



HAL
open science

Etude expérimentale de la couche limite dans l'air à proximité immédiate des vagues

Hubert Branger, Laurent Grare, Jean-Paul Giovanangeli

► **To cite this version:**

Hubert Branger, Laurent Grare, Jean-Paul Giovanangeli. Etude expérimentale de la couche limite dans l'air à proximité immédiate des vagues. CFM 2009 - 19ème Congrès Français de Mécanique, Aug 2009, Marseille, France. hal-03390971

HAL Id: hal-03390971

<https://hal.science/hal-03390971>

Submitted on 21 Oct 2021

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Etude expérimentale de la couche limite dans l'air à proximité immédiate des vagues

H. BRANGER, L. GRARE, J.P. GIOVANANGELI

Institut de Recherche sur les Phénomènes Hors Equilibre (IRPHE), CNRS

Campus Luminy, case 903, 13009 Marseille, branger@irphe.univ-mrs.fr

Résumé :

Dans la grande soufflerie air-eau du laboratoire IRPHE à Marseille, nous avons mesuré expérimentalement les caractéristiques de la couche limite dans l'air à proximité immédiate des vagues, y compris dans les creux de celles-ci. Nous avons placé un anémomètre à fil chaud et un capteur de pression très sensible sur un "suiveur à vagues", maintenant les appareils à une altitude constante par rapport à la surface de l'eau. Nous avons ainsi mesuré les vitesses de vent et leurs fluctuations, et les fluctuations de pression statique, de l'ordre de quelques Pascals, au voisinage immédiat de l'interface. D'autre part, à l'aide d'un fil chaud placé sur un dispositif "plongeur", nous avons mesuré les gradients verticaux de la composante horizontale de la vitesse du vent jusque dans la sous-couche visqueuse, à moins d'un millimètre de la surface. Nous avons pu ainsi déterminer la répartition des contraintes normales et tangentielles dans le bilan des flux de transfert de quantité de mouvement de l'air vers la mer. Les résultats présentent les évolutions de ces contributions en fonction de différents paramètres géophysiques. Par moyennage de phase, on décrit l'évolution de la structure locale de l'écoulement le long de la vague depuis la sous-couche visqueuse jusqu'aux limites de la couche limite turbulente à flux constant. Nous discutons de l'influence des termes induits par les mouvements de l'interface dans les processus d'échange énergétiques océan-atmosphère.

Abstract :

We conducted experiments in the IRPHE large air-sea interaction facility in Marseille. We measured the air-flow characteristics along the water wave near the crests and troughs. We put a hot-wire anemometer and a static pressure sensor on a "wave follower" in order to acquire data at a constant altitude above the air-water interface. We put also a hot-wire on a homemade "diving device" crossing the interface. We measured vertical gradient of the horizontal wind speed very close to the surface, at less than one millimeter from the interface. We quantified the viscous drag / form drag repartition as a function of wave phase, wind speed and wave steepness.

Mots clefs : vagues, vent, interactions air-mer, expérimentation en bassin, couche limite, sous-couche visqueuse, traînée de forme, turbulence, suiveur à vagues, plongeur, pression statique

1 Introduction

La détermination des flux de quantité de mouvement à proximité immédiate des vagues est toujours d'actualité, car très près de la surface, il reste difficile de mesurer correctement ces flux. A l'interface air-eau, le vent transfère la quantité de mouvement *a)* par traînée visqueuse générant des courants marins, et *b)* par traînée de forme amplifiant les hauteurs de vague. La répartition traînée visqueuse/traînée de forme est mal connue, car il faut pouvoir mesurer à la fois le gradient de vitesse du vent dans la sous-couche visqueuse, et la répartition des champs de pression au dessus des vagues. C'est dans cet optique que nous avons mis au point une instrumentation pour mesurer en soufflerie air/eau les caractéristiques de l'écoulement d'air (vitesse et pression) de la couche turbulente jusqu'à l'intérieur de la couche visqueuse qui fait à peine 1 mm d'épaisseur. Nous décrivons l'installation expérimentale et les résultats des mesures.

2 Conditions expérimentales

Les expériences ont été réalisées dans la grande soufflerie air-eau de l'IRPHE à Luminy - Marseille. Elle est constituée d'une veine fermée de 40m de long, 3.2m de large et de 1.6m de hauteur, située au dessus d'un bassin de 40m de long, pour 2.6m de large et 1m de profondeur. Le ventilateur permet de générer un écoulement d'air qui peut atteindre 14m/s. Le batteur immergé sous la plage amont, piloté par ordinateur, permet de générer des trains de vagues pour lesquels la fréquence de l'onde dominante peut varier entre 0.7Hz et 2Hz.

