

Zeitschrift:	Ingénieurs et architectes suisses
Band:	126 (2000)
Heft:	08
Artikel:	Simulation des écoulements aéro- et hydrodynamiques autour d'un voilier de type "Class America"
Autor:	Sanchi, Stéphane / Caponnetto, Mario
DOI:	https://doi.org/10.5169/seals-81496

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

Download PDF: 10.02.2026

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

Simulation des écoulements aéro- et hydrodynamiques autour d'un voilier de type «Class America»

(NOUVELLES TECHNOLOGIES)

La conception d'un voilier moderne de type «Class America» s'appuie sur l'utilisation de simulations numériques des écoulements afin d'obtenir des prestations compétitives. Le calcul des écoulements aérodynamique et hydrodynamique autour de voiliers est, de toute manière, extrêmement exigeant. Il requiert les technologies informatiques et numériques les plus avant-gardistes. Un certain nombre de problèmes propres à la conception de voiliers pour la Coupe de l'America sont discutés ci-après et diverses approches liées à la simulation numérique avancée d'écoulements sont décrites. Ce travail s'est déroulé dans le cadre d'un projet de la Commission pour la technologie et l'innovation, du mois d'octobre 1997 au mois d'août 1999; les partenaires principaux en étaient l'EPFL et Fast 2000.

Dynamique d'un voilier et prédition de vitesse

Un voilier est soumis à plusieurs forces: la force aérodynamique s'exerçant sur les voiles, la force hydrodynamique appliquée sur la coque et les appendices, ainsi que la force de gravité. Pour un mouvement stationnaire idéal, la somme de ces forces et la somme de leurs moments associés sont égales à zéro. Les voiles développent une poussée et une force latérale qui sont respectivement égales à la résistance hydrodynamique et la portance générée par la coque, la quille et le safran. En outre, la force aérodynamique latérale et la portance hydrodynamique produisent un moment de gîte qui doit être compensé par le moment redressant de la coque.

Il est reconnu qu'un voilier navigue rapidement au près¹ lorsqu'il est stable (large, lourd et emmenant de grandes voiles, même dans des conditions de vents forts) et lorsque les voiles et la coque développent une efficacité élevée (rapport portance sur traînée). A l'inverse, lorsque le voilier navigue au portant², le bateau devrait être léger et étroit avec des voiles agissant comme des parachutes pour développer une poussée maximale. Comme toutes les compétitions de ce type, les régates de la Coupe de l'America comprennent des bords (trajectoires) au près et au portant. Le voilier le plus rapide est donc celui qui présente le meilleur compromis entre performances au près et au portant. De plus, chaque

concurrent doit se conformer aux règles établies pour cette classe de bateaux, qui imposent une relation constante entre longueur, poids et surface vénique, l'objectif étant d'uniformiser la vitesse moyenne des différents voiliers. L'approche couramment utilisée pour prédire la performance d'un bateau est de calculer séparément toutes les forces exercées sur la coque et les voiles comme une fonction de la vitesse du voilier et du vent, des angles d'attaque et de gîte et une combinaison de ces variables. Toutes ces données sont insérées dans un code, appelé programme de prédition de vitesse (*Velocity Prediction Program*), pour obtenir la vitesse finale du voilier et les angles d'attaque et de gîte qui satisfont l'équilibre des forces et moments pour une condition de vent donnée.

Forces hydrodynamiques

Il est convenu de considérer la traînée (résistance) totale d'un voilier navigant en régime de mer calme comme la somme des résistances d'onde, visqueuse et induite. Cette convention a été adoptée par les architectes navals dans le but d'unifier les essais en bassins de carène, bien qu'il ne soit pas toujours simple de séparer chaque composante et de tenir compte des interactions mutuelles. Au près, sous des conditions de vent normales et stables, chacune des trois composantes représente un tiers de la résistance totale. Au portant, la résistance induite est négligeable, tandis que la résistance visqueuse augmente selon le carré de la vitesse du bateau et que la résistance due à la génération de vagues (résistance d'onde) dépend encore plus fortement de la vitesse du voilier (exposant variant de 6 à 9). Pour une vitesse de navigation élevée (forts vents), la résistance d'onde est prépondérante, alors que la résistance visqueuse domine à faible vitesse (vents légers).

Résistance d'onde

La résistance d'onde est générée par le volume du voilier se déplaçant à l'interface de l'eau et de l'air. Ce paramètre

¹ Allures du près: les divers caps suivis par un voilier qui progresse contre le vent.

² Allures portantes: les divers caps suivis par un voilier qui reçoit le vent par l'arrière (la position «vent de travers» marque la transition entre les allures du près et du portant).

