

7^e JOURNEES DE L'HYDRODYNAMIQUE

MARSEILLE - 8, 9, 10 MARS 1999

Écarts de pressions au près sur un voilier. Une approche numérique et des mesures à la mer.

A.Dulieu *
LIMSI CNRS
adulieu@limsi.fr

B.Dulieu †
Université Paris 7
dulieu@paris7.jussieu.fr

C.Molinié
Université Paris 7

12 janvier 1999

RÉSUMÉ : En juillet et août 98, nous avons enregistré environ 5 heures de mesures sur un voilier de série, (Beneteau First 260, voiles Tonnerre), naviguant au près. L'instrumentation utilisée est décrite, et nous indiquons les principales caractéristiques des capteurs employés. Nous donnons quelques exemples de résultats qui montrent, tous, la variabilité du champ de pression. La partie haute fréquence des fluctuations semble être liée au tangage. Les variations plus lentes sont corrélées avec la direction du vent apparent. L'aspect de ces corrélations dépend beaucoup des réglages.

Pour rapprocher prédictions numériques et mesures il semble indispensable de mieux prendre en compte la forme réelle des voiles.

SUMMARY : During the summer 98, sail's pressure differences have been recorded while sailing to windward. Sensors and measuring equipment are described. We display some typical records showing the great pressure variability. The high frequency part of these fluctuations is related to pitching. The slow part is correlated with the bearing of the apparent wind. This correlation varies strongly according to the tuning.

*BP 133 -91403 Orsay cedex

†Correspondance à : B.Dulieu LUAP case 7087, 2 place Jussieu, 75 251 Paris cedex 05-tel/fax : 01 4427 4009

1 Introduction

La littérature concernant la physique des bateaux à voiles est relativement abondante. Mais elle est diverse, inégale et dispersée. Un lecteur français éprouve parfois des difficultés à la localiser et à la consulter. L'article de L.Larsson dans Annual Review of Fluid Mechanics [6] peut servir de point de départ. Le numéro spécial [4] du Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics donnera un aperçu assez large et plus récent de la nature des recherches en cours. Si elle consulte les listes bibliographiques de ces deux documents la lectrice pourra faire un tri entre la littérature grise (qui existe mais est particulièrement difficile à consulter) et l'autre. Il existe aussi des livres. La réédition du livre de Ross Garrett [5] permet de disposer d'un bon exposé de la manière dont un physicien comprend, (ou essaye de comprendre), un voilier.

Pratiquement pour prévoir la vitesse moyenne d'un voilier on utilise un programme de prédiction de vitesses (VPP). L'idée de base est de déterminer une vitesse (moyenne) correspondant à l'égalité de la force propulsive (due au vent et aux voiles) et de la résistance hydrodynamique. Deux problèmes sont ainsi découplés et deux communautés peuvent travailler, chacune avec ses méthodes et ses moyens. Bassins d'essais et simulations numériques d'une part, souffleries et simulations numériques de l'autre.

Un scientifique naïf aimerait qu'une troisième communauté prenne les résultats hydrodynamiques, les résultats aérodynamiques, en déduise les vitesses prévues, organise des essais en vraie grandeur, compare les prédictions et les observations, publie le tout, et qu'ainsi la science progresse. Citons G.I.Taylor [11] :

At the beginning of the twentieth century, when flying began and engineers had to design airplanes, the importance of knowing about the force which a body experiences when moving through a fluid increased greatly. Since the existing non viscous fluid theory was so unrealistic, engineers constructed small models of airplanes and tested them in wind tunnels, assuming that such tests could be scaled up and give reliable design information. [...] To use model tests with confidence in airplane design it seemed necessary to think of something that could be measured, both in flight and in a wind tunnel, and compare them. One such thing was the distribution of pressure over one section of a wing. In 1915, when I returned to Farnborough after getting my wings as an airplane pilot, I took up this problem and designed a multitube manometer [...] I set up the manometer in the plane and flew it as well as I could at a constant speed. [...] In this way I got a set of pressure measurements [...] which could be compared with measurements made at the National Physical Laboratory. [...] The results did not agree very well, but it was found that...

Une dizaine d'années plus tard Edward P. WARNER et Shatswell OBER publiaient [12] les premières mesures de pression réalisées sur un voilier. À notre connaissance ¹ ces mesures sont aussi les dernières ; ce qui est très étonnant. On peut lire parfois que ces mesures sont inutiles et parfois qu'elles sont pratiquement impossibles.

Les progrès de la modélisation numérique des voiles sont tels [7] qu'il sera sans doute un jour possible de dégager des questions auxquelles des expériences un peu fines à la mer pourront prétendre répondre de manière compétitive.

Il y a un peu plus de 10 ans l'un d'entre nous a été amené (à la demande de la société AIR METHOD GROUP) à fabriquer des capteurs de différences de pression utilisables sur des voiles. Il nous a semblé utile d'utiliser ces capteurs pour une nouvelle campagne de mesures.

Si nous comprenons bien pourquoi les mesures en situation réelle ont une si mauvaise réputation nous croyons qu'elles peuvent apporter des questions et des réponses. Bien entendu il faut attendre et choisir des conditions favorables et il faudra quelques essais publiés avant d'obtenir des résultats solides.

¹Très incomplète : nous toujours pas trouvé de moyen raisonnable pour avoir accès aux actes des congrès de Chesapeake Bay-entre autres.