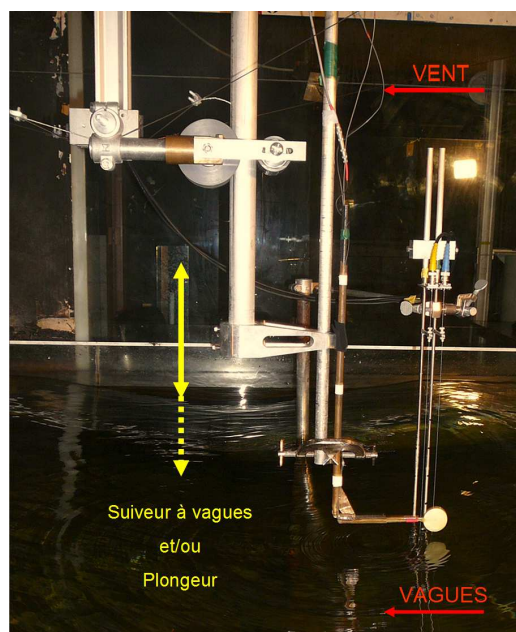


FIG. 1 – Le suiveur à vagues avec les capteurs.

Afin de positionner les divers capteurs à une altitude constante prédéterminée au dessus de l'interface air-eau en présence de vagues, nous avons utilisé un vérin électromagnétique de la marque Copley Corp, modèle XTB 3810. Il peut être piloté par un signal analogique ce qui nous a permis de le connecter directement à la sonde à vagues, et ainsi de réaliser *un suiveur à vagues* (figure 1). Un capteur de position, monté sur le vérin, permet de mesurer à chaque instant les déplacements effectifs du vérin. De nombreux essais ont été réalisés afin de régler les différents paramètres d'asservissement de manière à ce que la réponse du suiveur soit satisfaisante par rapport aux déplacements instantanés de l'interface. Dans la gamme des fréquences qui nous intéresse (1 à $3Hz$), l'erreur de position du suiveur est d'environ 10% alors que le retard en phase augmente avec la fréquence entre -2° et -6° . Cependant, connaissant simultanément la position instantanée des sondes et les mouvements de l'interface, il est possible de calculer, à chaque instant, la position exacte des sondes par rapport à la surface.

Dans une autre série de mesures, nous avons utilisé le vérin dans une configuration de type *plongeur*. Ce montage a été réalisé afin de mesurer la composante horizontale de la vitesse dans la sous-couche visqueuse. Ce montage original permet aux sondes de traverser l'interface air-eau et donc de transiter dans la sous-couche visqueuse. Un fil droit monté sur le plongeur permet de mesurer la valeur absolue de la vitesse de l'écoulement dans le référentiel lié au capteur. Si l'on connaît exactement la vitesse de plongée, il est alors possible de calculer la vitesse absolue de l'écoulement dans le référentiel lié au laboratoire. Lorsque le capteur touche la surface de l'eau, le signal fourni par la sonde de vitesse sature instantanément ce qui nous permet de connaître exactement l'instant T_0 qui correspond au point d'impact de la sonde avec la surface. A partir de cette information et de la vitesse de plongée, nous pouvons relier le temps et l'espace et déterminer alors la trajectoire parcourue par la sonde avant la plongée. Nous obtenons ainsi la position de la sonde par rapport à la surface, la vitesse absolue de l'écoulement pour chaque position, et donc le gradient des vitesses très près de l'interface. Les mouvements du vérin sont commandés par un signal périodique, chaque cycle correspondant à une plongée. Le cycle se décompose en 3 temps : a) le séchage : le capteur est en position haute à $12cm$ de la surface au repos, le fil sèche pendant 10 secondes suite à la plongée précédente ; b) la plongée à la vitesse de $1m/s$ à travers la surface ; c) le retour en position haute. Le but de la manipulation est de connaître la vitesse dans le $1^{er}mm$ au dessus de la surface y compris dans les creux des vagues. Nous avons choisi de plonger à $1m/s$; en réalisant une acquisition à la haute fréquence de $20000Hz$, le millimètre situé au dessus de l'interface est défini par 20 points, ce qui représente une discrétisation spatiale de $50\mu m$.

