2.20 représentent le pourcentage de pings bullés en fonction des paramètres secondaires : l'écart type du roulis, la gîte (moyenne du roulis), l'écart type du pilonnement, la vitesse du navire, et l'orientation par rapport au vent.

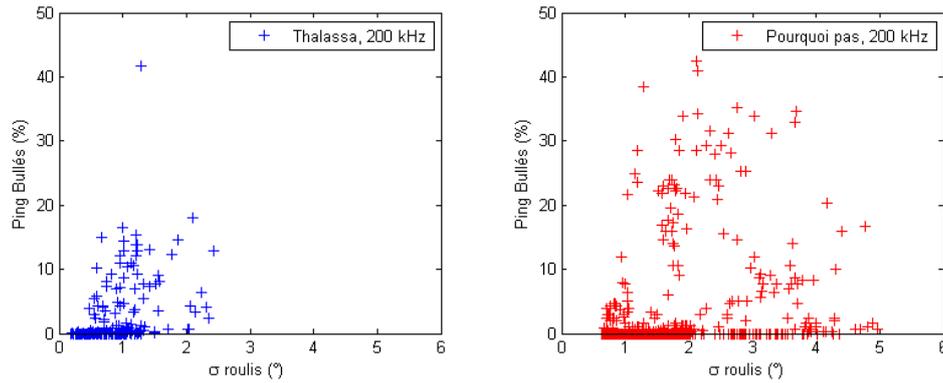


FIGURE 2.16 – Pourcentage de pings bullés en fonction du roulis pour la *Thalassa* (en bleu) et le *Pourquoi pas ?* (en rouge)

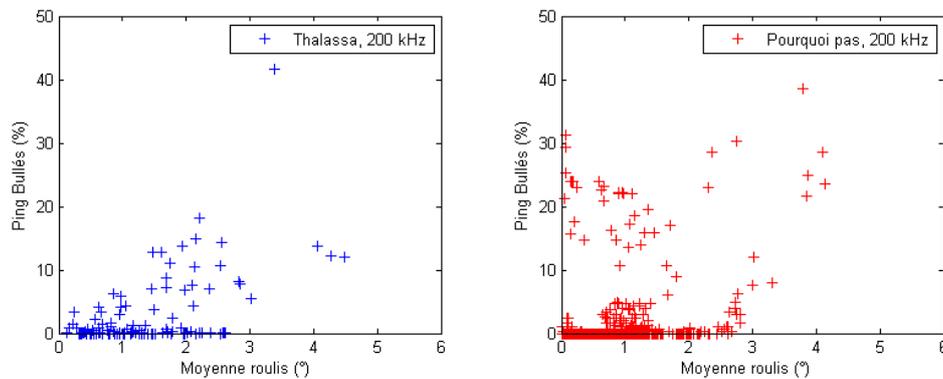


FIGURE 2.17 – Pourcentage de pings bullés en fonction du roulis pour la *Thalassa* (en bleu) et le *Pourquoi pas ?* (en rouge)

L'influence de la gîte et du roulis est négligeable par rapport à celle de la vitesse du vent. De même la corrélation entre la détection des bulles et le pilonnement est bien moins importante que pour le tangage. Il est naturellement plus probable d'observer des bulles pour des amplitudes de mouvements (pilonnement et roulis) plus élevées, mais on observe également des périodes durant lesquelles les mouvements sont importants et où le pourcentage de pings bullés reste nul. Les amplitudes du pilonnement et du roulis rencontrées sur le *Pourquoi pas ?* atteignent des valeurs

2.3. RÉSULTATS : CORRÉLATIONS ENTRE CONDITIONS DE NAVIGATION ET PRÉSENCE DE BULLES

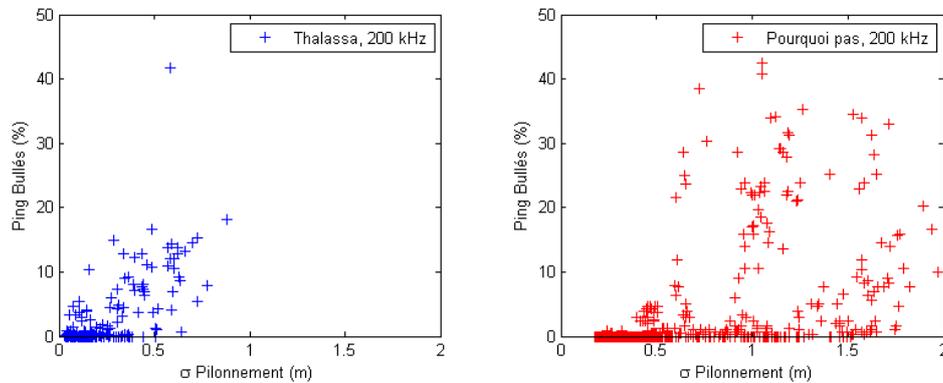


FIGURE 2.18 – Pourcentage de pings bullés en fonction du pilonnement pour la *Thalassa* (en bleu) et le *Pourquoi pas ?* (en rouge)

beaucoup plus élevées que celles de la *Thalassa*. Cela s'explique par les différentes zones de navigation : les données du *Pourquoi pas ?* proviennent d'une traversée de l'Atlantique, où la houle est bien formée, tandis que les données de la *Thalassa* proviennent principalement de la Manche avec une houle relativement courte.

De la même manière, le graphique 2.19 pour la *Thalassa* a tendance à montrer que la vitesse du navire a très peu d'influence sur le pourcentage de pings bullés. Au contraire pour *Pourquoi pas ?* ces deux paramètres sont fortement corrélés. Dans ce cas, la vitesse ne permet pas d'identifier le phénomène de la génération de bulles, le navire ayant simplement ralenti durant le transit lors des périodes de mauvais temps. Ces graphiques montrent tout de même que la génération de bulles en mer peut avoir lieu pour des vitesses d'avance relativement faibles (inférieur à 5 nœuds).

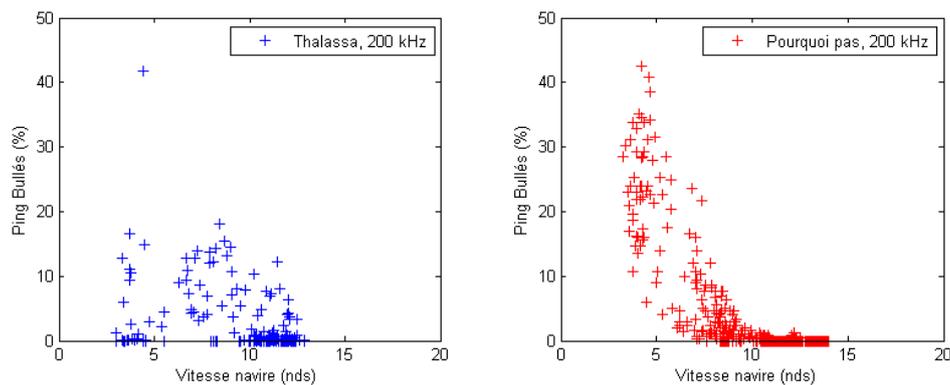


FIGURE 2.19 – Pourcentage de pings bullés en fonction de la vitesse du navire pour la *Thalassa* (en bleu) et le *Pourquoi pas ?* (en rouge)

2.3. RÉSULTATS : CORRÉLATIONS ENTRE CONDITIONS DE NAVIGATION ET PRÉSENCE DE BULLES

Enfin, comme pour la vitesse du navire, le graphique 2.20 de la *Thalassa* montre que l'orientation par rapport au vent n'est pas un critère d'identification du phénomène aussi pertinent que la vitesse du vent. On peut observer des périodes bullées et non bullées pour toutes les orientations possibles. Au contraire, le graphique du *Pourquoi pas ?* semble indiquer un cap susceptible de générer davantage de bulles autour de 150° . Cela peut s'expliquer également par le fait que la campagne correspond à un long transit et que le cap a pu être constant pendant toute la période de mauvais temps rencontrée.

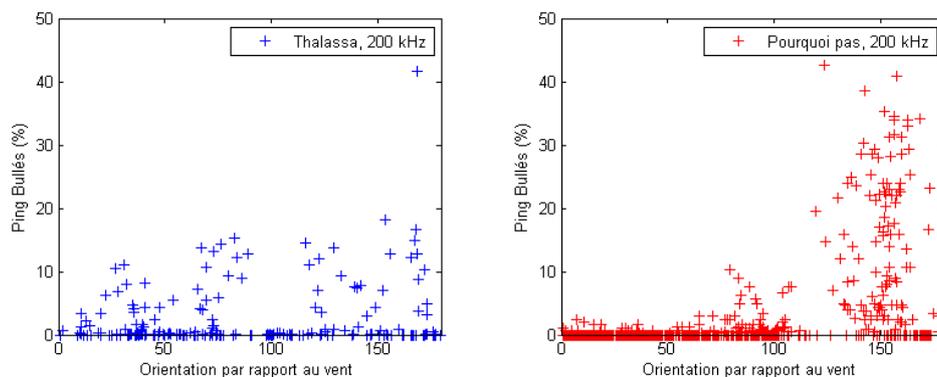


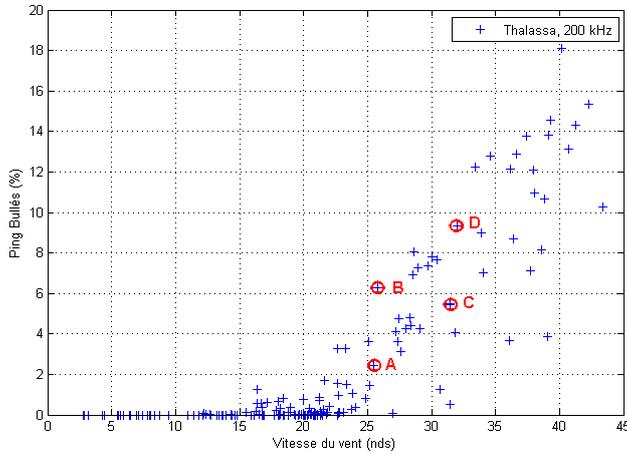
FIGURE 2.20 – Pourcentage de pings bullés en fonction de l'orientation par rapport au vent pour la *Thalassa* (en bleu) et le *Pourquoi pas ?* (en rouge)

Pour étudier l'influence réelle de la vitesse du navire et de l'orientation par rapport au vent, une base de données plus conséquente serait nécessaire, avec un nombre de périodes important pour des vitesses de vent et des amplitudes de tangage constantes.

N'ayant pas cette possibilité actuellement, on cherche à expliquer des variations de taux de pings bullés importantes pour des périodes de vent équivalent. Pour cela deux couples de périodes ont été choisis arbitrairement, pour un vent entre 25 et 35 nœuds (cf. figure 2.21). Les périodes A et B correspondent à des vitesses de vent de 25 et 26 nœuds et à des pourcentages de pings bullés de 2,4 et 6,3%. De même, les périodes C et D correspondent à des vitesses de vent de 31 et 32 nœuds et à des pourcentages de pings bullés de 5,5 et 9,3%.

Nous avons choisi de travailler sur les données de la *Thalassa*, car celles-ci proviennent de la Manche, où l'on peut trouver de façon plus précise des informations concernant l'état de mer grâce à la banque de données Previmer. Connaissant les coordonnées de chaque période (A : $52^\circ 50' N$ $3^\circ 55' E$, B : $50^\circ 19' N$ $0^\circ 16' W$, C : $50^\circ 38' N$ $0^\circ 15' E$, D : $54^\circ 04' N$ $4^\circ 14' E$) on peut retrouver la hauteur de houle significative, la période et la direction de la houle (cf. illustration de la figure 2.22). Ces données sont accessibles depuis 2009 avec la définition spatiale présentée sur cette figure, et un pas de temps de 3h. Les conditions de navigation des deux couples de

2.3. RÉSULTATS : CORRÉLATIONS ENTRE CONDITIONS DE NAVIGATION ET PRÉSENCE DE BULLES



Période	W (nds)	PB (%)
A	25	2,4
B	26	6,3
C	31	5,5
D	32	9,3

FIGURE 2.21 – Choix de couples de période (A/B et C/D) avec des vitesses de vent très proches mais des pourcentages de pings bullés distincts

périodes sont répertoriées dans le tableau 2.3.

Dans ces deux cas, la vitesse du navire, le roulis et l'orientation par rapport à la houle ne semblent pas influencer sur le pourcentage de pings bullés. En revanche pour les deux couples, les cas les plus bullés correspondent à une hauteur de vague significative plus élevée, entraînant des mouvements de tangage et de pilonnement de grandes amplitudes. C'est notamment le cas pour la période D, correspondant à un H_s de 3,75 m rencontré en mer du Nord. Les écarts types de tangage et de pilonnement sont alors de $1,2^\circ$ et 0,5 m, augmentant le passage des bulles sous la coque.

On peut également comparer les périodes B et C entres elles. Malgré un vent plus élevé pour la période C, on détecte légèrement plus de passage de bulles pour la période B. L'état de mer est identique (H_s et T_p) entre ces deux périodes mais l'orientation du navire par rapport à la houle est bien distincte. Pour la période C on observe une orientation (voir définition sur la figure 2.23) d'environ 180° . La vitesse du navire étant relativement rapide, la fréquence de rencontre de la houle sera très faible, d'où des mouvements de tangage et de pilonnement très faibles. En revanche pour la période B l'orientation du navire par rapport à la houle est d'environ 75° , d'où des mouvements de tangage et de pilonnement plus importants (d'écarts types respectifs $1,1^\circ$ et 0,4 m). Cela explique donc le fait que la génération de bulles soit plus importante malgré un vent plus faible.

2.3. RÉSULTATS : CORRÉLATIONS ENTRE CONDITIONS DE NAVIGATION ET PRÉSENCE DE BULLES

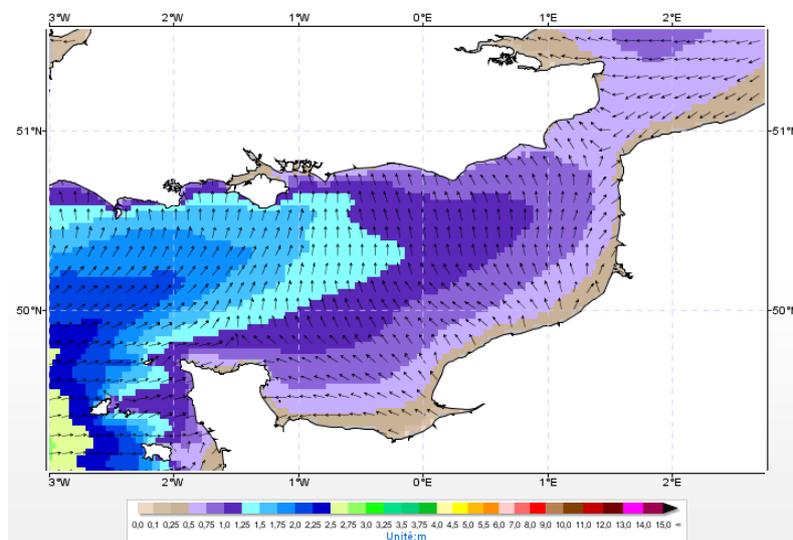


FIGURE 2.22 – Illustration de la base de données Previmer, permettant d’obtenir la hauteur de houle significative, la période et la direction pour une date et une position donnée

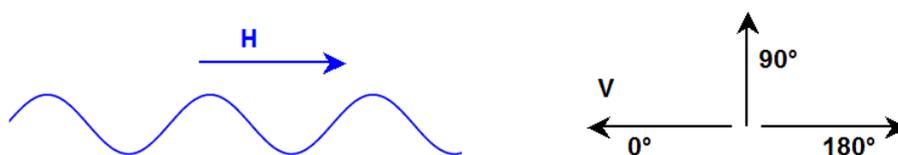


FIGURE 2.23 – Schéma de définition des angles de cap par rapport à la houle

Période	V (nds)	σT ($^{\circ}$)	σP (m)	σR ($^{\circ}$)	H_s (m)	T_p (s)	Cap/houle ($^{\circ}$)
A	8,5	0,6	0,1	0,5	1	4	150
B	6,7	1,1	0,4	0,8	1,5	5	74
C	11,8	0,3	0,1	2,4	1,5	5	177
D	12,0	1,2	0,5	2,2	3,75	9	138

TABLE 2.3 – Comparaison des différents paramètres de navigation pour les couples de périodes A/B et C/D

2.4 Conclusion

Cette étude de la génération de bulles à partir de mesures en mer permet de mieux connaître les conditions d'apparition du phénomène de *Bubble Sweep-down* sur différents navires de recherche. Ce chapitre a été dédié au développement d'une méthode d'analyse des données acoustiques, permettant de définir un pourcentage de pings bullés. Les résultats obtenus sont cohérents avec la théorie, notamment concernant la détection des réflexions des bulles en fonction de la fréquence des sondeurs : la détection est plus efficace pour le sondeur à 120 kHz à cette profondeur (pour des tailles de bulles souvent inférieures à 100 μm). Le taux de bullage obtenu peut ensuite être corrélé avec les conditions de navigation, afin de déterminer précisément les conditions d'apparition du phénomène de *Bubble Sweep-down*. La corrélation entre le pourcentage de pings bullés et le tangage, et surtout la vitesse du vent, est élevée ($R^2 > 0,8$). On peut définir une vitesse de vent critique, à partir de laquelle le passage de bulles sous la coque devient important. On obtient, pour la *Thalassa*, une vitesse de vent critique de 21 nœuds.

La détection de bulles sous la coque a été confrontée avec l'observation de l'aération naturelle visible dans la colonne d'eau à une profondeur moyenne de 7 m (contre 9 m pour l'analyse sous la coque). Cette aération naturelle peut être importante pour des vents proches de 25 nœuds, mais l'influence du navire pour entraîner une quantité de bulles plus conséquente en profondeur a été démontrée.

Cette méthode permet également de comparer le comportement de différents navires en terme de génération de bulles. Les comportements du *Pourquoi pas ?* et de la *Thalassa* ont été comparés à partir des bases de données de l'Ifremer. Malgré des vitesses de vent critiques similaires, le *Pourquoi pas ?* présente des taux de bulles extrêmement importants pour un état de mer agité. En prenant en compte le fait que la méthode appliquée sous-estime la quantité de passage de bulles sous la coque, à cause de la zone aveugle des sondeurs, cette différence est importante pour la productivité des navires.

Les programmes d'analyse des données de navigation et des données acoustiques ont été automatisés au maximum afin de pouvoir analyser de nouvelles campagnes le plus rapidement et le plus facilement possible. Il sera donc possible d'augmenter le nombre de campagnes traitées afin d'obtenir une analyse statistique plus précise, ce qui permettrait de mieux appréhender l'influence des paramètres secondaires décrits dans cette partie. Cela pourra également permettre d'analyser les données provenant d'un grand nombre de navires et de comparer les conditions d'apparition du phénomène de *Bubble Sweep-down*, comme cela a été réalisé entre le *Pourquoi pas ?* et la *Thalassa*. Les influences des caractéristiques du navire telles que les rapports entre longueur, largeur et tirant d'eau, les coefficients (de bloc ou prismatique) et les formes d'étrave sur la génération de bulles pourront ainsi être étudiées. Les résultats expérimentaux pourront ainsi être validés grâce à cette méthode d'analyse. De

2.4. CONCLUSION

même, l'efficacité des différentes solutions choisies pour réduire le passage de bulles sous les sonars (gondole, forme "dentée", etc) pourra être analysée de façon précise.

Ces analyses ont permis une meilleure caractérisation des conditions de navigation propices à la génération de bulles autour de la carène de la *Thalassa* et du *Pourquoi pas ?*. Pour la suite de notre étude, cela facilitera le développement de la méthode expérimentale permettant d'étudier le phénomène en bassin. On cherchera à reproduire les états de mer correspondant, en prenant en compte la vitesse du navire, et surtout la hauteur significative et la période de la houle rencontrées dans ces conditions.

2.4. CONCLUSION

Chapitre 3

Montage expérimental et techniques développées

Sommaire

3.1	Moyens d'essais	71
3.1.1	Bassin de circulation de Boulogne-sur-Mer	71
3.1.2	Montage spécifique avec générateur de mouvement	72
3.2	Instrumentation	74
3.3	Méthodologie	78
3.3.1	Lois de similitudes et effets d'échelle	78
3.3.2	Paramètres d'essais	80
3.3.3	Calcul des mouvements	82
3.3.4	Synchronisation des mouvements avec la houle	84
3.3.5	Configurations d'essais	86

Comme indiqué en introduction, les techniques actuelles -expérimentales et/ou numériques- ne sont pas suffisamment performantes pour obtenir une bonne prédiction de la génération et de la propagation des bulles autour d'une carène de navire en présence de houle. Les problématiques de *Bubble Sweep-down*, même spécifiées dans le cahier des charges lors de la conception des navires, peuvent s'avérer très pénalisantes sur certains navires scientifiques. C'est notamment le cas du *Pourquoi pas ?*, qui malgré des essais spécifiques en bassin, est fortement affecté par le passage de bulles sous la coque. L'analyse des données acoustiques du chapitre précédent a permis de confirmer que le pourcentage de données perturbées est très important pour des vents supérieurs à 20 nœuds.

Les essais classiques réalisés en bassin de traction n'ont pas permis de visualiser le phénomène d'entraînement d'air. Le comportement des bulles dans l'écoulement est alors simulé par l'injection d'un colorant inerte, ne prenant pas en compte la dynamique de celles-ci. De plus l'emplacement de l'injection influe fortement sur le passage ou non du colorant sous la carène. Le choix de l'emplacement des transducteurs est alors souvent basé sur les seules lignes de courant obtenues par ce type d'essais ou par simulation numérique.

On propose ici de développer une méthode expérimentale originale en bassin de circulation, permettant d'étudier le phénomène de *Bubble Sweep-down* dans sa globalité. Ces essais nécessitent le couplage de simulations numériques avec l'utilisation d'un générateur de mouvements. Ce chapitre est consacré à la mise en place de ces essais, en décrivant tout d'abord les moyens d'essais mis en œuvre, puis l'instrumentation nécessaire, et enfin la méthodologie développée afin d'aboutir aux configurations d'essais choisies.

La phase de développement consiste à reproduire en bassin les conditions de mer rencontrées lors de la campagne en mer ESSBULLE 2 réalisée en baie de Douarnenez par le *Pourquoi pas ?* en février 2006. Lors de ces essais, le phénomène de *Bubble Sweep-down* a pu être observé sur les sondeurs, et confirmé à l'aide de caméras sous-marines installées sous la gondole.

Le *Pourquoi pas ?* ayant déjà été décrit dans le paragraphe 2.3.2, on rappelle simplement ici ses caractéristiques principales : une longueur entre perpendiculaire $L_{pp} = 94$ m, une largeur $B = 20$ m et un tirant d'eau en opération $T = 5,45$ m, pour un déplacement $\Delta = 5970$ t.

3.1 Moyens d'essais

3.1.1 Bassin de circulation de Boulogne-sur-Mer

Cette technique expérimentale a été développée au bassin de circulation à houle et courant de l'Ifremer à Boulogne-sur-Mer (figure 3.1). La zone de travail (partie supérieure du bassin) mesure 18 m de long, 4 m de large et 2 m de profondeur. Les pompes installées dans la partie inférieure permettent de générer une vitesse de courant dans la veine entre 0,2 et 2 m/s. Le bassin possède également une fenêtre d'observation de 8 m × 2 m facilitant l'identification et la caractérisation de phénomènes sous-marins.

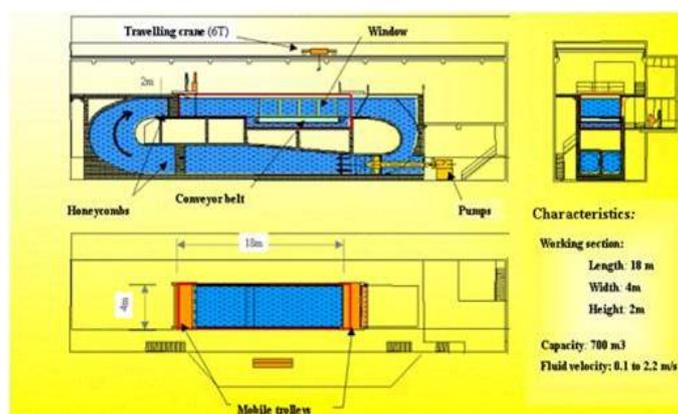


FIGURE 3.1 – Vue schématique du bassin de circulation de Boulogne-sur-Mer

Cette installation est équipée d'un générateur de houle, composé de 8 panneaux indépendants de 50 cm de large et 50 cm de profondeur (figure 3.2). Ce générateur de houle peut être placé en amont ou en aval de la zone de travail, permettant la génération de houle dans le sens du courant ou contre le courant. Une houle régulière ou irrégulière peut être générée, pour des fréquences comprises entre 0,5 et 2 Hz et une amplitude maximale $A = 280$ mm.



FIGURE 3.2 – Vue du générateur avec houle régulière

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

$$IT = \sqrt{\frac{1}{3} \frac{u'^2 + v'^2 + w'^2}{\bar{u}^2 + \bar{v}^2 + \bar{w}^2}} \quad (3.1)$$

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

Lorsque le batteur est enlevé l'intensité turbulente est faible, proche de 6% en surface. Une fois le batteur positionné en amont cette intensité turbulente atteint 15%, proche des intensités turbulentes observables en mer. Les caractéristiques de l'écoulement incident, ayant un impact significatif sur le phénomène étudié, seront détaillées pour chaque configuration (sans batteur, avec batteur immergé et avec houle) par les mesures de l'écoulement présentées dans le chapitre 5.

3.1.2 Montage spécifique avec générateur de mouvement

Contrairement aux essais (dits "classiques") en bassin de traction où la maquette est mise en mouvement sur une longueur importante, la vitesse d'avance est ici simulée par le courant. Le taux important de turbulence dans l'écoulement est également une différence majeure entre ces essais et les essais classiques. De plus, cette nouvelle méthode consiste à imposer les mouvements à la maquette par un générateur de mouvements (hexapode). En effet, lors des essais classiques le modèle est libre en tangage et en pilonnement et répond dynamiquement aux sollicitations de la houle.

3.1. MOYENS D'ESSAIS

Avec cette technique, les mouvements sont calculés par simulation numérique au préalable, et générés par l'hexapode.

Le montage de l'hexapode, fixé sous le pont roulant du bassin, et de la maquette du *Pourquoi pas ?* est visible sur la figure 3.3.



FIGURE 3.3 – [Gauche] Vue du montage du générateur de mouvement (hexapode). [Droite] Vue du montage de la maquette du *Pourquoi pas ?*

Cet outil permet de générer tout mouvement dans les six degrés de liberté. La maquette peut ainsi être positionnée selon sa ligne de flottaison. Il n'est donc pas nécessaire de l'équilibrer en terme de déplacement, d'inertie, ni de centre de gravité, ce qui facilite sa conception. L'utilisation de l'hexapode permet également d'étudier indépendamment les effets de la houle et des mouvements sur la génération de bulles. Enfin, il est possible de travailler sur la partie avant de la maquette seulement (cf. figure 3.4). Cette configuration est très avantageuse dans le bassin de circulation, où l'espace est relativement limité, et permet surtout de supprimer les houles parasites générées par les mouvements du tableau arrière de la maquette.

Avant de réaliser les essais pour l'étude de la génération de bulles à proprement parler, des mesures de résistance à l'avancement ont été réalisées avec la maquette complète. Pour ces essais le générateur de houle a été relevé, assurant ainsi une intensité turbulente relativement faible (6% en surface). Ces mesures ont été comparées aux résultats de mesures en bassin de traction afin de vérifier que l'écoulement est bien représentatif de la réalité. La technique d'extrapolation au réel (méthode de Froude), ainsi que les courbes obtenues sont reportées en annexe A. Les erreurs par rapport aux résultats obtenus au bassin de traction de MARIN sont toujours inférieures à 10%.



FIGURE 3.4 – Vue du tiers avant de la maquette du *Pourquoi pas ?*

Après vérification à partir de résultats de mesures de l'écoulement que la coupure de la maquette au niveau du tiers avant n'a pas d'influence sur l'écoulement autour de l'étrave, il a été décidé de réaliser la suite de l'étude avec la partie avant de la maquette du *Pourquoi pas ?* uniquement.

3.2 Instrumentation

La génération de bulles dans le bassin sera conditionnée par les caractéristiques de l'écoulement incident, de la houle et des mouvements. Ces éléments doivent donc être connus avec précision.

Mesure des mouvements

Deux logiciels indépendants sont installés avec le générateur de mouvements développé par la société Symétrie. SYM_Motion permet de contrôler les mouvements de l'hexapode. Un mode positionnement simple permet de définir la position initiale de la maquette (ligne de flottaison, assiette). Puis un mode trajectoire permet d'imposer les mouvements, soit en imposant des sinusoides pour les degrés de liberté choisis, soit directement en entrant en fichier ASCII contenant les trajectoires à imposer. La position du centre de gravité à partir duquel sont imposées ces trajectoires peut être réglée manuellement à partir de cette interface.

Les mouvements de la maquette sont ensuite enregistrés en temps réel par le logiciel SYM_Measure, à une fréquence de 100 Hz. La précision de ces déplacements est extrêmement bonne, avec des erreurs par rapport aux consignes inférieures à 0,1 mm en translation et 0,01° en rotation.

Mesure de la houle

À cause de l'interaction entre le courant dans la veine et le batteur, la houle générée fluctue en amplitude et diffère de la consigne émise. Des essais spécifiques ont été réalisés afin de caractériser la houle (amplitude, longueur d'onde et célérité) dans les conditions de courant souhaitées. Les résultats de ces essais sont présentés en annexe B. Malgré cela, il est nécessaire de connaître l'évolution de la surface libre au cours du temps pendant chaque essai. Des sondes à houle de type résistive ont donc 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. Plongées dans l'eau du bassin, les sondes délivrent un courant proportionnel à la hauteur d'immersion des tiges en acier. La calibration permet d'obtenir directement l'élévation de la surface libre à travers le logiciel Labview. Suivant les essais, une à deux sondes ont été placées entre 1 et 2 m en amont de l'étrave de la maquette.

Le développement de techniques optiques pour mesurer les déformations de la surface libre en deux dimensions, telles que la stéréo-vision, la stéréo-réfraction ou par balayage laser (Boucheron *et al.*, 2014) est suivi avec attention. Ces méthodes non-intrusives permettraient d'obtenir des mesures de la houle, et les déformations de celle-ci, au plus proche de l'étrave.

Mesure de l'écoulement

Les mesures de l'écoulement ont été effectuées au bassin grâce à la technique optique non intrusive Particle Image Velocimetry (PIV). Contrairement à la seconde technique optique classique Laser Doppler Velocimetry (LDV) permettant d'obtenir les trois composantes de la vitesse en un point, la PIV permet d'obtenir des champs de vitesse en un plan. Celle-ci est donc mieux adaptée pour étudier un écoulement dans un volume relativement important.

Malgré de récents développements permettant d'obtenir des mesures PIV 3D, la technique utilisée ici est celle de la PIV 2D classique. Pour une revue détaillée de ces développements et de la technique PIV en général, le lecteur pourra se référer à des travaux tels que ceux d'Adrian (2005) ou de Raffel *et al.* (2007). Pour ces mesures, le bassin d'essai estensemencé par des particules de densité suffisamment proche de celle de l'eau et suffisamment petites pour suivre l'écoulement de façon neutre, sans causer de perturbation. Les particules utilisées dans le bassin de circulation sont des billes de verre argentées de 15 μm de diamètre. La configuration en écoulement fermé permet d'obtenir un ensemencement continue homogène. Un laser à impulsion de type Nd-YAG (Neodymium-doped Yttrium Aluminium Garnet) et un système optique composé principalement de lentilles cylindriques permettent de générer un plan lumineux (voir figure 3.6) en deux instants successifs avec un intervalle de temps δt très faible. Une caméra digitale synchronisée au système laser permet d'obtenir

la position des particules dans le plan en ces deux instants. Enfin, pour chaque image des zones d'interrogation sont générées afin de déterminer le déplacement des particules entre les deux instants par inter-corrélation des niveaux de gris. Le déplacement et l'intervalle de temps étant connus, on peut en déduire la vitesse locale de l'écoulement pour chaque zone d'interrogation du plan.

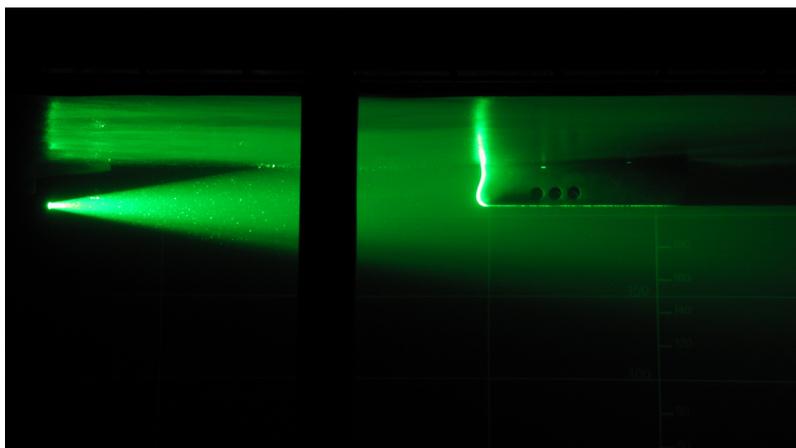


FIGURE 3.5 – Vue de la nappe laser -dans l'axe de la maquette- utilisée par le système d'acquisition

Le laser utilisé fonctionne à une fréquence maximale de 15 Hz (fréquence d'émission du couple d'impulsion laser, qui correspond par conséquent à la fréquence de la mesure du champ de vitesse). Celui-ci délivre une énergie de 120 mJ, à une longueur d'onde de 532 nm. Les images des particules sont acquises grâce à une caméra CCD d'une résolution de 1600×1200 pixel², synchronisée avec le laser à une fréquence de 15 Hz. La caméra utilisée est placée perpendiculairement au plan laser. Pour réaliser des acquisitions dans des plans verticaux, la caméra est placée à l'extérieur du bassin devant la fenêtre d'observation à une distance d'environ 2 m de l'axe central de la veine. 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. Une description plus approfondie de la méthode PIV et de son application au bassin d'essai de Boulogne-sur-Mer peut être trouvée dans Bouhoubeyny (2012)

Les différents plans étudiés, ainsi que l'analyse des écoulements seront présentés dans le chapitre 5.

Visualisation de l'entraînement d'air

L'objectif principal de la thèse est de mieux comprendre les mécanismes d'entraînement d'air, de génération et de propagation des bulles. Pour cela, deux systèmes vidéos synchronisés ont été utilisés. Des caméras digitales CMOS à haute vitesse et haute performance ont été employées pour la visualisation de la surface libre à proximité de l'étrave. De plus, le système PIV a également été utilisé en mode "single frame" (image unique) afin d'acquérir des images sous-marines de bonne qualité.

Les images obtenues et les phénomènes de génération de bulles sont décrits dans le chapitre 4.

Illustration du montage

Les schémas ci-dessous résument le montage expérimental :

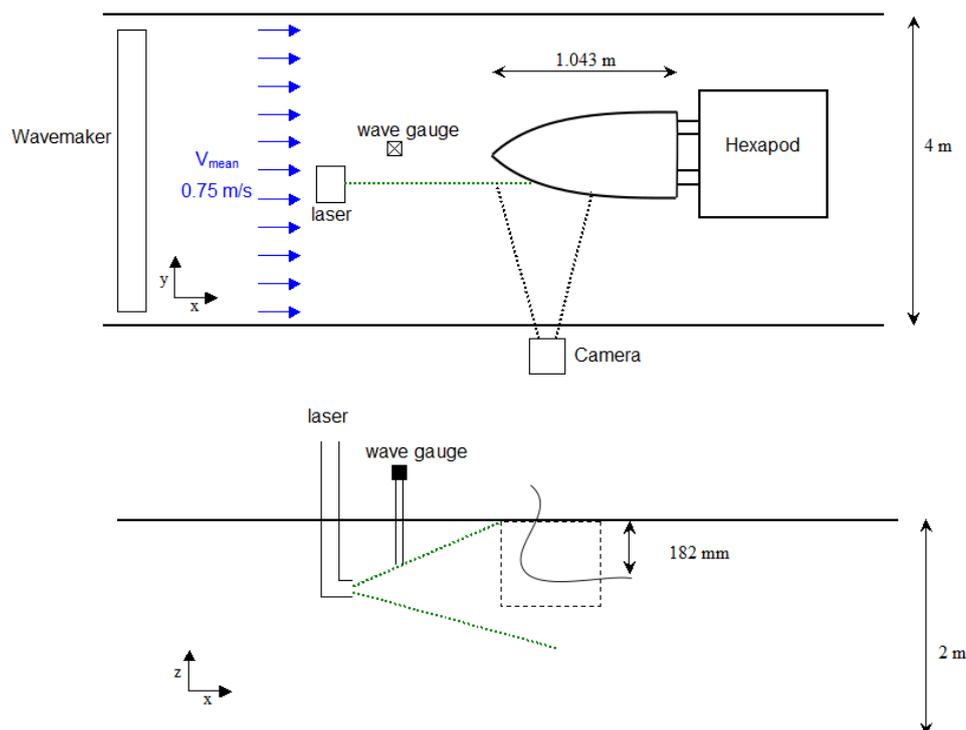


FIGURE 3.6 – Schémas du montage expérimental. [Haut] Vue du dessus. [Bas] Vue de profil.

3.3 Méthodologie

3.3.1 Lois de similitudes et effets d'échelle

Dans la plupart des cas d'interaction fluide-structure, trois types de force ont une importance significative sur l'écoulement. Ces forces, obtenues à partir des équations fondamentales de la dynamique (équations de Navier-Stokes dans le cas d'un fluide), sont les forces d'inertie F_i , les forces de gravité F_g et les forces de viscosité F_v . Deux nombres adimensionnels principaux ont été définis afin de caractériser l'importance relative de ces forces, le nombre de Froude Fr et le nombre de Reynolds Re .

$$\begin{aligned} Fr &= \frac{U}{\sqrt{gl}} \propto \frac{F_i}{F_g} \\ Re &= \frac{Ul}{\nu} \propto \frac{F_i}{F_v} \end{aligned} \tag{3.2}$$

où U est la vitesse du fluide, g l'accélération de la pesanteur, l la longueur caractéristique de l'interaction et ν la viscosité cinématique.

Comme indiqué précédemment, les éléments prépondérants à prendre en compte dans cette étude sont la houle, les mouvements du navire et l'interaction de l'étrave avec la surface libre. Pour étudier ces phénomènes en bassin, la similitude de Froude s'impose, et permet de conserver le rapport entre les forces d'inertie et les forces gravitationnelles liées à la houle et aux déformations de la surface libre. Grâce à cette similitude, l'écoulement autour de la maquette est bien représentatif de l'écoulement réel, comme cela a pu être vérifié lors des calculs de résistance à l'avancement (annexe A).

Cependant, il est impossible de respecter à la fois la similitude de Froude et la similitude de Reynolds en conservant les caractéristiques physiques du fluide. Le nombre de Reynolds est donc largement plus faible lors des essais en bassin que pour l'écoulement autour du navire à échelle réelle (d'un facteur ~ 100 , comme on pourra le voir par la suite). Les effets de la viscosité affectent principalement la couche limite, très proche de la coque et sont souvent négligeables dans le reste du volume. La propagation des bulles le long de la carène peut néanmoins être affectée. La turbulence de l'écoulement autour de la maquette sera également largement réduite. Ce dernier point est compensé dans cette configuration en bassin de circulation par une forte intensité turbulente de l'écoulement incident, comme cela a été décrit dans le paragraphe 3.1.1.

La problématique de similitude est également prépondérante pour la génération et le comportement des bulles dans l'écoulement. La dynamique des bulles est liée aux forces d'inertie mais également aux forces de tension superficielle, F_t , assurant

la stabilité de celles-ci. Le diamètre d'une bulle résulte du rapport entre les forces de cisaillement présentes dans l'écoulement et ces forces de tension superficielle, inversement proportionnelle au rayon de la bulle. Cette dynamique est caractérisée par le nombre de Webber :

$$We = \frac{\rho l U^2}{\gamma} \propto \frac{F_i}{F_t} \quad (3.3)$$

avec γ la tension superficielle entre l'air et l'eau.

De la même manière que pour le nombre de Reynolds, le nombre de Webber ne peut être conservé (différence d'un facteur ~ 1000). La similitude de Froude impose en bassin une amplitude de houle et une vitesse de l'écoulement plus faible qu'au réel. Par conséquent les forces de cisaillement dans l'écoulement proche de la maquette seront également fortement réduites. La quantité d'air entraîné sous la surface sera également réduite. Les forces de cisaillement sont alors insuffisantes pour casser les cavités d'air en bulles microscopiques comme cela peut être observé en mer. La taille des bulles observées en bassin est de l'ordre du millimètre, ce qui entraîne une vitesse ascensionnelle beaucoup plus élevée et diminue fortement le phénomène d'entraînement d'air sous la carène. Par ailleurs, la salinité de l'eau affecte directement la distribution en taille des bulles. La présence de sel diminuant les événements de coalescence et augmente donc la quantité de petites bulles en mer (Cartmill et Su, 1993), (Kracht et Finch, 2009).