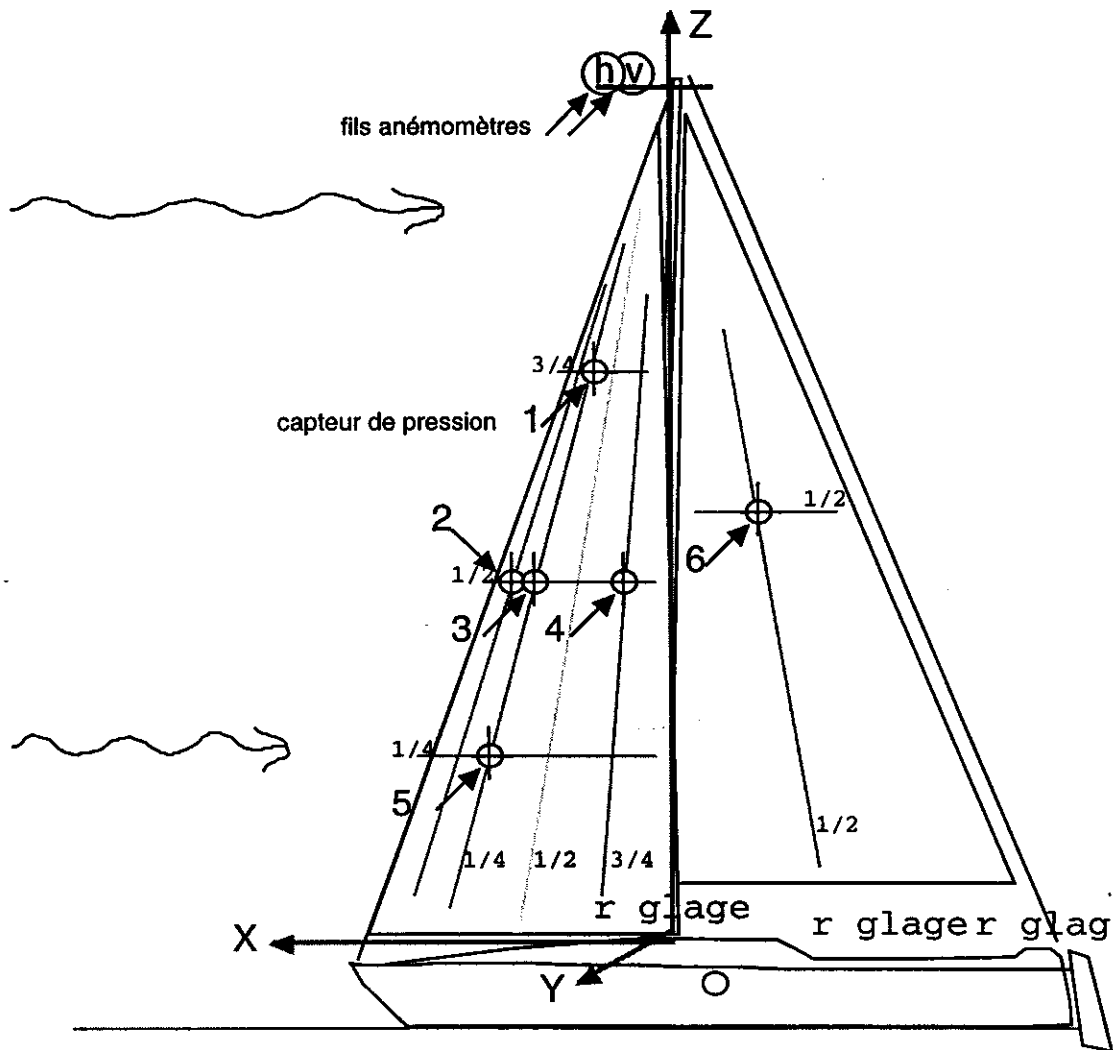


FIG. 1: Positions des capteurs

2 Matériel

2.1 Navire, voiles, capteurs

Nous disposons, basé à Port la Forêt, du First 260 "Tournepierre". Voilier construit en série par Beneteau sur les plans du groupe Finot. Il s'agit d'un voilier de croisière récent dont la longueur à la flottaison est de 7 mètres 35 pour une masse d'environ 2500 Kg. Une de ses caractéristiques intéressante est la quille pivotante de 625 Kg qui permet de faire varier le tirant d'eau entre 0,85 et 1,85 mètre. On peut donc espérer faire varier quelques caractéristiques dynamiques du navire. Un autre avantage de ce modèle réside dans l'existence d'un plus petit le First 210 et d'un plus grand le First 300. Sur un seul ponton de Port la Forêt on peut voir tous ces modèles.

Nous disposons de deux jeux de voiles (généris et grand voile) identiques fabriquées par la voilerie Tonnerre (Lorient) sur les plans de C.E.Broc. L'un de ces jeux est équipé de 6 capteurs de différences de pression dont les positions sont indiquées sur la figure 1. Ces positions peuvent être changées. Le choix actuel privilégie le généris. Trois points de mesure, (de haut en bas on les note 1,3,5), sur la section verticale au quart des cordes, et trois points, (2,3,4 dans la direction du vent), le long de la section horizontale médiane. La grand voile est moins bien traitée : un seul capteur, (6), au centre. La barre peut être contrôlée par un pilote automatique. Ce pilote automatique devrait pouvoir tirer sa consigne du vent apparent, mais pour le moment ce mode ne fonctionne pas et on n'utilise un contrôle par le compas incorporé.