Nous avons conservé les sondes à vagues afin de connaître à quelle phase de la vague a lieu l'impact. Nous avons pu ainsi étudier l'évolution de l'écoulement dans la sous-couche visqueuse en fonction de la phase de la vague. Afin d'avoir une représentation détaillée de cet écoulement le long du profil de l'onde, nous avons choisi d'effectuer 100 plongées par chaque combinaison vent/vagues étudiée. L'étalonnage du fil droit a nécessité de mettre au point une nouvelle technique de tarage du fil car les vitesses que nous voulons mesurer sont faibles au voisinage de la surface et le fil se dégrade au cours des plongées. La calibration est décrite en détail dans [1].

Afin de réaliser les mesures de pression, nous avons choisi d'utiliser l'antenne de pression d'Elliot [2] dans laquelle a été insérée un capteur piézométrique Endevco. La particularité de notre sonde de pression est d'avoir inséré le capteur de pression au plus près de l'orifice en contact avec l'écoulement. Ainsi, l'air compris entre la prise de pression et le capteur a un volume restreint, ce qui permet d'éliminer les problèmes de déphasage

et d'atténuation du signal de pression entre la prise de pression et la capteur. Ceci a également permis de minimiser au maximum l'erreur sur la mesure de la pression lorsque la sonde, munie du capteur, a été utilisée sur le suiveur à vagues (effet de l'accélération verticale - voir [3]). Les détails de fabrication de la pastille et les calibrations de la sonde sont décrits dans [1].

3 Etude de la sous-couche visqueuse

Dans cette partie, nous présentons les résultats obtenus à partir des mesures réalisées avec le montage *plongeur*. Tout d'abord, nous étudions l'évolution verticale de la vitesse horizontale *moyenne* U . Ceci nous permet de mettre en évidence les différentes zones de l'écoulement à proximité de la surface. Nous présentons sur la figure 2 l'évolution de la vitesse normée $U^+ = U/u_*$ en fonction de l'altitude normée $\xi^+ = \xi u_*/\nu$ où u_* est la vitesse de frottement, ξ est la distance entre la sonde et la surface et ν est la viscosité cinématique de l'air. La vitesse U est calculée en moyennant, pour chaque altitude, les vitesses instantanées mesurées au cours des 100 plongées.

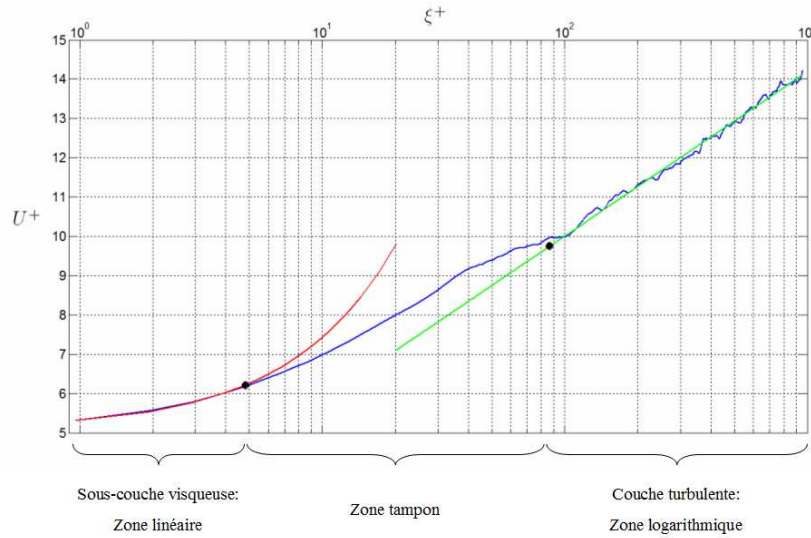


FIG. 2 – Profil vertical de U^+ .