Ces effets d'échelle contrarient l'observation du phénomène de *Bubble Sweep-down* en bassin d'essai, ainsi que l'extrapolation des résultats au réel. La méthodologie décrite ici doit permettre une meilleure visualisation de la génération des bulles et une approche plus avancée combinant l'analyse de l'entraînement d'air et de l'écoulement. Afin de limiter un maximum les effets d'échelle, le modèle a été choisi le plus grand possible en fonction des caractéristiques du bassin (espace, génération de houle et de courant). Une maquette au 1/30 du *Pourquoi pas ?* a donc été conçue et permet de générer les conditions d'essais sans effets de blocage dans le bassin. À cette échelle, la maquette possède une longueur entre perpendiculaire $L_{pp} = 3,13$ m, une largeur $B = 0,67$ m et un tirant d'eau de $T = 0,18$ m (cf. figure 3.3). La valeur des caractéristiques principales des essais, dont les trois nombres adimensionnels principaux, sont détaillées dans le tableau 3.1.

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

TABLE 3.1 – Résumé des caractéristiques de l'écoulement au réel et pour les essais en bassin

3.3.2 Paramètres d'essais

Comme indiqué en début de chapitre, des essais spécifiques ont été mis en place peu après les premières sorties en mer du *Pourquoi pas ?* afin de caractériser les perturbations des équipements acoustiques. Ces essais ont permis d'observer le phénomène de *Bubble Sweep-down* en mer de face pour les conditions de navigation données dans le tableau 3.1, où V correspond à la vitesse du navire, λ à la longueur d'onde, H_s à la hauteur de houle significative, et T_p à la période de pic du spectre de houle.

V (nds)	λ (m)	H_s (m)	T_p (s)
8	109	2,8	8,4

TABLE 3.2 – Conditions de navigation durant la campagne *Essbulles2* de 2006

La première étape de l'étude expérimentale du phénomène de *Bubble Sweep-down* en bassin de circulation consiste à reproduire ces conditions, le plus fidèlement possible, avec courant, houle et mouvements de la maquette. Dans cette configuration, les mouvements sont imposés par un hexapode et synchronisés avec la houle incidente. Pour cela, il est nécessaire de travailler avec une houle régulière.

Les caractéristiques de cette houle régulière sont calculées afin de conserver la densité d'énergie de la houle irrégulière rencontrée en mer. La densité d'énergie d'une houle irrégulière est donnée par l'expression suivante :

$$E = \rho g m_0 [J/m^2], \text{ avec } H_s = 4\sqrt{m_0} \quad (3.4)$$

Tandis que pour une houle sinusoïdale,

$$E = \frac{1}{2} \rho g A^2, \text{ où } A \text{ est l'amplitude } (A = H/2). \quad (3.5)$$

3.3. MÉTHODOLOGIE

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

$$m_0 = \frac{1}{2}A^2 \quad (3.6)$$

$$\text{soit } A = \frac{\sqrt{2}H_s}{4} \text{ et } H = \frac{\sqrt{2}H_s}{2} \quad (3.7)$$

Pour $H_s = 2,8$ m, la houle sinusoïdale correspondant à la même densité d'énergie possède une hauteur $H = 2,0$ m. La période T sera prise égale à T_p .

Les données d'entrée du générateur de houle sont l'amplitude et la fréquence. Le courant et l'amplitude de la houle sont directement obtenus par la similitude de Froude. À l'échelle du modèle, la vitesse d'avance est $U = V/\sqrt{30} = 0,75$ m/s. L'amplitude de la houle est $A_m = A_r/30 = 33$ mm. Pour le calcul de la fréquence, nous devons prendre en compte le fait que le modèle soit fixe et que la fréquence de rencontre est supérieure à celle de la houle.

La fréquence de rencontre f_e peut être calculée par :

$$f_e = f - \frac{V}{\lambda} \cos(\theta) \quad (3.8)$$

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

$$f_e = f + \frac{V}{\lambda} \quad (3.9)$$

On obtient finalement $f_e = 0,85$ Hz. Les conditions finales d'essai sont résumées dans le tableau 3.3.

U (m/s)	A (mm)	f_e (Hz)
0,75	33	0,85

TABLE 3.3 – Paramètres d'essais de houle et de courant, permettant de simuler les conditions de mer rencontrées lors de la campagne ESSBULLES 2.

3.3.3 Calcul des mouvements

Les mouvements à imposer à la maquette doivent ensuite être calculés pour ces conditions d'essais. Des simulations numériques ont été effectuées grâce au logiciel FREDYN (De Kat, 2001), développé au Maritime Research Institute Netherland (MARIN). Cet outil, prenant en compte les effets non-linéaires, permet de calculer les forces hydrodynamiques agissant sur la carène. Les forces de Froude-Krylov, de diffraction, de radiation, d'amortissement visqueux, des safrans et des propulseurs, de la houle et éventuellement du vent peuvent être prises en compte. Les calculs sont réalisés dans le domaine temporel grâce aux 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.

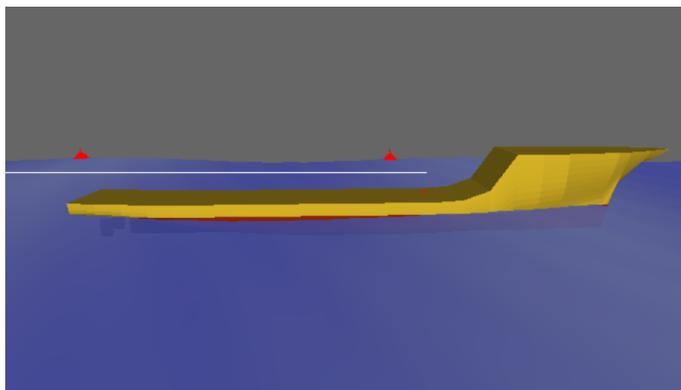


FIGURE 3.7 – Modèle numérique du *Pourquoi pas ?* sous FREDYN

Le modèle numérique est défini à partir de la géométrie, la résistance à l'avancement, et les caractéristiques des propulseurs et des safrans (une vue du modèle est présentée sur la figure 3.7). Puis les entrées de calcul sont définies : vitesse de rotation des propulseurs, direction et spectre de houle. La validation de ce modèle est réalisée grâce aux résultats d'essais de tenue à la mer réalisés au MARIN, lors de la conception du *Pourquoi pas ?* avec une maquette à l'échelle 1/16,7. Les configurations testées alors en houle irrégulière sont indiquées dans le tableau 3.4.

Configuration	1	2	3	4	5
V [nds]	5	10	5	9	5
H_s [m]	3,25	3,25	5	5	6,25
T_p [s]	9,7	9,7	12,4	12,4	12,4

TABLE 3.4 – Configurations testées pour la validation du modèle numérique

Les résultats des calculs FREDYN pour ces configurations sont donnés sur la figure 3.8. Sur ce graphique est représenté l'analyse statistique du tangage : l'écart type et l'amplitude significative (moyenne du tiers des amplitudes les plus importantes) pour les simulations numériques et les essais. Le tangage est légèrement inférieur pour le modèle numérique, notamment pour les plus grandes hauteurs significatives. Cependant la tendance est bonne et les résultats sont très similaires pour les configurations 1 et 2, plus proche des conditions de navigation décrites dans le paragraphe 3.3.2 (respectivement 0% et 8,7% d'erreur sur l'écart type et 2,3% et 1,5% sur l'amplitude significative).

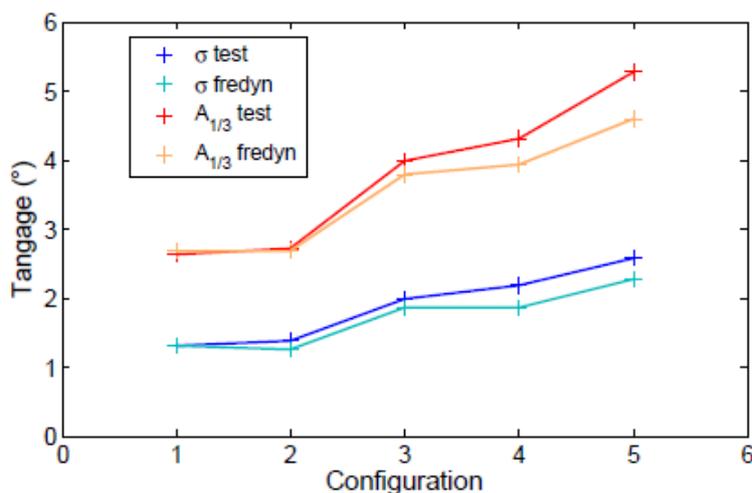


FIGURE 3.8 – Comparaison des résultats de tangage (écart type et amplitude significative) entre les simulations FREDYN et les tests de tenue à la mer

Suite à cette phase de validation, les mouvements du navire sont calculés pour les conditions simplifiées d'essai à échelle réelle : une houle régulière de hauteur $H = 2,0$ m et de période $T = 8,4$ s, pour une vitesse d'avance de 8 nœuds. Les résultats des simulations sont présentés sur la figure 3.9.

Les mouvements de cavalemt sont négligeables ($< 0,1$ m au réel) et ne sont pas représentés sur la figure. Pour la suite de l'étude, ces mouvements ne seront pas pris en considération. Dans cette configuration par mer de face, seuls les mouvements de tangage et de pilonnement sont significatifs. Il doit être souligné ici que le pilonnement est en phase avec l'élévation de la surface libre au niveau du centre de gravité du navire.

Ces résultats doivent être convertis à l'échelle (1/30) du modèle 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). On obtient finalement une amplitude de tangage de 2° et de pilonnement de 20 mm.

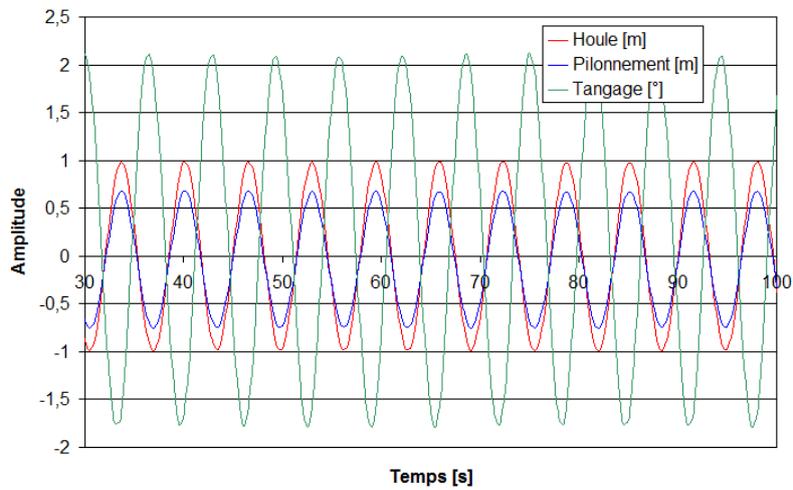


FIGURE 3.9 – Mouvements obtenus par FREDYN pour les conditions d’essais à échelle réelle

3.3.4 Synchronisation des mouvements avec la houle

Un des points clés du développement de cette 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, et se trouve synthétisée sur le diagramme de la figure 3.10.

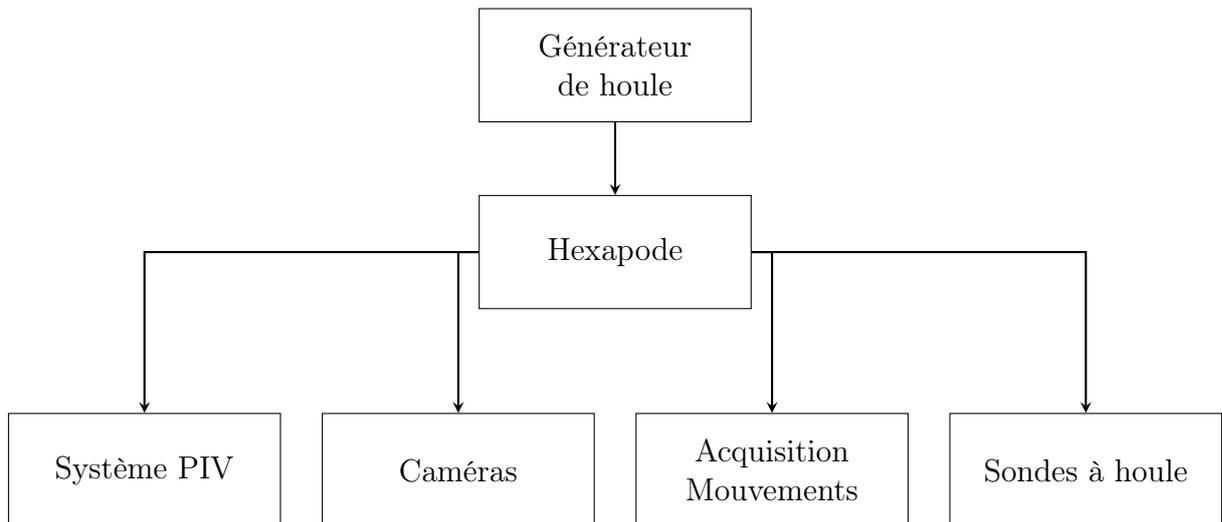


FIGURE 3.10 – Diagramme du système de synchronisation de la méthode expérimentale

3.3. MÉTHODOLOGIE

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).

Le synchronisme est vérifié a posteriori à partir des enregistrements de houle et de mouvement, comme le montre la figure 3.11. L'élévation de la surface libre au niveau du centre de gravité du modèle est obtenu 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. Les essais spécifiques (détaillés en annexe B) réalisés avec deux sondes ont permis de caractériser la houle au préalable, et d'obtenir notamment la célérité de celle-ci.

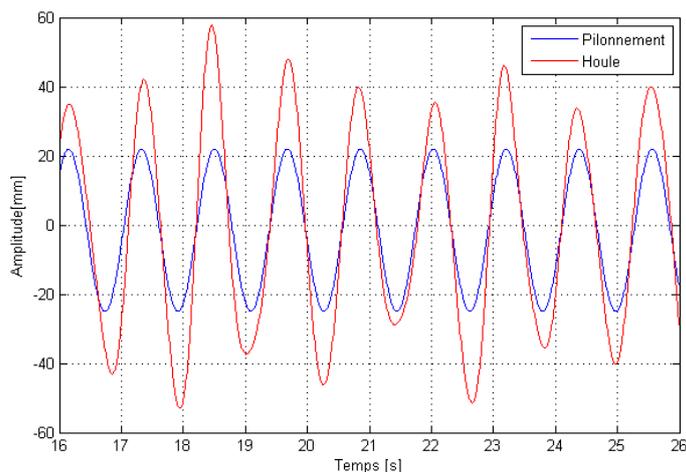


FIGURE 3.11 – Mesures de la houle et du pilonnement synchronisés

La moyenne du déphasage est calculée sur la séquence entière. Seules les séquences possédant un déphasage de moins de 10° , n'ayant pas d'influence sur la génération de bulles, sont conservées pour être analysées.

3.3.5 Configurations d'essais

De nombreux essais ont été conduits pour appréhender l'influence de chaque paramètre sur le phénomène de génération de bulles autour de l'étrave. Quatre configurations de base permettent d'étudier indépendamment les effets de la vitesse, de la houle et des mouvements sur la génération des bulles dans le bassin de circulation :

1. Dans la première configuration, le modèle est fixe et seulement soumis à un courant de vitesse $U = 0,75$ m/s.
2. Dans la seconde configuration, le modèle est fixe et soumis au courant et à la houle régulière définie dans le paragraphe 3.3.2 (une amplitude $A = 33$ mm et une fréquence $f_e = 0,85$ Hz).
3. Dans la troisième configuration, le modèle est soumis au courant et les mouvements sont imposés par l'hexapode (2° d'amplitude de tangage et 20 mm d'amplitude de pilonnement, à une fréquence $f = 0,85$ Hz).
4. Dans la quatrième configuration, le modèle est soumis au courant avec mouvements imposés en présence de houle, les mouvements étant synchronisés avec la houle.

Ces quatre configurations de bases permettent de visualiser et d'étudier les phénomènes d'entraînement d'air en bassin qui seront décrits dans le paragraphe 4.1. Pour conserver les mêmes propriétés d'écoulement incident pour ces quatre configurations, tous ces essais ont été réalisés avec le générateur de houle immergé provoquant une intensité turbulente de 15%, comme indiqué dans le paragraphe 3.1.1.

Des essais complémentaires ont été effectués afin de réaliser une étude paramétrique de la génération de bulles. Le tableau 3.5 résume les configurations testées, grâce auxquelles chaque paramètre est étudié indépendamment.

- Les essais 5 à 12 permettent d'étudier l'influence de l'amplitude puis de la fréquence de la houle. L'amplitude A du tableau 3.5 correspond à l'entrée du générateur de houle et diffère de l'amplitude moyenne mesurée comme cela sera détaillé dans le chapitre 4. Les variations sont les suivantes : $A = 20 ; 40 ; 55 ; 65$ et 85 mm avec $f = 0,85$ Hz pour les essais 5 à 9 et $f = 0,65 ; 0,75$ et 1,00 Hz avec $A = 75$ mm pour les essais 10 à 12.
- Les essais 13 à 18 permettent d'étudier l'influence de l'amplitude puis de la fréquence des mouvements. Le coefficient d'amplitude (CA) est directement appliqué aux amplitudes des trajectoires de l'hexapode : $CA = 0,75 ; 1,25$ et 1,50 avec $f = 0,85$ Hz pour les essais 13 à 15 et $f = 0,65 ; 0,75$ et 1,00 Hz avec $CA = 1$ pour les essais 16 à 18.

3.3. MÉTHODOLOGIE

Config.	V	Houle		Mouvements	
	(nds)	A (mm)	f (Hz)	CA	f (Hz)
1 (19 - 20)	8 (4 - 6)	No -	No -	No -	No -
2 (5 - 9) (10 - 12) (21 - 22)	8 - - (4 - 6)	75 (20 - 85) - -	0,85 - (0,65 - 1.0) -	No - - -	No - - -
3 (13 - 15) (16 - 18) (23 - 24)	8 - - (4 - 6)	No - - -	No - - -	1 (0,75 - 1,5) - -	0,85 - (0,65 - 1,0) -
4 (25 - 26)	8 (4 - 6)	75 -	0,85 -	1 -	0,85 -

TABLE 3.5 – Description des quatre configurations de base. Les informations entre parenthèses correspondent aux variations réalisées pour l'étude paramétrique de la génération des bulles dans le bassin.

- Les essais 19 à 26 permettent d'étudier l'influence de la vitesse du courant : les quatre configurations de base ont été répétées pour les vitesses d'avance correspondantes de 4 et 6 nœuds.
- Les essais 27 à 30, non indiqués dans le tableau, permettent d'étudier l'influence de la synchronisation entre la houle et les mouvements. La configuration 4 est alors répétée pour différents déphasages.
- Enfin les essais 31 et 32 permettent d'étudier l'influence de la turbulence de l'écoulement sur la génération de bulles. Pour ces essais, les configurations 1 et 3 ont été répétées sans le générateur de houle, diminuant ainsi l'intensité turbulente de l'écoulement incident à $IT = 6\%$.

Chapitre 4

Analyse de la génération de bulles en bassin de circulation

Sommaire

4.1	Phénomènes observés	91
4.1.1	Mécanismes d'entraînement d'air	91
4.1.2	Fréquence des nuages de bulles	96
4.2	Méthode de détection de bulles	98
4.3	Caractérisation des mécanismes de génération de bulles .	104
4.3.1	Configuration 1 : Courant	104
4.3.2	Configuration 2 : Courant et houle	105
4.3.3	Configuration 3 : Courant et Mouvements	106
4.3.4	Configuration 4 : Courant, houle et mouvements	106
4.4	Étude paramétrique de la génération de bulles	108
4.4.1	Influence des caractéristiques de la houle	108
4.4.2	Influence de la dynamique du navire	110
4.4.3	Influence de la synchronisation	112
4.4.4	Discussion	113
4.5	Conclusion	116

Les techniques d'essais décrites dans la partie 3 sont développées spécifiquement pour l'étude de la génération de bulles. Elles permettent d'apporter une nouvelle approche du phénomène en obtenant un écoulement turbulent autour de l'étrave, représentatif de réelles conditions de mer avec houle et mouvements. Ce chapitre est consacré à la description et à l'analyse des phénomènes observés dans ces conditions. Différents mécanismes d'entraînement d'air, rencontrés selon les conditions

d'essai, sont décrits. Une méthode d'analyse d'images est développée afin de mieux caractériser ces mécanismes. Enfin, l'influence de chaque paramètre d'essais est étudiée puis discutée, en prenant en compte les effets d'échelles décrits dans le chapitre précédent.

4.1 Phénomènes observés

4.1.1 Mécanismes d'entraînement d'air

Grâce aux quatre configurations d'essais de base décrites dans le paragraphe 3.3.5, les phénomènes d'entraînement d'air et de génération de bulles ont pu être observés. Deux mécanismes distincts ont été détectés et sont présentés sur la figure 4.1.

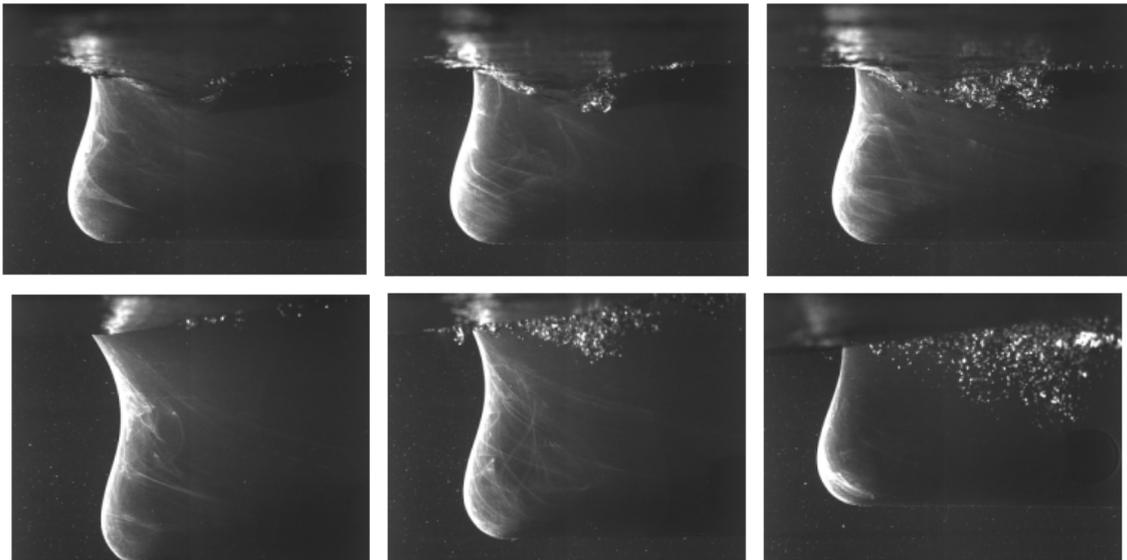


FIGURE 4.1 – Visualisation des mécanismes d'entraînement d'air observés : entraînement tourbillonnaire (images du haut) ou par déferlement de la vague d'étrave (images du bas)

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

des séquences d'essais. On peut noter également que la cavité et l'entraînement d'air peuvent être amplifiés par les mouvements de la maquette.

Ce premier type d'entraînement d'air est représenté par le schéma ci-dessous :

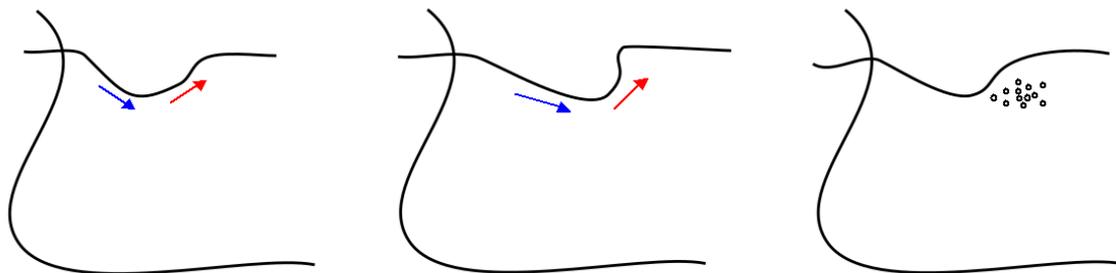


FIGURE 4.2 – Explication schématique du phénomène d'entraînement tourbillonnaire

La formation de la cavité a lieu lorsque l'écoulement proche de la surface présente en fort gradient de vitesse au contact de l'étrave, avec des vitesses plongeantes puis des vitesses ascendantes relativement proches. Lorsque ce gradient de vitesse devient trop important la cavité se creuse et devient instable. On observe alors l'apparition d'un tourbillon (dont l'axe principal est transverse au plan de mesure), provoquant un entraînement d'air et la formation du nuage de bulles correspondant.

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

Dans la suite du manuscrit, on fera référence aux deux mécanismes d'entraînement d'air respectivement par les termes d'entraînement tourbillonnaire ou de déferlement. Ces deux mécanismes sont bien distincts et seront étudiés indépendamment, mais il peut arriver que le déferlement ait lieu en présence de détachement tourbillonnaire. Dans ce cas les phénomènes se superposent pour générer un nuage de bulles important.

La synchronisation entre les différentes caméras permet de corréler l'évolution de la surface libre avec la génération de bulles, comme on peut le voir sur les figures 4.3 et 4.4 pour le cas de l'entraînement d'air par déferlement. Sur ces figures sont représentées six instants du mécanisme d'entraînement d'air, à la fois par visualisation sous-marine (images de gauche) ou au-dessus de la surface libre (images de droite). L'intervalle de temps entre ces instants correspond à deux images pour une acquisition à 15 Hz, soit 0,13 s. Les mouvements correspondants (tangage et pilonnement), ainsi que l'élévation de la surface libre au niveau de l'étrave sont représentés sur la figure 4.5.

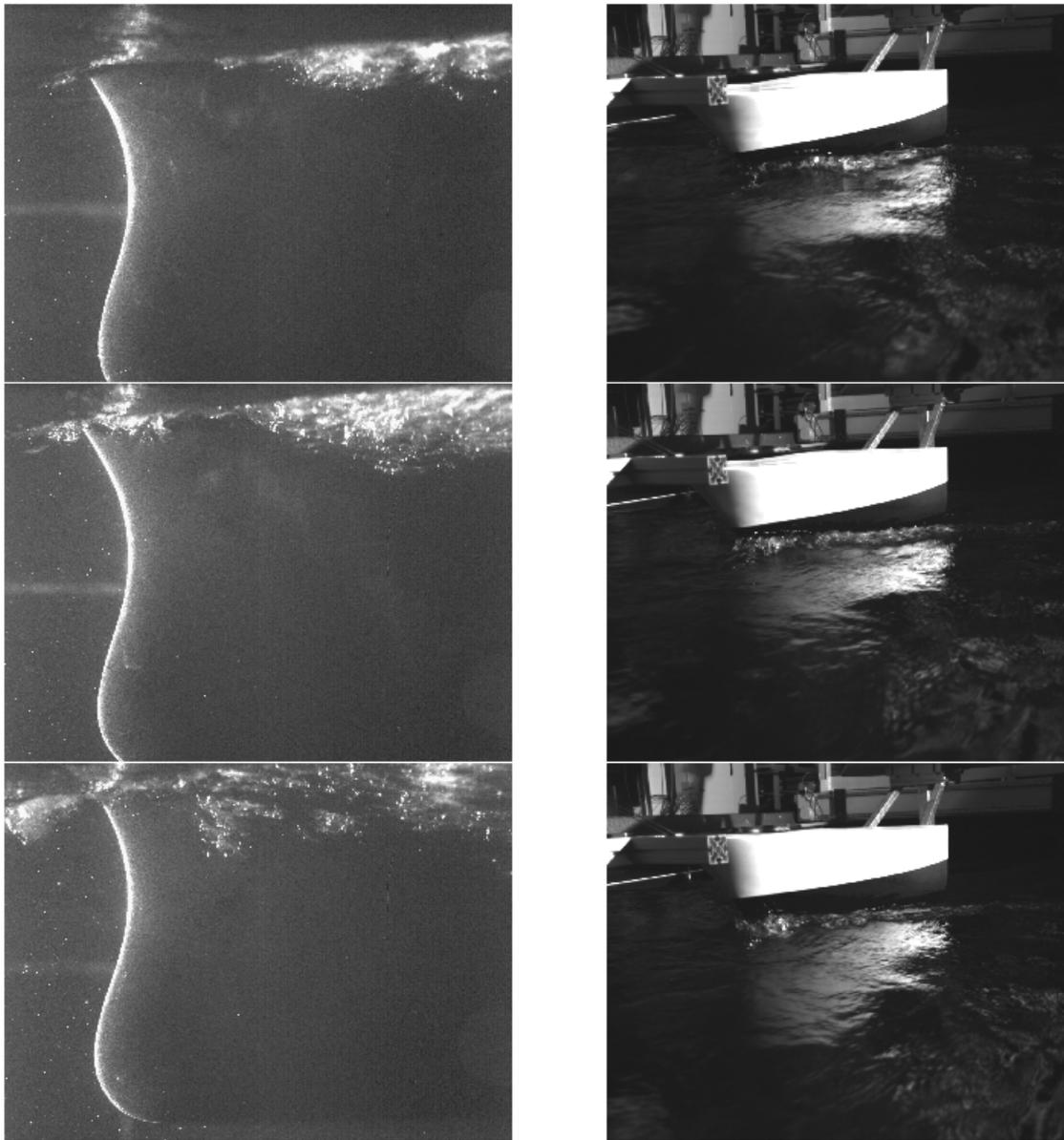


FIGURE 4.3 – Visualisation simultanée de la génération d’un nuage de bulles (gauche) et de la vague d’étrave (droite) durant un déferlement aux instants t_1 , t_2 et t_3 , indiqués sur la figure 4.5

, correspondant à la phase d’initiation du phénomène.

Les deux instants t_1 et t_2 de la figure 4.3 correspondent à un creux du signal de tangage, et donc à la position de l’étrave la plus basse. La vague incidente génère un déferlement au niveau de l’étrave, lors de la phase de plongeon des mouvements de l’étrave. Le déferlement a lieu sur une zone relativement étendue, partant de l’évase-

4.1. PHÉNOMÈNES OBSERVÉS

ment de la forme et remontant jusqu'à l'étrave. On observe donc une génération de bulles dès les instants t_1 et t_2 dans cette zone (partie supérieure droite des images sous-marines). La vague d'étrave est entièrement formée à t_2 , et l'impact à l'étrave a lieu avant t_3 (instant correspondant au pic de la houle incidente). Une visualisation de la surface libre aux instants t_2 et t_3 est présentée sur la figure 4.6.

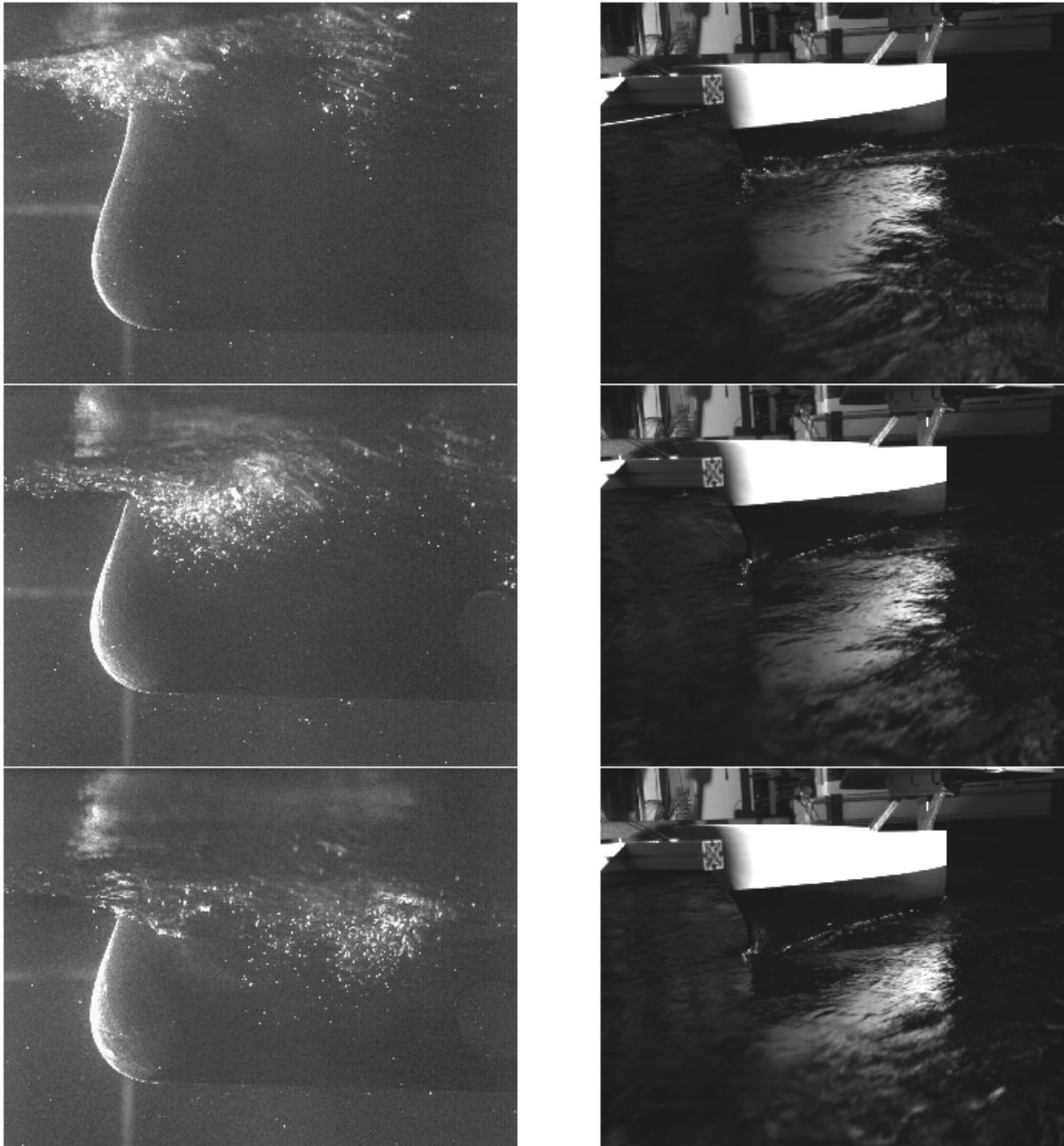


FIGURE 4.4 – Visualisation simultanée de la génération d'un nuage de bulles (gauche) et de la vague d'étrave (droite) durant un déferlement aux instants t_4 , t_5 et t_6 , indiqués sur la figure 4.5

4.1. PHÉNOMÈNES OBSERVÉS

La figure 4.4 (t_4 , t_5 et t_6) correspond à la remontée de l'étrave. Le déferlement généré par la houle incidente provoque un entraînement d'air à l'avant de la maquette et la formation d'un nuage de bulles. Ce nuage est entraîné en profondeur par le jet plongeant, au moment où l'étrave atteint la position la plus élevée (entre t_5 et t_6).

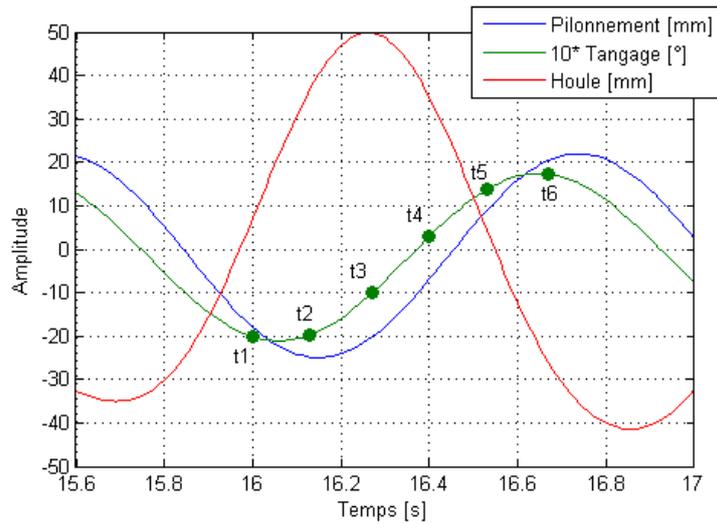


FIGURE 4.5 – Tangage, pilonnement et élévation de la surface libre (au niveau de l'étrave) durant les mécanismes de déferlement et d'entraînement d'air ($t_1 \rightarrow t_6$)

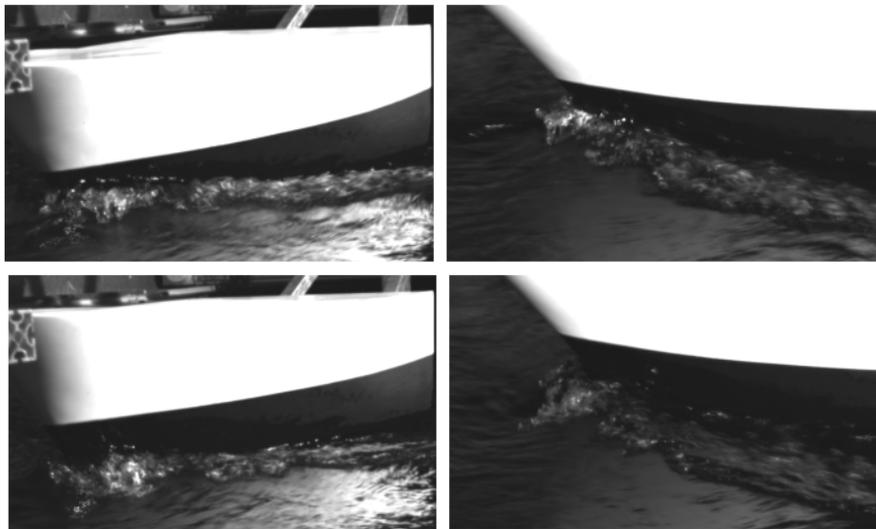


FIGURE 4.6 – Visualisation de la surface libre aux instants t_2 (images du haut) et t_3 (images du bas)

4.1.2 Fréquence des nuages de bulles

Afin de déterminer les conditions d'apparition des phénomènes décrits dans le paragraphe précédent, on s'intéresse ici à leur fréquence d'occurrence. La fréquence des deux mécanismes d'entraînement d'air est déterminée pour chaque configuration à partir de l'analyse des vidéos sous-marines. Les résultats obtenus pour les quatre configurations d'essais sont présentés sur la figure 4.7.

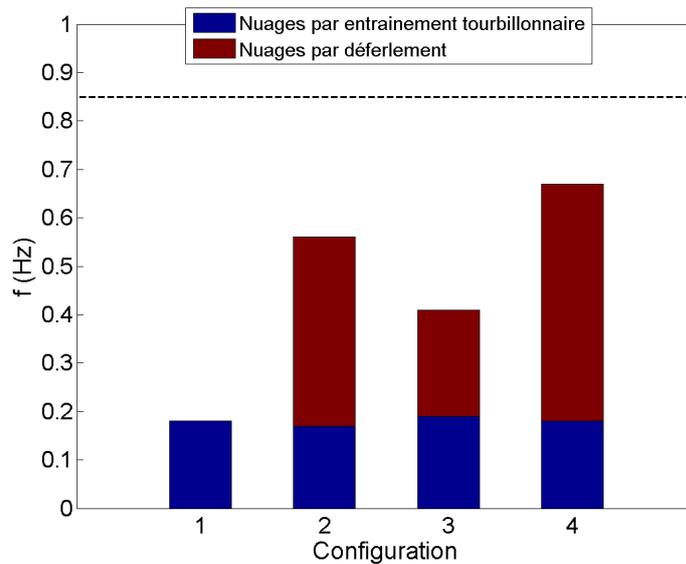


FIGURE 4.7 – Fréquences d'apparition des nuages de bulles, générés par entraînement tourbillonnaire ou par déferlement, pour les quatre configurations de base

Pour la première configuration, avec courant uniquement, la fréquence d'apparition des nuages de bulles est faible ($<0,2$ Hz), et uniquement due au phénomène d'entraînement tourbillonnaire. Pour la seconde configuration avec houle et courant, le phénomène de déferlement apparaît. La fréquence des nuages de bulles augmente jusqu'à atteindre une génération de bulles pour environ sept vagues sur dix : une fréquence de $0,59$ Hz pour une fréquence de houle de $0,85$ Hz. Le phénomène de déferlement est deux fois plus fréquent que l'entraînement tourbillonnaire. Pour le troisième cas avec mouvements et courant, la fréquence des nuages de bulles est environ deux fois plus élevée que pour le premier cas ($0,40$ Hz). Les deux mécanismes d'entraînement d'air apparaissent ici à des fréquences similaires. Les mouvements de la maquette provoquent moins de déferlement que la présence de houle. Pour la dernière configuration avec courant, houle et mouvements, la combinaison des sollicitations provoque un entraînement d'air pour huit vagues sur dix ($0,66$ Hz). Dans ce cas, le phénomène de déferlement est majoritaire.

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

Ces calculs de fréquence ont été réalisés à partir de séquences vidéos de 5 minutes. La fréquence de la génération de bulles a également été calculée toute les 30 secondes afin de confirmer la convergence des résultats. La figure 4.8 montre ce procédé pour les quatre configurations de base. Les variations de la fréquence d'occurrence sont faibles, et minimales au delà de 180 secondes. Dans la suite de ce chapitre l'influence des paramètres seront testés à travers les essais décrits dans le chapitre précédent. Pour ces essais, les séquences seront limitées à trois minutes en considérant ce temps suffisant pour la convergence des mesures de la fréquence de génération de bulles.