Un capteur de gîte commercial (Brookes et Gatehouse) donne une tension analogique propor-

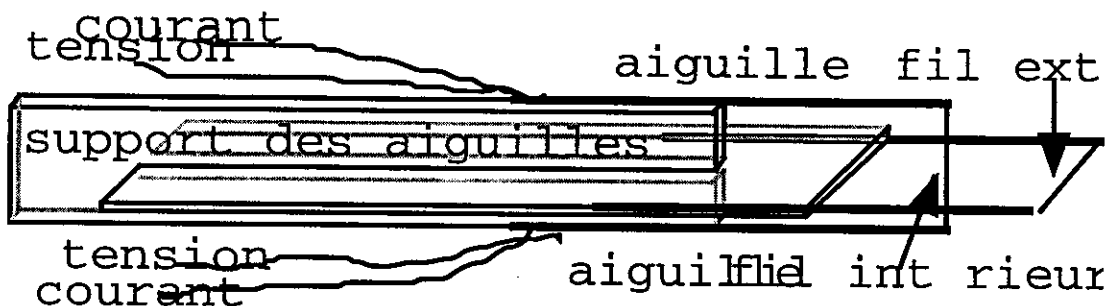


FIG. 2: L'anémomètre

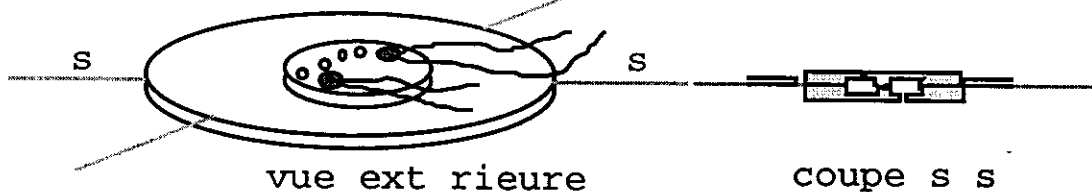


FIG. 3: Capteur de pression

tionnelle à la gîte. Enfin, à environ 0,80 mètre en avant de la tête de mat on a placé deux fils anémomètres, un "vertical" et l'autre "horizontal".

Afin d'avoir une idée qualitative des sillages induits (dans l'air) et de l'état du fluide près des voiles celles-ci ont été équipées d'un jeu très étendu de pennons.

2.2 Les capteurs spéciaux

Nous donnons ici quelques indications sur les capteurs fabriqués spécialement. En choisissant les détails qui peuvent faire gagner du temps à qui souhaiterait en fabriquer.

2.2.1 Anémomètre à fil chaud

L'anémomètre est représenté sur la figure 2. Chaque fil sensible est en tungstène doré, de 20 microns de diamètre, et de 12 millimètres de long.

Le choix d'un grand diamètre est justifié par une bonne sensibilité pour la gamme de vitesse (de 1 à 10 m/s) visée et une relative solidité qui facilite la fabrication manuelle et les manipulations. L'inconvénient est une consommation de courant importante de 160 à 200 mA environ par fil.

Le mode de fonctionnement choisi est à résistance constante (donc à température moyenne constante). Le contrôle, avec la précision requise, d'une résistance faible située à une vingtaine de mètres (c'est la longueur des fils de liaison actuels, elle était prévue pour des mesures sur des voiliers plus grands) nécessite quelques soins. Nous employons un montage à quatre fils. Le courant principal I , qui chauffe le fil capteur de résistance de consigne X , traverse une résistance de référence R . Les différences de potentiel XI et RI sont captées par deux montages différentiels. La différence pondérée des sorties de ces deux montages est employée pour former le signal d'erreur qui permet d'asservir X/R . La puissance dissipée dans X est donc proportionnelle à $R I^2$. Le signal de mesure $R I$ est décalé puis amplifié pour donner le signal de sortie. En notant V le module de la composante de la vitesse du vent normale au fil, on a, compte tenu de l'allongement du fil, [1, 8] : $X I^2 = A + B V^{0.45}$. On en déduit facilement une expression explicite de V en fonction de la tension de sortie. Chaque capteur est associé à une carte et, une fois les réglages du point de consigne et du décalage effectués, un étalonnage simple permet de déterminer la relation exprimant V en fonction de la tension de sortie. Pour simplifier nous avons décidé de considérer que le vent apparent est "horizontal". Le signal du fil "vertical" donne donc directement le module du vent apparent et le signal du fil horizontal et transversal (parallèle à la barre d'écoute) donne