Ce graphe permet de différencier les différentes couches aériennes au dessus de l'interface : la sous-couche visqueuse (environ 1 mm) à proximité immédiate de la surface, la zone tampon (environ 1cm) qui marque la transition entre écoulement laminaire et turbulent, et le début de la couche turbulente. La représentation logarithmique permet de mettre en évidence la limite inférieure de la couche turbulente caractérisée par la fin de la partie linéaire du graphe. Dans cette zone, la vitesse moyenne évolue de manière logarithmique avec l'altitude suivant la loi

$$U(\xi) = \frac{u_*}{\kappa} \ln \left(\frac{\xi}{z_0} \right) \quad (1)$$

où z_0 est la rugosité aérodynamique et κ la constante de Von Karman. En remplaçant les valeurs absolues par les grandeurs normées de la vitesse et de l'altitude dans cette équation, nous obtenons la relation suivante :

$$U^+(\xi^+) = \frac{1}{\kappa} \left(\ln(\xi^+) + \ln \left(\frac{\nu}{z_0 u_*} \right) \right) \quad (2)$$

Ainsi, nous remarquons qu'en utilisant cette paramétrisation, U^+ est directement relié à $\ln(\xi^+)$ par le coefficient directeur $1/\kappa$. En effectuant une régression linéaire sur nos points de mesures, nous obtenons un coefficient directeur proche de la théorie avec une erreur inférieure à 20%.

En ce qui concerne la sous-couche visqueuse, la théorie prédit une augmentation linéaire de la vitesse avec l'altitude. En utilisant la représentation (U^+, z^+) , quand ξ tend vers 0, la pente de cette partie linéaire est :

$$\frac{\partial U^+}{\partial \xi^+} = \frac{\partial \frac{U}{u_*}}{\partial \frac{\xi u_*}{\nu}} = \frac{\nu}{u_*^2} \frac{\partial U}{\partial \xi} = \frac{\mu \frac{\partial U}{\partial \xi}}{\rho u_*^2} = \frac{\tau_\nu}{\tau} \quad (3)$$

où τ_ν est la tension visqueuse à la surface et $\tau = \rho u_*^2$ est la tension totale. Ainsi, nous obtenons directement la contribution de la tension visqueuse à la contrainte totale. Pour le cas d'un écoulement sur une plaque plane,

la conservation de la quantité de mouvement prédit une égalité entre tension totale et tension visqueuse à proximité immédiate de la plaque ; la pente de la droite représentant l'évolution de U^+ en fonction de ξ^+ dans la sous-couche visqueuse est alors égale à 1. Dans nos expériences, la présence de vagues induit des contraintes normales qui induisent la traînée de forme. D'après le modèle de Deardoff [4], la somme des tensions normales et tangentielles est égale à la tension totale. Ainsi, la contribution des contraintes visqueuses est balancée par les contraintes normales. Nous obtenons des gradients $\partial U^+ / \xi^+$ qui varient entre 0.1 et 0.5, ce qui montre que pour les différentes conditions que nous avons étudiées, la contribution des contraintes visqueuses à la contrainte totale évolue de 10 à 50%.

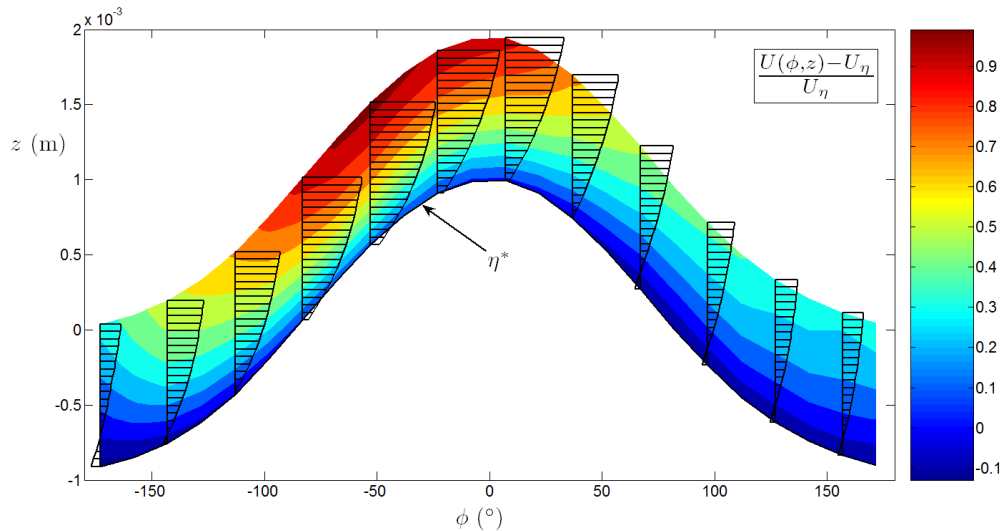


FIG. 3 – Résultats expérimentaux : profils de la vitesse du vent dans la 1^{ère} mm au dessus de l'interface le long de la phase de la vague.