Fig. 1 - Profil d'onde autour d'une carène calculée par SHIPFLOW

Fig. 2 - Distribution de pression autour d'une coque et des appendices (quille, bulbe, ailettes et safran) obtenue par FLUENT/UNS

dépend de la longueur du bateau, de son poids, de la forme de la coque et du nombre de Froude (rapport entre les forces inertielles et gravitationnelles). Bien que constituant un phénomène essentiellement potentiel, des effets visqueux à l'intérieur de la couche limite sont présents, notamment au voisinage de la poupe, et une détermination sûre de la résistance d'onde s'est de tout temps avérée extrêmement difficile pour les architectes navals; pour cette raison, les essais en bassins de carènes demeurent un instrument incontournable.

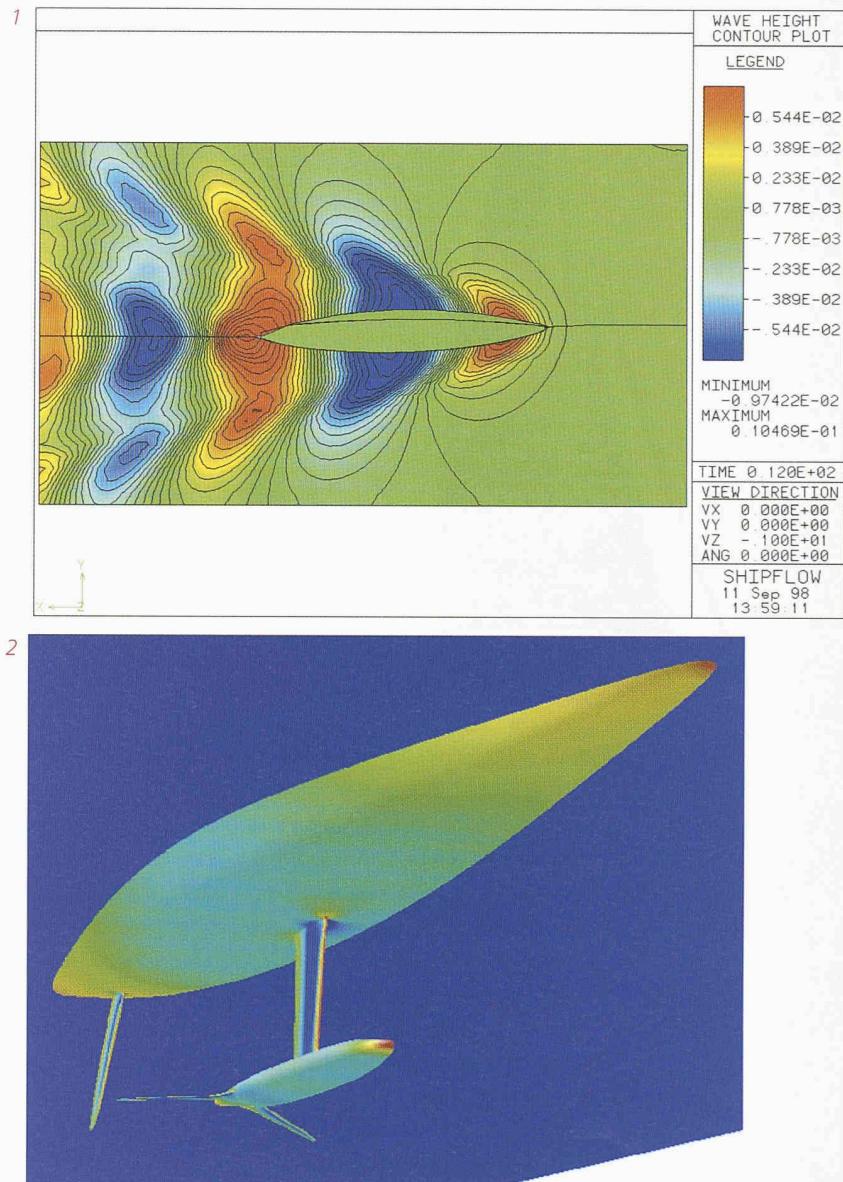
Le code à panneaux *SHIPFLOW*, développé par *FLOWTECH International AB*, a été utilisé pour calculer la déformation de la surface libre autour des coques de voiliers pour différents angles de gîte, d'attaque et vitesses amont. L'un des principaux problèmes est de prédire comment la surface mouillée de la coque varie, lorsque le profil des ondes et la position exacte du bateau sur les vagues sont pris en considération.

Outre la détermination quantitative de la résistance d'onde, la visualisation des champs d'écoulement permet une comparaison plus aisée des distributions de pression et profils d'onde (fig. 1). De telles informations aident aussi à comprendre le comportement de différentes formes de carène d'un point de vue qualitatif.