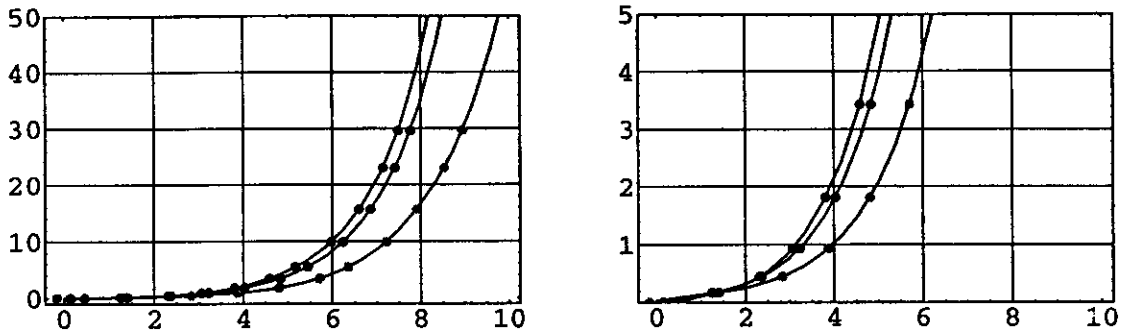


FIG. 4: Courbes d'étalonnage de 3 capteurs de pression. En ordonnée : différence de pression en millimètres d'eau. En abscisse : tension de sortie en volts.

alors l'angle α du vent apparent par rapport à l'axe longitudinal (OX) du bateau si on connaît ² l'angle de ce dernier fil par rapport à OX.

2.2.2 Capteurs de pression

La figure 3 montre un capteur de pression [3]. Le principe de la mesure est de créer une fuite entre les deux faces de la voile et de mesurer le débit de cette fuite par l'intermédiaire d'un fil chaud asservi en température. La masse du capteur, inférieure à 3 grammes n'induit pas de déformation de la voile. Par contre le capteur crée une surépaisseur d'environ 1,5 millimètre par rapport à la face extérieure de la voile, sur un diamètre de 38 millimètres. La manière dont cette protubérance (associée à une fuite) modifie la pression locale n'est pas tout à fait évidente. Le fil chaud est semblable aux fils employés pour les anémomètres décrits ci-dessus. L'électronique de commande est la même.

La hauteur du canal central dans lequel est fixé le fil est de un ou deux dixièmes de millimètre. Pour ces capteurs on préfère employer une courbe d'étalonnage entièrement empirique. La figure 4 montre ces courbes pour quatre capteurs.

Les temps de réponses des anémomètres et des capteurs de pressions, réglables par l'asservissement des résistances, sont fixés à 100 millisecondes.

2.3 Chaîne de mesure et d'acquisition

Les 9 signaux analogiques des capteurs : 6 pressions, deux composantes de vent et la gîte sont filtrés en parallèle par 9 filtres passe-bas (fréquences de coupures : 5 Hertz) et numérisés sur 16 bits de manière synchrone.

On a choisi une période d'acquisition de 1/10 seconde et une durée de 4 minutes par enregistrement.

Les données sont affichées en temps réel sur l'écran de l'ordinateur portable (mais sans linéarisation). Chaque fichier de mesure, désigné par la date et l'heure du début d'enregistrement, est nommé et enregistré automatiquement sur le disque de l'ordinateur portable.

3 La campagne de mesure juillet août 98

3.1 Préparation : campagne 89 et modèle numérique

Les essais qui ont eu lieu à la Rochelle en mai 89 étaient principalement des tests de faisabilité des capteurs. Nous voulions savoir si les capteurs résisteraient et s'ils pouvaient donner des indications utilisables pour régler des voiles et le gréement. Comme prévu les signaux de pression se sont avérés complexes— dépendant du temps, des réglages, et du vent. Le plus urgent pour espérer pouvoir interpréter ces signaux était de disposer d'enregistrements simultanés des

²Problème actuellement mal résolu. Nous avons mesuré 21 degrés mais c'est à deux ou trois degrés près.

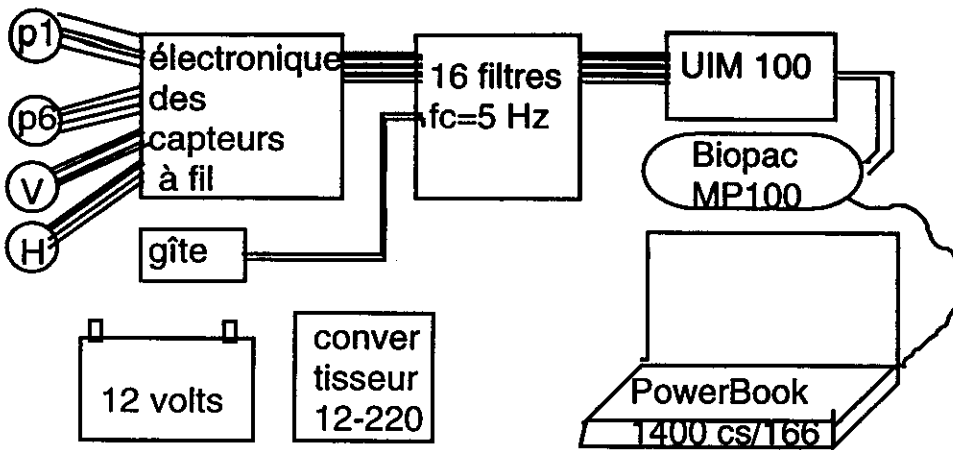


FIG. 5: La chaîne de mesure et d'acquisition

pressions et du vent. Nous avons donc ajouté un anémomètre du type décrit ci-dessus et réalisé quelques enregistrements complémentaires pour préparer la suite.