Sur la figure 3, nous présentons les modulations de la vitesse moyenne horizontale dans la sous-couche visqueuse le long du profil moyen de la vague. Ce graphique présente les résultats des mesures effectuées pour un vent de 7 m.s^{-1} . On notera que la variable η^* correspond au profil moyen $\bar{\eta}$ du champ de vague normé à l'échelle de l'épaisseur de la sous-couche visqueuse. La principale information que l'on peut tirer de cette représentation est la dissymétrie de l'écoulement entre la face amont et la face aval de la vague. En effet, dans toute la sous-couche visqueuse, on observe une compression des lignes de courant sur la face amont de la vague, ce qui produit une accélération de l'écoulement à cet endroit. Par opposition, sous le vent de la vague, la vitesse moyenne diminue sous l'effet d'abri provoqué par la crête de la vague.

Ce phénomène d'accélération/décélération a aussi une influence sur l'évolution du gradient vertical de la vitesse horizontale. Sur la face au vent, la vitesse de l'écoulement augmente rapidement avec l'altitude tandis que, sous le vent, cette augmentation est beaucoup moins importante. On obtient ainsi une dissymétrie de la tension visqueuse de part et d'autre de la crête.

Pour mieux visualiser les variations de tension visqueuse le long du profil des vagues, la figure 4 représente l'évolution du rapport de la tension visqueuse locale à la surface $\tau_v^{\phi, \eta} = \mu \partial u(\phi, \eta) / \partial \xi$ sur la tension visqueuse moyenne τ_v noté $R_{\tau_v}^{\phi, \eta} = \tau_v^{\phi, \eta} / \tau_v$. Nous distinguons les cas où le champ de mer est uniquement composé de vagues de vent (courbe rouge) et les cas où le champ de mer est une combinaison de vagues de vent et de vagues de batteur (courbe bleue). Nous retrouvons bien la dissymétrie observée, avec une augmentation significative de la tension visqueuse sur la face au vent de la vague, qui s'équilibre avec une diminution en aval de la crête. Pour le cas des vagues de vent pures, on s'aperçoit que le maximum de $R_{\tau_v}^{\phi, \eta}$ est très localisé, à environ -55° de la crête, tandis que le minimum présente une zone couvrant quasiment toute la face sous le vent. Ce résultat montre que la tension visqueuse n'est pas seulement déphasée par rapport aux mouvements de l'interface mais qu'il existe une forte dissymétrie entre les faces au vent et sous le vent. Pour les champs de mer complexes, les modulations de la tension visqueuse locale sont bien plus importantes (70 à 80 %) que pour les vagues de vent pures (environ 40 %). De plus, la dissymétrie entre amont et aval de la crête est différente, avec une zone assez étendue pour laquelle la tension visqueuse est importante alors que le minimum est atteint sur une zone localisée de la face sous le vent.

Ce graphique nous montre que les modulations de la tension visqueuse sont sensibles à l'état du champ de mer (que l'on caractérise généralement par la cambrure ak). Afin d'étudier cette tendance, nous comparons sur la figure 5 trois cas pour lesquels la vitesse du vent est constante et égale à 7 m.s^{-1} mais avec des cambrures

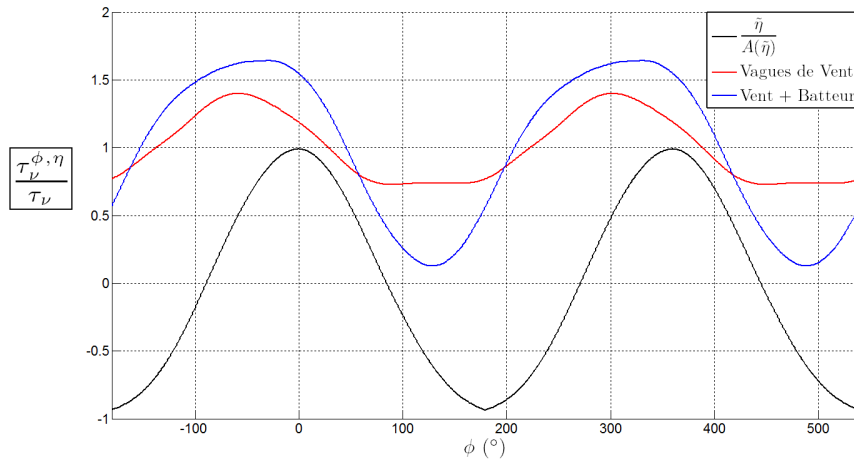


FIG. 4 – Modulation de la tension visqueuse à la surface le long du profil moyen du champ de vagues.