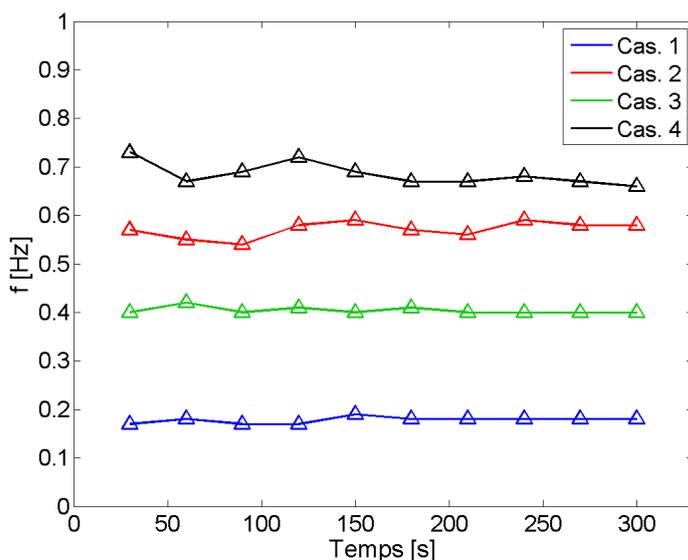


FIGURE 4.8 – Étude de la convergence des mesures de fréquence d'apparition des nuages de bulle

4.2 Méthode de détection de bulles

Les calculs des fréquences de génération des bulles décrits ci-dessus ont été réalisés par un comptage manuel de chaque événement. Cette méthode était nécessaire et a permis de bien observer chaque mécanisme d'entraînement d'air dans les différentes configurations. Cependant cette méthode est fastidieuse et soumise à l'appréciation de l'opérateur pour les événements de très faible intensité (génération de très peu de bulles). Une méthode de traitement d'image a été élaborée de façon à automatiser cette procédure. Ces traitements permettent de détecter les bulles sur les images et de suivre l'évolution des nuages de bulles. Cette analyse permet donc de mieux caractériser, quantifier et comprendre les deux mécanismes d'entraînement d'air et la dynamique des nuages de bulles.

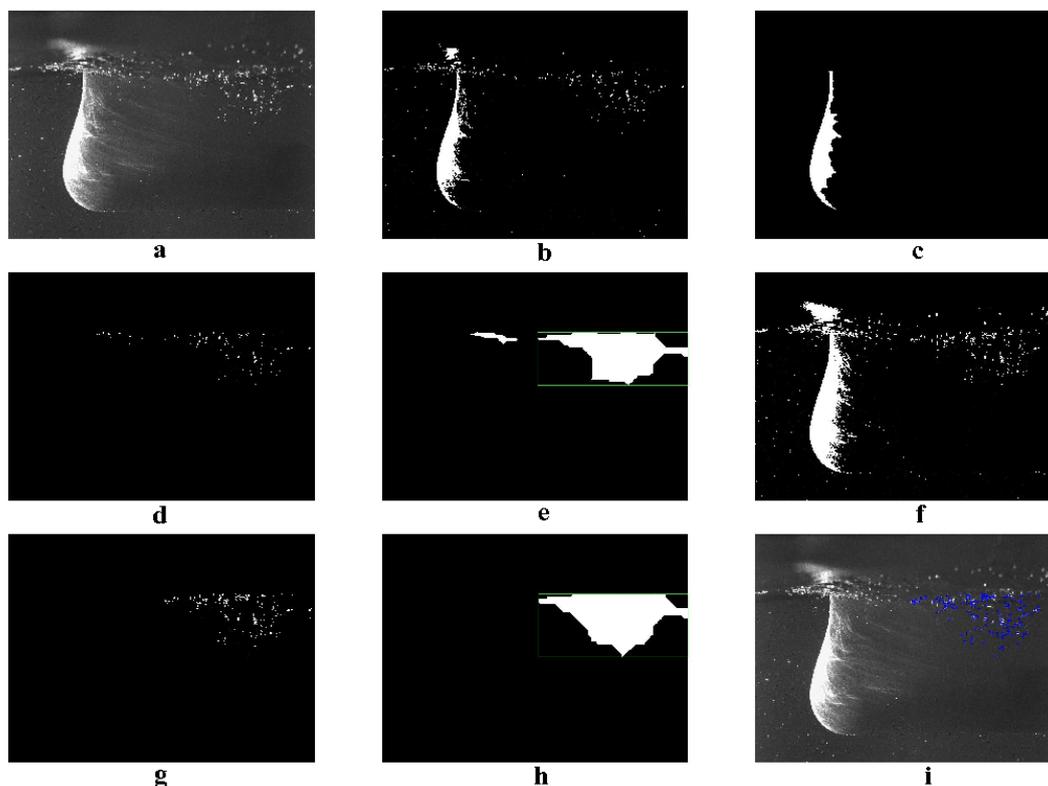


FIGURE 4.9 – Visualisation des étapes de l'analyse d'image, depuis l'image brute (a) aux détections des aérations (g) et à la localisation du nuage (h)

Chaque image est traitée par une analyse de niveau de gris sous MATLAB. Plusieurs étapes de cette analyse sont présentées sur la figure 4.9. L'image brute (a) est convertie en une image binaire (b) en prenant en compte un premier niveau de gris. Cette image permet de détecter la surface libre et l'étrave de la maquette (c). La région du nuage de bulle le plus important est ensuite détectée (d et e). Une seconde

4.2. MÉTHODE DE DÉTECTION DE BULLES

boucle avec un second niveau de gris (f) est effectuée afin d'obtenir un maximum d'information dans la zone du nuage. L'image g montre les aérations détectées au final dans cette zone. La majorité de ces détections sont des bulles seules, mais certaines zones peuvent correspondre à un agglomérat de plusieurs bulles. C'est pourquoi il sera fait référence à des aérations dans la suite du manuscrit, mais celles-ci peuvent être associées à des détections de bulles en première approximation. L'image h montre la détection finale de l'aire du nuage de bulles, tandis que la dernière image (i) superpose les aérations détectées sur l'image brute initiale.

L'application de ce traitement d'images pour une séquence complète de déferlement est présentée sur les figures 4.10 et 4.11, où sont illustrées respectivement les détections d'aérations et l'évolution des nuages de bulles. Cette analyse permet de calculer de façon automatique la fréquence de génération de bulles, mais également la taille des aérations et leur quantité, l'aire des nuages, la densité (définie comme le rapport entre l'aire des aérations et l'aire du nuage), la profondeur, et l'évolution global du nuage (vitesses verticales et horizontales du centre du nuage).

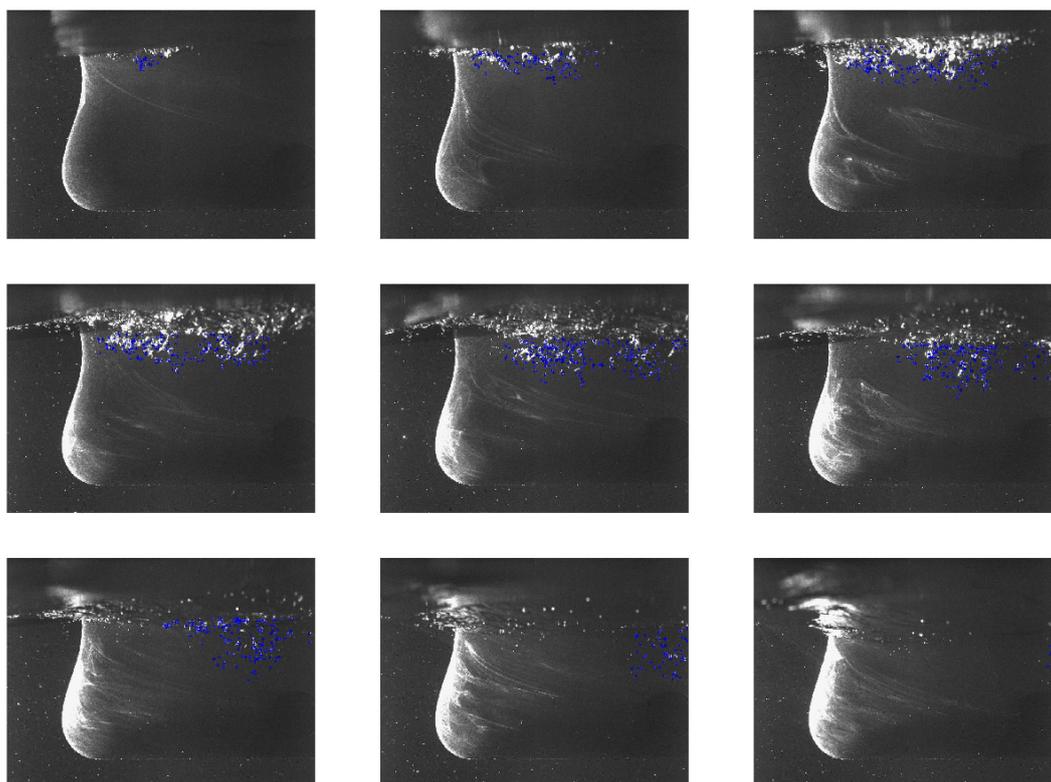


FIGURE 4.10 – Séquence d'un nuage de bulle par déferlement (configuration 2 avec courant et houle). Les aérations détectées sont marquées en bleu.



FIGURE 4.11 – Évolution de l'aire du nuage de bulle pour une séquence de déferlement (figure 4.10)

À cause de la complexité des essais, la luminosité n'est pas parfaite et peut varier en fonction de la houle et des mouvements de la maquette. Cela impose donc de définir certains critères de détection des aérations pour ne pas prendre en compte les réflexions de la forme, de la surfaces libre, ou des particules d'ensemencement PIV présentes dans l'écoulement. Un critère d'excentricité est notamment utilisé afin de ne pas prendre en compte les traits lumineux de réflexion du laser autour de l'étrave. La détection automatique est également limitée à des aérations ayant des diamètres équivalents supérieurs à $d_{min} = 0,6$ mm. Malgré cela, ce post-traitement procure de nombreuses données très utiles à la caractérisation des phénomènes de génération de bulles.

Afin de valider cette détection automatique des nuages de bulles, les fréquences d'entraînement d'air calculées manuellement et automatiquement sont comparées sur la figure 4.12 pour les configurations 5 à 9 (répétition de la configuration avec houle pour différentes amplitudes de houle). L'erreur du calcul automatique varie entre 0% et 10% (respectivement pour les configuration 8 et 7). Les résultats, en terme de valeur et de tendance, sont en accord avec le calcul visuel de la fréquence

de génération des nuages de bulles.

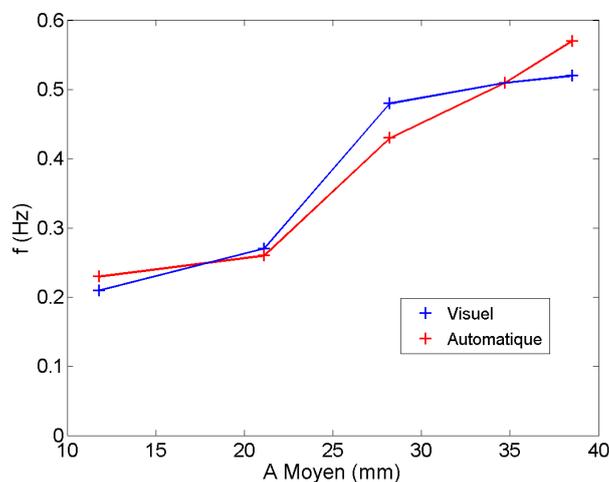


FIGURE 4.12 – Comparaison des fréquences d’apparition des nuages de bulles obtenues visuellement ou par détection automatique

Par ailleurs l’influence sur la précision des mesures des différents paramètres à régler -durant la méthode de traitement d’image- a été testé. Le paramètre principal correspond au choix du niveau de gris permettant d’obtenir une image binaire et la région des nuages de bulles souhaités. Les figures 4.13 à 4.15 illustrent le procédé utilisé pour ce choix de seuil.

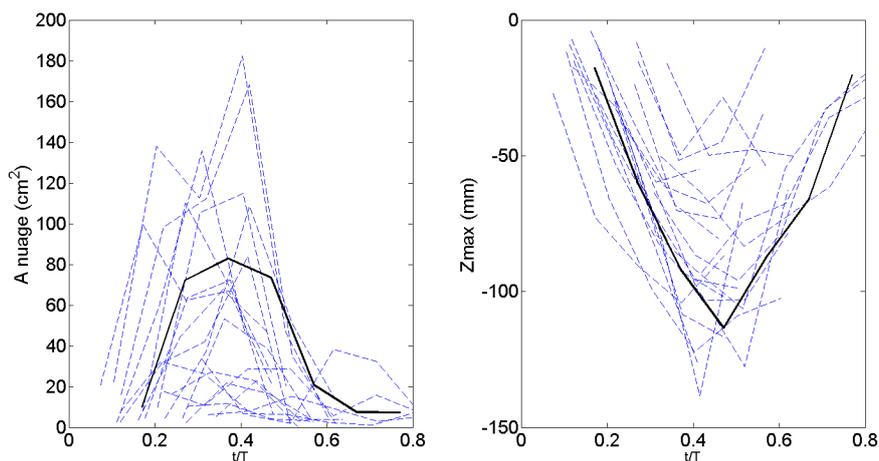


FIGURE 4.13 – Propriétés des nuages de bulles significatifs de la configuration 2 avec houle et courant, obtenues grâce à la méthode de traitement d’image. [Gauche] Évolution de l’aire des nuages. [Droite] Évolution de la profondeur des nuages.

4.2. MÉTHODE DE DÉTECTION DE BULLES

La figure 4.13 présente l'évolution de l'aire (graphique de gauche) et de la profondeur maximale (graphique de droite) des nuages de bulles pour la configuration 2 avec houle et courant. Chaque courbe en pointillé correspond à un nuage de bulles significatif (cf. paragraphe 4.3). Les courbes en gras noir correspondent aux moyennes de ces propriétés, obtenus en prenant en compte uniquement les nuages entraînés en profondeur (dépassant 80 mm de profondeur maximale).

L'influence du choix du premier seuil de niveau de gris est présentée sur la figure 4.14. On remarque d'ores et déjà que de tels variations de seuil ont très peu d'influence sur la profondeur maximale détectée. En revanche l'aire obtenue varie de façon plus significative.

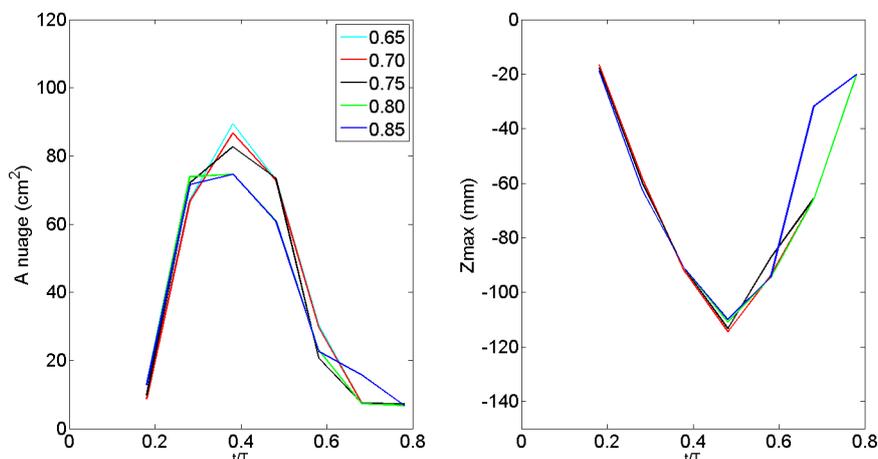


FIGURE 4.14 – Influence du premier seuil de niveau de gris sur les moyennes des propriétés

Les moyennes décrites ci-dessus sont ici obtenues pour 5 seuils de niveaux de gris : 0,65 ; 0,70 ; 0,75 ; 0,80 et 0,85. Les niveaux de gris 0 et 1 correspondent respectivement à un pixel totalement noir et totalement blanc. Si le seuil de niveau de gris est bas on détectera plus facilement les réflexions, même peu intense, en revanche si le seuil de gris est élevé on détectera uniquement les réflexions les plus intenses. Ce raisonnement est illustré par la figure 4.15. L'image de droite correspond à un seuil trop bas (0,55) car on détecte des réflexions qui ne sont pas dûs aux bulles. L'image de gauche correspond à un seuil trop élevé car de nombreuses bulles ne sont pas détectées.

La première étape du choix de seuil de niveau de gris est de vérifier qu'aucune de ces deux situation ne se présente pour toute la séquence. Cette étape est réalisable visuellement étant donné le nombre d'images par séquence (1530). Sur chaque séquence on peut ainsi vérifier que les critères de détections sont choisis de façon adéquate.



FIGURE 4.15 – Réglage visuel du seuil de niveau de gris. [Gauche] Seuil trop bas (0,55). [Droite] Seuil trop élevé (0,85).

Les courbes obtenues sur la figure 4.14 donnent alors une idée de la précision des mesures réalisées. Les seuils de 0,85 et 0,80 sont trop élevés et ne sont pas pris en compte. On observe alors des erreurs d'environ 5 cm^2 pour le pic de l'aire des nuages (soit une erreur de 6,2 %) et de quelques millimètres pour la profondeur maximale (soit une erreur de 3,6 %). Cette méthode sera donc utilisée dans le paragraphe suivant pour la caractérisation de la dynamique des nuages de bulles.

4.3 Caractérisation des mécanismes de génération de bulles

Dans cette section, les nuages de bulles détectés dans les quatre configurations de base sont analysés grâce au traitement d'image par niveau de gris décrit ci-dessus. Pour chaque cas, les figures 4.16 à 4.19 montrent l'évolution des nuages significatifs (définis comme étant observable sur au moins quatre images consécutives). Chaque courbe en pointillé correspond à un nuage significatif. Trois propriétés sont présentées : l'aire du nuage, la profondeur maximale et la vitesse verticale des nuages. Les abscisses de chaque figure correspondent au temps adimensionnel t/T où T est la période de la houle et des mouvements ($T = 1/0,85 \approx 1,18$ s).

4.3.1 Configuration 1 : Courant

Pour la première configuration (figure 4.16), l'instant $t = 0$ correspond à la première détection d'aérations pour chaque nuage. Tous les nuages sont dus au phénomène d'entraînement tourbillonnaire dans ce cas. L'aire des nuages est toujours inférieure à $0,5 \cdot 10^4$ mm². La profondeur maximale de pénétration est légèrement supérieure à 50 mm. La vitesse verticale des nuages est proche de zéro durant la première moitié de la vie des nuages puis tend vers une valeur positive, les bulles remontant vers la surface.

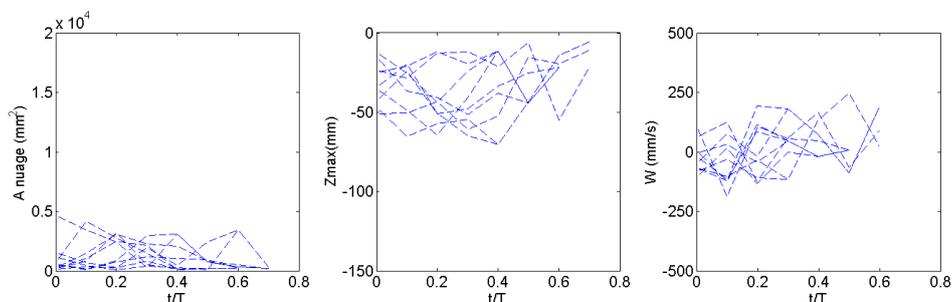


FIGURE 4.16 – Évolution des propriétés (aire, profondeur maximale et vitesse verticale) de chaque nuage de bulles significatif dans la première configuration : avec courant seulement

4.3.2 Configuration 2 : Courant et houle

Dans la seconde configuration (figure 4.17), l'instant $t = 0$ correspond au pic de la houle incidente au niveau de l'étrave. Durant cet essai, la grande majorité des nuages de bulles significatifs sont dus aux phénomènes de déferlement.

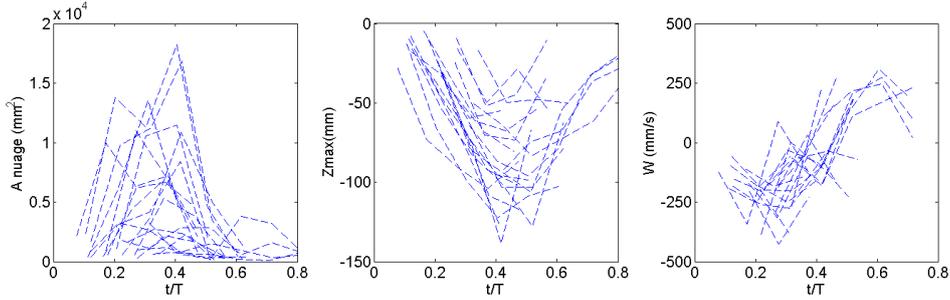


FIGURE 4.17 – Évolution des propriétés (aire, profondeur maximale et vitesse verticale) de chaque nuage de bulles significatif dans la seconde configuration : avec courant et houle

La détection de l'initiation des nuages de bulles a lieu entre 0,1 et 0,3 T après le pic de houle. Les propriétés des nuages de bulles sont très différentes de celles des nuages de bulles par entraînement tourbillonnaire. L'aire des nuages et la profondeur passent par un maximum entre 0,3 et 0,5 T. La valeur maximale de l'aire des nuages est pour plusieurs nuages 3 fois supérieure à celle des nuages observés pour la première configuration (jusqu'à $1,8 \cdot 10^4$ mm²). La profondeur maximale de pénétration atteint 140 mm. Même si cette valeur est considérablement plus élevée que pour les nuages par entraînement tourbillonnaire, les bulles ne passent jamais sous la coque (la maquette possédant un tirant d'eau de 182 mm). Enfin, les vitesses verticales sont inférieures -0,25 m/s après le déferlement (jusqu'à -0,43 m/s), proche de zéro entre 0,4 et 0,5 T et augmentent jusqu'à une vitesse ascensionnelle de plus de 0,25 m/s (jusqu'à 0,30 m/s) entre 0,5 et 0,7 T.

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

$$w = A\omega e^{kz} \sin(kx - \omega t) \quad (4.1)$$

avec A l'amplitude de la houle, ω la pulsation, k nombre d'onde et z la profondeur. Par conséquent, le maximum de la vitesse orbitale proche de la surface libre sera $w = A\omega = 0,18$ m/s pour une amplitude de houle de 33 mm. Ces valeurs seront comparées dans le chapitre 5 aux vitesses de l'écoulement mesurées par la technique PIV.

4.3.3 Configuration 3 : Courant et Mouvements

Dans la troisième configuration (figure 4.18), l'instant $t = 0$ correspond au moment où l'étrave est le plus haut.

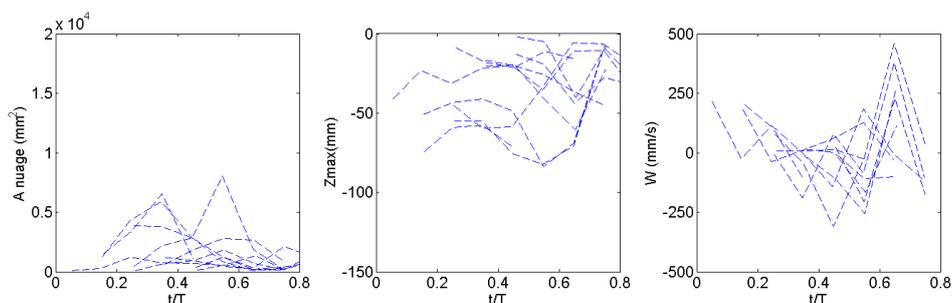


FIGURE 4.18 – Évolution des propriétés (aire, profondeur maximale et vitesse verticale) de chaque nuage de bulles significatif dans la troisième configuration : avec courant et mouvements

Dans cette configuration, même si la fréquence des déferlements est aussi importante que celle de l'entraînement tourbillonnaire, ces événements ne sont pas aussi énergétiques que lors de l'impact de la houle sur la maquette. Le nombre de nuages significatifs est donc réduit, et ces nuages sont principalement dus aux phénomènes d'entraînement tourbillonnaire favorisés par les mouvements de l'étrave, comme le confirme les propriétés des nuages, plus proches de la première configuration. Les variations des vitesses verticales sont plus importantes que dans la première configuration à cause de l'amplification des tourbillons due aux mouvements de la maquette. L'aire maximale des nuages de bulles et la profondeur de pénétration sont respectivement de $0,8 \cdot 10^4 \text{ mm}^2$ et 84 mm. Les vitesses verticales oscillent entre -0,3 et 0,46 m/s.

4.3.4 Configuration 4 : Courant, houle et mouvements

Pour la quatrième configuration (figure 4.19), l'instant $t = 0$ correspond au pic de la houle incidente au niveau de l'étrave, comme pour la deuxième configuration. Le nombre de nuage significatif est le plus élevé dans ce cas. Les propriétés des nuages sont similaires à la seconde configuration, attestant la prédominance des nuages générés par déferlement. L'aire maximale des nuages et la profondeur de pénétration atteignent respectivement $1,4 \cdot 10^4 \text{ mm}^2$ et 146 mm. Les valeurs des vitesses verticales peuvent être plus importantes que pour la seconde configuration (entre -0,5 et 0,5 m/s).

4.3. CARACTÉRISATION DES MÉCANISMES DE GÉNÉRATION DE BULLES

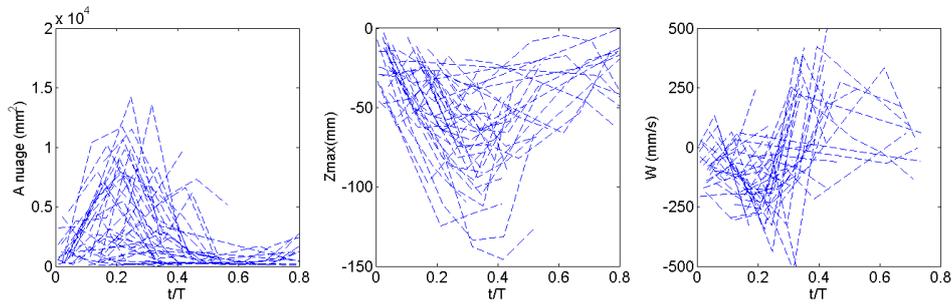


FIGURE 4.19 – Évolution des propriétés (aire, profondeur maximale et vitesse verticale) de chaque nuage de bulles significatif dans la quatrième configuration : avec courant, houle et mouvement

Ces analyses confirment et détaillent les descriptions des mécanismes d'entraînement d'air réalisées dans le paragraphe 4.1 à partir de simples observations. Les nuages de bulles générés par entraînement tourbillonnaire sont relativement petits et restent proche de la surface. En revanche les nuages de bulles générés par des déferlements de la vague d'étrave peuvent être plus grands et entraînés en profondeur quelques instants après le pic de la vague incidente. Même dans le cas de déferlement, ces bulles n'atteignent pas la profondeur correspondant au tirant d'eau. Cela s'explique par les problématiques de similitude s'exerçant sur la dynamique des bulles, et leur tailles relativement élevées par rapport au réel.

Malgré ces effets d'échelle, cette étude permet de caractériser l'entraînement d'air en bassin de circulation. La section suivante a pour but de caractériser l'influence de chacun des paramètres d'essais sur ces entraînements d'air.

4.4 Étude paramétrique de la génération de bulles

La section précédente a permis de caractériser les deux types de nuages de bulles générés dans un bassin de circulation. Les quatre configurations de base ont permis d'étudier les effets de l'interaction entre un écoulement incident turbulent et l'étrave du *Pourquoi pas ?*, mais aussi de la houle et des mouvements, sur la génération de nuage de bulles. Dans cette section les nombreux paramètres d'essais ont été modifiés (cf. paragraphe 3.3.5 et tableau 3.5) afin de mieux comprendre l'influence de chacun de ces paramètres sur les phénomènes d'entraînement d'air.

4.4.1 Influence des caractéristiques de la houle

L'impact de la houle au niveau de l'étrave peut générer un déferlement et un nuage de bulles associé, qui est susceptible d'être entraîné en profondeur et de perturber les signaux acoustiques. La houle est par conséquent un des paramètres prépondérants. Cependant il est difficile d'en contrôler parfaitement la génération pour cette configuration dans le bassin, à cause de l'interaction entre le générateur de houle et l'écoulement incident à cette vitesse relativement élevée. Les fluctuations de l'amplitude de la houle pour une consigne donnée sont importantes, comme on peut le voir sur la figure 4.20 correspondant à la seconde configuration. En effet, l'amplitude moyenne du signal est bien de 33 mm mais l'écart type est de 13 mm.

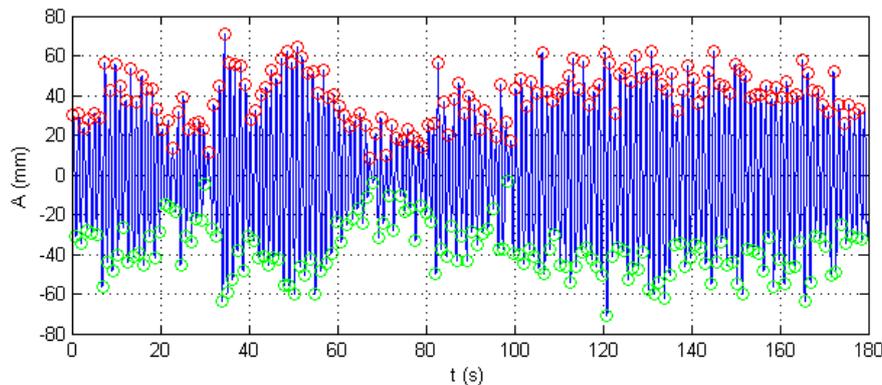


FIGURE 4.20 – Fluctuations de l'amplitude de houle dans la seconde configuration. Signal enregistré par la sonde à houle 1 m en amont de l'étrave

Pour mieux prendre en compte la hauteur de vague, le signal de houle a été trié en fonction de son amplitude. La figure 4.21 montre l'évolution de la profondeur des nuages observés pour trois niveaux de hauteur de vague. Le graphique de gauche correspond aux nuages significatifs observés après les pics du tiers de vague les plus grandes ($45 \text{ [mm]} < A$). Les graphiques du centre et de droite correspondent aux

4.4. ÉTUDE PARAMÉTRIQUE DE LA GÉNÉRATION DE BULLES

nuages observés pour les tiers de vague intermédiaire ($35 < A < 45$) et inférieur ($A < 35$) respectivement. On observe un nombre de nuages significatifs bien plus élevé pour le tiers de houle supérieur, la génération de bulle est donc directement liée à l'amplitude de la houle incidente.

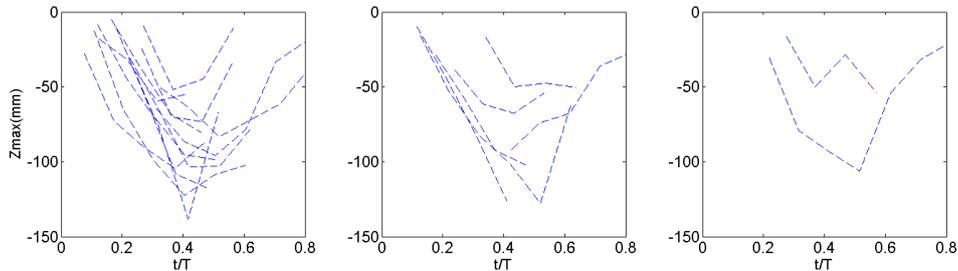


FIGURE 4.21 – Évolution de la profondeur maximale de pénétration des nuages pour la seconde configuration. Gauche : pour le tiers supérieur des amplitudes de houle. Centre : pour le tiers d'amplitudes de houle intermédiaires. Droite : pour le tiers d'amplitudes de houle les plus faibles.

Cette analyse montre que l'influence de l'amplitude de houle ne doit pas être étudiée directement à partir de la fréquence de génération calculée pour une amplitude moyenne donnée. Pour cela, tous les essais avec courant et houle (configurations 2 et 5 à 9) ont été analysés comme une seule base de données. Tous les signaux de houle ont été triés par groupe de hauteur de vague par intervalle de 10 mm. La fréquence des nuages de bulles est calculée pour chaque groupe et présentée sur la figure 4.22 (graphique de gauche). Ces résultats montrent que la fréquence d'apparition des nuages de bulles dans la configuration avec houle et courant est directement proportionnelle à la hauteur de vague, avec un coefficient de détermination $R^2 = 0,91$. Par ailleurs on retrouve bien une droite affine, avec une ordonnée à l'origine légèrement inférieure à 0,2 Hz correspondant à la fréquence du mécanisme d'entraînement tourbillonnaire ayant lieu sans houle. Pour la hauteur de houle la plus élevée, on obtient une fréquence de génération de bulles de 0,85 Hz, soit la génération d'un nuage de bulles pour chaque période de houle.

Le graphique de droite de la figure 4.22 correspond aux analyses des configurations 2 et 10 à 12, pour des fréquences de houle de 0,65 ; 0,75 ; 0,85 et 1,00 Hz. Pour tous ces essais, seuls les nuages de bulles générés par les vagues possédant la hauteur désirée (66 mm plus ou moins 5 mm) ont été considérés. La fréquence des nuages de bulles passe par un maximum (proche de 0,6 Hz) entre les fréquences de houle de 0,75 et 0,85 Hz et décroît jusqu'à 0,3 Hz pour une fréquence de houle de 1,00 Hz. Pour une telle fréquence la longueur d'onde devient trop courte, l'impact de la houle sur la carène est moins important et la quantité de déferlement diminue.

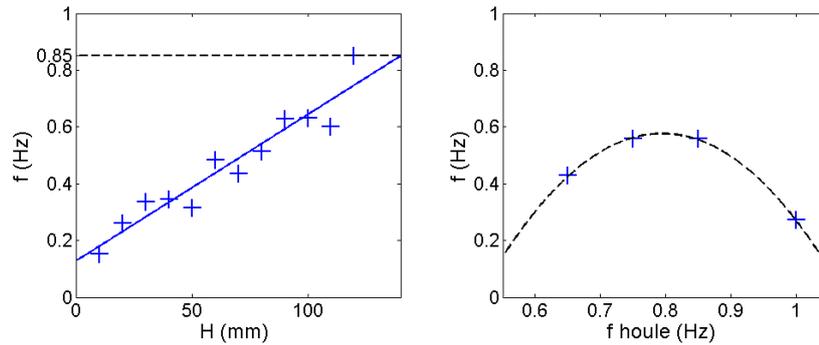


FIGURE 4.22 – Influence des paramètres de houle sur la fréquence d’apparition des nuages de bulles. [Gauche] : fréquence des nuages en fonction de la hauteur de vague (régression linéaire : $R^2 = 0,91$). [Droite] : fréquence des nuages en fonction de la fréquence de la houle (régression quadratique : $R^2 = 0,99$)

4.4.2 Influence de la dynamique du navire

La dynamique du navire représente également un élément essentiel pour l’étude de la génération des bulles. La vitesse d’avance du navire est simulée par la vitesse du courant dans le bassin. Pour l’étude de ce paramètre, les quatre configurations de base ont été répétées pour des courants correspondants à des vitesses d’avance de 4, 6 et 8 nœuds (respectivement 0,38 ; 0,56 et 0,75 m/s à l’échelle 1/30 dans le bassin). Les résultats de ces essais sont présentés sur la figure 4.23. La fréquence des nuages de bulles est largement réduite à 6 nœuds ($f = 0,22$ Hz avec houle et mouvements) et minimale à 4 nœuds ($f = 0,06$ Hz). Pour ces vitesses, la houle ne génère pas plus de nuage de bulles que les mouvements. L’influence de la vitesse du courant est donc primordial pour les mécanismes d’entraînement d’air en bassin, l’énergie de l’écoulement devant être suffisante pour que les phénomènes tourbillonnaires ou les déferlements apparaissent.

L’influence de l’amplitude et de la fréquence des mouvements est présentée sur la figure 4.24. Le graphique de gauche correspond à l’analyse des configurations 3 et 13 à 15, avec un coefficient d’amplitude de mouvement de 0,75 ; 1,00 ; 1,25 ; et 1,50. À la différence de la houle, les mouvements générés par l’hexapode sont extrêmement précis (avec un écart type sur l’amplitude de $4 \cdot 10^{-3}$ mm). Pour chacun des cas, la fréquence d’entraînement tourbillonnaire reste similaire, proche de 0,2 Hz. Au contraire, la fréquence des nuages dus aux déferlements augmente fortement avec les amplitudes des mouvements. Le graphique de droite correspond à l’analyse des configurations 3 et 16 à 18, avec des fréquences de mouvement de 0,65 ; 0,75 ; 0,85 et 1,00 Hz. De la même façon que pour la houle, la fréquence des nuages de bulles augmente et semble atteindre un maximum entre 0,85 et 1,00 Hz.

4.4. ÉTUDE PARAMÉTRIQUE DE LA GÉNÉRATION DE BULLES

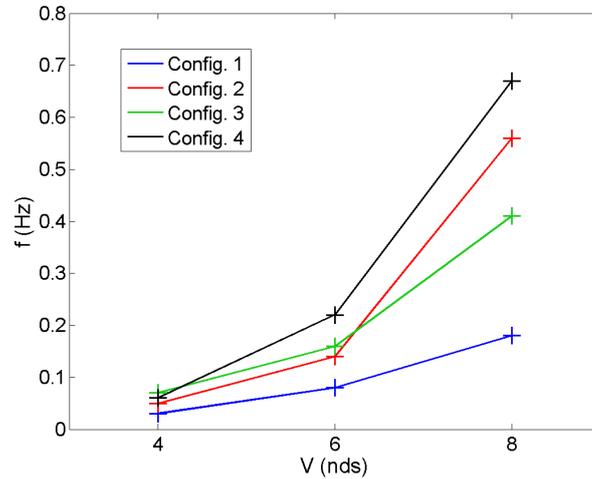


FIGURE 4.23 – Influence de la vitesse sur la fréquence d’apparition des nuages de bulles, pour les 4 configurations de base.

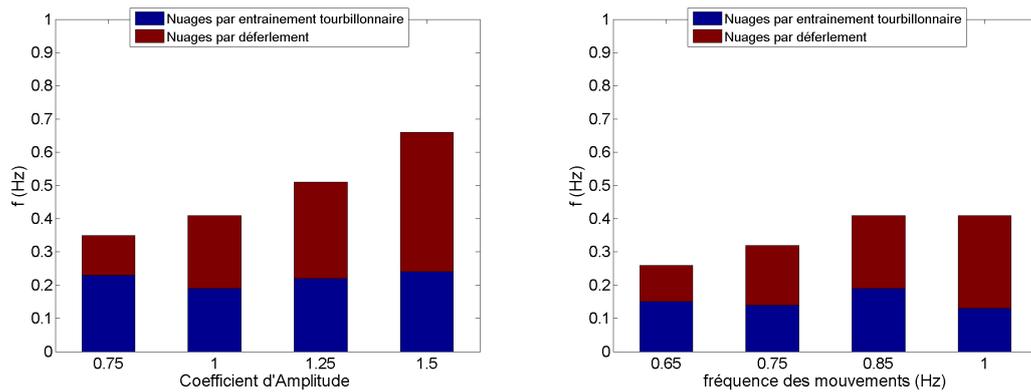


FIGURE 4.24 – Influence des paramètres de mouvement sur la fréquence d’apparition des nuages de bulles. [Gauche] : Fréquence des nuages en fonction des coefficients d’amplitude des mouvements. [Droite] : Fréquence des nuages en fonction de la fréquence des mouvements

4.4.3 Influence de la synchronisation

La synchronisation des mouvements de la maquette avec la houle a été une étape importante du développement de la méthode d'essai. Le déphasage entre la houle et les mouvements peut être modifié en augmentant ou en diminuant le temps de pause inclus dans la trajectoire de l'hexapode avant le démarrage des mouvements. Les simulations numériques ont montrées que le pilonnement doit être en phase avec la houle au niveau du centre de gravité (cf paragraphe 3.3.3 et 3.3.4). L'influence de ce paramètre est étudiée grâce aux configurations 27 à 30, avec respectivement un déphasage moyen entre le pilonnement et la houle au niveau du centre de gravité de -90° ; -5° ; 5° et 30° .

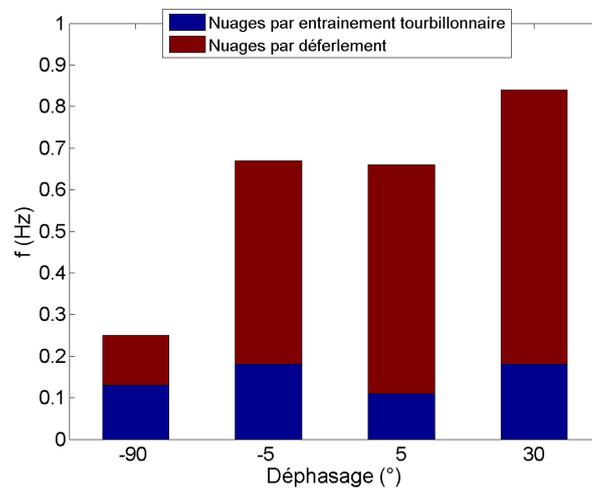


FIGURE 4.25 – Influence du déphasage sur la fréquence d'apparition des nuages de bulles

Ces résultats montrent qu'un déphasage de plus ou moins 5° n'est pas significatif sur la fréquence de génération de bulles. En revanche, les deux autres cas démontrent que le déphasage peut être un paramètre clé. Pour un déphasage de -90° , la vague incidente suit les mouvements de l'étrave, et l'impact est très réduit voire inexistant. Dans ce cas, la fréquence des nuages de bulles est réduite à $f = 0,25$ Hz, la fréquence des déferlements étant plus faible dans ce cas que la fréquences des entraînements tourbillonnaires. Au contraire, pour un déphasage de 30° , le mouvement descendant de l'étrave impacte directement la houle incidente, ce qui résulte en un déferlement pour presque chaque vague ($f = 0,84$ Hz).