En examinant ces données il nous avait semblé qu'il était possible d'obtenir des profils de pression réduites (des coefficients de pression) en fonction de l'angle du vent apparent. Ces résultats n'ont pu être à l'époque comparés à quoi que ce soit d'accessible. Pour avancer un peu plus il fallait pouvoir comparer ces résultats à d'autres. Par exemple aux mêmes grandeurs calculées. Nous avons donc écrit (été 97) un ensemble de logiciels permettant le calcul des différences de pressions de part et d'autre de voiles de formes et de dispositions données, placées dans un vent permanent mais non nécessairement uniforme. Connaissant le plan des voiles, mis à notre disposition par C.E.Broc, et la géométrie du navire, il est possible d'évaluer numériquement les grandeurs accessibles à la mesure.

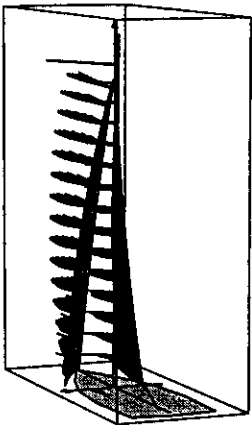


FIG. 6: Une représentation du champ des écarts de pression calculé. Pour la clarté de la figure on a ouvert le génois en le faisant tourner autour de l'étai.

Les calculs de position des voiles et les maillages, l'analyse et la représentation des résultats, sont effectués sous Mathematica. La méthode employée [9, 10] pour le calcul des champs de vitesse est la méthode des singularités. Cette méthode donne accès aux forces élémentaires associées aux éléments du maillage. Nous leur associons un champ des écarts de pressions.

Dans ces calculs les voiles ont leur forme de conception. La géométrie connue du navire fixe la position des guindants (bords d'attaques). Il y a donc, dans le cas le plus simple d'un vent uniforme et d'une gîte nulle, trois paramètres. Le premier ω_1 correspond à la rotation du génois autour de l'étai, le second ω_2 à la rotation de la grand-voile autour du mat, le troisième α est l'angle du vent apparent par rapport à l'axe OX du bateau. Le module du vent n'apparaît, par son carré, que comme un facteur d'échelle multiplicatif. Avec ce modèle on peut déterminer des grandeurs globales, par exemple la composante propulsive de la poussée aérodynamique, le

α	cp_1	cp_2	cp_3	cp_4	cp_5	cp_6	CY/CX
24	2,79	1,50	2,28	1,77	1,46	1,30	2,8866
30	4,03	2,71	3,21	2,04	2,08	1,46	2,2835

TAB. 1: Références numériques : Voiles rigides, $\omega_1 = 22$, $\omega_2 = 10$

moment de gîte et des grandeurs locales, les coefficients de pression, ou la déviation du vent au point de mesure de l'anémomètre.

Il s'agit, on le souligne, d'une caricature de voilier mais qui permet de calculer des grandeurs comparables aux grandeurs mesurées si l'on est capable d'identifier deux configurations identiques dans les deux démarches.

À titre de référence centrale un "près de calcul" nous semblait correspondre à $\alpha = 27$ degrés, $\omega_1 = 22$ degrés, $\omega_2 = 10$ degrés. Les valeurs utiles sont données dans le tableau 1.

3.2 La campagne 98

Entre le 10 juillet le 15 août 98 le temps dans le Finistère sud a été déplorable. Nous avons enregistré, par beau temps, au cours de sorties successives environ 5 heures de mesures. Un cahier d'expériences a été partiellement tenu. Aucun incident n'a été observé sur la chaîne expérimentale.

Nous extrayons quelques enregistrements caractéristiques en leur conservant l'ordre chronologique.

3.2.1 Vendredi 24 juillet : Bords de près sans modification des réglages.

Alors que nous étions encalminés au sud de Beg Meil le vent s'est levé au sud ouest. Conditions idéales pour un long bord de près tribord amure sans soucis importants de sécurité. Nous avons réglé pour un bord de près et installé le pilote. Le réglage n'a pas été modifié par la suite, on s'est contenté de retoucher le cap (via le pilote) pour garder grosso modo constant l'angle du vent apparent.

Nom	16h06 20	16h12 52	16h17 05	16h21 08	16h26 33	16h30 45
amure	Tribord	Tribord	Tribord	Tribord	Tribord	Tribord
vitesse	5,4-4	5,2		6,2	6,5	7,05
α	43,7	42,6	44,26	42,95	41,7	40,86
V	5,36	5,27	6,04	7,32	7,37	7,6
gîte	9,71	11,3	13,4	19,5	20,1	22,2
gîte/	5,52	6,66	6,02	5,96	6,06	6,28
cp1	1,21	0,97	1,91	2,36	2,11	1,30
cp2	1,63	1,77	1,88	1,61	1,63	1,56
cp3	2,65	3,60	3,29	2,51	2,60	3,31
cp4	2,02	1,79	0,64	1,45	1,36	1,45
cp5	3,23	3,91	1,06	2,36	2,33	3,09
cp6	1,87	2,02	2,02	2,05	1,98	1,96
p6	3,28	3,41	4,52	6,72	6,57	6,92

TAB. 2: Moyennes sur 4 minutes

Moyennes Le tableau 2 contient la suite des valeurs moyennes (moyenne sur la durée d'enregistrement d'un fichier : c'est à dire sur 4 minutes) des grandeurs enregistrées sur ce bord.

Cette série correspond à un vent apparent croissant entre 5,27 et 7,6 mètres par seconde et à une vitesse du bateau croissant entre 5 et 7 noeuds. La gîte augmente de 10 à 22 degrés et la pression au point 6 (au milieu de la grand-voile) de 3,3 à 6,9 mm d'eau.