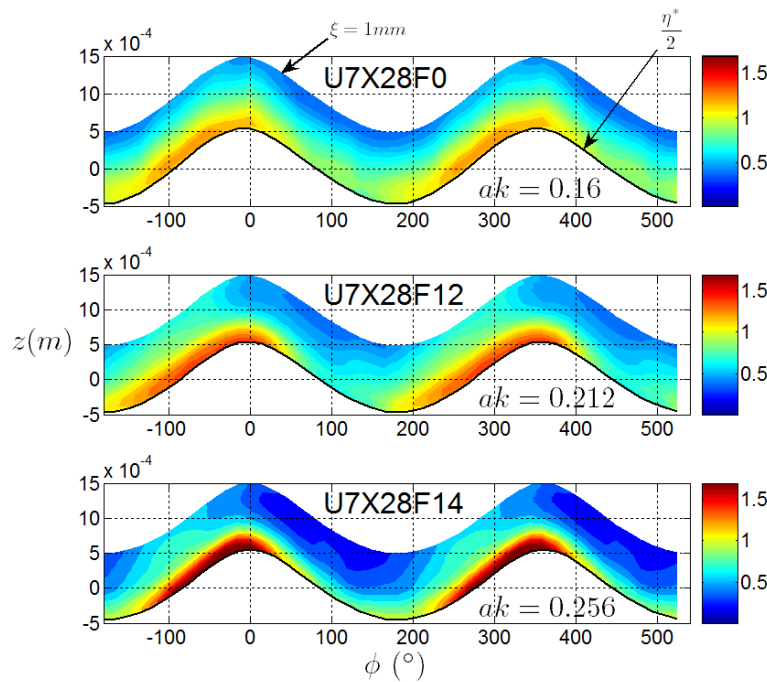


FIG. 5 – Evolutions de $R_{\tau_v}^{\phi, z}$ en fonction de ak dans le 1^{er} mm au dessus de l’interface.

différentes. Nous avons reporté ici, les modulations de $R_{\tau_v}^{\phi, \xi}$ le long de la vague et à l’intérieur de la sous-couche visqueuse pour différentes vitesses de vent avec $R_{\tau_v}^{\phi, \xi} = \tau_v^{\phi, \xi} / \tau_v$, où $\tau_v^{\phi, \xi}$ est la contrainte de cisaillement locale définie par $\mu \partial u(\phi, \xi) / \partial \xi$. Sur cette représentation, nous observons une intensification de la contrainte de cisaillement sur la face au vent sur une zone de plus en plus petite et une diminution importante de la contrainte de cisaillement dans le creux de la vague. De plus, l’épaisseur de la sous-couche visqueuse semble être modulée par les mouvements de l’interface lorsque la cambrure augmente. La sous-couche visqueuse s’épaissit en amont de la crête puis elle s’amincit au niveau de la face sous le vent.

4 Mesures réalisées sur le suiveur à vagues

Nous présentons sur la figure 6 un exemple de résultats obtenus à partir de mesures réalisées en utilisant le suiveur à vagues. Le traitement des données et les corrections nécessaires aux calculs de tels termes sont détaillés dans [1]. Le principal outil mathématique utilisé pour le traitement de ces données est le moyennage de phase qui permet d’extraire les composantes induites par les mouvements de l’interface. Il est alors possible de décomposer une variable f en parties moyennes (\bar{f}), parties induites (\tilde{f}) et en parties purement turbulentes (f''). L’utilisation de ces outils, combinée aux trajectoires suivies par les sondes grâce au suiveur à vagues, permet d’étudier la structure de l’écoulement dans son ensemble, au plus près de l’interface. Sur le graphe 6,