Il est intéressant de prendre en compte le fait que ces déphasages sont représentatifs de conditions réelles. En effet, même si le navire répond directement à la fréquence de la houle la plus énergétique, des vagues irrégulières peuvent impacter l'étrave et provoquer un entraînement d'air important.

4.4.4 Discussion

Comme cela a été mentionné tout au long de ce chapitre, l'interaction entre l'écoulement turbulent incident et la forme de l'étrave de la maquette du *Pourquoi pas ?* crée une perturbation de l'écoulement proche de la surface libre. Une cavité d'air se développe et des bulles peuvent être entraînées dans l'éclatement de cette cavité par détachement tourbillonnaire. Ce phénomène n'est pas observé lors d'essais classiques en bassin de traction. L'une des différences majeures entre ces deux types d'essai est le fait que le générateur de houle placé en amont de l'écoulement provoque un écoulement fortement turbulent. L'influence de ce paramètre est présentée sur la figure 4.26, avec les fréquences de la génération des nuages de bulles pour les configurations 1 et 31 (cas sans mouvements, en bleu sur la figure), puis 3 et 32 (cas avec mouvements, en rouge). Dans les configurations 31 et 32, le générateur de houle a été enlevé, réduisant l'intensité turbulente de l'écoulement à $IT = 6\%$, ce qui est plus proche des configurations en bassin de traction.

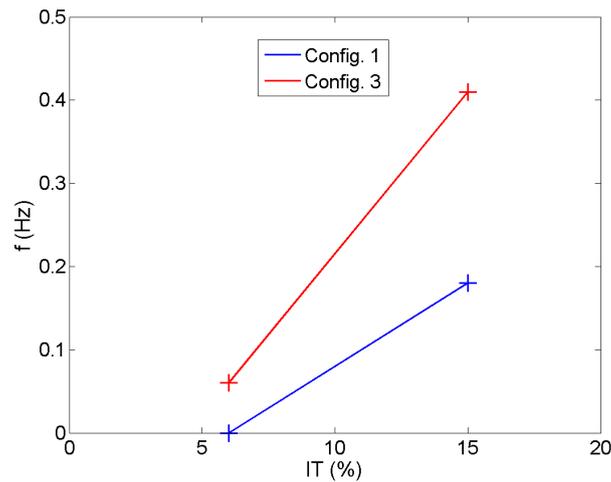


FIGURE 4.26 – Influence de l'intensité turbulente sur la fréquence d'apparition des nuages de bulles

Dans le cas avec courant seulement et une intensité turbulente de 6% , il n'y a pas de génération de bulles. Le mécanisme de génération de bulles par entraînement tourbillonnaire disparaît totalement, ce qui confirme l'importance de la turbulence sur ce phénomène.

Dans le cas avec mouvement, la fréquence des nuages est également très faible ($f = 0,06$ Hz). La turbulence influe donc également en favorisant l'entraînement d'air par déferlement. Lorsque l'intensité turbulente est plus élevée, proche des conditions de mer ($IT = 15\%$), les fréquences de nuages de bulles sont largement plus élevées : $0,18$ Hz et $0,40$ Hz pour les configurations 1 et 3, respectivement.

4.4. ÉTUDE PARAMÉTRIQUE DE LA GÉNÉRATION DE BULLES

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

Il doit être pris en compte ici le fait que l'interaction du générateur de houle avec le courant incident génère une turbulence non contrôlée dans la bassin. L'influence d'une turbulence homogène et isotrope pourrait être différente. Les détails de la caractérisation de l'écoulement incident avec batteur, grâce aux mesures PIV, seront apportés dans le chapitre 5. De plus, l'immersion du générateur en amont génère -en plus de la turbulence à proprement parler- une perturbation de la surface libre. Les déformations de la surface libre mesurées par la sonde à houle pour la première configuration sans houle mais avec le générateur immergé sont illustrées sur la figure 4.27.

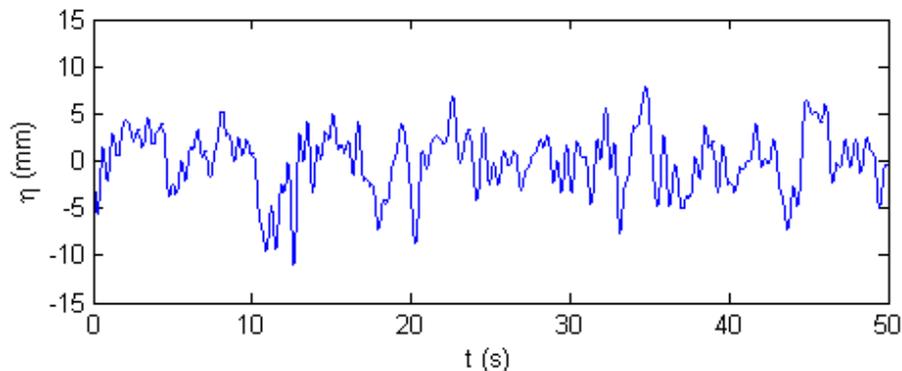


FIGURE 4.27 – Élévation de la surface libre dans la première configuration, sans houle.

Ces déformations, pour toute la séquence de mesures, sont comprises entre -16 et 11 mm. L'écart type de l'élévation de la surface libre est de 3,12 mm, ce qui n'est pas négligeable par rapport à l'amplitude moyenne de la houle (33 mm). L'effet favorable aux mécanismes d'entraînement d'air, par détachement tourbillonnaire ou par déferlement, est donc dû à la combinaison de la turbulence de l'écoulement et des déformations de la surface libre.

Le second point de discussion concerne les effets de similitudes et la difficulté d'extrapoler au réel l'influence des différents paramètres testés sur la génération de bulles. L'expérience des campagnes en mer et l'analyse des données acoustiques

réalisée dans le chapitre 2 ont montré par exemple que l'influence de la vitesse du navire sur le phénomène de *Bubble Sweep-down* n'est pas aussi importante que celle de la vitesse du courant observée dans le paragraphe 4.4.2. Au réel, l'énergie de l'écoulement est suffisante pour entraîner de l'air en profondeur, même à 4 nœuds.

Il a été observé dans le paragraphe 4.3, lors de la caractérisation des différents nuages, que les bulles ne passent jamais sous la coque de la maquette. Il doit être rappelé ici que cela est dû aux effets d'échelle et à la taille des bulles générées dans le bassin. L'effet des tensions de surface n'étant pas pris en compte dans la similitude de Froude, les mécanismes d'entraînement d'air et la dynamique des bulles en sont également affectées. Les bulles microscopiques générées en mer seront en effet entraînées plus en profondeur.

La distribution en tailles des bulles détectées par la méthode de traitement d'image est présentée sur la figure 4.28 (graphique de gauche). Sur ce graphique, la distribution moyenne est donnée par intervalle de 0,1 mm pour la configuration 2 (avec houle et mouvements). Le nombre de bulles en fonction du diamètre équivalent est ici calculé par la moyenne de toutes les images pour lesquelles plus de 10 bulles sont détectées. Le nombre de détection est maximal pour un diamètre équivalent de 0,6 mm (avec en moyenne plus de 20 bulles de cette taille par image), correspondant à la limite de détection. Le nombre d'aération décroît fortement jusqu'à de très faibles valeurs au dessus de 2 mm. Il n'y a pas de détection pour des diamètres équivalents de plus de 4 mm. Ces mesures sont cohérentes avec les vitesses d'ascension des nuages de bulles observés. Le graphique de droite montre la vitesse d'ascension terminale théorique d'une bulle sphérique isolée, calculée selon l'expression provenant de Comolet (1979) :

$$u_{\infty} = \frac{g \cdot \rho_w}{18 \cdot \mu_w} d_b^2 \quad (4.2)$$

où g est l'accélération de la pesanteur, d_b le diamètre équivalent de la bulle, ρ_w la densité et μ_w la viscosité dynamique de l'eau.

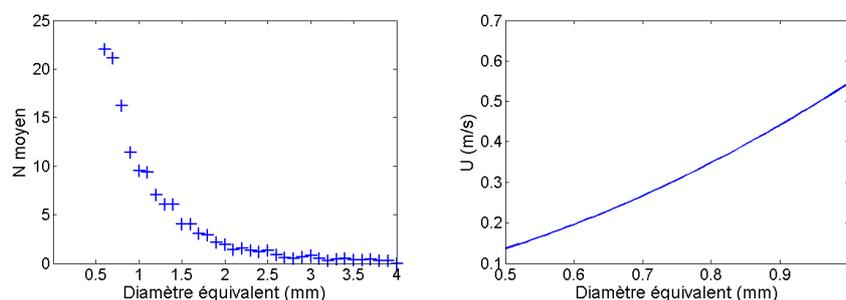


FIGURE 4.28 – Gauche : Distribution de la taille des aérations détectées sur chaque image de la configuration 2 avec houle et mouvement. Droite : Vitesse verticale théorique des bulles en fonction du diamètre.

La vitesse maximale d’ascension des nuages générés par déferlement est proche de 0,25 m/s, ce qui correspond à la vitesse d’ascension d’une bulle de diamètre $d = 0,67$ mm, proche de la taille typique des bulles observées au bassin.

4.5 Conclusion

L’objectif à long terme de ce projet est de développer des outils, destinés aux architectes des navires de recherche, capables de prédire le comportement du navire en terme de génération et de propagation de bulles. Pour cela une méthode spécifique d’essai a été développée, et ce chapitre a permis de démontrer plusieurs points :

- le bassin de circulation et de houle est bien adapté pour reproduire les conditions d’apparition en mer du phénomène de *Bubble Sweep-down* pour une maquette à l’échelle 1/30 du *Pourquoi pas ?* ;
- l’utilisation de l’hexapode pour imposer les mouvements de la maquette permet de travailler avec la partie avant de la maquette, et facilite l’étude paramétrique des phénomènes ;
- l’acquisition d’images sous-marines de bonne qualité est facilitée dans cette configuration.

Une méthode de traitement d’image a été établie et utilisée afin de caractériser les processus de génération de bulles. Deux phénomènes ont été décrits : l’entraînement tourbillonnaire et le déferlement. Les essais réalisés permettent de caractériser l’influence des paramètres d’essais :

- les nuages de bulles par entraînement tourbillonnaire apparaissent seulement lorsque le générateur de houle immergé provoque une forte intensité turbulente dans l’écoulement. La turbulence est donc favorable à la génération de bulles. De plus la fréquence du phénomène d’entraînement tourbillonnaire varie très peu, malgré toutes les configurations et les gammes de paramètres testées.

Ce phénomène est donc uniquement lié à la géométrie de la maquette et à la turbulence de l'écoulement incident.

- la houle est un facteur déterminant de la génération de bulles par déferlement. La fréquence des nuages de bulles est directement proportionnelle à la hauteur de vague.
- les influences considérables de la vitesse du courant et du déphasage (pouvant être représentatif d'une houle irrégulière) ont également été démontrées.

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

Ces essais ouvrent également de nouvelles perspectives. Tout d'abord, la base de données originale ainsi obtenue pourrait être utilisée lors du développement de modèles numériques des phénomènes d'entraînement d'air à l'étrave des navires. Enfin, l'un des grands avantages de cette technique expérimentale consiste en l'acquisition simultanée des champs de vitesses grâce aux mesures PIV. De cette manière, il est possible d'étudier à la fois la génération de bulles et les caractéristiques de l'écoulement autour de l'étrave. Grâce à la similitude de Froude, ces mesures sont représentatives de l'écoulement réel et sont donc complémentaires des analyses réalisées dans ce chapitre.

Chapitre 5

Analyse de l'écoulement autour de l'étrave

Sommaire

5.1	Caractérisation de l'écoulement incident	125
5.1.1	Écoulement sans générateur de houle	127
5.1.2	Écoulement avec générateur immergé sans houle	128
5.1.3	Écoulement avec générateur et houle	129
5.1.4	Comparaison des intensités turbulentes	131
5.2	Caractérisation de l'écoulement autour de l'étrave du	
	<i>Pourquoi pas ?</i>	132
5.2.1	Plans de mesures	132
5.2.2	Analyse des champs de vitesses instantanées	135
5.2.3	Analyse des champs de vitesses moyennes	141
5.2.4	Analyse en moyenne de phase	143
5.2.5	Analyse fréquentielle	151
5.3	Conclusion	156

L'analyse de la génération de bulles autour de l'étrave à partir des enregistrements vidéos a permis de distinguer deux mécanismes d'entraînement d'air, dus à des tourbillons ou à des déferlements. Même si dans ces deux cas les phénomènes sont bien distincts, la vorticité et les forces de cisaillement jouent un rôle primordial sur la dynamique des bulles. Les différentes configurations étudiées montrent que les caractéristiques de l'écoulement déterminent la taille et la trajectoire des bulles autour de la carène, la turbulence de l'écoulement incident impactant fortement les phénomènes d'aération.

L'analyse de l'écoulement autour de la carène des navires est un élément important de l'hydrodynamique navale. Une bonne connaissance du sillage d'un navire est notamment primordial pour une conception optimale des propulseurs. Durant de nombreuses années, les tubes de Pitot étaient utilisés et permettaient d'obtenir la vitesse grâce à des mesures de pression et à l'application du théorème de Bernoulli. Cette méthode présente deux contraintes : elle est intrusive et ponctuelle (même si des peignes de tubes de Pitot peuvent être utilisés pour obtenir des mesures simultanées en plusieurs points). Le développement des techniques laser permet actuellement de réaliser des mesures de vitesses de façon non intrusive. De plus, la possibilité d'obtenir des champs de vitesse dans tout un plan par la méthode Particles Image Velocimetry (PIV) est vraiment avantageuse pour mesurer l'écoulement autour des navires.

Ainsi, de nombreux travaux sont basés sur l'application de la PIV pour mesurer l'écoulement autour de carènes. Des systèmes fixes sont employés en bassin de circulation (Lee *et al.* (2003), Lee *et al.* (2009)) afin de déterminer le sillage derrière une maquette, ou en tunnel de cavitation derrière un propulseur en rotation (Paik *et al.*, 2007). Chen et Chang (2006) développent un système mobile permettant de réaliser des mesures PIV en bassin de traction, tout en soulignant les problèmes rencontrés, notamment à hautes vitesses d'avance. Stern (2008) présente des mesures réalisées autour de la carène d'une maquette réalisant des manœuvres PMM (Planar Motion Mechanism). Bassler *et al.* (2010) présentent également des mesures autour d'une carène sans vitesse d'avance, mais soumis à de larges amplitudes de roulis. Les principales applications de la PIV en hydrodynamique navale ont été résumées dans Di Felice et Pereira (2008). Toutes ces études ont été réalisées en condition de mer calme. Très peu de mesures ont été effectuées afin d'obtenir l'écoulement autour d'un navire en mouvement soumis à la houle. La technique PIV a été appliquée pour une configuration en mer de face (Longo *et al.*, 2005), mais toujours afin de caractériser le sillage du navire.

D'autre part, plusieurs études sont dédiées à l'analyse des phénomènes générés par le déferlement de vagues sur une plage inclinée (Kimmoun et Branger, 2005) ou après une bosse (Kang *et al.*, 2012). Sanjou *et al.* (2010) étudient les structures de la turbulence induite par des vagues générées par le vent, en soufflerie. Cependant ces études ne sont pas liées à l'hydrodynamique navale. La base de données obtenue ici, autour de l'étrave en mouvement et/ou avec houle est donc originale.

Les mesures présentées dans ce chapitre ont deux objectifs. Tout d'abord obtenir une meilleure caractérisation de l'écoulement incident (vitesses, taux de turbulence), dans les différentes configurations d'étude, puis analyser la dynamique de l'écoulement dans les différentes configurations testées, avec courant, houle et/ou mouvements. Ces mesures seront extrapolables à l'échelle réelle grâce à la similitude de Froude, contrairement à la dynamique des bulles observées sur modèles réduits.

Ce chapitre s'articulera autour de trois sections. Tout d'abord la caractérisation de l'écoulement incident avec et sans générateur de houle sera présentée. Les mesures effectuées et les plans PIV autour de l'étrave du *Pourquoi pas ?* seront ensuite décrits avant d'analyser l'écoulement autour de la maquette.

5.1 Caractérisation de l'écoulement incident

Le principe du système de mesure de l'écoulement par PIV a été décrit dans le paragraphe 3.2, tout comme son application au bassin de circulation de Boulogne-sur-Mer. Tous les champs de vitesses étudiés dans ce chapitre ont été obtenus par la méthode Adaptive Correlation. Les paramètres principaux utilisés pour cette technique sont une aire d'interrogation finale de 32×32 pixels², avec deux étapes de raffinement, et un recouvrement horizontal et vertical de 25%. On obtient ainsi un plan de 66×49 points PIV, avec une discrétisation spatiale de 3,5 mm dans les deux directions.

Un pré-traitement est réalisé pour chaque champs instantané afin de supprimer les vecteurs aberrants pouvant apparaître sur certaines images. Ces vecteurs aberrants sont principalement générés par une perte du suivi des particules, causée par le système d'éclairage (réflexion du laser sur la surface libre). Pour cela un intervalle large a été fixé afin de conserver les vecteurs vitesses uniquement si $-0,2 < u < 1,5$ m/s (avec $\bar{U} = 0,75$ m/s) et $-1 < w < 1$ m/s. Avec de tels critères, le pourcentage de vecteurs aberrants (calculé sur toute une configuration) est toujours inférieur à 0,1%. Ce nombre étant très faible, les vecteurs aberrants détectés sont remplacés par une interpolation temporelle du champs de vitesse au point PIV correspondant.

Dans un premier temps, des mesures ont été réalisées sans carène, afin de caractériser l'écoulement incident dans les différentes configurations décrites dans le paragraphe 3.3.5. Trois cas ont donc été considérés. Tout d'abord l'écoulement avec le générateur hors de l'eau, et donc un taux de turbulence supposé faible. Ensuite avec le générateur de houle immergé mais inactif (correspondant aux configurations de base 1 et 3), avec un taux de turbulence supposé élevé. Enfin, le champ de vitesse en présence de houle est également étudié.

Les mesures ont été réalisées sur des séquences de 818 images ("double frame") à une fréquence de 8,5 Hz, soit des séquences de 96,12 s. Les plans sont obtenus dans l'axe longitudinal du bassin, d'une taille $x = 372$ mm \times $z = 276$ mm, juste sous la surface libre.

5.1. CARACTÉRISATION DE L'ÉCOULEMENT INCIDENT

Pour ces trois configurations sans carène, les champs de vitesse moyens et le tenseur des contraintes ont été calculés. Quatre graphiques sont représentés pour chaque configuration : le champs de vitesse moyennes longitudinales U , le champs de vitesses moyennes verticales W , ainsi que les composantes longitudinales et verticales du tenseur des contraintes adimensionné.

Ces composantes sont définies, en utilisant la convention d'Einstein, par :

$$R_{ii} = \frac{\overline{u'_i u'_i}}{U_{ref}^2} \quad (5.1)$$

avec dans le plan PIV $i = 1$ ou 2 ($u_1 = u$, $u_2 = w$) et $U_{ref} = 0,75$ m/s (vitesse de référence de l'écoulement).

Selon la décomposition de Reynolds,

$$u_i = u'_i + \bar{u}_i \quad (5.2)$$

où \bar{u}_i est la partie moyennée et u'_i la partie fluctuante de la vitesse u_i . Des contraintes de Reynolds élevées signifient de fortes parties fluctuantes de la vitesse et donc une turbulence importante de l'écoulement.

Les intensités turbulentes de chacun des cas sont comparées dans le paragraphe 5.1.4.

5.1.1 Écoulement sans générateur de houle

Pour le premier cas sans générateur de houle, les résultats sont présentés sur les figures 5.1 et 5.2. La position de la surface libre est indiquée par la zone de vitesse nulle. On retrouve bien une vitesse moyenne unidirectionnelle avec une composante longitudinale de 0,75 m/s et une composante verticale nulle. Les contraintes de Reynolds sont très faibles, inférieures à 0,01 selon les deux composantes.

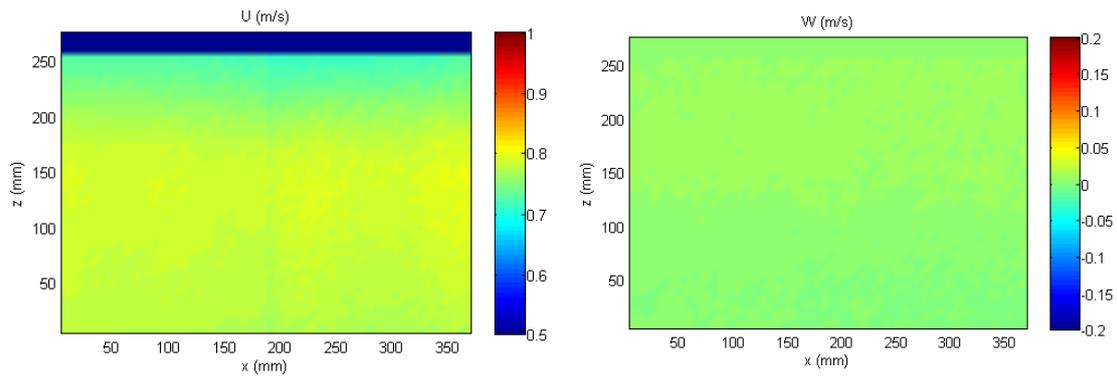


FIGURE 5.1 – Champs de vitesses moyennes sans générateur de houle. [Gauche] Vitesse longitudinale. [Droite] Vitesse verticale.

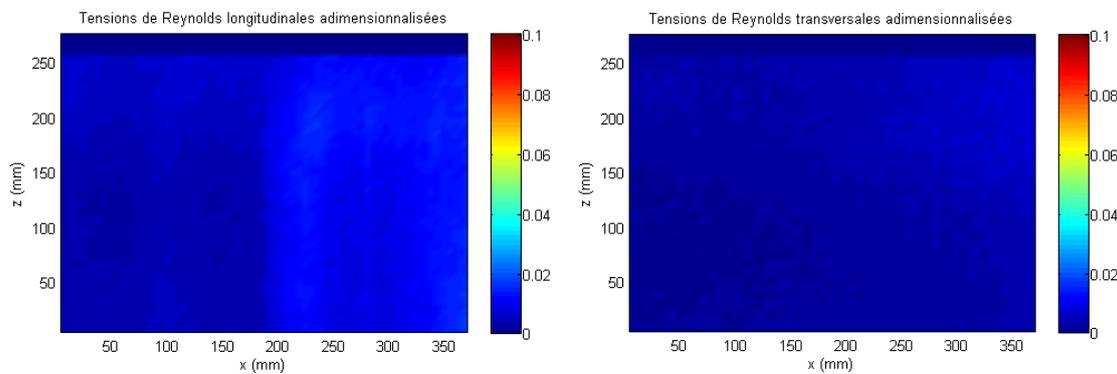


FIGURE 5.2 – Tenseur des contraintes de Reynolds sans générateur de houle. [Gauche] Composante longitudinale. [Droite] Composante verticale.

Nous sommes donc en présence d'un écoulement unidirectionnel à faible turbulence et avec $\bar{U} = 0,75$ m/s.

5.1.2 Écoulement avec générateur immergé sans houle

Dans le cas avec générateur de houle (figures 5.3 et 5.4), l'immersion du générateur provoque une légère montée du niveau d'eau dans le bassin. Par conséquent la surface libre se situe à 2 cm au dessus des plans de mesure dans cette configuration (la caméra n'ayant pas été déplacée entre les deux essais).

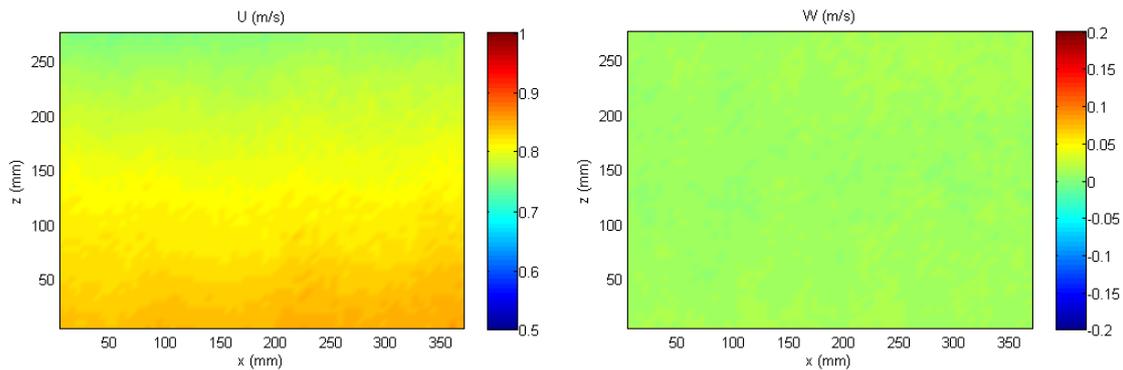


FIGURE 5.3 – Champs de vitesses moyennes avec générateur immergé, sans houle. [Gauche] Vitesse longitudinale. [Droite] Vitesse verticale.

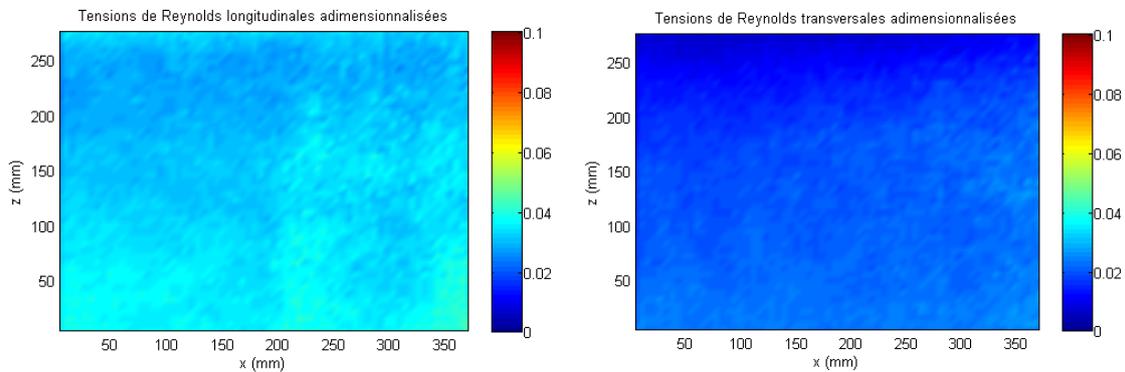


FIGURE 5.4 – Tenseur des contraintes de Reynolds avec générateur immergé, sans houle. [Gauche] Composante longitudinale. [Droite] Composante verticale.

On retrouve bien une vitesse moyenne verticale nulle. La vitesse longitudinale moyenne est légèrement plus élevée, avec $\bar{U} = 0,78$ m/s. Cette différence s'explique par l'interaction entre le courant et le générateur de houle, et la difficulté de générer une vitesse précise en surface dans cette configuration. On observe également dans cette configuration une variation importante de la vitesse longitudinale en fonction de la profondeur. La vitesse minimale est de 0,73 m/s dans la partie supérieure du plan de mesure ($z = 276$ mm), tandis que la vitesse maximale est de 0,84 m/s dans la partie inférieure ($z = 0$ mm). La différence de vitesse moyenne reste cependant

5.1. CARACTÉRISATION DE L'ÉCOULEMENT INCIDENT

faible, inférieure à 0,04 m/s. Les tensions de Reynolds adimensionnées atteignent dans cette configuration $R_{uu} = 0,033$ et $R_{ww} = 0,019$.

Nous sommes donc ici toujours en présence d'un écoulement unidirectionnel mais à turbulence plus élevée, notamment pour la composante longitudinale.

5.1.3 Écoulement avec générateur et houle

Dans le cas avec houle (figures 5.5 et 5.6), le niveau zéro de la surface libre est toujours situé à 2 cm au dessus des plans de mesure. La zone de vitesse nulle correspond ici au niveau du creux de houle.

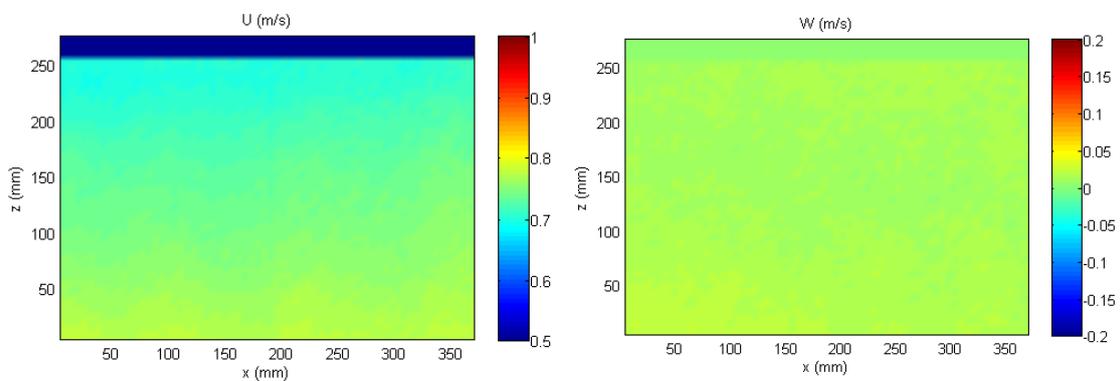


FIGURE 5.5 – Champs de vitesses moyennes avec générateur et houle. [Gauche] Vitesse longitudinale. [Droite] Vitesse verticale.

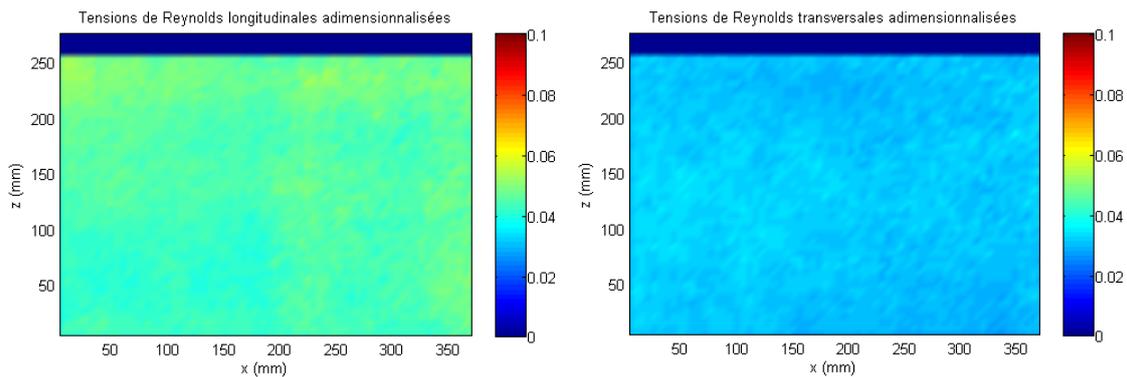


FIGURE 5.6 – Tenseur des contraintes de Reynolds avec générateur et houle. [Gauche] Composante longitudinale. [Droite] Composante verticale.

On retrouve dans cette configuration une vitesse moyenne verticale nulle. La vitesse longitudinale est dans ce cas légèrement plus faible (0,72 m/s). La houle diminue l'effet de variation de la vitesse longitudinale en fonction de la profondeur.

5.1. CARACTÉRISATION DE L'ÉCOULEMENT INCIDENT

Les tensions de Reynolds sont les plus élevées, en combinant les effets de la houle et de l'interaction courant/générateur, on obtient $R_{uu} = 0,045$ et $R_{ww} = 0,032$.

On s'intéresse également ici à l'influence de la houle sur les champs de vitesse. Pour cela des moyennes de phase ont été réalisées sur la séquence de mesure. Comme indiqué en début de section, le système PIV fonctionne à une fréquence de 8,5 Hz, afin d'obtenir exactement 10 mesures de vitesse par période de houle. Une illustration de ces phases est représentée sur la figure 5.7, et les moyennes des phases 1 à 9 sont représentées sur la figure 5.8. Pour des raisons de clarté la phase 10 n'est pas représentée mais a bien été prise en compte durant l'analyse.

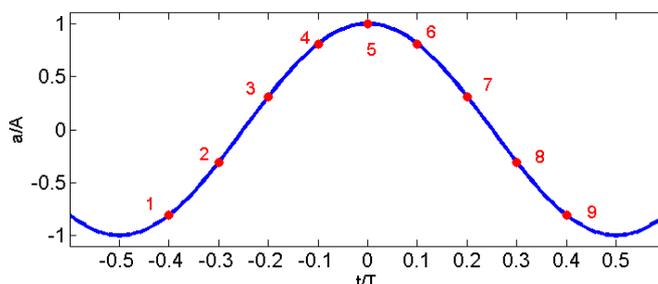


FIGURE 5.7 – Instants correspondant aux calculs des moyennes de phase

La houle générée dans le bassin étant fortement perturbée par l'interaction entre le générateur de houle et le courant (cf. paragraphe 4.4.1 et annexe B), on peut observer des fluctuations de la longueur d'onde, de l'amplitude et de la période de la houle. Par conséquent, les calculs de moyennes de phases réalisés directement sur toute une séquence, avec les champs de vitesse $p + 10 \cdot i$ (où p correspond à la phase et où i est un entier variant entre 0 et $N-1$, avec N le nombre de périodes de la séquence) ne convergent pas. Ce calcul a donc été repris en réajustant la phase à partir du signal de houle mesuré par la sonde résistive. Pour chaque période, l'image correspondant au pic de houle est détectée et ajoutée au calcul de la moyenne de la phase 5. Les images précédentes sont ajoutées aux calculs des moyennes des phases 1 à 4 (les images suivantes sont ajoutées aux calculs des moyennes des phases 6 à 10).

L'image du centre de la figure 5.8 correspond à la phase 5, c'est à dire au pic de la houle. Sur chacun des graphiques sont représentés les vecteurs vitesses, et la couleur représente la valeur de la vitesse verticale. On retrouve donc bien une vitesse verticale nulle lors du pic de houle. Les vitesses verticales sont maximales pour les phases 2 et 3 et minimales pour les phases 7 et 8, avec des valeurs absolues d'environ 0,15 m/s. Ces valeurs sont cohérentes avec la valeur théorique de 0,18 m/s obtenue en appliquant la théorie d'Airy (cf. paragraphe 4.3.2).

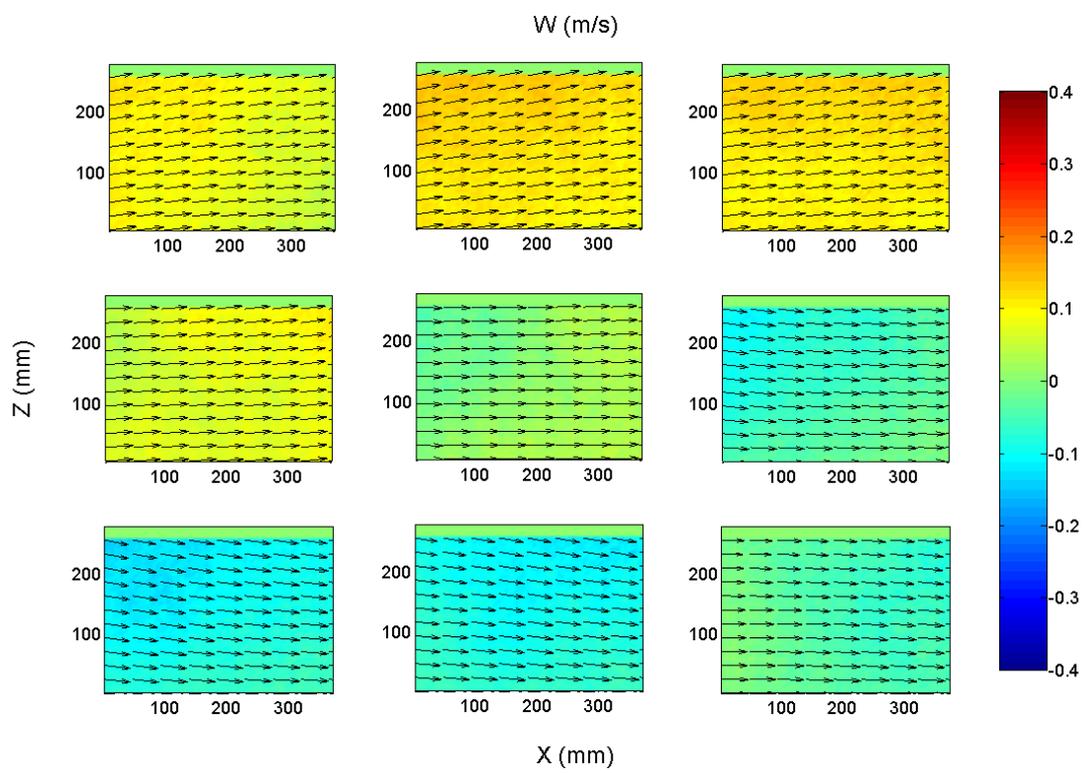


FIGURE 5.8 – Moyenne de phase sur toute la séquence avec houle et courant

5.1.4 Comparaison des intensités turbulentes

Pour conclure la comparaison des écoulements incidents dans les trois cas d'étude, les intensités turbulentes sont calculées afin de confirmer l'influence de la présence du générateur sur cet indicateur. Cette caractérisation est importante du fait de l'influence de la turbulence sur la génération de bulles, tel que cela a été démontré dans le chapitre précédent. La figure 5.9 présente le pourcentage d'intensité turbulente (IT) pour les différents cas, avec dans notre configuration de mesure PIV bidimensionnelle :

$$IT(\%) = 100 \cdot \sqrt{\frac{1}{2} \cdot \frac{\overline{u'^2} + \overline{w'^2}}{\overline{u^2} + \overline{w^2}}} \quad (5.3)$$

Les résultats confirment donc bien l'importance de la présence du générateur de houle sur l'intensité turbulente. Lorsque le générateur est relevé, l'intensité turbulente est de l'ordre de 6%. La seule présence du générateur augmente cette intensité jusqu'à une valeur de 15%. Enfin la turbulence est maximale pour le cas avec houle où $IT = 20\%$.

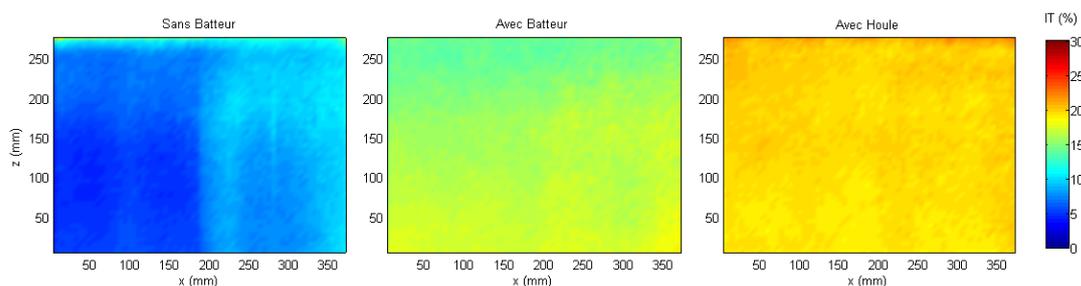


FIGURE 5.9 – Intensité turbulente pour les trois configurations. [Gauche] Générateur relevé. [Centre] Générateur immergé, sans houle. [Droite] Avec houle.

L'étude de ces différents cas sans carène permet de caractériser l'écoulement incident, et de mieux appréhender chaque configuration. On peut alors s'intéresser à l'interaction entre le fluide et la maquette, et à l'impact de la forme sur l'écoulement.

5.2 Caractérisation de l'écoulement autour de l'étrave du *Pourquoi pas ?*

5.2.1 Plans de mesures

Suite à cette première phase sans carène, l'écoulement autour de la maquette du *Pourquoi pas ?* a pu être mesuré. Trois plans verticaux ont été traités (cf. illustrations figure 5.10). Le premier plan correspond à l'axe de symétrie de la maquette. Le second plan correspond à une translation du plan 1 de 50 mm vers bâbord. Le dernier plan correspond à une translation de 100 mm.

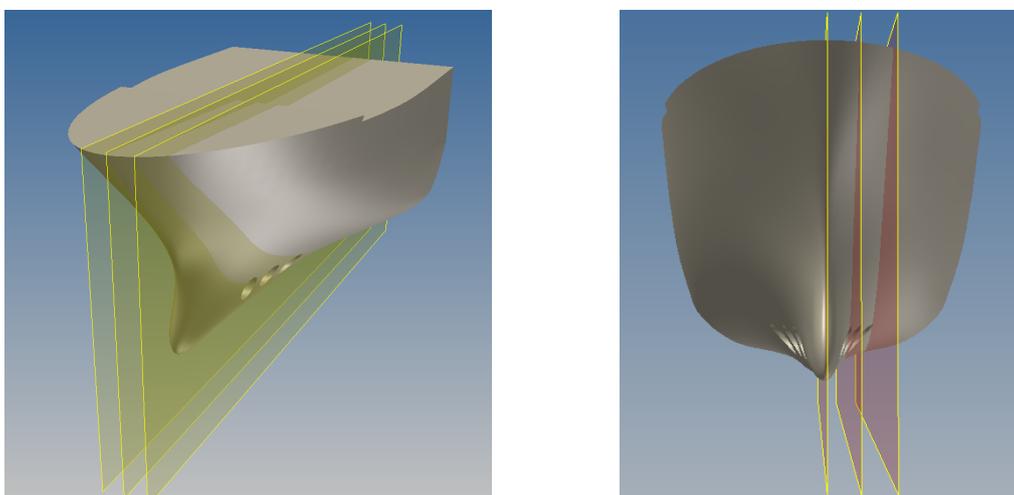


FIGURE 5.10 – Visualisation des trois plans verticaux de mesures PIV

Ces trois plans sont également décalés selon l'axe longitudinal (cf. schéma figure 5.11). Ces décalages ont été réalisés afin de visualiser le contact entre l'écoulement et la maquette sur chaque plan, comme le montre les images de la figure 5.12.