Si le bateau était conforme au modèle numérique, le réglage n'ayant pas varié, les coefficients de pression ne devraient dépendre que de α , et correspondre aux valeurs calculées pour une certaine valeur, à déterminer, du couple (ω_1, ω_2) .

Constats agréables : la gîte réduite (en la divisant par le carré de la vitesse) est presque constante et cp_6 est effectivement pratiquement constant. cp_2 ne varie pas trop.

Les résultats s'accordent aussi avec des résultats qualitatifs attendus prédits par le modèle numérique : $cp_2 < cp_3$ (si α n'est pas trop grand) et $cp_3 > cp_4$.

Constats désagréables : en examinant la série des valeurs moyennes de cp_1 on constate qu'elles fluctuent beaucoup. Tout comme pour cp_3 et cp_5 .

La valeur la plus faible de cp_1 est obtenue pour le fichier 16h12 52. Pour ce même fichier on observe que cp_3 et cp_5 prennent leurs plus grandes valeurs. La plus grande valeur de cp_1 correspond à la colonne 16h21 08, et dans cette colonne on lit la plus faible valeur de cp_3 .

On n'a jamais le résultat qualitatif, surprenant mais prévu par le calcul, $cp_1 > cp_3$.

L'évolution temporelle La figure "Petite rafale" montre les signaux du fichier 16h21 08. Première ligne de graphes : la coupe verticale (capteurs 1,3,5). Deuxième ligne : coupe dans la direction du vent (2,3,4,6). Troisième ligne : module du vent (m/s), α , gîte. On peut y voir un "échange" spectaculaire de valeur des niveaux de pression entre p_1 et p_3 par exemple. De telles

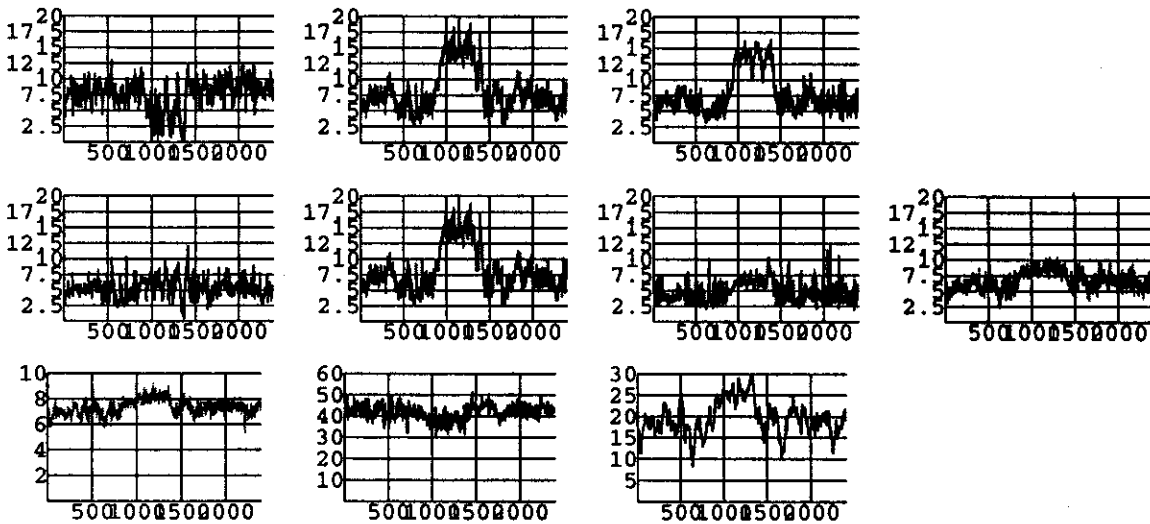


FIG. 7: Une petite rafale

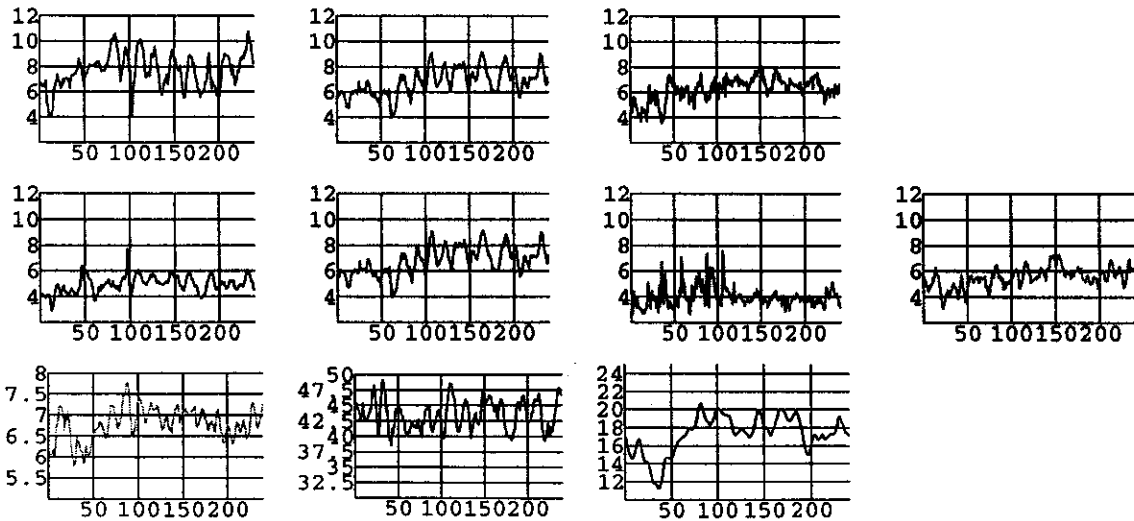


FIG. 8: Les 24 premières secondes

variations temporelles de pression nous semblent devoir être associées à des déformations des voiles. La forme du génois (au moins) ne conserve pas. Dans ces conditions sa forme "moyenne" diffère de sa forme de conception. Le haut semble s'effacer par instants. Le champ de pression n'est pas stable.