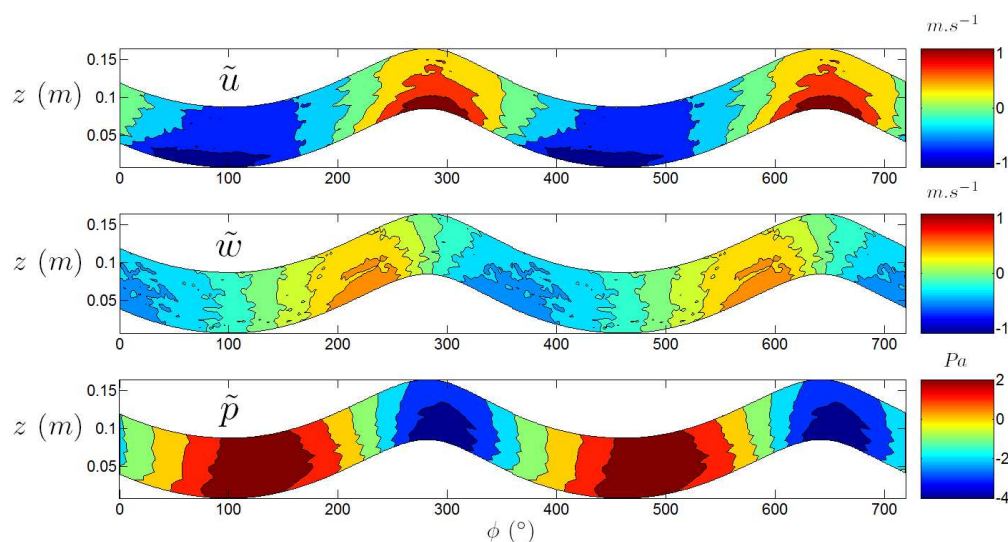


FIG. 6 – Exemple de résultats acquis à partir de mesures réalisées sur le suiveur à vagues : composantes horizontale et verticale de la vitesse induite par les vagues, et champ de pression induit.

nous avons reporté les composantes horizontale et verticale de la vitesse induite par les vagues et de la pression statique afin d'illustrer le type de mesures que nous avons réalisées. Les variations de pression statiques sont très faibles, de l'ordre de quelques Pa, d'où la difficulté de mesure (1Pa représente est la pression d'une colonne de 10cm d'air). Les modulations des vitesses induites augmentent à mesure que l'on s'approche de la surface, avec notamment un lien fort entre les maxima de la vitesse horizontale et les creux et crêtes des vagues. En ce qui concerne la pression statique, on observe un léger déphasage entre la pression induite et les mouvements de l'interface qui traduit un transfert de quantité de mouvement positif du vent vers les vagues via la traînée de forme induite $\tilde{p}\partial\eta/\partial x$.

5 Conclusions

Nous avons mis au point un système de mesure des champs de pression et de vitesse de vent sur un suiveur à vagues (les instruments restent à la même élévation par rapport à la surface), et sur un plongeur (les capteurs traversent l'interface). Le développement, les tests, les mesures et les résultats font l'objet d'un travail de thèse ([1]). Les premiers *mm* et *cm* de la couche atmosphérique de surface ont pu être ainsi observés. Par moyennage de phase, nous avons calculé les composantes moyennes, induites, et turbulentes des différentes grandeurs. Les principales conclusions sont les suivantes :

- les formes des vagues induisent des asymétries entre les faces au vent et sous le vent qui modulent les valeurs des transferts de quantité de mouvement du vent aux vagues le long de ces dernières ;
- la répartition traînée visqueuse (courant) / traînée de forme (amplification des vagues) est liée aux cambrures des vagues. De plus, la traînée visqueuse n'est pas répartie uniformément le long des vagues : elle est plus importante sur la face au vent et près des crêtes.

Perspectives : L'utilisation de ces composantes et leurs corrélations nous permettent de mener actuellement une étude critique de la méthode Inertio-Dissipative de mesure des flux (travail en cours de réalisation). Nous étudions le bilan local entre production turbulente, dissipation visqueuse et termes de transport de l'énergie cinétique.

Références

- [1] Grare L. Structure détaillée de la couche limite atmosphérique à proximité de l'interface air-eau. (En cours de rédaction). PhD thesis, Université d'Aix-Marseille II, 2009.
- [2] Elliott J. A. Microscale pressure fluctuations near waves being generated by the wind. *J. Fluid Mech.*, 54, 427–448, 1972.
- [3] Donelan M., Babanin A., Young I., Banner M., and McCormick C. Wave-follower field measurement of the wind-input spectral function. *J. Atm. Ocean. Tech.*, 22, 799–813, 2005.
- [4] Deardoff J. Aerodynamic theory of growth with constant wave steepness. 23(6), 278–297, 1967.