Pour chacun de ces plans, les quatre configurations de base -avec courant seul, avec courant et houle, avec courant et mouvements, et enfin avec courant, houle et mouvement- ont été répétées. La fréquence des mesures PIV est toujours de 8,5 Hz afin d'obtenir exactement 10 mesures par période de houle et/ou mouvement. La durée de chaque séquence de mesure a été augmentée à 3 minutes, ce qui correspond à 1530 images.

5.2. CARACTÉRISATION DE L'ÉCOULEMENT AUTOUR DE L'ÉTRAVE DU POURQUOI PAS ?

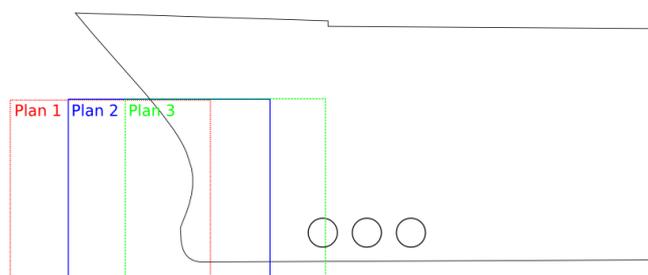


FIGURE 5.11 – Schéma du décalage longitudinal des plans de mesures PIV

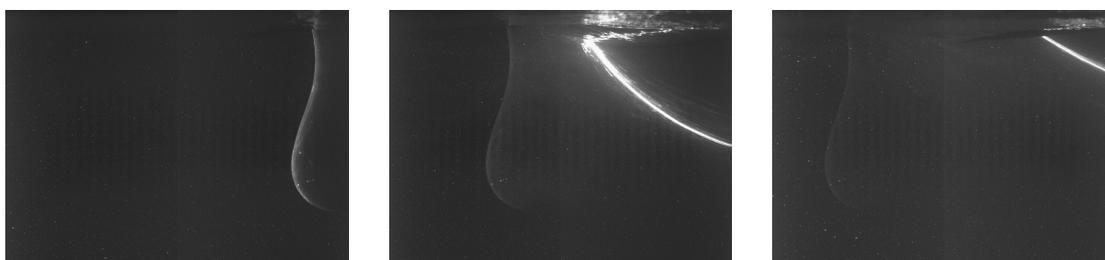


FIGURE 5.12 – Visualisation des images PIV dans les trois plans verticaux

Dans tous les plans d'études, des zones ne sont pas exploitables à cause de la présence de l'étrave ou de la surface libre. Ces zones sont illustrées sur la figure 5.13 dans le plan $y=0$ mm. Des masques ont donc été réalisés : sur toutes ces zones, on impose une valeur nulle aux vecteurs vitesse.

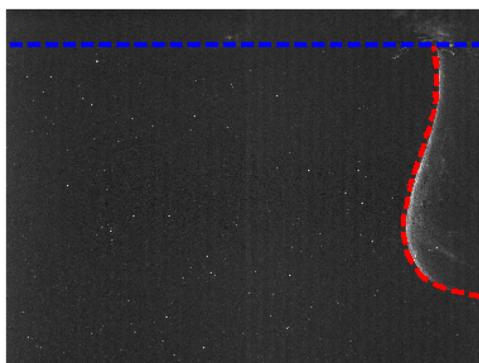


FIGURE 5.13 – Illustration des zones masquées dans le plan de symétrie de la maquette

La génération de ces masques est relativement aisée dans la première configuration, sans houle et sans mouvements, car les zones sont fixes. En revanche, pour les configurations avec houle et/ou mouvements, les masques doivent être délimitées

5.2. CARACTÉRISATION DE L'ÉCOULEMENT AUTOUR DE L'ÉTRAVE DU *POURQUOI PAS ?*

pour chaque image. De manière analogue à la méthode de détection des bulles, une analyse du niveau de gris des images dans Matlab permet de détecter la réflexion du laser sur l'étrave. La limite supérieure de la réflexion correspond au niveau de la surface libre. Le masque est alors délimité par deux droites (cf. figure 5.14), la première (pointillés rouges) correspondant au suivi de la réflexion du laser, et la seconde (pointillés bleus) dont la pente a été fixée de façon à obtenir une marge suffisante sur les perturbations de la surface libre.

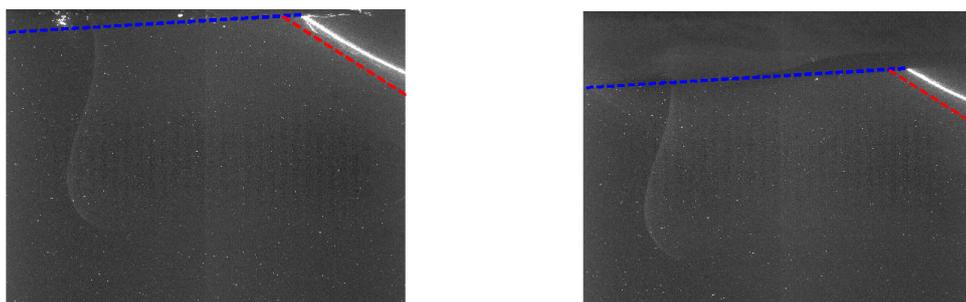


FIGURE 5.14 – Détection automatique des zones non exploitables pour les mesures PIV, dans le plan $y=100$ mm

On peut noter ici que cette technique génère une légère perte d'information au plus proche de la surface libre dans la partie gauche des images. Cependant les analyses présentées dans ce chapitre n'ont pas été affectées par ce problème.

5.2.2 Analyse des champs de vitesses instantanées

Ce paragraphe a pour but de présenter de façon précise et visuelle les mesures réalisées. Le chapitre 4 ayant démontré que les principaux nuages de bulles sont générés par le déferlement dû à la houle, on se focalisera ici sur la seconde configuration avec courant et houle. Deux séquences de houle ont été choisies dans les plans 1 (plan de symétrie) puis 3 (à $y = 100$ mm), afin de comparer les vitesses mesurées avec et sans déferlement sur une période de houle.

Les figures 5.15 et 5.16 présentent respectivement les images et les champs de vitesses instantanées dans le plan de symétrie de la maquette, pour une période durant laquelle aucune bulle n'est visible. Le pic de houle correspond à l'image du centre (image 5), et la hauteur de houle mesurée sur cette période est de 83 mm. Sur la figure 5.16, l'échelle de couleur représente la vitesse verticale w .

Au cours de cette période, on peut observer des vitesses ascendantes (ponctuellement jusqu'à 0,39 m/s) pendant la phase d'élévation de la surface libre correspondant aux images 1 à 3. La vitesse est ensuite globalement négative à partir du pic de houle. Cependant ces vitesses sont relativement faibles (avec $w > -0,3$ m/s), et des zones de vitesses positives sont présentes sur toutes les images de cette période. Par ailleurs pour toute cette séquence on observe des vitesses plongeantes sous la forme bulbeuse, dès la première image et malgré la houle incidente.

Les figures 5.17 et 5.17 présentent respectivement les images et les champs de vitesses instantanées dans le même plan, pour une période durant laquelle on peut observer l'initiation du phénomène de déferlement, avec l'apparition de bulles à l'étrave du navire (seule indication possible du phénomène d'entraînement d'air dans ce plan). Logiquement, la hauteur de houle est plus élevée pour cette période ($H = 135$ mm), ce paramètre étant directement proportionnel à la fréquence de génération des nuages de bulles (cf. paragraphe 4.4.1).

L'évolution du champs de vitesses dans ce plan est totalement distincte pour cette période, avec des variations de vitesses beaucoup plus prononcées en fonction des phases de la houle. Les vitesses ascendantes générées par le front de houle se concentre contre l'étrave sur les images 2 et 3. On constate une accélération sur l'image 3 avec des vitesses verticales atteignant ponctuellement $w = 0,60$ m/s. Pour l'image 4, l'écoulement est presque vertical au contact de la surface libre, avec un rapport $\frac{w}{u}$ proche de 1,5 dans cette zone.

L'écoulement replonge à partir du pic de houle, pour obtenir des vitesses descendantes très importantes (ponctuellement jusqu'à -0,80 m/s) sur les images 6 à 8.

5.2. CARACTÉRISATION DE L'ÉCOULEMENT AUTOUR DE L'ÉTRAVE DU POURQUOI PAS ?

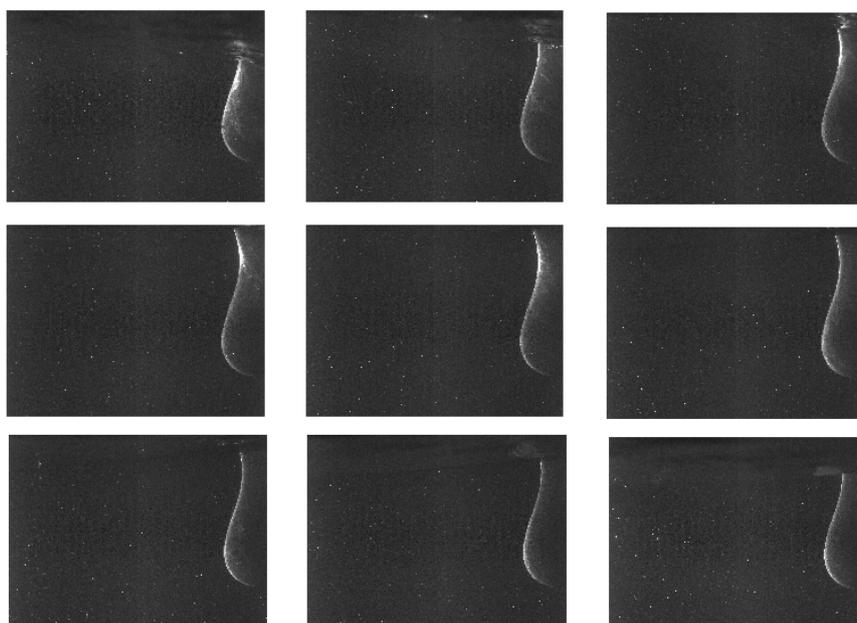


FIGURE 5.15 – Visualisation d'une période de houle sans déferlement, dans le plan de symétrie de la maquette

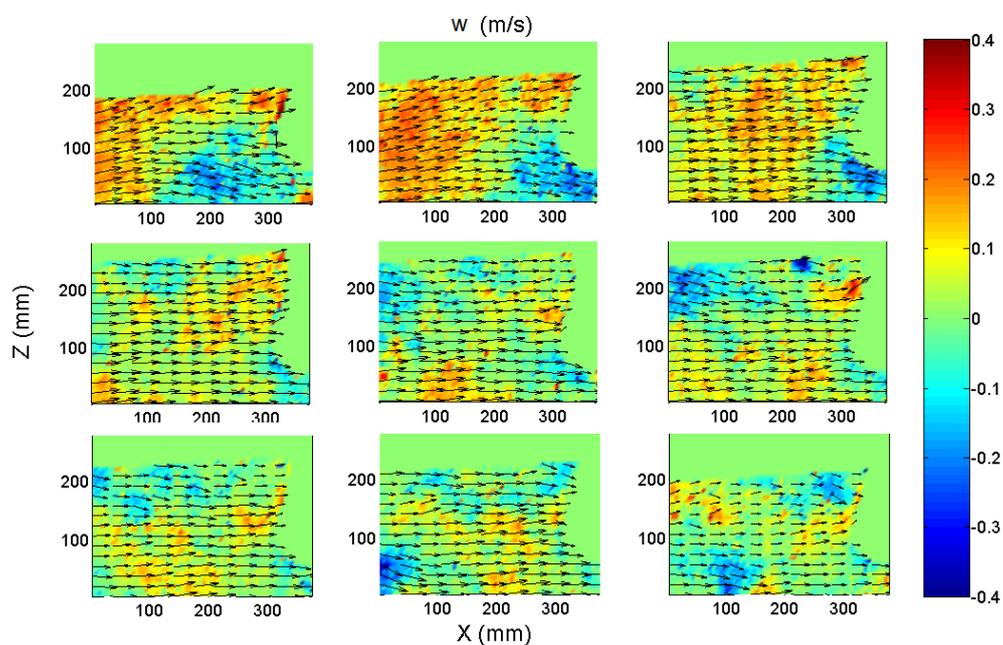


FIGURE 5.16 – Champs de vitesses instantanées d'une période de houle sans déferlement, dans le plan de symétrie de la maquette

5.2. CARACTÉRISATION DE L'ÉCOULEMENT AUTOUR DE L'ÉTRAVE DU *POURQUOI PAS ?*

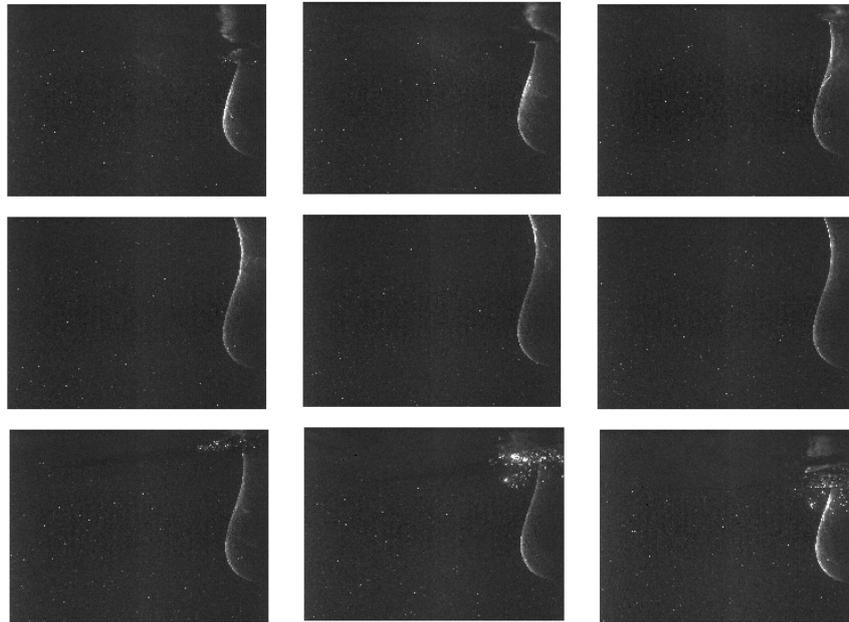


FIGURE 5.17 – Visualisation d'une période de houle, avec déferlement et génération de bulles, dans le plan de symétrie de la maquette

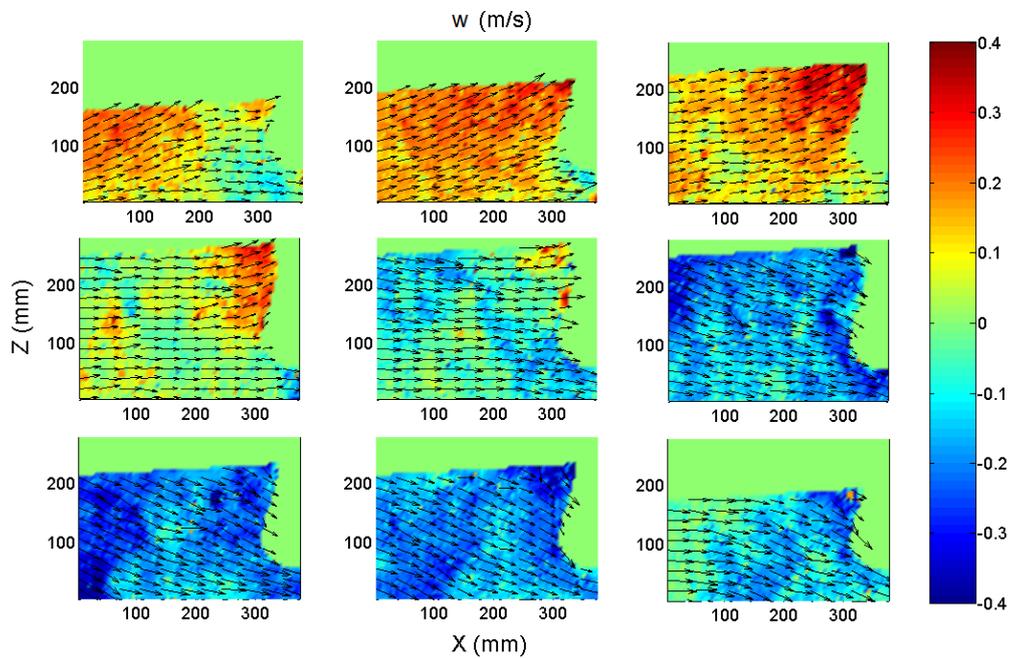


FIGURE 5.18 – Champs de vitesses instantanées d'une période de houle avec déferlement et génération de bulles, dans le plan de symétrie de la maquette

Le plan 3 offre une meilleure visibilité du phénomène de génération de bulles. Les figures 5.19 et 5.20 présentent respectivement les images et les champs de vitesses instantanées dans ce plan, pour la période sans déferlement. Le pic de houle correspond toujours à l'image du centre. À cet instant, la surface libre se situe au dessus de la limite supérieure de l'image.

On peut observer sur les champs de vitesse que les masques suivent bien l'évolution de la surface. Les champs instantanés présentent des vitesses verticales positives importantes sur la partie gauche du plan de mesure (jusqu'à plus de 0,4 m/s) pour les images 1 à 3, correspondant à l'élévation de la surface libre. À l'inverse des vitesses plongeantes sont présentes dans tout le plan après le pic de houle (images 6 et 7). La vitesse minimale mesurée sur cette période est de -0,53 m/s.

Les figures 5.21 et 5.22 présentent les images et les champs de vitesses instantanées pour la période avec déferlement. La génération du nuage de bulles est bien visible sur ces images. Comme cela a pu être observé dans le chapitre précédent, l'initiation de l'entraînement d'air a lieu juste après le pic de houle (image 6). Le nuage de bulles est ensuite entraîné le long de la carène. Sur les images où les bulles sont observées assez largement sous la surface libre, et donc sous le masque PIV, la méthode "adaptive correlation" permettant d'obtenir les champs de vitesse prend en compte le déplacement des particules mais également des bulles dans les fenêtres d'interrogation. Les vitesses mesurées dans les zones des nuages de bulles sont donc les vitesses du milieu diphasique, pouvant être affecté par la dynamique des bulles.

Sur cette période, durant laquelle on observe un déferlement, les vitesses positives lors de l'élévation de la surface libre sont très élevées dans la zone de contact entre la forme et la surface. La vitesse maximale mesurée est de 0,63 m/s. De même, les vitesses plongeantes sont très importantes sur cette période de déferlement. La vitesse minimale mesurée est de -0,78 m/s. Ces valeurs extrêmes sont environ 50% supérieures à celles mesurées pour la période sans déferlement. L'énergie de l'écoulement est donc ici bien supérieure, et permet d'entraîner un nuage de bulles en profondeur. Les hauteurs de vagues mesurées sont ici de 89 mm pour le cas sans déferlement, et 104 mm pour le cas où l'on observe un déferlement.

Enfin, on peut constater une zone de vitesse ascensionnelle proche de la surface libre après le phénomène de déferlement (image 9). Cette zone n'existant pas pour la période sans déferlement, on peut supposer que ces vitesses sont liées à la remontée du nuage de bulles vers la surface.

Ces observations instantanées permettant de caractériser les périodes d'entraînement d'air par déferlement seront approfondies par une analyse en moyenne de phase dans le paragraphe 5.2.4.

5.2. CARACTÉRISATION DE L'ÉCOULEMENT AUTOUR DE L'ÉTRAVE DU
POURQUOI PAS ?

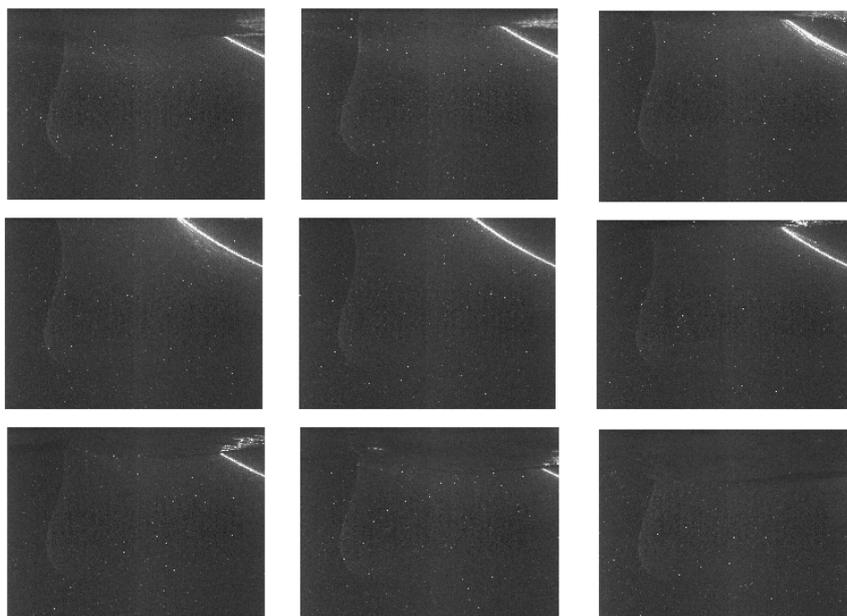


FIGURE 5.19 – Visualisation d’une période de houle sans déferlement, dans le plan à $y = 100$ mm

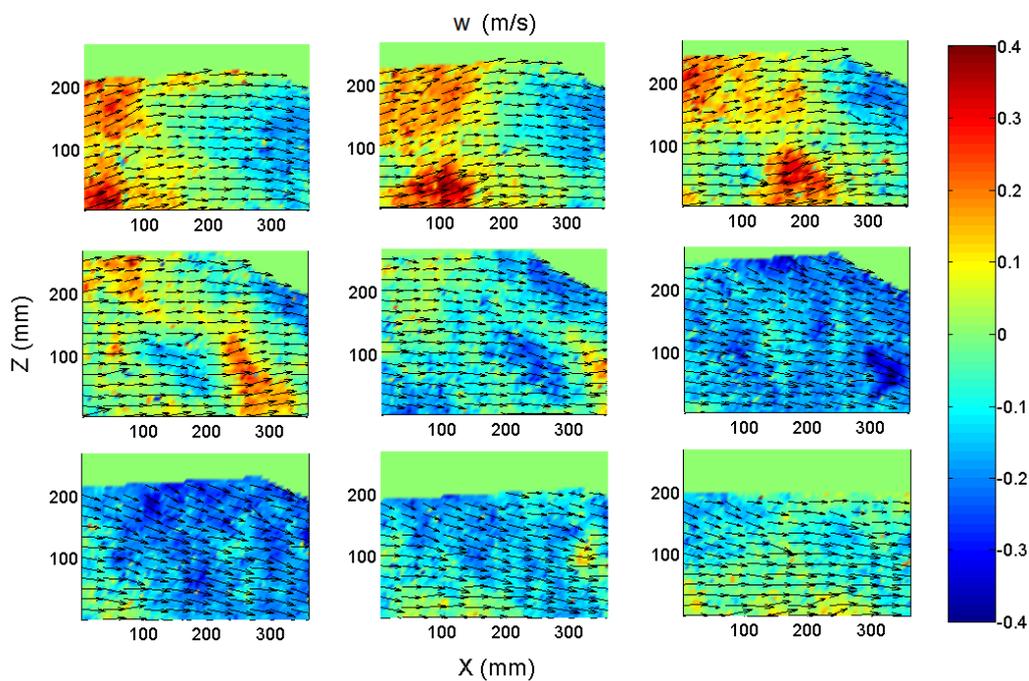


FIGURE 5.20 – Champs de vitesses instantanées d’une période de houle sans déferlement, dans le plan à $y = 100$ mm

5.2. CARACTÉRISATION DE L'ÉCOULEMENT AUTOUR DE L'ÉTRAVE DU
POURQUOI PAS ?

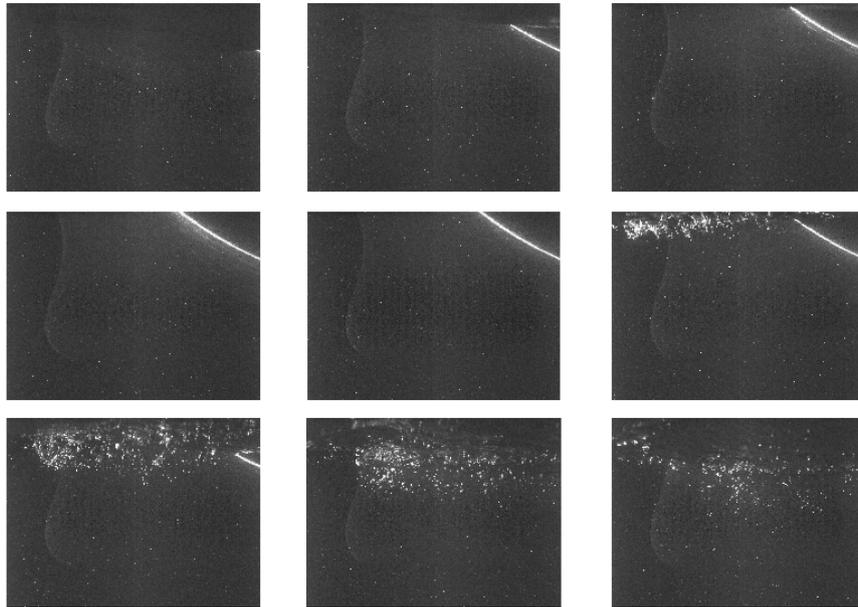


FIGURE 5.21 – Visualisation d'une période de houle avec déferlement et génération de bulles, dans le plan à $y = 100$ mm

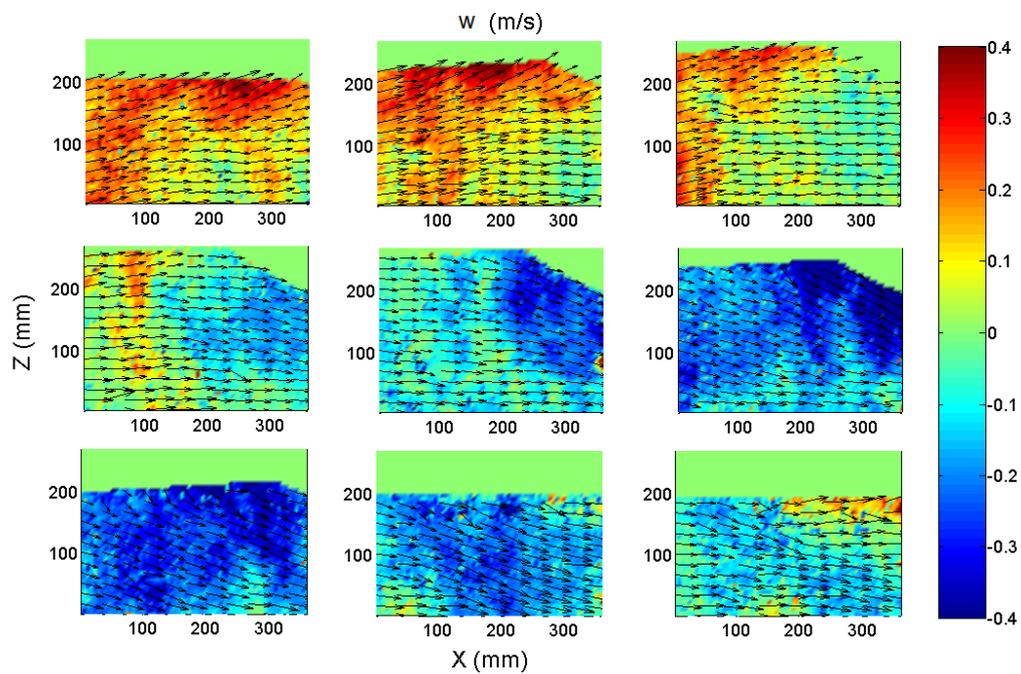


FIGURE 5.22 – Champs de vitesses instantanées d'une période de houle avec déferlement et génération de bulles, dans le plan à $y = 100$ mm

5.2.3 Analyse des champs de vitesses moyennes

Afin de compléter l'analyse des champs de vitesses instantanées, les vitesses moyennes ont été calculées dans les trois plans de mesure PIV, pour la première configuration avec courant uniquement. Les composantes longitudinales (U) et verticales (W) de la vitesse moyenne sont représentées pour les plans 1, 2 et 3 sur les figures 5.23, 5.24 et 5.25 respectivement. Les lignes de courant correspondantes sont également représentées. Il est intéressant de rappeler ici que le positionnement des sonars est actuellement réalisé à partir de l'étude des lignes de courant, obtenues par simulations numériques. La méthodologie d'essai développée dans ce manuscrit permet donc également d'accéder à ce type d'information.

Dans le plan de l'axe de symétrie du navire, on observe un ralentissement net de l'écoulement avant l'étrave, avec une transition rapide entre des vitesses proches de 0,75 m/s et des zones où la vitesse longitudinale est inférieure à 0,5 m/s. L'écoulement est particulièrement ralenti au plus proche de la surface libre.

Au contact de l'étrave, l'écoulement se sépare en deux zones. L'une au dessus de la forme bulbeuse où la vitesse verticale est positive, l'autre sous cette forme bulbeuse où la vitesse verticale est négative, avec des valeurs absolues atteignant 0,2 m/s.

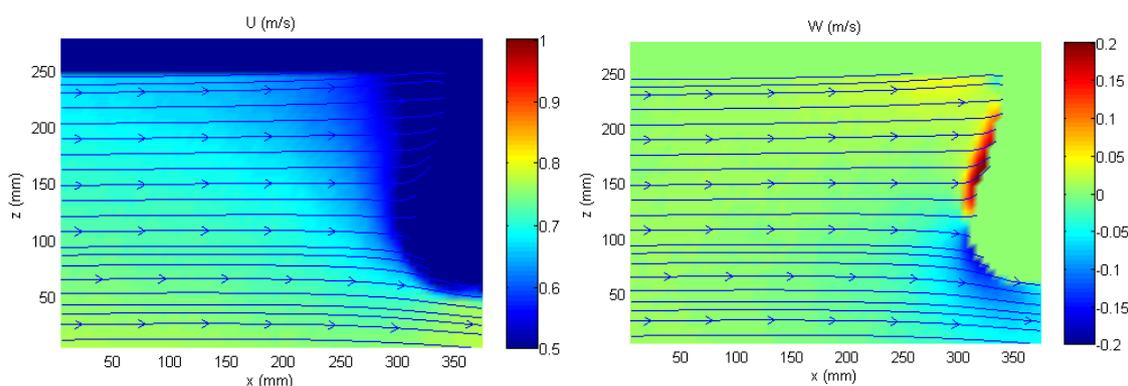


FIGURE 5.23 – Champs de vitesses moyennes et lignes de courant dans le plan de l'axe de symétrie de la maquette. [Gauche] Vitesse longitudinale. [Droite] Vitesse verticale.

Dans les plans à $y = 50$ mm et $y = 100$ mm de l'axe de symétrie, on peut distinguer une zone de faible vitesse dans la partie supérieure gauche des plans de mesures. Cette zone correspond à l'élargissement de l'étrave, qui impose donc un contournement de la forme. La composante transverse de l'écoulement (suivant l'axe Y perpendiculaire au plan PIV) est sans doute non négligeable dans cette zone.

On observe une vitesse verticale négative, dans la partie droite des plans de mesure, atteignant -0,12 m/s dans le plan 2 et -0,09 m/s dans le plan 3. On peut constater des lignes de courant plongeantes dans ces plans, et notamment à $y = 50$ mm de l'axe de symétrie de la maquette.

5.2. CARACTÉRISATION DE L'ÉCOULEMENT AUTOUR DE L'ÉTRAVE DU POURQUOI PAS ?

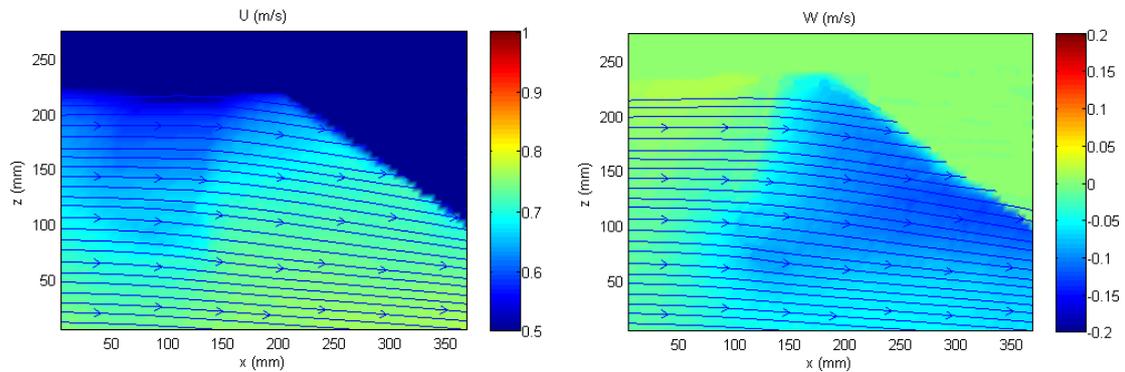


FIGURE 5.24 – Champs de vitesses moyennes et lignes de courant dans le plan à $y = 50$ mm. [Gauche] Vitesse longitudinale. [Droite] Vitesse verticale.

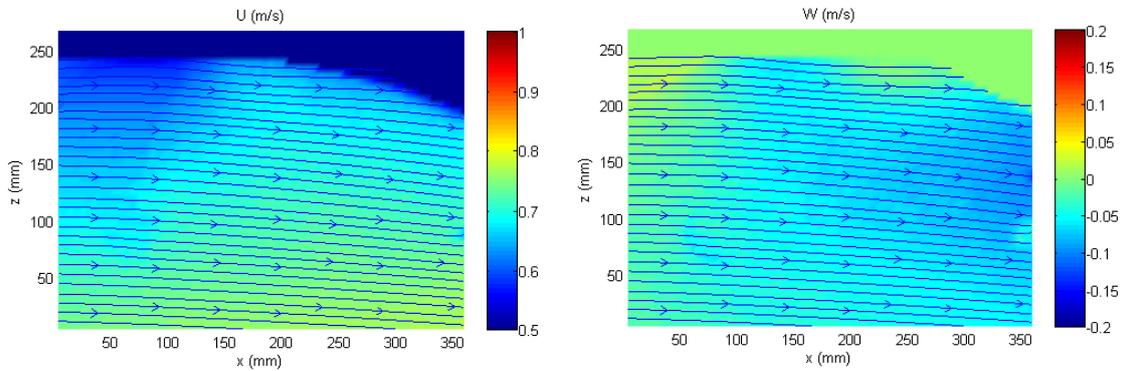


FIGURE 5.25 – Champs de vitesses moyennes et lignes de courant dans le plan à $y = 100$ mm. [Gauche] Vitesse longitudinale. [Droite] Vitesse verticale.

Au vue des vitesses plongeantes bien supérieures mesurées sur les champs instantanés en présence de houle, ces résultats montrent que la seule prise en compte des lignes de courant obtenues dans la configuration sans houle ni mouvement ne suffit pas à la validation du positionnement des sondeurs. Les influences sur l'écoulement de la houle, des mouvements, puis de la combinaison de ces deux éléments sont présentées dans le paragraphe suivant.

5.2.4 Analyse en moyenne de phase

Configuration 2

Les calculs de moyenne de phase, déjà décrits pour le cas avec houle sans carène, sont effectués dans le plan de symétrie pour la seconde configuration avec courant et houle. Les résultats sont présentés sur la figure 5.26, où chaque image correspond aux phases détaillées sur la figure 5.7. L'image du centre (phase 5) correspond au pic de houle au niveau de l'étrave.

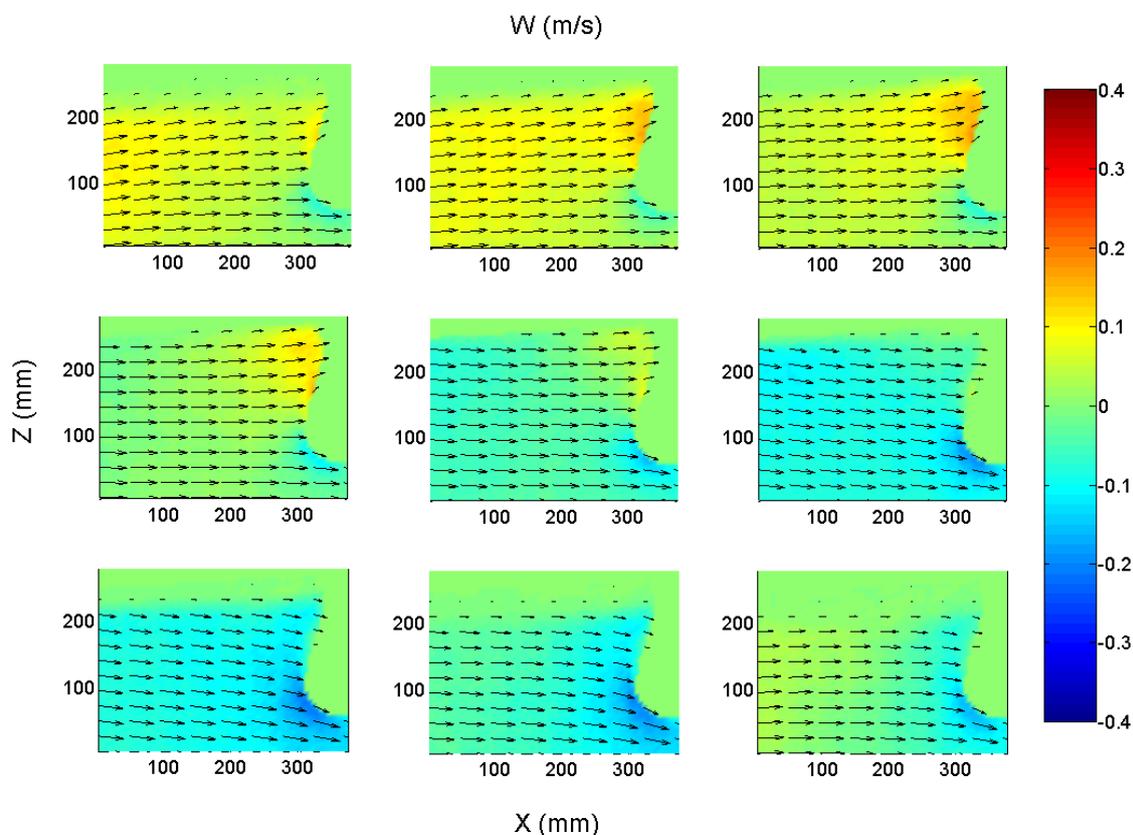


FIGURE 5.26 – Moyennes de phase de la configuration 2, dans le plan de symétrie de la maquette

L'écoulement dans ce plan est globalement ralenti par la présence de la forme. Les fluctuations de vitesse verticale sont légèrement plus faibles que pour le cas avec houle sans maquette, et ne sont pas uniforme dans tout le plan de mesure. Les fortes fluctuations sont concentrées au contact de l'étrave où l'on observe des vitesses verticales de 0,17 m/s pour les phases 2 et 3. On retrouve la séparation de l'écoulement (observée sur les champs moyens) autour de la forme bulbeuse, avec des vitesses descendantes sous le bulbe même pour les phases 1 à 4, et atteignant -0,21 m/s pour la phase 7.

5.2. CARACTÉRISATION DE L'ÉCOULEMENT AUTOUR DE L'ÉTRAVE DU POURQUOI PAS ?

Pour la suite de l'étude, on s'intéressera particulièrement au 3^{ème} plan à $y = 100$ mm (figure 5.27), dans lequel on peut observer l'entraînement des bulles d'air.

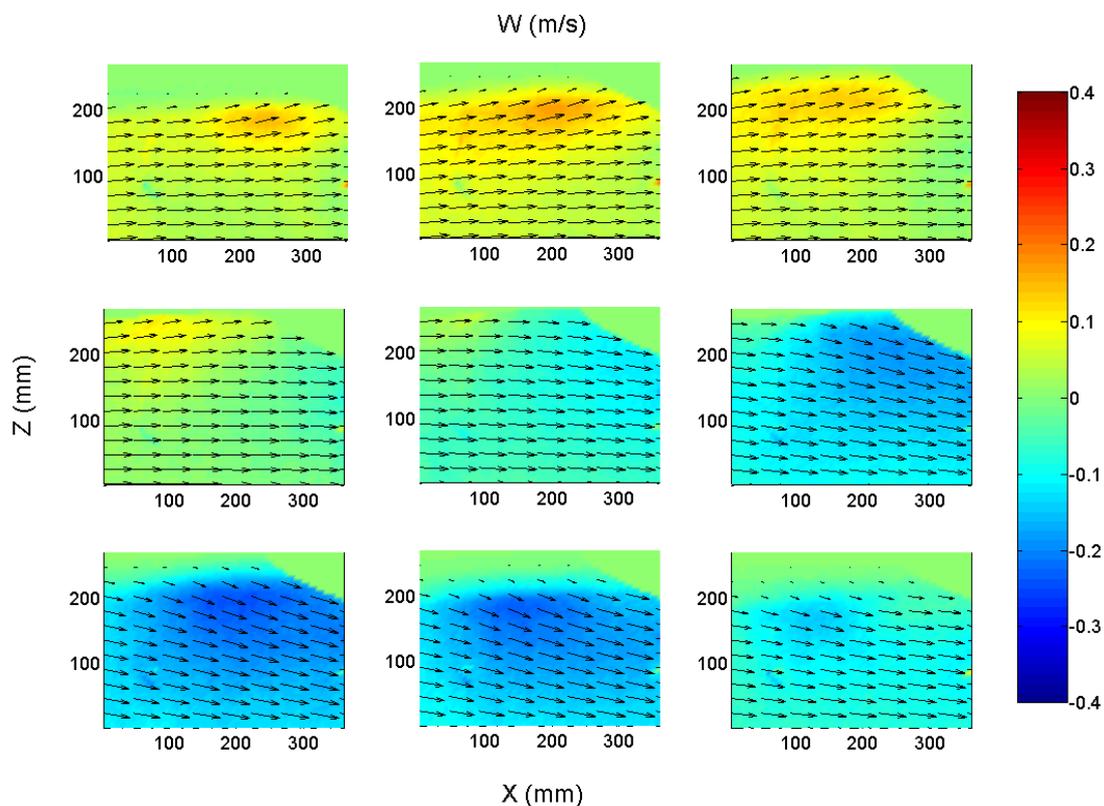


FIGURE 5.27 – Moyennes de phase de la configuration 2, dans le plan à $y = 100$ mm

On retrouve dans ce plan le fait que l'écoulement moyen possède une vitesse verticale négative, avec une composante globalement plongeante lors du pic de houle en phase 5. Les valeurs maximales (phase 2) et minimales (phase 7) sont significatives : la présence de la forme génère des vitesses verticales maximales de 0,22 m/s et minimales de -0,25 m/s (contre 0,15 m/s sans la carène). La zone où les fluctuations sont maximales se situe proche de la surface libre et de la carène. La moyenne des hauteurs de houle est de 79 mm pour cette séquence d'essai.