La figure "Les 24 premières secondes" montre le début des signaux de la figure précédente. La disposition est la même. En abscisse on trouve le temps avec pour unité de mesure la période d'échantillonnage (1/10 de seconde). La ligne verticale 50, par exemple, correspond donc à 5 secondes. Le temps caractéristique des oscillations rapides qu'on peut apercevoir sur cette figure est statistiquement très bien défini. La fonction d'autocorrélation de l'un quelconque des signaux présente un premier zéro vers 16 points (1,6 seconde). Ce "bruit" haute fréquence correspond au mouvement du bateau. Et plus précisément au tangage (on s'en est assuré directement en observant l'affichage en temps réel). Le bateau "encense". Le Nouveau Cours de Navigation des Glénans [2] associe ce terme à un "réglage de novices" (trop bordé, trop près du vent) et au clapot. En tout cas certains réglages favorisent et même déclenchent ce mouvement pratiquement en l'absence de houle.

3.2.2 Vendredi 7 août : deux types de réglages

C.E. Broc a bien voulu nous montrer à nouveau comment régler ses voiles. Les dernières figures montrent qu'avec un bon réglage le champ de pression est beaucoup plus stable. Les voiles bien réglées sont superbes. Pour notre part nous avons pu obtenir un réglage qui rétablisse des pressions plus fortes particulièrement en haut de génois mais la stabilité est perdue au profit d'un comportement bimodal (voir le graphe du physicien). Il n'est pas du tout évident qu'un réglage à plus grande pression donne un gain de vitesse. En particulier si l'instabilité accentue les mouvements de la coque elle en augmente aussi probablement la trainée.

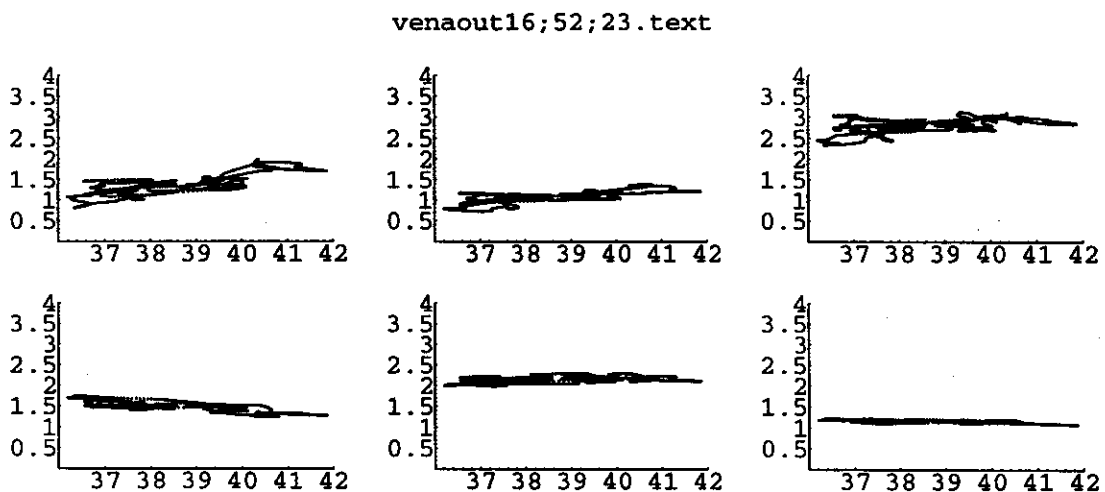


FIG. 9: Chacun des 6 graphes correspond aux pressions mesurées en un point des voiles. Chaque graphe contient 4 minutes (2400 points) d'enregistrement. Coefficient de pression en ordonnée, angle du vent apparent au même instant en abscisse. Cet enregistrement correspond à un réglage de professionnel ; assurant la stabilité du champ de pression. Dans ces conditions il est possible de comparer quantitativement les prédictions numériques et les résultats expérimentaux si l'on connaît la forme réelle de la voile.