5.2. CARACTÉRISATION DE L'ÉCOULEMENT AUTOUR DE L'ÉTRAVE DU POURQUOI PAS ?

Ces calculs de moyennes de phase peuvent être répétés en distinguant deux catégories : les périodes de houle durant lesquelles on n'observe pas de génération de bulles ("cas non bullés"), et les périodes durant lesquelles des bulles sont détectées par la méthode de traitement d'image décrite dans le chapitre précédent ("cas bullés").

Les moyennes de phase calculées sur les cas non bullés sont présentées sur la figure 5.28. L'écoulement est sensiblement équivalent au cas de moyenne de phase sur toute la séquence. On retrouve les zones de fortes fluctuations, avec des amplitudes similaires : une vitesse verticale maximale de 0,22 m/s et minimale de -0,23 m/s. La moyenne des hauteurs de houle correspondant à ces cas non bullés est de 76 mm.

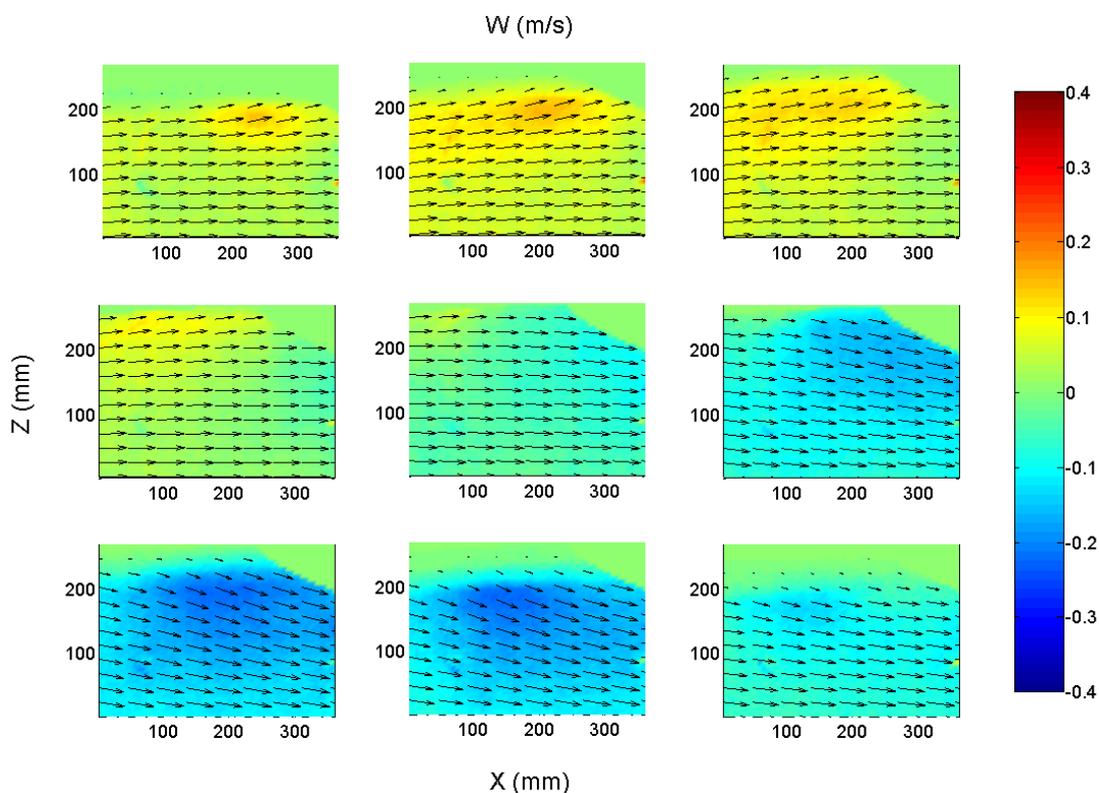


FIGURE 5.28 – Moyennes de phase sur les cas non bullés de la configuration 2

5.2. CARACTÉRISATION DE L'ÉCOULEMENT AUTOUR DE L'ÉTRAVE DU POURQUOI PAS ?

La moyenne des hauteurs de houle provoquant des générations de bulles est ici de 84 mm. Les nuages de bulles sont donc bien générés plus fréquemment pour des houles de grandes amplitudes, mais la différence des moyennes de hauteur de houle entre les cas bullés et non bullés est relativement faible ($\approx 10\%$). La hauteur de houle n'est donc pas le seul paramètre responsable du déferlement et de la génération de bulles. Pour les moyennes de phase sur ces cas bullés (figure 5.29), la zone de forte fluctuation est plus étendue. Les valeurs absolues de ces fluctuations sont également plus élevées. La vitesse verticale maximale observée en phase 2 est toujours similaire (0,23 m/s). En revanche, la vitesse verticale minimale observée en phase 7 est de -0,31 m/s, soit une augmentation de la vitesse plongeante absolue de plus de 30% pour les cas bullés par rapport au cas non bullés. De plus, l'apparition de vitesses négatives non négligeables a lieu plus tôt dans la période : dès la phase 4 contre une apparition à la phase 5 pour les cas non bullés. Le phénomène de déferlement est donc détecté ici de façon purement hydrodynamique.

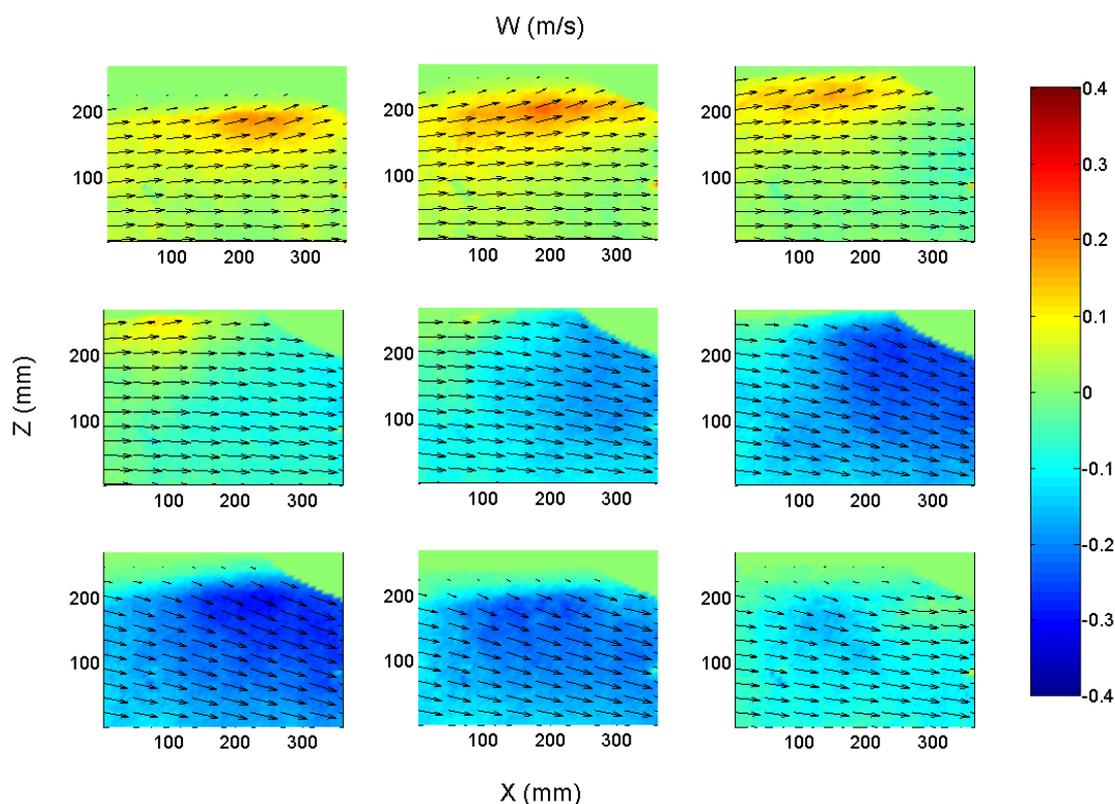


FIGURE 5.29 – Moyennes de phase sur les cas bullés de la configuration 2

Configuration 3

Les moyennes de phase obtenues dans le plan de symétrie et dans le plan 3 ($y = 100 \text{ mm}$) pour la configuration avec courant et mouvements sont présentées sur les figures 5.30 et 5.31 respectivement. Dans ce cas, la phase 5 correspond au pic de tangage, c'est à dire au moment où l'étrave est dans la position la plus élevée.

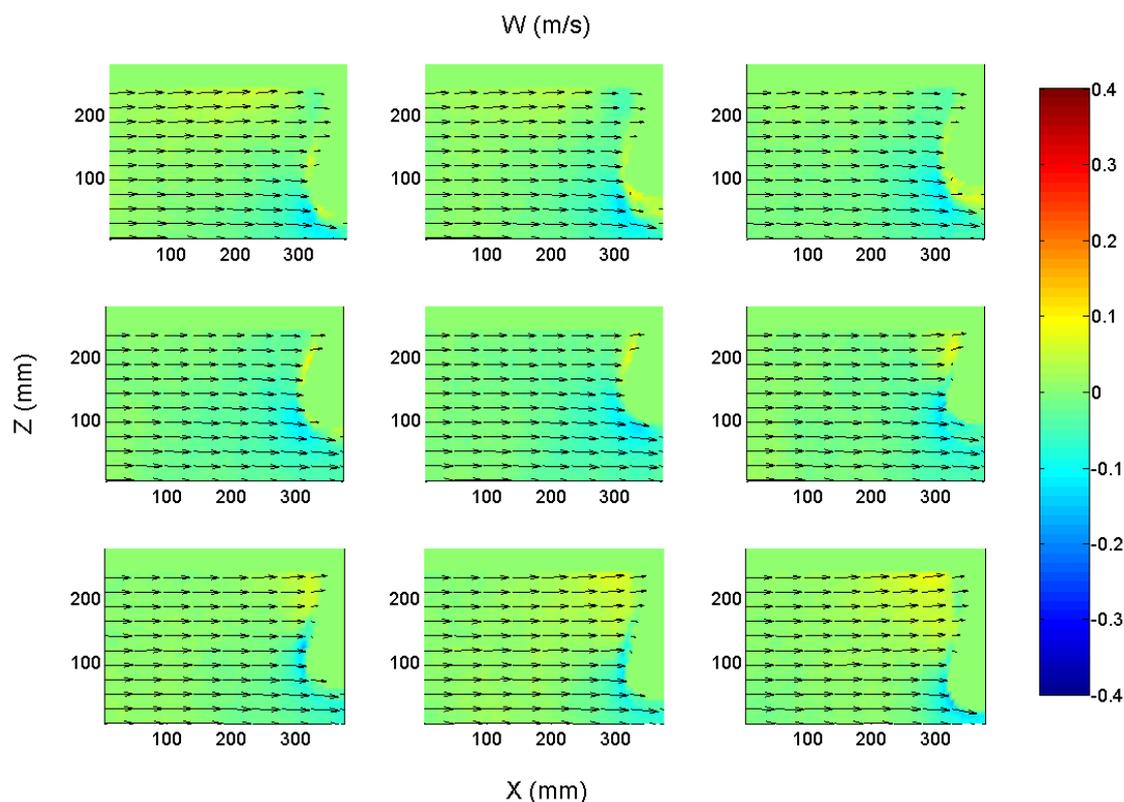


FIGURE 5.30 – Moyennes de phase sur toute la séquence de la configuration 3, dans le plan de symétrie de la maquette

Les amplitudes des fluctuations sont beaucoup plus faibles que celles générées par la houle. Dans le plan de symétrie, la vitesse verticale reste proche de zéro dans la majorité du plan, excepté autour du bulbe avec une composante négative toujours présente. On observe l'apparition d'une zone de vitesse positive (jusqu'à $0,10 \text{ m/s}$) sous le bulbe lors de la remontée de l'étrave (phases 2 et 3). Par ailleurs, l'enfoncement de l'étrave génère également une zone de vitesse positive proche de la surface, atteignant $0,09 \text{ m/s}$ pour la phase 9.

5.2. CARACTÉRISATION DE L'ÉCOULEMENT AUTOUR DE L'ÉTRAVE DU POURQUOI PAS ?

Dans le plan à $y=100$ mm, la position basse de l'étrave (phase 1) impose à l'écoulement de contourner la forme évasée et génère donc des vitesses descendantes. À l'inverse, des vitesses verticales ascendantes sont observées après le pic de tangage. On observe des vitesses verticales minimales pour la phase 1 de $-0,16$ m/s et maximales pour la phase 8 de $0,09$ m/s. Les fluctuations sont concentrées près du contact de la forme, et n'affectent pas la partie où $x < 100$ mm et $z < 100$ mm.

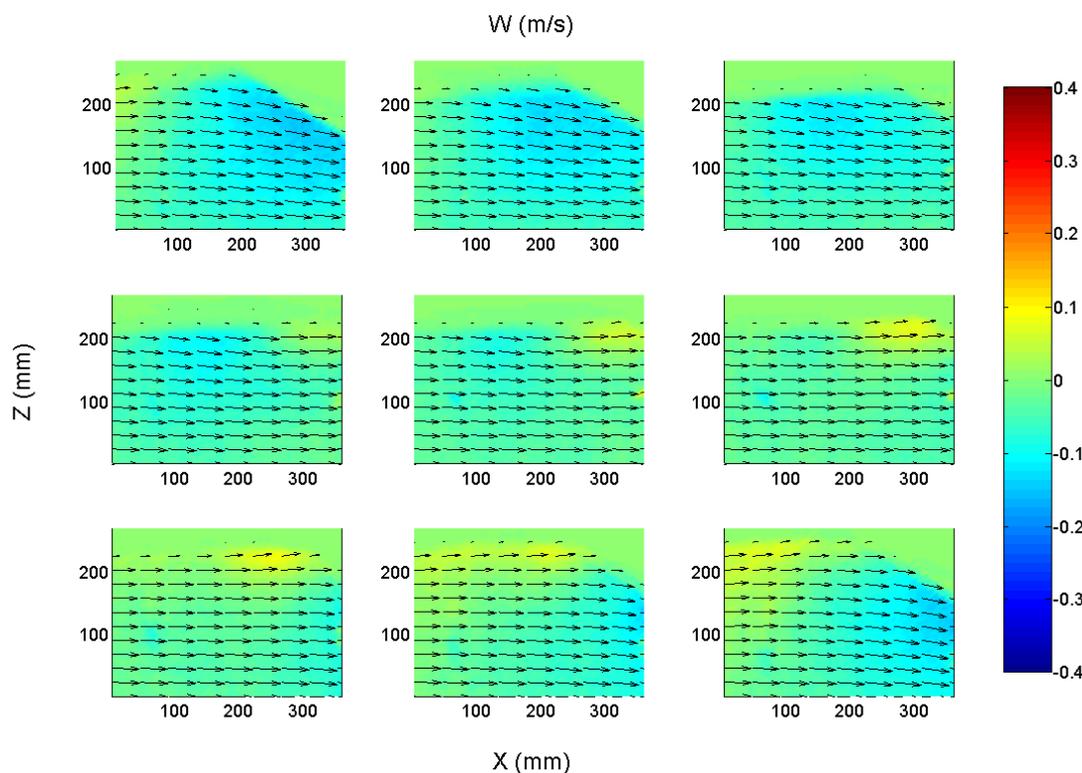


FIGURE 5.31 – Moyennes de phase sur toute la séquence de la configuration 3, dans le plan à $y = 100$ mm

Ces résultats expliquent également la plus faible influence des mouvements sur la génération de bulles, l'impact sur l'écoulement dans cette configuration étant beaucoup plus faible que dans la configuration avec houle.

Configuration 4

Les moyennes de phase obtenues pour la quatrième configuration avec courant, houle et mouvements sont présentées sur les figures 5.32 et 5.33 pour respectivement le plan de symétrie et le plan à $y = 100$ mm.

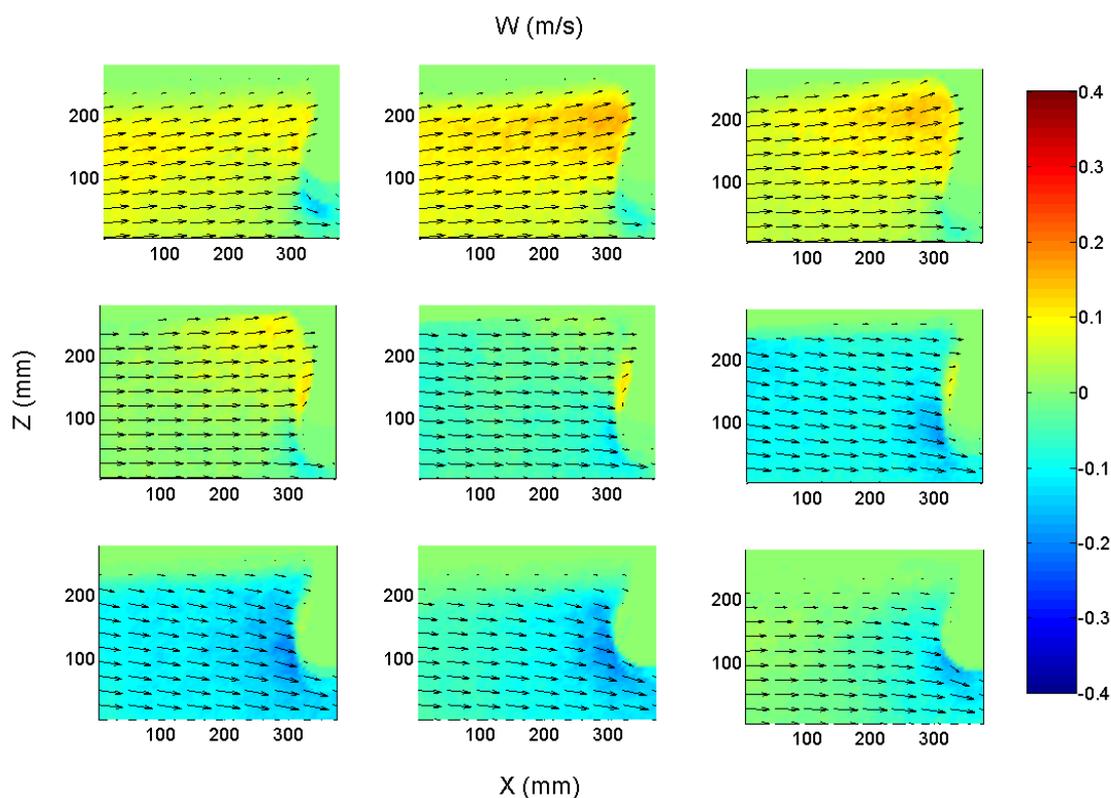


FIGURE 5.32 – Moyennes de phase sur toute la séquence de la configuration 4, dans le plan de symétrie de la maquette

Dans cette configuration, la houle et le tangage ne sont pas en phase (la houle étant en phase avec le pilonnement). La phase 5 correspond au pic de la houle au niveau de l'étrave. La résultante des deux contributions est similaire à ce qui a été détaillé pour la houle. Dans le plan de symétrie, les plus fortes fluctuations sont concentrées au contact de l'étrave avec des vitesses verticales de 0,17 m/s pour la phases 2, et atteignant -0,22 m/s autour du bulbe pour la phase 7. Dans le plan à $y = 100$ mm, les vitesses verticales sont maximales pour la phase 2 (0,19 m/s) et minimales pour la phase 7 (-0,24 m/s).

Ces mesures démontrent que l'influence de la houle sur l'écoulement autour de l'étrave est bien plus importante que celle des mouvements de la maquette.

5.2. CARACTÉRISATION DE L'ÉCOULEMENT AUTOUR DE L'ÉTRAVE DU
POURQUOI PAS ?

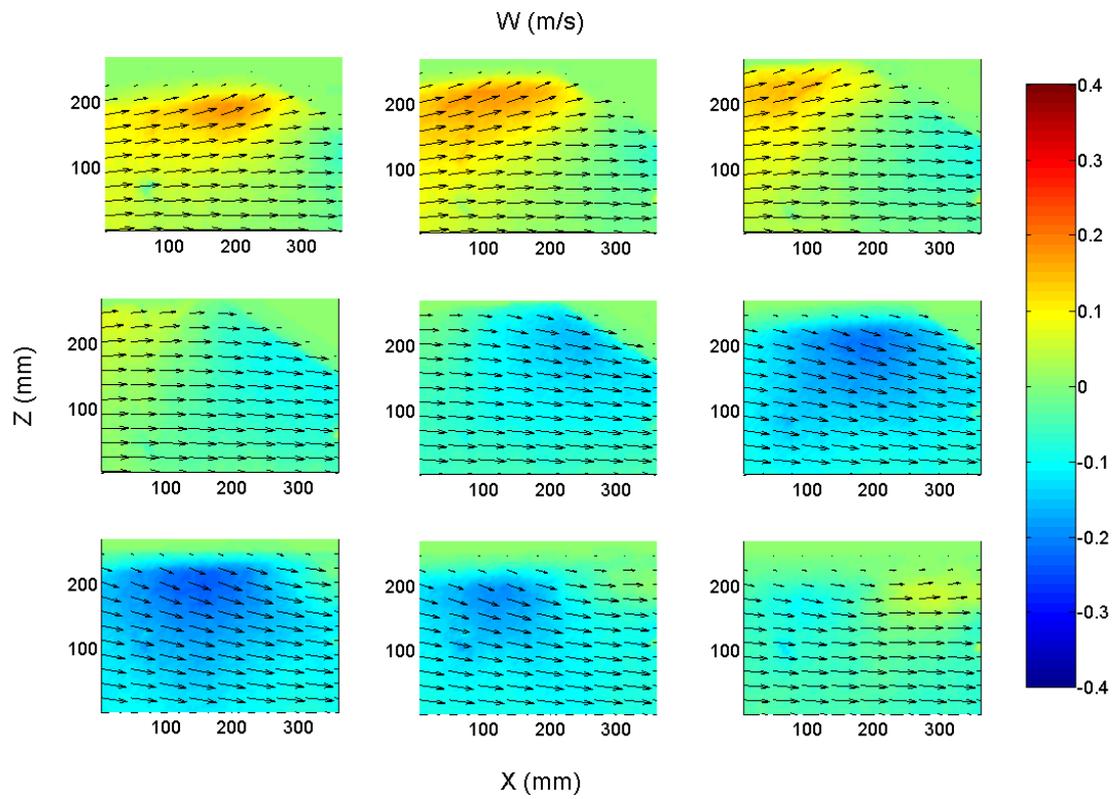


FIGURE 5.33 – Moyennes de phase sur toute la séquence de la configuration 4, dans le plan à $y = 100$ mm

5.2.5 Analyse fréquentielle

Les données PIV, en plus de représenter spatialement le champ instantané des vitesses, sont porteuses de nombreuses informations. L'objectif de ce paragraphe est de présenter les résultats obtenus à partir des informations contenues dans le domaine fréquentiel.

Une première approche consiste à étudier les spectres de vitesse de trois points du plan 3 (A, B et C, cf. figure 5.34). En chacun de ces points la transformée de Fourier discrète est calculée, après avoir retranché la moyenne temporelle. Les fréquences dominantes sont recherchées afin de caractériser les mécanismes, et savoir s'ils se produisent périodiquement. Les calculs ont été réalisés dans la première configuration avec courant seul (figure 5.35) et dans la seconde configuration avec courant et houle (figure 5.36). Ces figures représentent les spectres associés à la vitesse verticale (w).

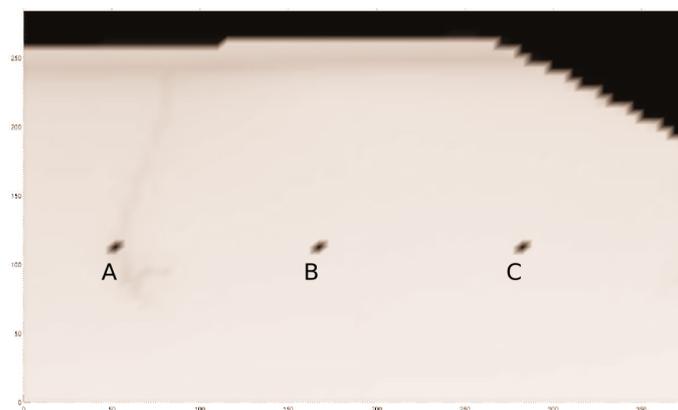


FIGURE 5.34 – Position des points dans le plan 3 à $y = 100$ mm

Aucune fréquence ne domine dans le premier cas, ce qui confirme le caractère aléatoire du phénomène d'entraînement tourbillonnaire. On peut noter que les amplitudes des composantes sont presque similaires à basses et à hautes fréquences (correspondant à du bruit de mesure), et ne dépassent que très rarement $0,01$ m/s.

Au contraire, dans le cas avec houle on retrouve une fréquence dominante de $0,85$ Hz, qui correspond bien à la fréquence de la houle. L'amplitude du spectre atteint à cette fréquence $0,11$; $0,13$ et $0,12$ m/s aux points A, B et C respectivement.

5.2. CARACTÉRISATION DE L'ÉCOULEMENT AUTOUR DE L'ÉTRAVE DU
POURQUOI PAS ?

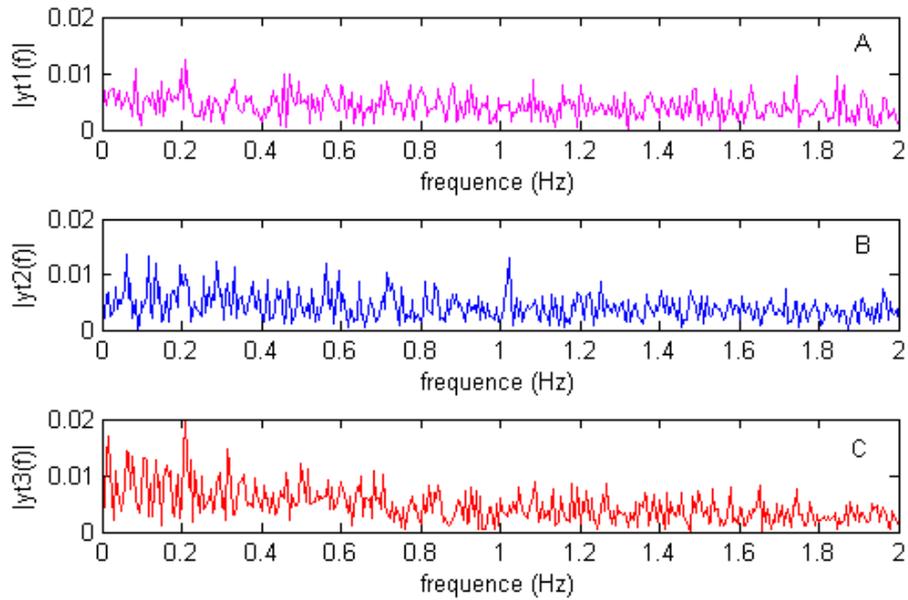


FIGURE 5.35 – Spectre de la vitesse verticale pour les points A, B et C dans la configuration 1 avec courant uniquement

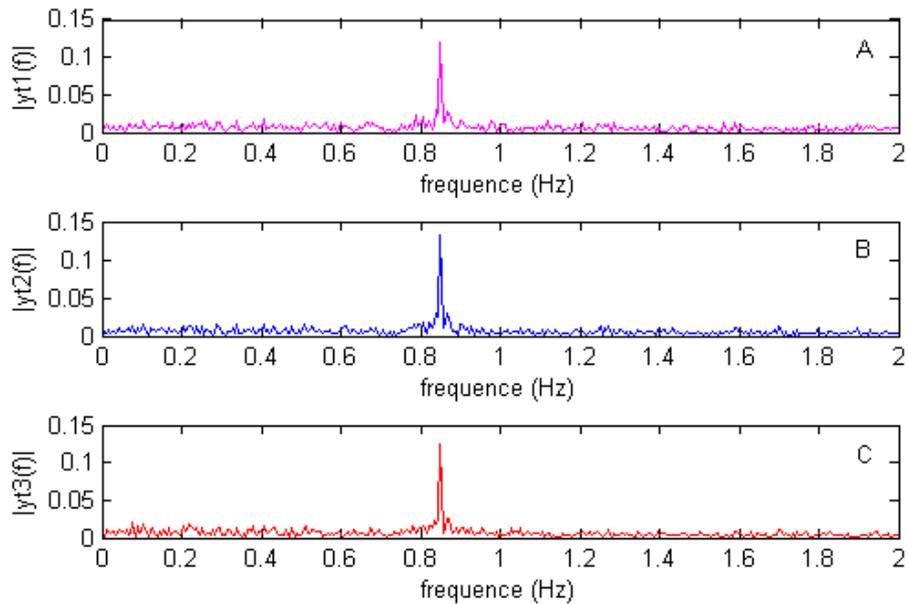


FIGURE 5.36 – Spectre de la vitesse verticale pour les points A, B et C dans la configuration 2 avec courant et houle

5.2. CARACTÉRISATION DE L'ÉCOULEMENT AUTOUR DE L'ÉTRAVE DU POURQUOI PAS ?

Une seconde approche consiste à analyser le spectre de la vitesse verticale dans tout le plan de mesure. La transformée de Fourier discrète est alors calculée en chaque point du plan. On relève à chaque fois l'amplitude maximale et la fréquence associée.

Les figures 5.37, 5.38, 5.39 et 5.40 illustrent ces calculs pour les quatre configurations de base. Sur chacune de ces figures la valeur des amplitudes maximales est représentée sur la graphique de gauche, et les fréquences associées sur la figure de droite.

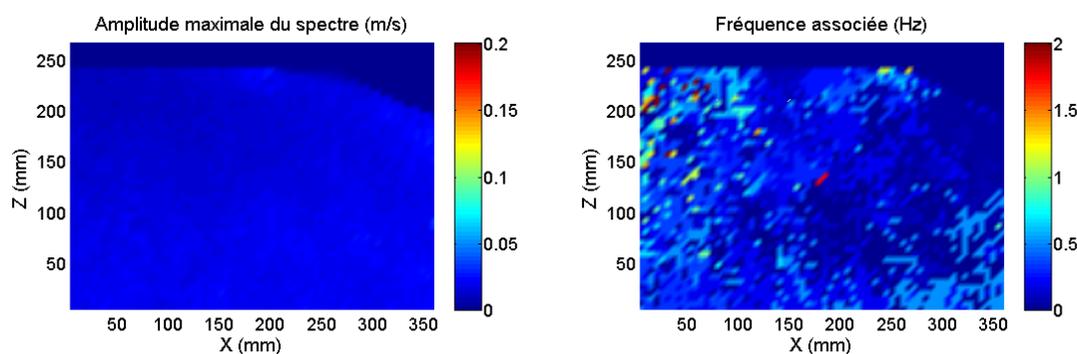


FIGURE 5.37 – Spectre de la vitesse verticale dans le plan pour le cas avec courant uniquement. [Gauche] Amplitude maximale de la transformée de Fourier. [Droite] fréquence associée à l'amplitude maximale.

Pour le cas avec courant seulement, l'amplitude maximale des fluctuations est faible. Il n'y a pas de fréquence dominante, les fréquences associées étant en majorité proche de zéro dans tout le plan. Les amplitudes du spectre étant très faibles, le bruit de mesure peut correspondre aux fluctuations d'amplitudes maximales, d'où l'apparition de hautes fréquences sur quelques points du graphique de droite de la figure 5.37.

Au contraire dans le cas avec houle on retrouve bien la fréquence de 0,85 Hz dans tout le plan. La zone grisée et délimitée par les pointillés correspond à la zone des mouvements de la surface libre générés par la houle. Les mesures peuvent donc être biaisées dans cette région. Cette approche permet de détecter une zone où les fluctuations de vitesse sont les plus significatives. Cette zone est concentrée proche de la surface libre, où l'influence de la houle est plus importante, mais également en une région proche de la carène (autour de $x = 200$ mm). Il est à noter ici que cette région correspond à la zone où la majorité de l'entraînement d'air peut être visualisée. La zone de fluctuation significative (zone rouge) atteint une profondeur d'environ 100 mm, ce qui correspond à la profondeur de pénétration des nuages de bulles par déferlement.

5.2. CARACTÉRISATION DE L'ÉCOULEMENT AUTOUR DE L'ÉTRAVE DU POURQUOI PAS ?

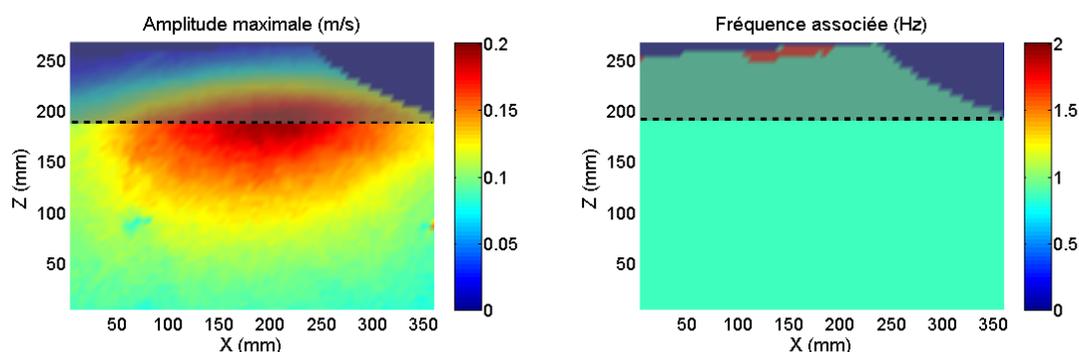


FIGURE 5.38 – Spectre de la vitesse verticale dans le plan pour le cas avec courant et houle. [Gauche] Amplitude maximale de la transformée de Fourier. [Droite] fréquence associée à l'amplitude maximale.

Pour le cas avec mouvements, on retrouve la fréquence de 0,85 Hz dans une grande partie du plan. Ces résultats confirment l'analyse en moyenne de phase : l'amplitude des fluctuations de l'écoulement est beaucoup plus faible que dans la configuration avec houle. De plus, la zone impactée par les mouvements est réduite, au plus proche de la maquette. La région en bas à gauche du plan n'est pas du tout affectée, et l'on retrouve majoritairement des basses fréquences.

La zone grisée ici prend en compte l'amplitude maximale des mouvements de l'étrave.

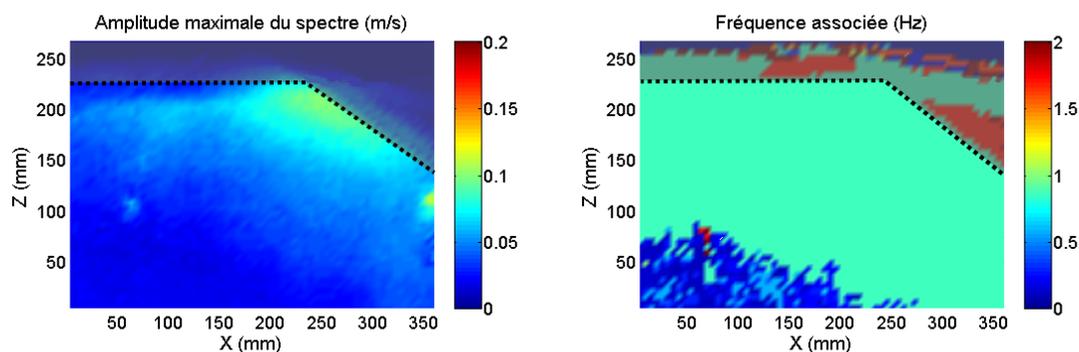


FIGURE 5.39 – Spectre de la vitesse verticale dans le plan pour le cas avec courant et mouvements. [Gauche] Amplitude maximale de la transformée de Fourier. [Droite] fréquence associée à l'amplitude maximale.

Enfin avec houle et mouvements, la répartition du spectre est similaire au cas avec houle seulement. La fréquence de 0,85 Hz est dominante dans tout le plan (excepté au dessus de la surface libre et sur la maquette). Il existe une région de forte

fluctuations concentrées près de la surface libre. Les fluctuations sont en revanche légèrement plus faibles, notamment dans la zone où $x > 200$ mm et $z < 100$ mm.

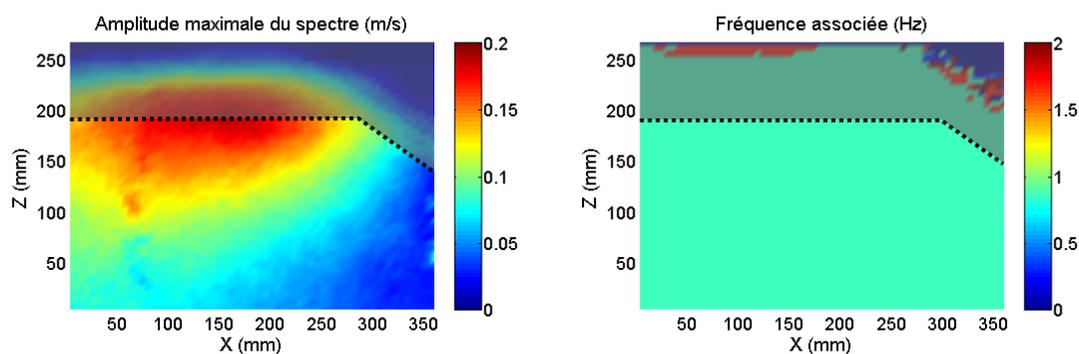


FIGURE 5.40 – Spectre de la vitesse verticale dans le plan pour le cas avec courant, houle et mouvements. [Gauche] Amplitude maximale de la transformée de Fourier. [Droite] fréquence associée à l'amplitude maximale.

Cette analyse fréquentielle permet de confirmer les différents résultats obtenus par la méthode des moyennes de phase. La houle est le paramètre le plus influant sur la dynamique de l'écoulement. Ces calculs permettent d'obtenir les amplitudes de fluctuations et de déterminer les zones correspondant aux fluctuations les plus élevées. Ces zones, où se concentre l'énergie de l'écoulement, correspondent aux endroits où le phénomène d'entraînement d'air peut avoir lieu.

5.3 Conclusion

Les mesures de l'écoulement par la méthode de Particles Image Velocimetry ont permis d'obtenir de nombreux résultats nécessaires à l'étude globale.

Tout d'abord, des mesures ont été réalisées afin de caractériser l'écoulement incident, et de confirmer l'influence du générateur de houle sur le taux de turbulence. Sur les plans de mesures, proche de la surface, on obtient une intensité turbulente de 6% sans le générateur, et une intensité de 15% avec le générateur immergé mais inactif.

Trois plans de mesures ont ensuite été définis autour de l'étrave de la maquette du *Pourquoi pas ?*. Les champs de vitesses moyennes ont été obtenus dans ces plans, ainsi que les lignes de courant. Ces éléments, bien que réducteurs au vue des vitesses plongeantes observées en présence de houle, sont actuellement essentiels lors de la détermination de l'emplacement des transducteur.

Une analyse en moyenne de phase, permet d'obtenir des valeurs précises de vitesses dans les différentes configurations. Ces valeurs ont pu être comparées notamment au cas de houle sans carène (vitesses maximales induites de 0,15 m/s). Les vitesses plongeantes maximales obtenues en moyenne de phase lors des cas bullés, correspondant aux cas de déferlements, sont de -0,31 m/s dans le plan $y = 100$ mm. Des vitesses plongeantes atteignant -0,78 m/s ont été mesurées ponctuellement sur des champs de vitesses instantanées. Les vitesses observées lors des périodes de houle sans déferlement sont bien plus faibles. Ces analyses permettent de faire le lien entre les phénomènes hydrodynamiques et le mécanisme d'entraînement d'air par déferlement.

Enfin, une analyse fréquentielle a permis de caractériser l'influence de la houle et des mouvements à la fréquence de 0,85 Hz. Les zones de fluctuations importantes de l'écoulement causées par la houle et/ou les mouvements sont ainsi déterminées. Les fluctuations générées par la houle sont les plus importantes, et celles générées par les mouvements se confinent au plus proche de la forme. Cela explique donc les corrélations relativement faibles entre les mouvements du navire et la génération de bulles, à la fois en mer (cf. chapitre 2) et en bassin (cf. chapitre 4). Au contraire, les corrélations entre l'état de mer (représenté par le vent) ou la houle avec la génération de bulles sont significatives.

Tous les résultats obtenus dans ce chapitre permettent de caractériser l'écoulement autour de la maquette, et sont complémentaires de l'analyse de la génération et de la dynamique des nuages de bulles en bassin de circulation. Ces mesures sont représentatives de l'écoulement réel grâce à la similitude de Froude, ce qui permettra de comparer différentes formes d'étrave de façon non biaisée par les effets d'échelle. Une seconde forme d'étrave sera ainsi testée dans le chapitre 6.

La possibilité d'obtenir deux types d'informations simultanées grâce à cette confi-

guration d'essai, à savoir l'entraînement d'air et le champs de vitesse, permet de développer certaines perspectives. Une analyse des champs de vitesse peut permettre de détecter automatiquement les phénomènes tourbillonnaires et de déferlement, responsables de l'entraînement d'air. Une méthode permettant de détecter les tourbillons à l'origine des nuages de bulles est actuellement en cours de développement. Cette méthode est basée sur la détection d'un changement de signe et d'un gradient important de la vitesse verticale le long d'une ligne sous la surface libre. Une seconde méthode permettant de détecter les vitesses plongeantes engendrées par les déferlements est également envisagée.

Enfin les forces de cisaillement présentes dans l'écoulement au moment de l'entraînement d'air peuvent être calculées. La connaissance de ces forces permettrait d'estimer la taille des bulles au réel, et d'en déduire la dynamique de celle-ci dans l'écoulement. Ce type de raisonnement est un premier pas vers une méthode d'extrapolation au réel de la dynamique des bulles étudiée en bassin.

Chapitre 6

Influence de la forme d'étrave

Sommaire

6.1	Analyse de l'entraînement d'air	165
6.2	Analyse de l'écoulement	169
6.2.1	Analyse des champs de vitesse moyens	169
6.2.2	Analyse en moyenne de phase	171
6.2.3	Analyse fréquentielle	174
6.3	Conclusion	176

La méthode d'essai décrite dans ce manuscrit a été développée en utilisant un navire existant, et en reproduisant les conditions de navigation ayant abouti à l'observation du passage de bulles sous les sonars de ce navire. Les chapitres 4 et 5 ont démontré l'intérêt de cette configuration d'essai, permettant de visualiser et d'analyser la génération de bulles en bassin, et également l'écoulement autour de l'étrave. Ce chapitre est donc consacré à l'application de cette méthode à une seconde forme d'étrave, afin de débiter la recherche de solutions pour limiter la génération et la propagation de bulles autour de la carène des navires scientifiques.

Dans cette optique, une forme de type étrave inversée a été retenue. La plupart des navires présentant ce type de forme sont dédiées au ravitaillement de plateforme offshore. C'est notamment le cas des navires Bourbon Orca et Bourbon Mistral dont on peut observer les formes sur la figure 6.1. Ce type de forme présente divers avantages. Tout d'abord une très bonne tenue à la mer, ce qui est primordial pour les missions de ravitaillement offshore, mais également la possibilité d'obtenir une longueur entre perpendiculaire supérieure, pour une même longueur hors-tout. Ce dernier point associé à la forme effilée de l'étrave inversée permet une réduction de la résistance à l'avancement, et donc une diminution de la consommation de carburant.



FIGURE 6.1 – Vue de navires Bourbon de type Étrave inversée par mer calme et forte

Cette forme d'étrave a surtout été retenue pour son bon comportement face à des houles importantes. Nous cherchons donc dans ce chapitre à étudier la génération de bulles et l'écoulement autour d'une étrave de ce type. Pour cela un navire "équivalent" au *Pourquoi pas ?* a été dessiné en modifiant uniquement les formes du tiers avant. La longueur hors-tout, ainsi que le déplacement du navire ont été conservés. La modification de forme est illustrée sur la figure 6.2. L'image de gauche superpose les formes du *Pourquoi pas ?* (en gris) et les formes de la nouvelle étrave (en rouge). La photo de droite présente les deux maquettes, toujours à une échelle 1/30. On peut constater que le tiers avant avec étrave inversée est bien compatible avec le reste du navire.



FIGURE 6.2 – Comparaison des formes du *Pourquoi pas ?* avec les formes du navire équivalent à étrave inversée

Les essais développés dans le chapitre 3 ont été reproduits pour cette seconde forme d'étrave. Les quatre configurations de base ont été testées, en conservant les caractéristiques de courant, de houle, et de mouvement. On s'intéresse donc ici uniquement à l'influence de la forme sur le phénomène de génération de bulles, sans prendre en compte l'influence de la forme sur la dynamique du navire.

L'analyse des mécanismes d'entraînement d'air est présentée dans la partie 6.1, puis l'analyse de l'écoulement est présentée dans la partie 6.2. Dans chacune de ces parties les performances de la forme de type étrave inversée sont comparées à celles du *Pourquoi pas ?*.

6.1 Analyse de l'entraînement d'air

Les deux mécanismes d'entraînement d'air sont toujours observés pour cette forme d'étrave. Des illustrations des entraînements d'air de type tourbillonnaire et de type déferlement sont présentées sur les figures 6.3 et 6.4.

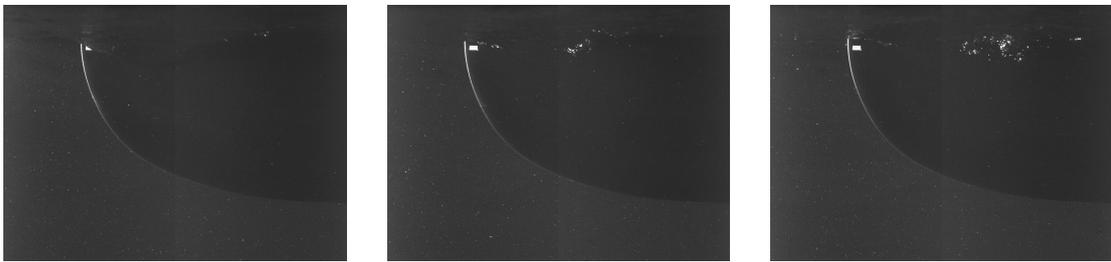


FIGURE 6.3 – Visualisation de l'entraînement d'air de type tourbillonnaire pour l'étrave inversée

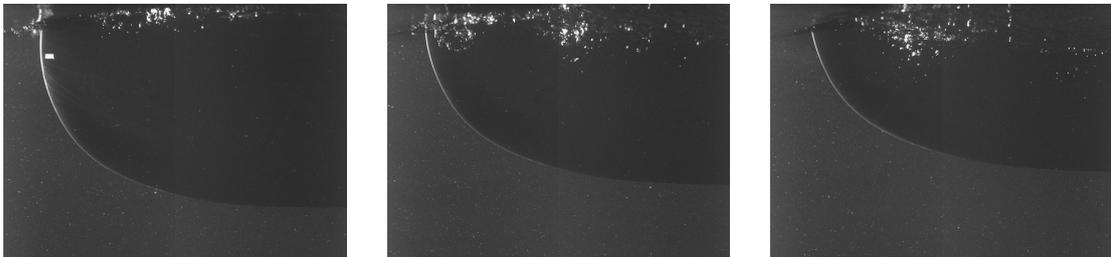


FIGURE 6.4 – Visualisation de l'entraînement d'air de type déferlement pour l'étrave inversée

La modification de forme change considérablement l'interaction avec l'écoulement. L'étrave plus longiligne et moins évasée génère une meilleure pénétration dans l'eau. Les phénomènes de création de cavité d'air puis d'entraînement tourbillonnaire, mais aussi de déferlement, sont moins fréquents et de plus faible intensité.

Les fréquences de génération de bulles pour les quatre configurations ont été calculées et sont présentées sur la figure 6.5. Les fréquences obtenues avec la maquette du *Pourquoi pas ?* sont également présentées sur le graphique de droite en guise de comparaison.

6.1. ANALYSE DE L'ENTRAÎNEMENT D'AIR

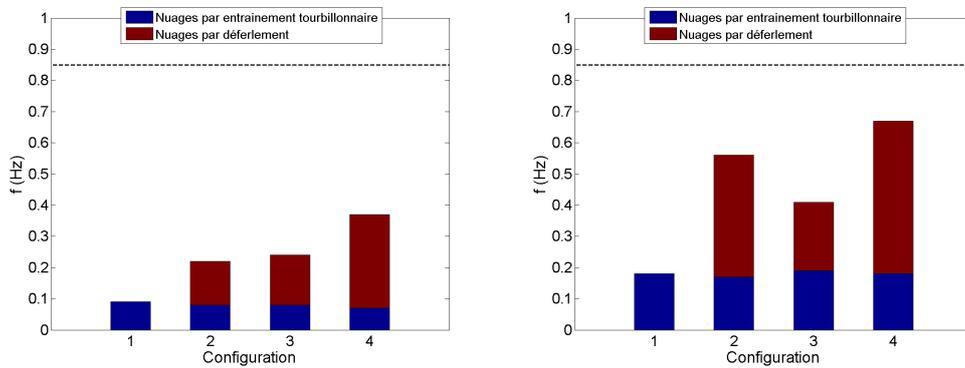


FIGURE 6.5 – Comparaison des fréquences de nuages de bulles entre l'étrave inversée [gauche] et le *Pourquoi pas ?* [droite]

La fréquence de la génération de bulles par entraînement tourbillonnaire reste presque constante pour les quatre configurations. Cette fréquence est d'environ 0,08 Hz, contre 0,18 Hz pour le *Pourquoi pas ?*, soit une diminution de plus de 50%. De même, la fréquence de la génération de bulles par déferlement diminue fortement, surtout dans le cas avec courant et houle. Les fréquences de déferlement obtenues sont de 0,14 ; 0,16 et 0,30 Hz pour les configurations 2, 3 et 4, contre 0,39 ; 0,22 et 0,49 Hz avec la maquette du *Pourquoi pas ?*. Pour rappel, la fréquence de la houle (0,85 Hz) est représentée en pointillé sur les graphiques.

Les calculs de l'évolution des propriétés des nuages de bulles par traitement d'image ont été effectués. Les figures 6.6 à 6.9 présentent l'aire du nuage, la profondeur maximale et la vitesse verticale des nuages significatifs (détectés sur au moins quatre images consécutives) pour les quatre configurations de base.

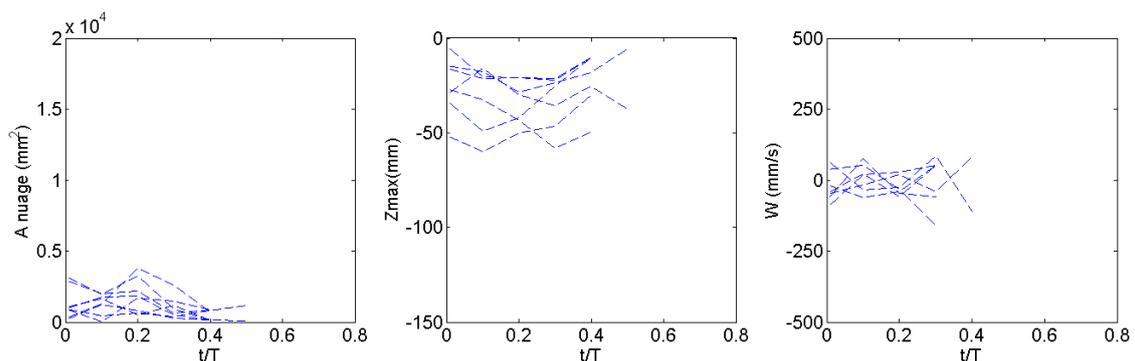


FIGURE 6.6 – Évolution des propriétés (aire, profondeur maximale et vitesse verticale) de chaque nuage de bulles significatif dans la première configuration : avec courant seulement

6.1. ANALYSE DE L'ENTRAÎNEMENT D'AIR

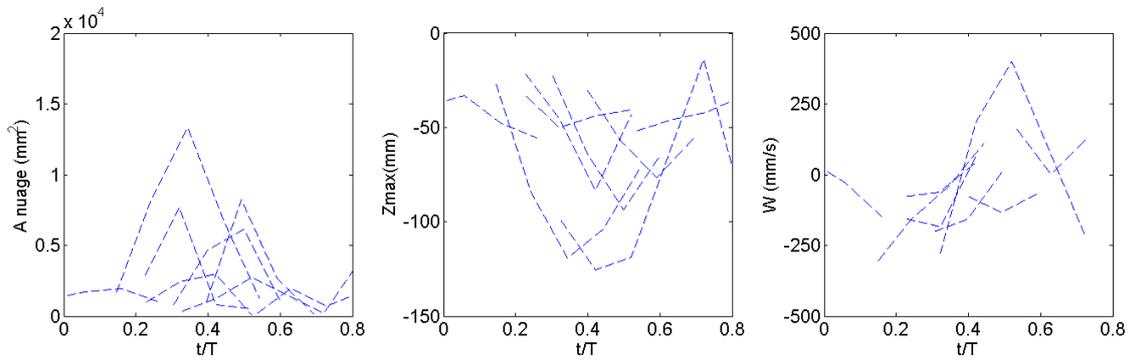


FIGURE 6.7 – Évolution des propriétés (aire, profondeur maximale et vitesse verticale) de chaque nuage de bulles significatif dans la seconde configuration : avec courant et houle

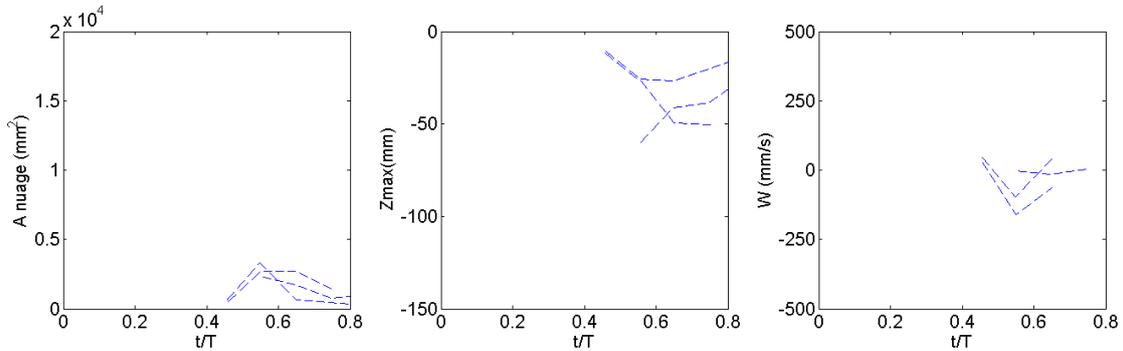


FIGURE 6.8 – Évolution des propriétés (aire, profondeur maximale et vitesse verticale) de chaque nuage de bulles significatif dans la troisième configuration : avec courant et mouvements

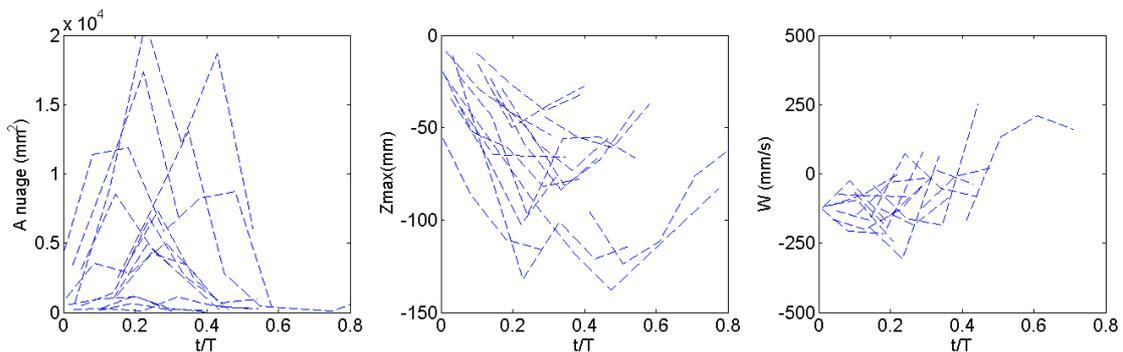


FIGURE 6.9 – Évolution des propriétés (aire, profondeur maximale et vitesse verticale) de chaque nuage de bulles significatif dans la quatrième configuration : avec courant, houle et mouvements

6.1. ANALYSE DE L'ENTRAÎNEMENT D'AIR

Ces propriétés peuvent être comparées à celles obtenues pour le *Pourquoi pas ?* dans la section 4.3. On retrouve les caractéristiques de l'entraînement d'air par détachement tourbillonnaire dans la première configuration avec une aire des nuages relativement réduite, des nuages restant en surface et une vitesse verticale proche de zéro. Cependant, malgré une fréquence d'observation de 0,08 Hz, très peu de ces nuages sont significatifs, et aucun n'est visible sur plus d'une demi période. De même on retrouve les caractéristiques des nuages par déferlement lors des configurations avec houle, avec une aire importante et une profondeur proche de 100 mm pour quelques nuages. En revanche le nombre de nuages significatifs reste faible, même dans le cas avec houle et mouvement. Les nuages observés autour de l'étrave inversé sont en majorité plus petits, et d'une durée de vie de moins de 0,3 périodes.

Le nombre de nuages significatifs détectés par traitement d'images pour chaque configuration est détaillé dans le tableau 6.1 pour le *Pourquoi pas ?* et pour l'étrave inversée.

Configuration	1	2	3	4
<i>Pourquoi pas ?</i>	11	20	10	39
Étrave Inversée	7	9	3	16

TABLE 6.1 – Nombre de nuages significatifs (visible sur au moins quatre image consécutive) pour les quatre configurations. Comparaison entre le *Pourquoi pas ?* et l'étrave inversée.

Malgré les effets d'échelle importants sur la génération et la dynamique des bulles, on peut observer une différence radicale entre les deux formes d'étrave à l'échelle 1/30. L'étrave inversée réduit fortement la fréquence et l'intensité de la génération de bulles dans le bassin de circulation.

6.2 Analyse de l'écoulement

Comme lors de l'analyse de l'écoulement autour de la maquette du *Pourquoi pas ?*, trois plans PIV ont été étudiés : dans l'axe de symétrie (plan 1), à $y = 50$ mm (plan 2) et à $y = 100$ mm (plan 3). Ces plans sont décalés selon l'axe x afin de visualiser le contact entre le fluide et la maquette dans chacun des plans (cf. schéma de la figure 6.10).

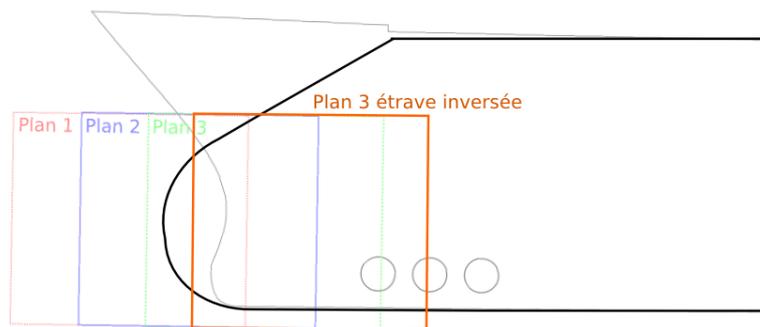


FIGURE 6.10 – Illustration des plans de mesure PIV pour l'étrave inversée

6.2.1 Analyse des champs de vitesse moyens

Les champs de vitesse moyens, ainsi que les lignes de courant, sont présentés sur les figures 6.11, 6.12 et 6.13 pour les plans 1, 2 et 3 respectivement. Ces graphiques peuvent être comparés à ceux obtenus avec la maquette du *Pourquoi pas ?* dans le paragraphe 5.2.3. La différence entre les deux formes est visible dès l'analyse du plan de l'axe de symétrie. Le ralentissement de l'écoulement longitudinal est beaucoup moins important et a lieu seulement au plus proche de l'étrave. De plus il n'y a pas de séparation due à la forme bulbeuse du *Pourquoi pas ?*, avec une zone de vitesse verticale positive au dessus du bulbe et négative en dessous. Dans le cas de l'étrave inversée, il n'y a pas de zone de vitesse verticale positive et la zone de vitesse verticale négative est concentrée au contact de la maquette.

Pour les plans à $y = 50$ mm et à $y = 100$ mm, la zone de ralentissement (partie supérieure gauche des plans de mesures) due à l'élargissement de l'étrave est beaucoup moins visible. Comme pour le *Pourquoi pas ?*, on peut observer des lignes de courant plongeantes. En revanche pour ces deux plans la vitesse verticale minimale mesurée est identique : $-0,08$ m/s, contre $-0,12$ m/s dans le plan 2 et $-0,09$ m/s dans le plan 3 pour le *Pourquoi pas ?*.

6.2. ANALYSE DE L'ÉCOULEMENT

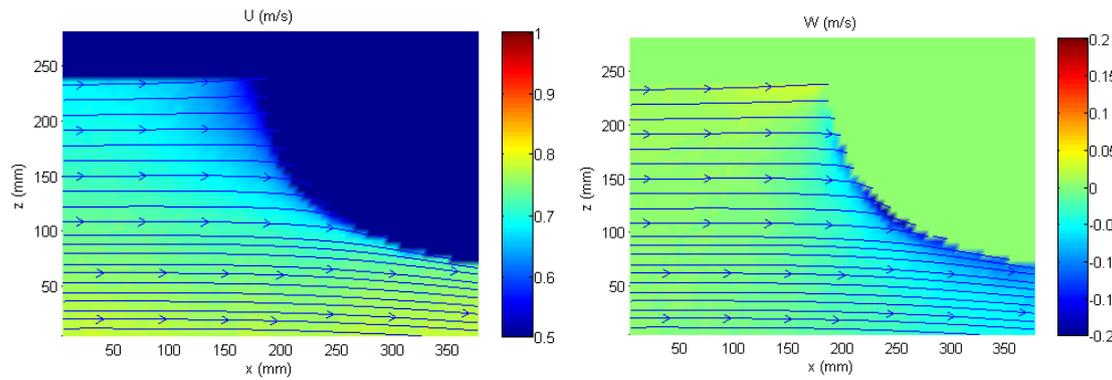


FIGURE 6.11 – Champs de vitesse moyens et lignes de courant dans le plan de symétrie. [Gauche] Vitesse longitudinale. [Droite] Vitesse verticale.

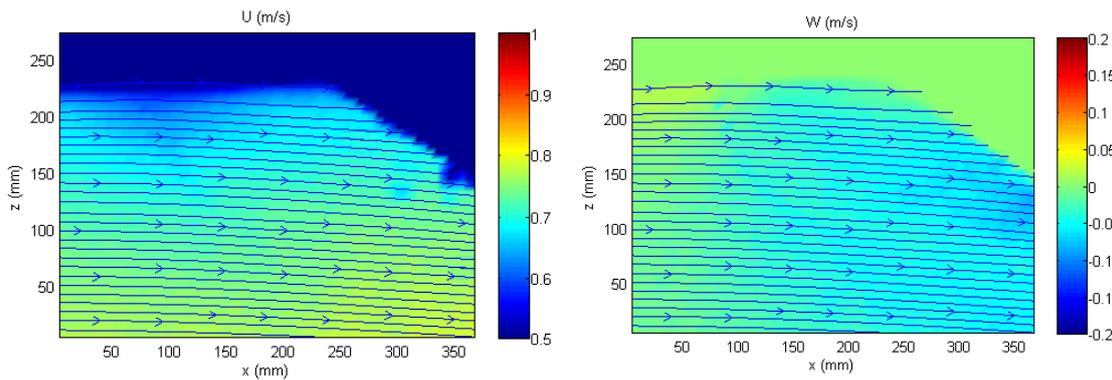


FIGURE 6.12 – Champs de vitesse moyens et lignes de courant dans le plan à $y = 50$ mm. [Gauche] Vitesse longitudinale. [Droite] Vitesse verticale.

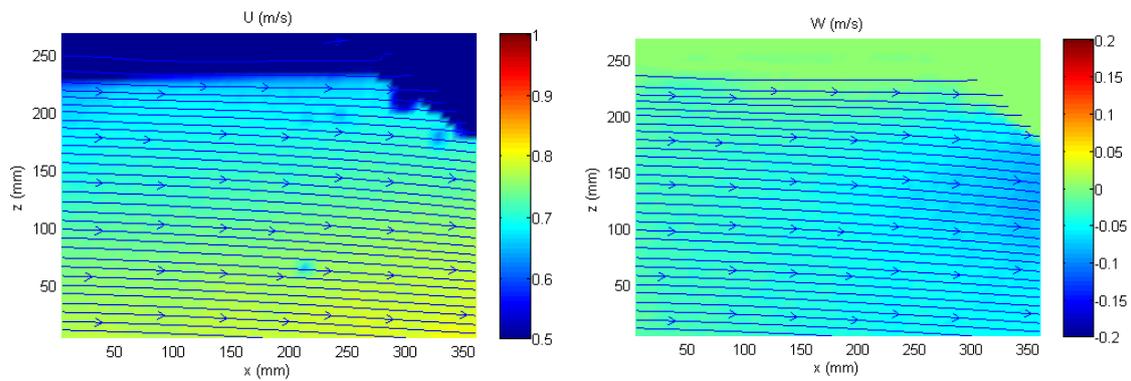


FIGURE 6.13 – Champs de vitesse moyens et lignes de courant dans le plan à $y = 100$ mm. [Gauche] Vitesse longitudinale. [Droite] Vitesse verticale.

6.2.2 Analyse en moyenne de phase

Les moyennes de phases obtenues dans le plan à $y = 100$ mm sur les séquences complètes (sans distinguer les cas bullés ou non bullés) des configurations 2, 3 et 4 sont présentées sur les figures 6.14, 6.15 et 6.16.

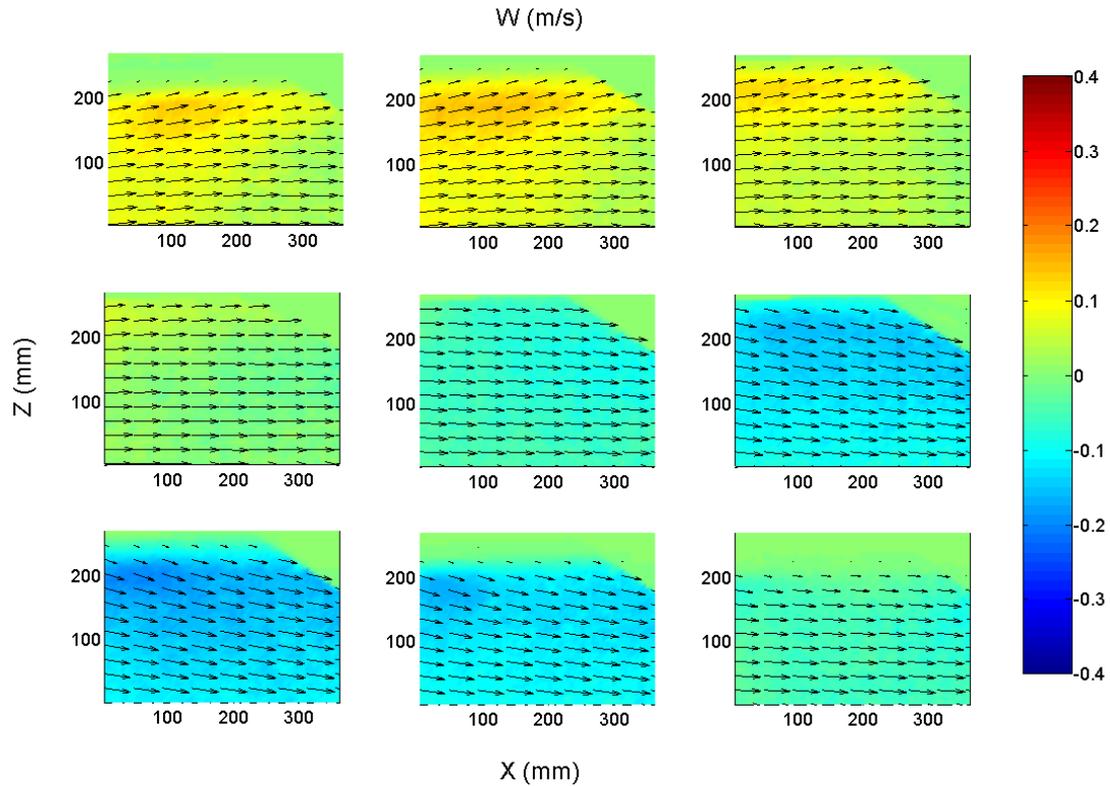


FIGURE 6.14 – Moyennes de phase sur toute la séquence de la configuration 2 autour de l'étrave inversée

Les vitesses verticales maximales et minimales obtenues en moyenne de phase pour chaque configuration sont répertoriées dans le tableau 6.2. On peut ainsi comparer les amplitudes de fluctuations de vitesses autour de l'étrave du *Pourquoi pas ?* et de l'étrave inversée. Ces fluctuations sont similaires pour les deux formes. On peut noter des fluctuations plus importantes autour de la maquette du *Pourquoi pas ?* pour la configuration avec houle seulement.

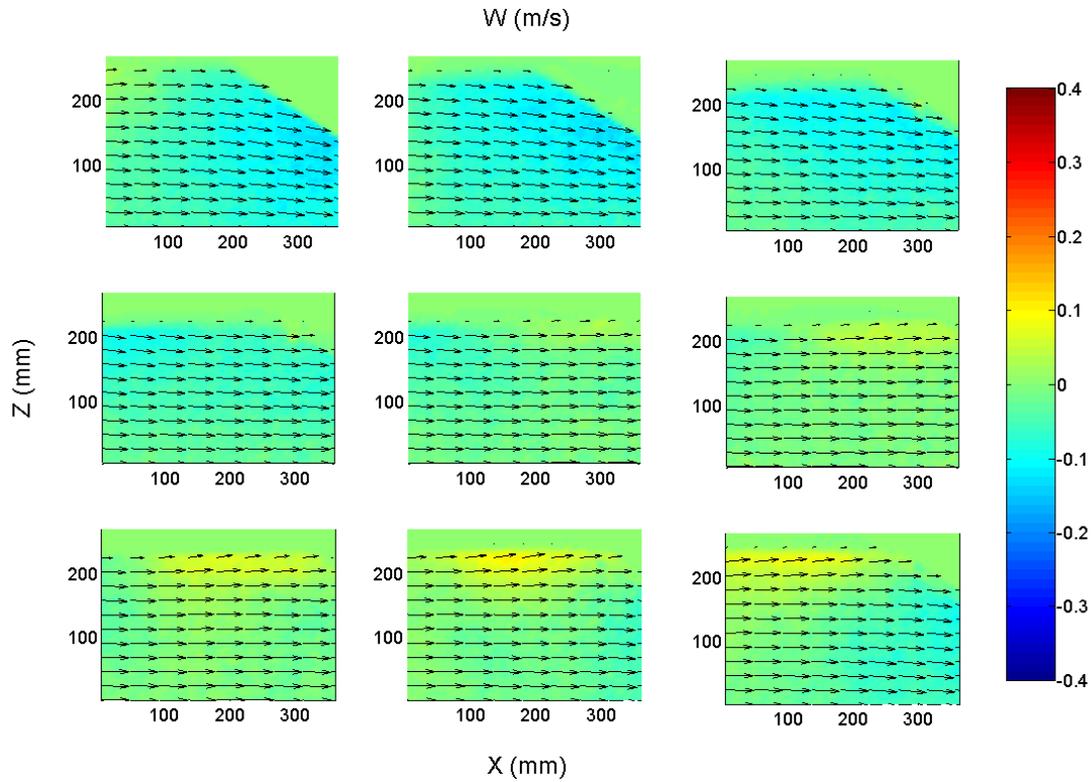


FIGURE 6.15 – Moyennes de phase sur toute la séquence de la configuration 3 autour de l'étrave inversée

Configuration		2	3	4
<i>Pourquoi pas ?</i>	V_{min} (m/s)	-0,25	-0,16	-0,24
	V_{max} (m/s)	0,22	0,09	0,19
Étrave Inversée	V_{min} (m/s)	-0,20	-0,13	-0,23
	V_{max} (m/s)	0,15	0,11	0,18

TABLE 6.2 – Vitesses verticales maximales et minimales obtenues en moyenne de phase pour les configurations 2, 3 et 4. Comparaison entre le *Pourquoi pas ?* et l'étrave inversée.

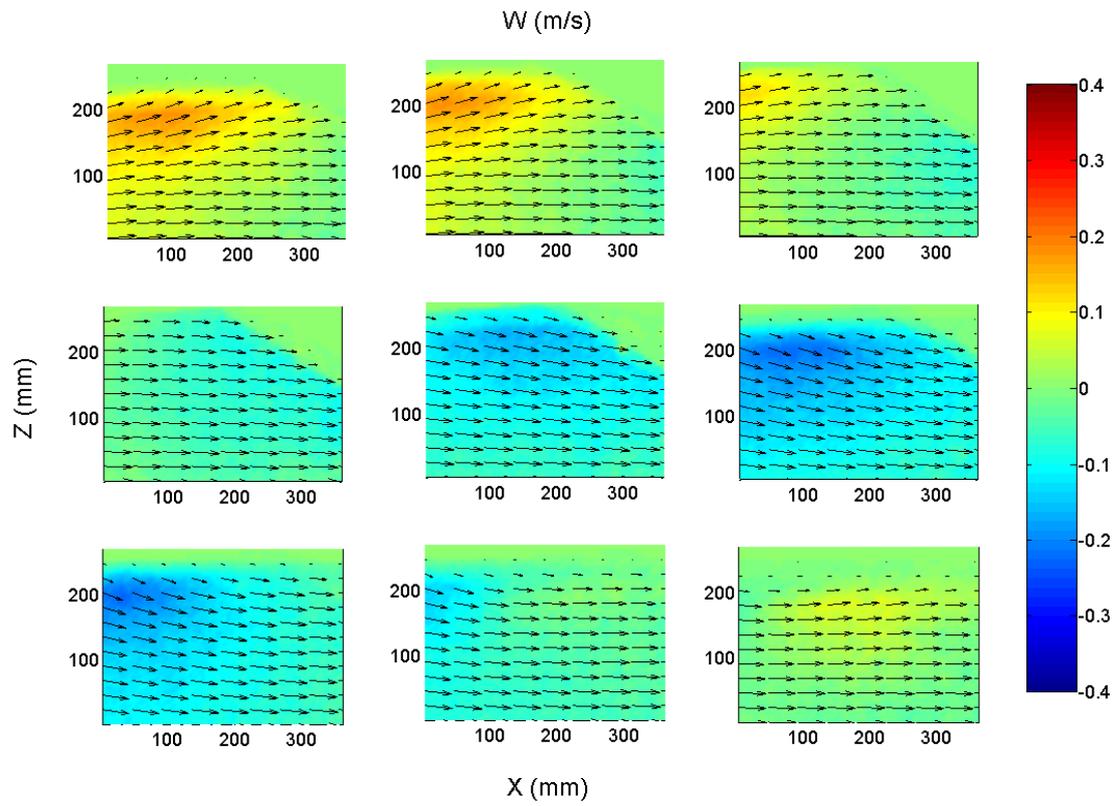


FIGURE 6.16 – Moyennes de phase sur toute la séquence de la configuration 4 autour de l'étrave inversée

6.2.3 Analyse fréquentielle

Les calculs de la transformée de Fourier ont été répétés en chaque point du plan pour les quatre configurations. Dans le cas avec courant uniquement, aucune fréquence ne prédomine. Le phénomène tourbillonnaire conserve son aspect aléatoire. Les figures 6.17, 6.18 et 6.19 présentent l'amplitude maximale du spectre de la vitesse verticale et la fréquence associée, pour les configurations 2, 3 et 4.

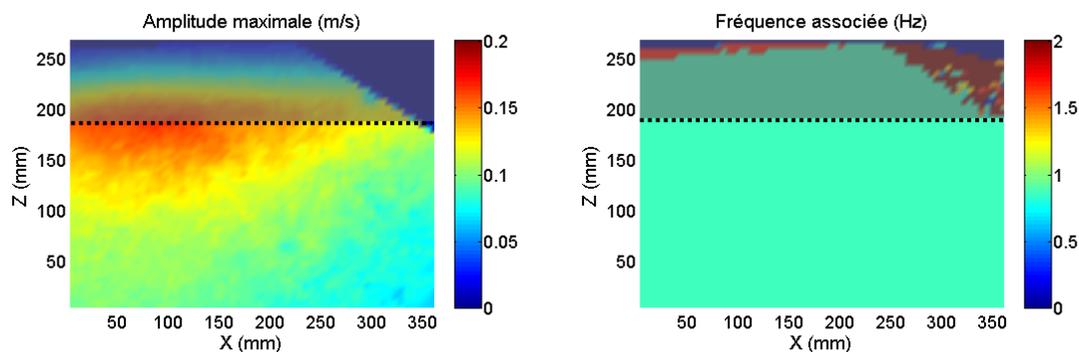


FIGURE 6.17 – Spectre de la vitesse verticale dans le plan pour le cas avec courant et houle. [Gauche] Amplitude maximale de la transformée de Fourier. [Droite] Fréquence associée à l'amplitude maximale.

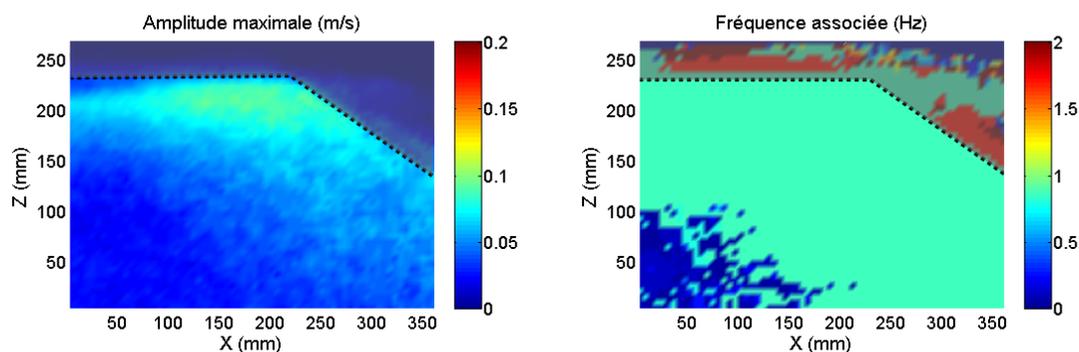


FIGURE 6.18 – Spectre de la vitesse verticale dans le plan pour le cas avec courant et mouvements. [Gauche] Amplitude maximale de la transformée de Fourier. [Droite] Fréquence associée à l'amplitude maximale.

Ces graphiques peuvent être comparés aux résultats exposés dans le paragraphe 5.2.5. L'impact de la houle est toujours significativement supérieur à celui des mouvements. L'amplitude maximale des fluctuations, générées par la houle ou par les mouvements, est légèrement plus faible pour l'étrave inversée. La zone de

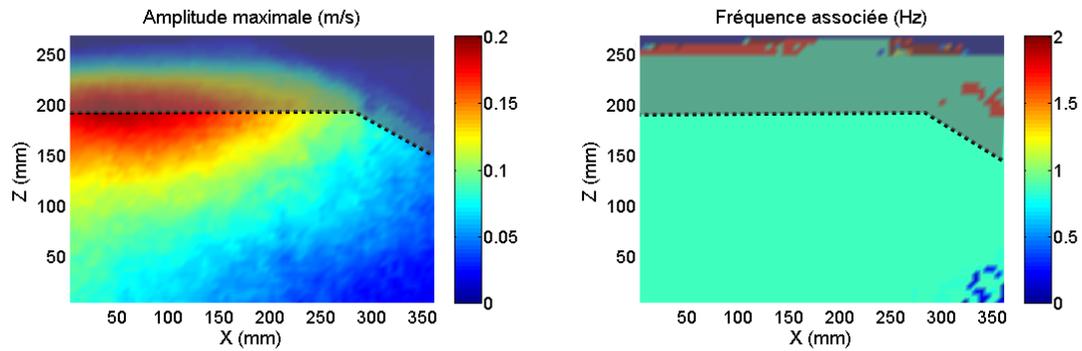


FIGURE 6.19 – Spectre de la vitesse verticale dans le plan pour le cas avec courant, houle et mouvements. [Gauche] Amplitude maximale de la transformée de Fourier. [Droite] Fréquence associée à l'amplitude maximale.

forte fluctuation est toujours proche de la surface libre, mais moins concentrée au contact de la maquette (la zone est légèrement décalée vers la partie gauche du plan). Pour le cas avec mouvement uniquement, on retrouve une partie du plan (inférieure gauche) non affectée par les mouvements.

6.3 Conclusion

Le navire équivalent au *Pourquoi pas ?*, en modifiant uniquement le tiers avant afin d'obtenir une étrave inversée, a été étudié en bassin de circulation. Cette forme a été envisagée pour les bonnes performances des navires de ravitaillement offshore en cas de mauvais temps et également pour la réduction de résistance à l'avancement que cela implique. Les techniques développées dans les chapitres 4 et 5 ont été appliquées, ce qui a permis de comparer les deux formes. La fréquence de génération de bulles et les caractéristiques des nuages ont été détaillées pour les quatre configurations de base, de même que l'analyse de l'écoulement autour de l'étrave.

Le résultat primordial concerne l'observation de la génération de bulles. La fréquence du mécanisme d'entraînement d'air par détachement tourbillonnaire est réduite de moitié. La fréquence des déferlements est également largement plus faible. De plus la quantité de nuages significatifs est extrêmement faible. On observe très peu de nuages suffisamment importants pour subsister dans l'écoulement.

Les champs de vitesse moyens obtenus dans les trois plans d'étude sont également bien distincts. La forme plus profilée de l'étrave inversée réduit de façon moins prononcée la vitesse longitudinale avant l'étrave. On observe la suppression de la séparation de l'écoulement induite par la forme bulbeuse du *Pourquoi pas ?*. Les vitesses plongeantes des plans $y = 50$ mm et $y = 100$ mm sont également réduites.