3.3 Discussion

C'est la règle de simplification maximum qui conduit au choix de ne mesurer que deux composantes du vent apparent. Ce parti pris permet en apparence au moins de caractériser expérimentalement le vent par les mêmes paramètres que ceux qui sont employés actuellement

vendredi16;21;08.text

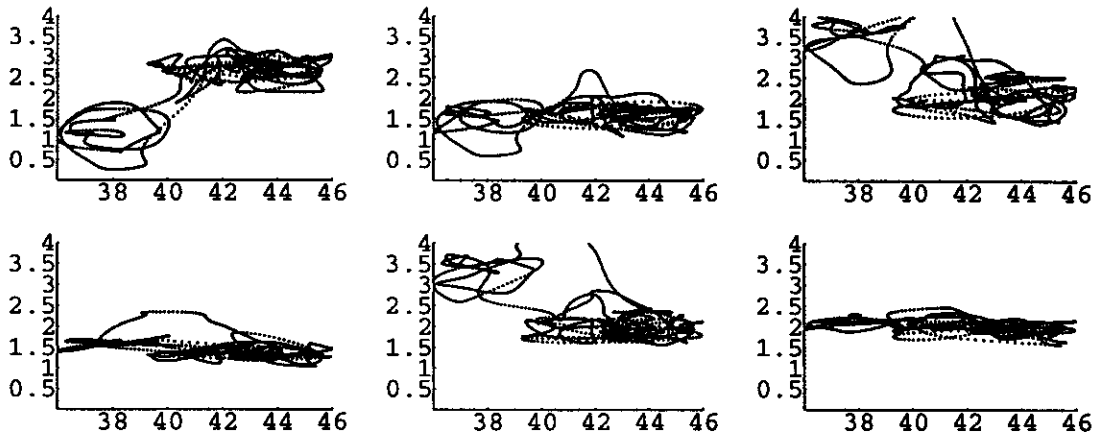


FIG. 10: A contrario voici un réglage de physicien. Le génois se déforme "spontanément". Il peut prendre deux formes qui correspondent à deux répartitions de pressions différentes.

pour la modélisation : le module et un angle. Il ne paraît pas essentiel de compliquer ce point. Par contre il faudrait accorder une plus grande attention au problème de l'alignement des anémomètres et au fait qu'ils sont placés dans une région influencée par les voiles.

Dans le cas simplifié qui correspond au modèle numérique, les δp_1 sont calculables avec la seule connaissance de $\omega_1, \omega_2, \alpha, V_\infty$. On écrit :

$$\delta p_1 = 0.5 \rho V_\infty^2 cp_1(\omega_1, \omega_2, \alpha).$$

D'un point de vue expérimental on estime plus réaliste d'écrire :

$$\delta p_1 = 0.5 \rho V_{\text{ref}}^2 cp_1(\alpha_{\text{ref}}, \text{réglages d'écoutes}).$$

Par convention, V_{ref} est exactement la vitesse mesurée par le fil "vertical" et α_{ref} se déduit comme indiqué plus haut des signaux des deux fils.

Un problème plus sérieux est celui de "réglages d'écoutes" : Ce paramètre, représente un ensemble de moyens de réglages très efficaces (en modifiant très peu la direction de l'écoute de génois on modifie beaucoup le champ de pression). Ce pseudo paramètre n'est pas contrôlable actuellement. Pour notre calcul la voile est considérée comme géométriquement rigide. Les résultats expérimentaux semblent inconciliables avec cette hypothèse. Cela impose d'employer un procédé d'enregistrement de la forme : la photogrammétrie paraît incontournable.

4 Conclusion

Bien que nous nous soyons imposé un champ d'investigation limité au cas du près sur mer calme nous pouvons déjà observer l'importance de la liberté que se donne une voile. Et les effets de cette liberté sur la répartition des pressions. Deux comportements de voile (et du navire) sont apparus au près. Dans le cas où les réglages conduisent à une répartition stable des pressions il est possible d'obtenir par des traitements simples des résultats quantitatifs précis. La comparaison calcul simple- expérience au réel sera éventuellement possible si une analyse photogrammétrique permet de définir la forme et la position des voiles. C'est avec cette nouvelle "complication" que nous pensons compléter notre instrumentation.

Références

- [1] P BRADSHAW. *An Introduction to Turbulence and Its Measurement*. Pergamon Press, 1971.

- [2] Collectif. *Nouveau Cours de Navigation des Glénans*. Seuil, 1972.
- [3] Bernard DULIEU. Capteur de pression différentiel et voile équipée d'un tel capteur. Brevet 88 08875, 1988.
- [4] Richard G.J. FLAY editor. Special issue on sail aerodynamics, 1996.
- [5] Ross GARRETT. *The symmetry of sailing*. Sheridan House, 1996.
- [6] Lars LARSSON. Scientific methods in yacht design. *Annu.Rev.Fluid Mech.*, 1990.
- [7] O. LE MAITRE, F. HAUVILLE, S. HUBERSON, and J.E. SOUZA de CURSI. Aéroélasticité non linéaire : Problèmes plan pour des obstacles flexibles. 6 ièmes Journées de l'hydrodynamique, Nantes, 1997.
- [8] Charles G. LOMAS. *Fundamentals of hot wire anemometry*. Cambridge University Press, 1986.
- [9] A. LUU, T.S.et DULIEU. Calcul de l'hélice fonctionnant en arrière d'un corps à symétrie axiale. Association Technique Maritime et Aéronautique, 1977.
- [10] Ion PARASCHIVOIU. *Aérodynamique subsonique*. Éditions de l'école polytechnique de Montréal, 1998.
- [11] G.I. TAYLOR. The interaction between experiment and theory in fluid mechanics. *Annu.Rev.Fluid Mech.*, 1974.
- [12] Edward P. WARNER and Shatswell OBER. The aerodynamics of yacht sails. *Transactions S.N.A.M.E.*, 33 : 207-232 and Plates 133-146, 1925.