Enfin, les effets de la houle et des mouvements ont été étudiés en moyenne de phase puis par une analyse fréquentielle. Les fluctuations de vitesse engendrées par la houle et les mouvements sont légèrement plus faibles dans le cas de l'étrave inversée.

Sous tous ces aspects, la forme de type étrave inversée présente des avantages permettant de réduire la génération des bulles et leur propagation sous la coque. On peut ajouter ici que cette étude ne prend pas en compte la possible réduction de l'amplitude des mouvements du navire pour un état de mer donné, ce qui serait également bénéfique face au problème de *Bubble Sweep-down*.

Chapitre 7

Conclusions et Perspectives

7.1 Résumé des travaux réalisés

La problématique engendrée par le phénomène de *Bubble Sweep-down* sur le fonctionnement des équipements acoustiques nuit fortement à la productivité des navires scientifiques. L'état de l'art présenté en introduction a permis de démontrer que les conditions d'apparition de ce phénomène étaient jusqu'à présent relativement mal connues, et que les outils numériques ou expérimentaux permettant l'étude de l'écoulement diphasique autour de l'étrave étaient limités. Cette thèse a été le point de départ d'un projet dont les objectifs, précisés en avant-propos, étaient les suivant :

- une meilleure compréhension de la génération et de la propagation des bulles autour de la carène des navires ;
- le développement d'une méthode permettant l'étude expérimentale de ce phénomène ;
- la recherche de solutions permettant d'améliorer le comportement des futurs navires de la flotte, ou des possibilités de modifier les navires actuels.

Dans un premier temps, une méthode d'analyse des données acoustiques issues de campagnes en mer a été développée. Cette méthode permet la détermination d'un seuil de détection du passage de bulles sous la coque. Les effets des différents paramètres de navigation sur la génération des bulles ont ensuite été étudiés.

Cette étude a permis de montrer que le tangage et la vitesse du vent sont les principaux paramètres caractéristiques de l'apparition des bulles sous la coque. La vitesse du vent est le paramètre le plus fortement corrélé avec la détection des bulles. Une vitesse de vent critique a été définie, au dessus de laquelle le pourcentage de pings bullés est supérieur à 1%. Il a été démontré que le taux de détection de

bulles diminue fortement en fonction de la profondeur de la couche étudiée. Au contraire, la vitesse de vent critique augmente sensiblement avec la profondeur, ce qui confirme l'intérêt de positionner les sondeurs le plus profondément possible. L'aération naturelle a également pu être étudiée en analysant les données d'un sonar latéral, spécifiquement installé lors de la campagne IBTS 2013. Cette aération est importante, mais pas suffisante pour expliquer la densité de bulles présente sous la coque. Le navire est donc bien responsable de la génération et de l'entraînement de bulles en profondeur.

Les comportements de la *Thalassa* et du *Pourquoi pas ?* ont été comparés grâce à cette méthode d'analyse. Les vitesses de vent critiques sont semblables (22 nœuds pour la *Thalassa* et 24 nœuds pour le *Pourquoi pas ?*, pour la fréquence de 200 kHz). Cependant on rencontre beaucoup plus de périodes fortement bullées (avec un pourcentage de pings bullés de plus de 20%) pour le *Pourquoi pas ?*.

Ces résultats permettent de mieux comprendre la perturbation des signaux acoustiques par le passage de bulles sous la coque. Tous ces éléments ont été pris en compte en tant que référence lors de la mise en place et l'analyse des essais en bassin.

Le développement d'une méthode d'essai pour l'étude du phénomène a été réalisé au bassin à houle et courant de Boulogne-sur-Mer. La recherche d'une méthode spécifique a été nécessaire à cause de la difficulté d'observer la génération de bulles en bassin de traction. Les effets d'échelle étant importants, l'étude du bullage est souvent réalisée par injection de colorant afin de simuler la dynamique des bulles. Un montage particulier a donc été réalisé pour ces travaux, avec l'utilisation d'un générateur de mouvement pour simuler la dynamique du navire. Les mouvements imposés sont calculés au préalable par simulation numérique. Cette méthode présente plusieurs avantages. Tout d'abord il n'est plus nécessaire de réaliser une maquette équilibrée en masse et en inertie, ce qui facilite la conception. Ce montage permet également l'étude indépendante de l'influence de la houle et des mouvements, en passant d'une configuration à l'autre par une simple interface logicielle. Enfin il est possible d'étudier uniquement le tiers avant de la maquette, ce qui permet de supprimer la houle parasite générée par les mouvements du tableau arrière. La dernière spécificité de cette méthode d'essai en bassin de circulation consiste en un fort taux de turbulence de l'écoulement incident, généré par l'interaction entre le courant de la veine et le générateur de houle.

Des systèmes de caméras ont permis la visualisation des phénomènes d'entraînement d'air à l'étrave, au-dessus et en-dessous de la surface libre. Ces acquisitions ont permis d'analyser la dynamique des bulles dans les différentes configurations. Deux mécanismes d'entraînement d'air ont été décrits : la génération de nuages de bulles par entraînement tourbillonnaire ou par déferlement. Des méthodes de traitement d'image ont permis d'étudier la dynamique des deux types de nuages de bulles. Le phénomène tourbillonnaire est uniquement lié à l'interaction entre l'écoulement

turbulent incident et la forme de l'étrave. Les nuages de bulles ainsi générés sont relativement petits et restent proche de la surface. Au contraire, le phénomène de déferlement apparaît avec les mouvements de la maquette, et de façon plus significative en présence de houle. Ces nuages de bulles sont plus importants et peuvent être entraînés en profondeur, avec une vitesse plongeante initiale de plus de 0,25 m/s. Lors de la remontée du nuage la vitesse ascensionnelle peut atteindre également 0,25 m/s.

Une étude paramétrique a permis de caractériser la génération de bulles avec cette méthode d'essai. Il a été montré par exemple que la fréquence de la génération de bulles est directement proportionnelle à la hauteur de la houle. La fréquence de la houle, les caractéristiques des mouvements et les vitesses du courant jouent également un rôle important. Plusieurs déphasages entre la houle et les mouvements ont été testés, afin de reproduire des conditions pouvant avoir lieu par mer irrégulière. On peut observer une très forte réduction du phénomène de déferlement pour certains déphasages, ou à l'inverse une génération de bulles pour chaque période de houle lorsque le mouvement de tangage impacte directement le front d'onde incident. Enfin, la turbulence provoquée par l'interaction entre l'écoulement incident et le générateur de houle est un élément primordial des mécanismes d'entraînement d'air. La réduction de la turbulence entraîne une suppression des phénomènes d'entraînement tourbillonnaire, et une réduction de la fréquence des déferlements, ce qui permet d'expliquer en partie les différences de résultats obtenus en bassin de traction avec ceux obtenus dans cette étude.

Ces observations sont soumises à des effets d'échelle, dus à une différence importante des nombres de Webber et de Reynolds entre le réel et les essais à l'échelle 1/30. L'extrapolation à l'échelle un de ces résultats en bassin n'est donc pas directe. Pour compléter l'étude, une analyse de l'écoulement autour de l'étrave a été entreprise. Des mesures par Particles Images Velocimetry ont été réalisées dans différents plans. Ces mesures permettent notamment d'obtenir les champs moyens et lignes de courant autour de la carène, éléments permettant la validation du positionnement des sondes par les méthodes actuelles. Les études en moyennes de phase et les analyses fréquentielles ont permis de caractériser les fluctuations de l'écoulement dans les quatre configurations, et de démontrer l'influence prépondérante de la houle. Le lien entre la génération de bulles et la dynamique de l'écoulement a été recherché. L'étude de l'écoulement dans les différents plans de mesures permet d'obtenir simultanément des visualisations de la génération des bulles avec des mesures de champs de vitesses. On peut ainsi observer l'apparition de vitesses plongeantes importantes (atteignant en moyenne -0,31 m/s) lors des déferlements.

Tous ces résultats montrent que la houle est le paramètre prépondérant agissant sur le phénomène de génération de bulles par déferlement. L'influence du tangage est moins significatif, ce qui explique la corrélation relativement faible obtenue dans le second chapitre entre ce paramètre et la génération de bulles en mer. La corrélation est plus importante avec la vitesse du vent, directement liée à l'état de mer et donc

à la houle.

Enfin une seconde forme, de type étrave inversée a été étudiée. La modification de forme permet d'observer au bassin une diminution conséquente de la fréquence et de l'intensité de l'entraînement d'air. Les caractéristiques de l'écoulement sont également favorable à la réduction du phénomène. En effet la forme profilée permet un écoulement plus homogène en réduisant la zone d'arrêt à l'étrave, et en réduisant les vitesses plongeantes notamment dans le plan à $y = 50$ mm.

Ces travaux ont permis d'avancer de façon significative sur les trois objectifs principaux de cette thèse :

- les analyses de la génération de bulles en mer et au bassin permettent une meilleure compréhension des phénomènes ;
- la méthode développée au bassin à houle et courant, permet d'obtenir des informations sur les mécanismes d'entraînement d'air et sur l'écoulement autour de l'étrave ;
- ces essais permettent de comparer différentes formes d'étraves, afin de limiter au maximum le passage des bulles sous la coque.

7.2 Perspectives

Concernant l'étude du phénomène en mer à partir des données acoustiques, la prise en compte d'une base de données plus conséquente permettrait d'affiner et de compléter les résultats obtenus. La poursuite de ces analyses est notamment nécessaire pour la prise en compte des paramètres secondaires, comme l'orientation par rapport au vent ou la vitesse du navire. Les codes de calculs ont été automatisés et peuvent être valorisés au sein de l'Ifremer, afin de traiter des données provenant de nouvelles campagnes. L'Ifremer possède donc un outil permettant de poursuivre cette étude, de prendre en compte davantage de paramètres, pour un nombre plus conséquent de navires. Une comparaison précise des performances des navires au réel est primordiale afin de valider les différentes solutions adoptées pour limiter le phénomène de *Bubble Sweep-down*.

Par ailleurs ce projet s'inscrit dans la continuité avec le début d'une seconde thèse en Novembre 2014 pour la poursuite de ces travaux. Les objectifs principaux sont de mieux appréhender l'influence de la turbulence et des effets d'échelle sur les conditions d'apparition et la dynamique des nuages de bulles.

Pour le premier point, différents taux de turbulence pourront être étudiés à l'aide de grilles placées en amont de la maquette. L'influence des déformations de la surface libre sera également étudiée. Pour cela l'utilisation des techniques de mesures optiques récemment développées (de type stéréo-réfraction) est nécessaire, afin d'obtenir des mesures bidimensionnelles de l'élévation de la surface, au plus proche de l'étrave. En ce qui concerne le second point, des formes identiques seront étudiées à plusieurs échelles. Les essais en bassin peuvent ainsi permettre d'estimer la quantité d'air entraînée en fonction de l'échelle. Une analyse des champs de vitesse peut permettre d'obtenir la vorticité et les taux de cisaillement présents dans l'écoulement, ces mesures étant représentatives et extrapolables au réel par la similitude de Froude. Ces informations permettraient une estimation de la distribution de bulles au réel, ainsi que leur dynamique autour de la carène. L'objectif d'obtenir un outil permettant l'étude du phénomène lors de la conception des navires océanographiques est donc en bonne voie.

La méthode développée durant cette thèse sera appliquée pour réaliser des essais sur la *Thalassa*, avant la modernisation de celle-ci et l'éventuelle installation d'une gondole équipée de nouvelles gammes de sondeurs.

Enfin, la base de données obtenue durant cette thèse, constituée à la fois d'images permettant la visualisation de la génération des nuages de bulles et également de mesures de l'écoulement autour de l'étrave en mouvement, est originale et donc précieuse. Celle-ci pourra être valorisée afin de valider le développement de modèles numériques pour la simulation de l'entraînement d'air et de l'écoulement diphasique autour de la carène des navires.

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.
- 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.
- 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.

BIBLIOGRAPHIE

- 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.
- 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. 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 dependence of bubble creation mechanisms in breaking waves. *Nature*, 418:839–844.
- DELHOMMEAU, G., GUILBAUD, M., DAVID, L., YANG, C. et NOBLESSE, F. (2009a). Boundary between unsteady and overturning ship bow wave regimes. *J. Fluid Mech.*, 620:167–175.
- 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.

BIBLIOGRAPHIE

- DINER, N. et MARCHAND, P. (1996). Acoustique et pêche maritime, présentation et application. *Editions Ifremer*.
- DRAGESUND, O. et OLSEN, S. (1965). On the possibility of estimating year-class strength by measuring echo-abundance of 0-group fish. *Fiskeridirektoratets Skrifter, Serie Havunderskelser*, 13(8):48–75.
- GOTMAN, A. S. (2007). A history of ship resistance evaluation. *The Journal of Ocean Technology*, 2(1):74–96.
- 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*.
- 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.
- KIGER, K. T. et DUNCAN, J. H. (2012). Air-Entrainment mechanisms in plunging jets and breaking waves. *Annu. Rev. Fluid Mech.*, 44:563–592.
- 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.
- 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.

BIBLIOGRAPHIE

- 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.
- LONGO, J., SHAO, J., IRVINE, M. et STERN, F. (2005). Phase-average nominal wake for surface ship in regular head waves. Rapport technique, IIHR - Hydroscience & Engineering.
- 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*.
- 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.
- MORAGA, F. J., CARRICA, P. M., DREW, D. A. et LAHEY JR, R. T. (2008). A sub-grid air entrainment model for breaking bow waves and naval surface ships. *Computers & Fluids*, 37:281–298.
- 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. et YANG, C. (2010). Vague d'étrave et fonction de green. *12èmes Journées de l'Hydrodynamique*.
- 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.

BIBLIOGRAPHIE

- 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.
- 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*.
- 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.
- 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.
- STERN, F. (2008). Unsteady PIV measurements in IIHR towing tank for PMM. *In 25th ITTC - Volume III*.
- 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.

BIBLIOGRAPHIE

- 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 RAICHLEN, F. (2001). Measurements of air entrainment by bow waves. *Journal of Fluids Engineering*, 23:57–63.
- 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

Résistance à l'avancement

Les premiers essais qui ont été réalisés avec la maquette du *Pourquoi pas ?* dans le bassin de circulation sont les mesures de résistance à l'avancement. L'objectif principal étant de comparer les valeurs obtenues avec des données provenant d'essais en bassin de traction, et de vérifier que l'écoulement est bien représentatif de la réalité.

Les données de référence proviennent des essais de résistance et propulsion effectués au MARIN (Maritime Research Institute Netherland) durant la conception du *Pourquoi pas ?*. Une illustration de ces essais est présentée sur la figure A.1. Lors de cette campagne d'essais, une maquette à une échelle de 1/16,68 (soit une longueur entre perpendiculaires de 5,63 m) a été utilisée. Durant les essais classiques de résistance à l'avancement, la maquette est tractée par une plate-forme mais libre en pilonnement et en tangage. Des bandes de rugosité sont installées à l'étrave afin de simuler la transition de la couche limite vers un régime turbulent.

Pour les essais en bassin de circulation, l'échelle de la maquette est restreinte en fonction des capacités du bassin à une valeur de 1/30 (soit une longueur entre perpendiculaires de 3,13 m, cf. figure A.2). La maquette étant fixée à l'hexapode, un protocole d'essai a été réalisé afin de se rapprocher au mieux des conditions d'essais en bassin de traction.

Sans courant, la maquette est tout d'abord amenée à sa ligne de flottaison grâce au générateur de mouvement. La prise d'origine de la balance est alors effectuée dans ces conditions. Puis on impose une vitesse de courant dans le bassin, avec le générateur de houle relevé et donc avec un taux de turbulence relativement faible. Une fois le courant stabilisé, la flottaison de la maquette est ajustée de façon à ce que l'effort mesuré dans l'axe vertical soit égal à celui mesuré lors de la prise d'origine. Pour différentes vitesses de courant, on obtient donc ainsi la trainée à l'échelle 1/30.

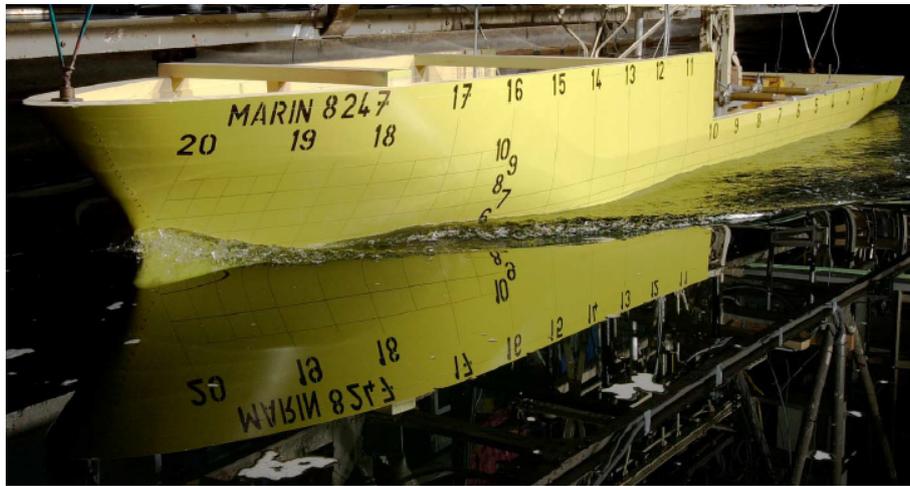


FIGURE A.1 – Illustration des essais réalisés au MARIN. Maquette du *Pourquoi pas ?* à l'échelle 1/16,68, libre en tangage et en pilonnement



FIGURE A.2 – Illustration du montage réalisé avec la maquette du *Pourquoi pas ?* à l'échelle 1/30 fixée sous l'hexapode

Ces résultats sont ensuite extrapolés à l'échelle réelle de la même façon que lors des calculs réalisés au MARIN, à savoir en respectant la méthode de Froude sans facteur de forme. Pour cette méthode, la résistance à l'avancement totale (R_T) est divisée en deux composantes : la résistance de frottement (R_F) et la résistance

résiduelle (R_W) principalement composée de la résistance par génération de vague.

$$R_T = R_F + R_W \quad (\text{A.1})$$

On définit alors le coefficient de résistance à l'avancement par :

$$C_T = \frac{R_T}{0,5\rho S U^2} = C_F + C_W \quad (\text{A.2})$$

avec ρ la densité de l'eau, S la surface mouillée et U la vitesse d'avance. Selon l'hypothèse de Froude, le coefficient de frottement C_F ne dépend que du nombre de Reynolds et le coefficient de résistance résiduelle C_W ne dépend que du nombre de Froude.

Les essais réalisés permettent de mesurer la résistance du modèle (R_{Tm}) et d'en déduire le coefficient de résistance totale du modèle, avec

$$C_{Tm} = C_{Fm} + C_{Wm} \quad (\text{A.3})$$

Grâce à la similitude de Froude, le coefficient de résistance résiduelle est conservé entre le réel et les essais ($C_{Wr} = C_{Wm}$). Le coefficient de frottement peut être calculé par la formule ITTC 57 (International Towing Tank Conférence) :

$$C_F = \frac{0,075}{(\log(Re) - 2)^2} \quad (\text{A.4})$$

On obtient alors le coefficient de résistance totale $C_{Tr} = C_{Fr} + C_{Wr}$ et la résistance à l'avancement du navire à l'échelle réelle par l'équation A.2.

Les courbes de résistance à l'avancement ainsi obtenues sont présentées sur la figure A.3.

La courbe rouge représente la résistance à l'avancement obtenue au MARIN. Les courbes bleues correspondent aux mesures effectuées dans le bassin de circulation de l'Ifremer à Boulogne-sur-mer. Dans les deux configurations, la résistance à l'avancement a été mesurée sans appendice. Les deux courbes bleues ont été réalisées suivant le même protocole. La répétabilité des mesures est bonne (erreur inférieure à 10%) compte-tenu du réglage en immersion effectué lors des essais. Les résultats en bassin de circulation sont légèrement inférieurs à ceux obtenus en bassin de traction (d'environ 10% à plus de 10 nœuds). Les plus grands écarts sont observés pour les plus grandes vitesses ($U > 12$ nœuds). La vitesse du courant nécessaire pour simuler une vitesse de 12 nœuds est de 1,13 m/s. Au delà de cette valeur, le courant est donc très important dans le bassin. La surface libre est alors fortement perturbée (cf. illustration de la figure A.4). Cette déformation de la surface libre peut diminuer la surface mouillée, malgré le réglage en flottaison, et ainsi expliquer une résistance à l'avancement relativement faible à hautes vitesses.

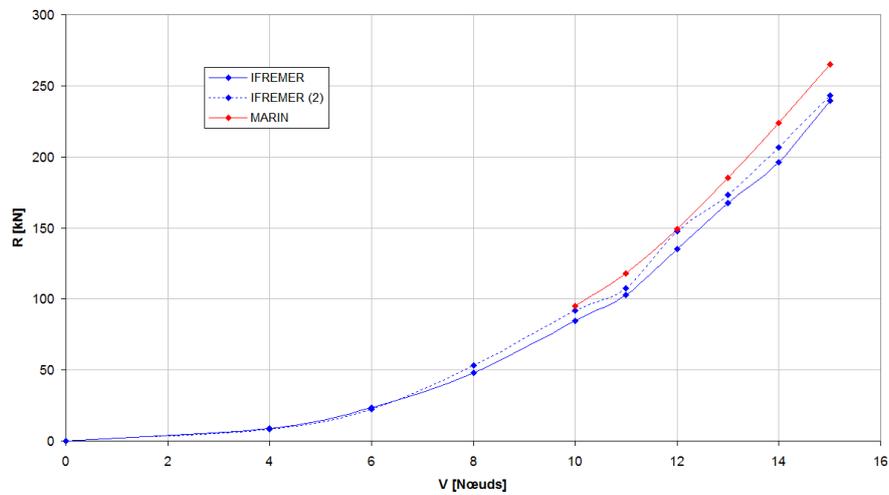


FIGURE A.3 – Comparaison des mesures de résistance à l’avancement du *Pourquoi pas ?* effectuées à MARIN et à l’Ifremer



FIGURE A.4 – Illustration de la perturbation de la surface libre à haute vitesse

Cependant l’allure de la courbe de résistance à l’avancement est bonne. L’écoulement est donc bien représentatif de l’échelle réelle, surtout pour la vitesse de 8 nœuds correspondant à la vitesse du courant utilisée pour la grande majorité des essais effectués au cours de la thèse.

Annexe B

Caractérisation de la houle

Comme indiqué dans divers paragraphes du manuscrit, la houle générée dans le bassin n'est pas parfaitement sinusoïdale. Il existe une forte interaction entre le générateur de houle et le courant, provoquant l'apparition d'un fort taux de turbulence mais également une perturbation de la houle.

L'amplitude et la fréquence de la houle sont des paramètres primordiaux du phénomène de génération de bulles observé en bassin de circulation (cf. paragraphe 4.4.1). De plus, la houle et les mouvements doivent être synchronisés pour certaines configurations. Ce synchronisme est effectué de façon à ce que l'élévation de la surface libre soit en phase avec le pilonnement au niveau du centre de gravité. La sonde à houle étant positionnée en amont de la maquette lors des essais, la connaissance de la célérité est nécessaire afin de pouvoir reporter le signal mesuré au niveau du centre de gravité.

Des essais spécifiques ont donc été réalisés afin de caractériser la houle en présence de courant. Ces essais ont eu lieu également pour déterminer l'échelle de la maquette. En effet, la maquette doit être suffisamment grande pour que les effets d'échelle soit réduits. On recherche donc l'échelle maximale permettant de reproduire les conditions de houle souhaitées, rencontrées lors de la campagne ESSBULLES (cf. paragraphe 3.3.2). Ces conditions sont répertoriées dans le tableau B.1, ainsi que les conditions correspondantes aux échelles 1/25, 1/30 et 1/35 en respectant la similitude de Froude. Dans ce tableau, les amplitudes indiquées correspondent directement à la hauteur significative rencontrée en mer ($A = H_s/2$).

Échelle	Réel	1/25	1/30	1/35
L_{pp} (m)	94	3,76	3,13	2,69
V (m/s)	4,12	0,82	0,75	0,70
λ (m)	109	4,36	3,63	3,11
A (mm)	1400	56	47	40
f_e (Hz)	0,16	0,79	0,85	1,00

TABLE B.1 – Conditions de navigation rencontrées lors des essais en mer ESS-BULLES. Conditions équivalentes aux échelles 1/25, 1/30 et 1/35 en respectant la similitude de Froude.

Afin de mesurer l'amplitude et la longueur d'onde des houles générées, trois sondes à houles ont été disposées dans l'axe central du bassin, à des écartements (multiples de $\lambda/2$ prohibés) de 0,58 m entre les sondes 1 et 2, et 0,93 m entre les sondes 2 et 3 (cf. figure B.1).

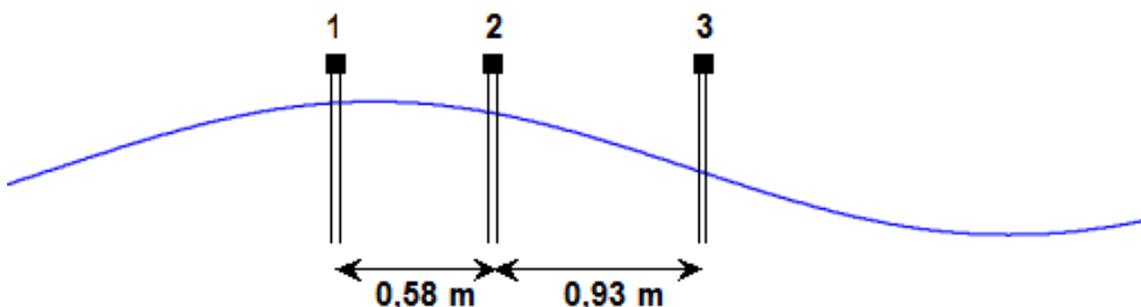


FIGURE B.1 – Schéma de la disposition des sondes à houles

La fréquence étant bien imposée par le générateur de houle, plusieurs méthodes permettent de calculer l'amplitude, la longueur d'onde et la célérité de la houle.

Tout d'abord en réalisant une analyse harmonique par décomposition du signal en série de Fourier. L'élévation de la surface libre η peut être décomposée en une somme de fonctions trigonométriques :

$$\eta(t) = X_0 + X_1 \cdot \cos(\omega t - \phi_1) + \dots + X_n \cdot \cos(n\omega t - \phi_n) \quad (\text{B.1})$$

avec

$$\begin{aligned}
 X_0 &= \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T \eta(\tau) d\tau \\
 X_n \cdot \cos(\phi_n) &= \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{2}{T} \int_0^T \eta(\tau) \cos(nw\tau) d\tau \\
 X_n \cdot \sin(\phi_n) &= \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{2}{T} \int_0^T \eta(\tau) \sin(nw\tau) d\tau
 \end{aligned} \tag{B.2}$$

On peut ainsi obtenir l'amplitude correspondant à la fréquence de la houle avec $w = 2\pi/T$, ainsi que la phase ϕ correspondant pour chaque sonde.

La seconde méthode consiste à réaliser une analyse du signal temporel, en calculant le déphasage entre les signaux pour chaque période de houle. Cela peut être réalisé par le calcul du déphasage entre les maxima, les minima ou les passages par zéro. La figure B.2 illustre la détection des maxima des sondes à houle 1 et 2 permettant d'obtenir le déphasage moyen entre les deux signaux.

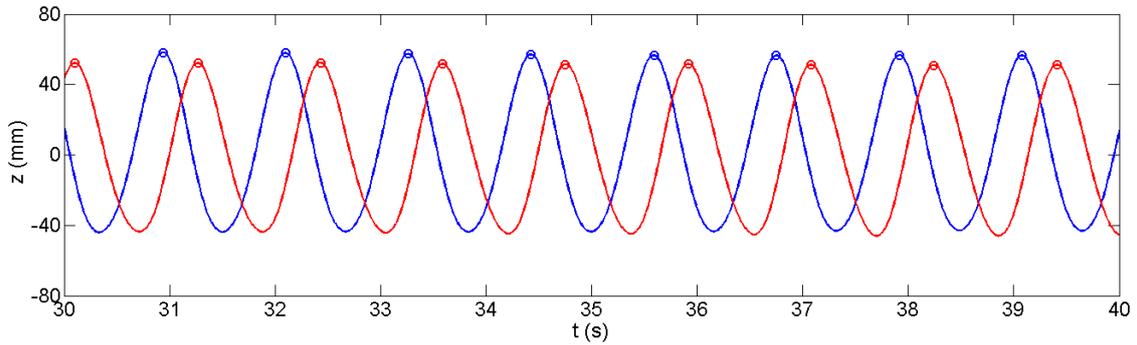


FIGURE B.2 – Détection des maxima des sondes à houle 1 et 2 permettant d'obtenir le déphasage moyen entre les deux signaux.

Dans les deux cas, les signaux des sondes à houle sont au préalable lissés à l'aide d'un filtre passe bas (à $f_{max} = 2$ Hz) permettant de supprimer le bruit de mesure. La distance entre les différentes sondes étant connue, on peut en déduire la célérité ($c = \Delta x / \Delta t$) et la longueur d'onde ($\lambda = c \cdot T$).

Les deux types d'analyses ont été réalisées. Les résultats obtenus concordent, avec des différences obtenues de moins de 5% sur les longueurs d'ondes mesurées. Les moyennes des résultats obtenus avec la combinaison des trois sondes à houle sont indiquées dans le tableau B.2.

Pour chaque échelle, une fréquence de houle et une vitesse de courant est déterminée. Des essais ont été réalisés avec et sans courant pour caractériser l'influence de celui-ci sur l'amplitude et la longueur d'onde.

Entrée bassin			Mesures		$\lambda_{theorique}$ (m)
Échelle	V (m/s)	A (mm)	A_m (mm)	λ_m (m)	
1/25 (f = 0,79 Hz)	0,00	56	59	2,45	2,50
	0,82	75	32	4,55	4,36
1/30 (f = 0,85 Hz)	0,00	47	49	2,04	2,11
	0,75	47	22	4,13	3,63
	0,75	75	34	4,15	3,63
1/35 (f = 1,00 Hz)	0,00	40	36	1,56	1,56
	0,70	40	24	3,33	3,11
	0,70	55	27	3,37	3,11

TABLE B.2 – Résultats obtenus lors de la caractérisation de la houle à différentes échelles

On peut constater que pour les cas sans courant, les amplitudes mesurées sont proches des consignes du générateur (erreur < 10%). De même les longueurs d'onde sont proches des longueurs d'onde théorique, calculées en hypothèse de profondeur infinie par la relation $\lambda = gT^2/2\pi$.

En revanche les amplitudes mesurées avec courant sont beaucoup plus faibles (erreur > 40%). Les longueurs d'onde sont logiquement largement agrandies par le courant, et sont plus grandes que les longueurs d'onde théoriques (erreur < 20%). La houle générée avec courant dans le bassin de circulation est donc légèrement plus longue que la houle rencontrée en mer.

Suite à ces essais, l'échelle de 1/30 a été retenue. La vitesse du courant étant trop élevée pour l'échelle 1/25, des déferlements sont observés dès la génération des vagues, ce qui entraîne une trop forte diminution de l'amplitude. À l'échelle 1/30, une consigne d'amplitude de 75 mm permet de générer une houle correspondant à une hauteur de 2 m, c'est à dire à la houle régulière de même densité d'énergie qu'une houle irrégulière d'une hauteur significative de 2,8 m (cf. paragraphe 3.3.2). La longueur d'onde obtenue dans cette configuration est $\lambda = 4,15$ m (14% supérieure à la longueur d'onde théorique) et la célérité est $c = 3,53$ m/s.

Afin d'assurer la synchronisation du pilonnement avec l'élévation de la surface libre, le signal de houle mesuré en amont de la maquette est reporté au niveau du centre de gravité de la maquette. On utilise pour cela la célérité calculée ci dessus. La perturbation de la houle en présence de courant étant importante, une vérification de la possibilité de transposer le signal de houle est nécessaire. Pour cela les signaux des sondes à houle 1 et 2 ont été superposés à celui de la sonde 3, simplement en retardant les signaux de $\Delta t_i = \Delta x_i/c$. La figure B.3 présente ces signaux superposés pour la configuration au 1/30 ($f = 0,85$ Hz) sans courant.

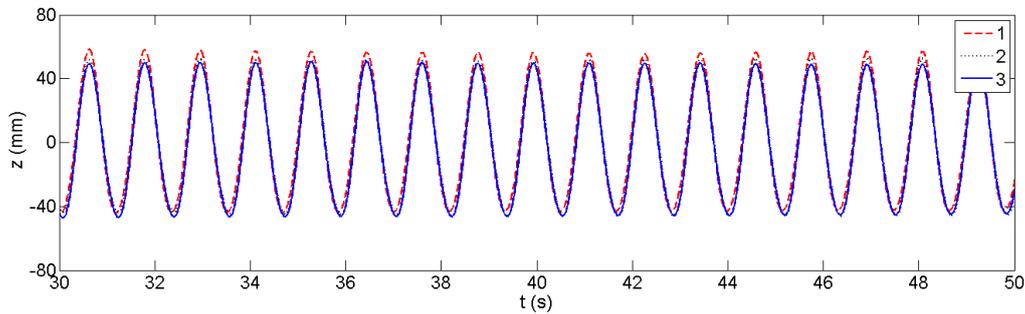


FIGURE B.3 – Superposition des signaux de houle sans courant

Les signaux de houle sont répétitifs et la superposition est bonne. Les différences de hauteur de houle entre les trois points de mesures sont faibles ($< 10\%$). L'évolution de ces différences tout au long de la séquence de mesure est présentée sur la figure B.4.

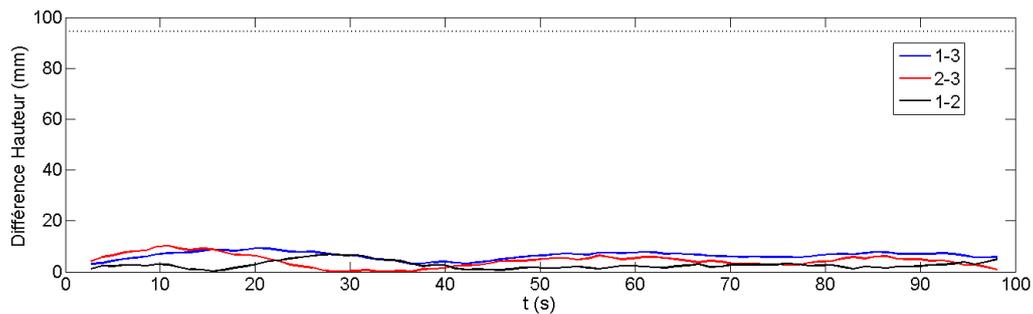


FIGURE B.4 – Différences de hauteur de houle sans courant

L'influence du courant sur le comportement de la houle est indiquée sur la figure B.5. On observe l'apparition de fluctuations importantes des amplitudes de houle. L'évolution des différences d'amplitudes entre les trois signaux est présentée sur la figure B.6. Ces différences sont largement plus significatives que pour le cas sans courant. On peut observer des pics dépassant 50 mm de différences de hauteur mesurée. Cependant les superpositions sont globalement acceptables, avec des erreurs moyennes de 14, 22 et 26% respectivement entre les signaux des sondes 1-2,

2-3 et 1-3. La différence est maximale pour la plus grande distance entre les sondes (1,51 m). Les différences moyennes sont répertoriées dans le tableau B.3 pour les configurations sans courant et avec courant.

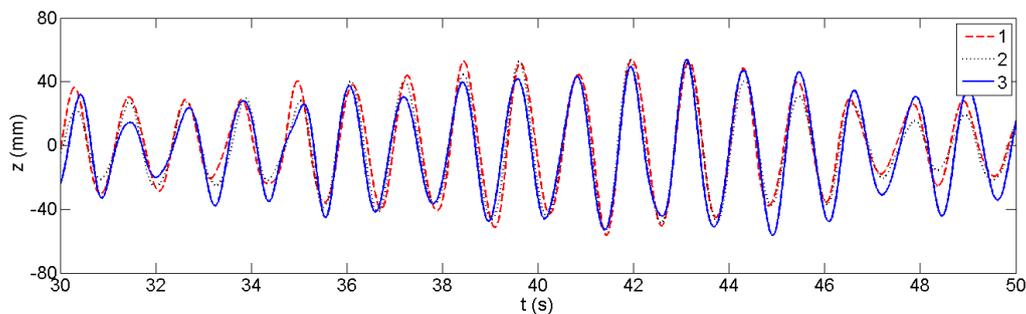


FIGURE B.5 – Superposition des signaux de houle avec courant

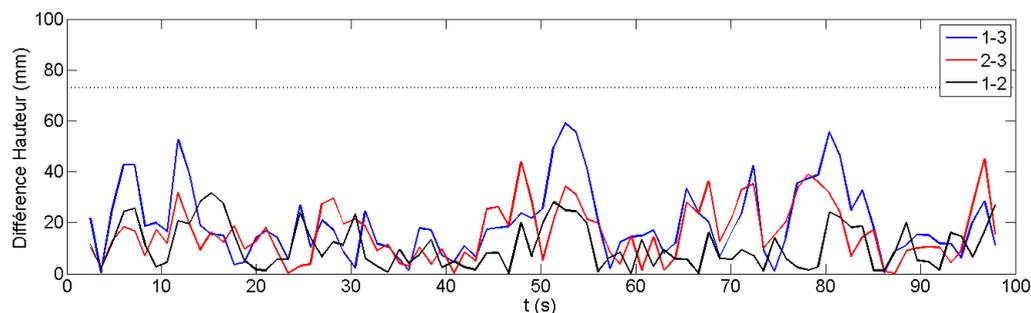


FIGURE B.6 – Différences de hauteur de houle avec courant

Différence (%)			
Sondes	1-2	1-3	2-3
Sans Courant	3	7	4
Avec Courant	14	26	22

TABLE B.3 – Différences de hauteur de houle obtenues entre les trois sondes à houle

Malgré la forte interaction entre le courant et le générateur de houle, la mesure de houle effectuée en amont de l'étrave est bien représentative de la houle rencontrée par la maquette.

Résumé

L'une des principales missions de l'Ifremer consiste à étudier les ressources sous-marines et les fonds marins via une flotte océanographique importante, employée à travers le globe. Pour ce faire, les navires sont munis d'équipements acoustiques de type SONAR afin d'obtenir les informations recherchées dans la colonne d'eau. Dans certaines conditions de navigation, la houle et les mouvements du navire génèrent un entraînement d'air conséquent sous la surface. Des nuages de bulles sont ainsi formés et entraînés sous la carène par l'écoulement. L'interaction entre ces bulles et les ondes acoustiques peuvent entraîner des pertes de données, et par conséquent une diminution importante de la productivité du navire. Les outils permettant l'étude du phénomène sont actuellement limités : les modèles numériques ne sont pas suffisamment performant pour simuler conjointement les mécanismes d'entraînement d'air à l'étrave puis l'écoulement diphasique autour de la carène, et les essais classiques en bassin de traction ne donnent pas entière satisfaction.

Dans le cadre de cette thèse, une méthode d'essai spécifique pour l'étude de ce phénomène a été développée et mise en place au bassin à houle et courant de l'Ifremer. Cette méthode nécessite la synchronisation entre un générateur de houle et un générateur de mouvement (hexapode) permettant d'imposer les mouvements à la maquette, calculés au préalable par simulation numérique. Grâce à cette configuration, les effets de la houle et des mouvements sur la génération des bulles peuvent être étudiés indépendamment.

L'instrumentation employée permet de filmer et de caractériser l'entraînement d'air à l'étrave de la maquette. Deux mécanismes distincts ont été observés : la génération de bulles par entraînement tourbillonnaire ou par le déferlement de la vague d'étrave. Une méthode de traitement d'image a été élaborée pour analyser ces mécanismes pour de nombreuses configurations d'essais. Une étude paramétrique a été réalisée afin de calculer la fréquence de génération de bulles en fonction de chaque paramètre d'essai. Des mesures PIV de l'écoulement permettent de corréler la dynamique des nuages de bulles avec celle de l'écoulement.

L'ensemble des résultats obtenus permet d'apporter des éléments nouveaux pour la compréhension et l'étude du phénomène, avec la perspective d'obtenir un outil fiable facilitant la conception des navires océanographiques.

Abstract

One of the main assignments of Ifremer is to study the seabed and the resources undersea, through a large oceanographic fleet used across the globe. For that purpose, ships are equipped with different kinds of SONAR (SOund Navigation And Ranging) to obtain the information sought in the water column. In some sea conditions, waves and ship motions generate significant air entrainment below the surface. Bubble clouds are then carried under the hull by the flow. The interaction between these bubbles and the acoustic waves may result in data loss, and therefore in a considerable reduction of the vessel's productivity. The tools used to study this phenomenon are currently limited : the numerical models are not efficient enough to simulate at a time air entrainment at the bow and the two phase flow around the hull. On the other hand conventional towing tank tests are not entirely satisfactory.

During this PhD research work, a specific test method to study this phenomenon has been developed and implemented at the Ifremer wave and current tank. This method requires the synchronization between a wave generator and a movement generator (hexapod) that enables to force the model motions, calculated in advance by numerical simulations. With this configuration, the effects of waves or motions characteristics on the bubbles generation can be studied independently.

A complete instrumentation allowed to acquire images sequences to characterize the air entrainment at the bow of the model. Two distinct mechanisms have been observed : the generation of bubbles by vortex shedding or by the breaking bow wave. An post-processing method has been developed to analyse these mechanisms, for many test configurations. A parametric study was performed to calculate the frequency of bubbles generation for each test parameter. PIV measurements allowed to correlate the dynamic of bubbles clouds with the own flow dynamic.

The overall results provide new elements for the understanding and the study of the phenomenon, with the final objective of obtaining a reliable tool that facilitates the design of research vessels.