Résistance visqueuse et induite

Malgré son importance, peu d'attention a jusqu'ici été accordée par l'architecte naval à la prédition correcte de la résistance visqueuse. Selon la méthodologie classique des essais en bassins de carène, la traînée due au frottement est supposée être égale à celle d'une plaque plane dont la surface mouillée est identique à celle de la coque. Or la distribution de pression agissant sur la coque résulte du comportement de la couche limite, qui est différent de celui s'exerçant sur une plaque plane. Le rapport entre la résistance visqueuse de la coque et celle de la plaque plane équivalente est appelé le facteur de forme, une quantité difficile à mesurer en bassins de carène. Il est à noter qu'un facteur de forme mal déterminé peut mener à une conception non souhaitée de la poupe, laquelle peut induire un phénomène amplifié de séparation de l'écoulement.

Pour établir la résistance visqueuse d'un yacht, des simulations numériques 3D pour différentes formes de coques ont été effectuées avec le code numérique *Navier-Stokes FLUENT/UNS*. Chaque carène est testée selon différentes orientations et vitesses (fig. 2). La surface libre considérée fut soit une surface plane soit la surface déformée obtenue par *SHIPFLOW*. Une modélisation correcte de la couche limite est requise pour calculer le frottement surfacique et le point de détachement de l'écoulement dans la région de la poupe. Un



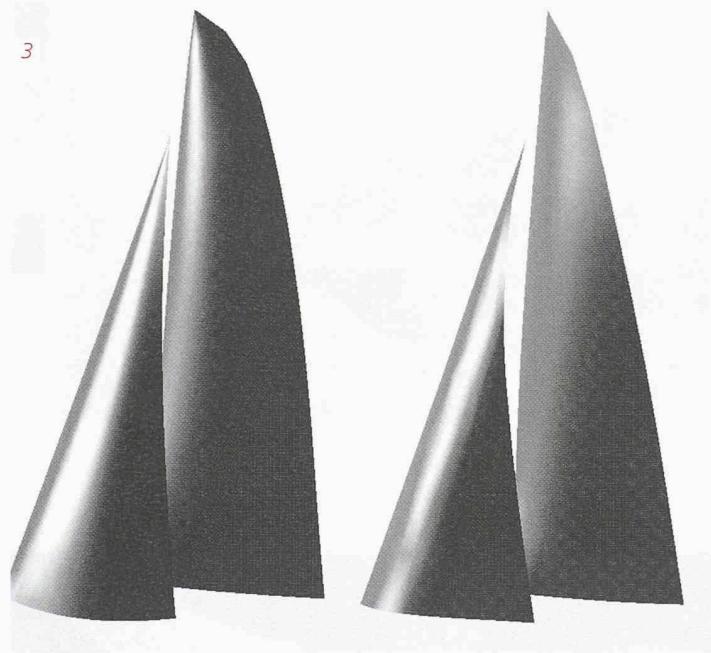
maillage hybride a ainsi été conçu, avec des cellules tétraédriques (maillage non-structuré) dans la majeure partie du domaine de calcul et des cellules prismatiques (maillage structuré) englobant la couche limite. Un temps de calcul d'environ dix heures sur douze processeurs d'une station *Silicon Graphics Origin2000* est requis pour atteindre la convergence souhaitée après cinq cents itérations d'un maillage de plus de deux millions de cellules.

Lorsque le voilier navigue sous un certain angle d'attaque, la coque et les appendices développent une portance et une résistance induite, déterminée par la structure tourbillonnaire produite. Pour des profils de type aile, comme la quille et le safran, la localisation de la séparation de l'écoulement peut être aisément déterminée à leur bord de fuite respectif. Quant au tourbillon qui se détache également de la partie sous le

Fig. 3 - Forme initiale (gauche) et forme pleine, droite, («flying shape») des voiles au près selon un calcul aéroélastique de FLOW-MEMBRAIN

Fig. 4 - Ecoulement autour du mât et d'une grand-voile calculé par FLUENT/UNS

Fig. 5 - Contours de pression surfaciques et lignes de courant calculés par FLUENT/UNS pour l'écoulement autour d'un voilier naviguant au portant



vent de la coque, sa localisation et son intensité dépendent fortement de la répartition de pression et du comportement de la couche limite le long de la coque. Enfin, d'autres tourbillons indésirables apparaissent encore à l'intersection entre les appendices et la coque (tourbillons en fer à cheval), dont la force et la trajectoire doivent être estimées judicieusement pour prédire la portance totale et la résistance induite du voilier, de même que la distribution optimale de portance entre la quille et le safran.

Ecoulement aérodynamique

Les voiles sont des profils fins devant développer une portance maximale et une traînée minimale en configuration au près et une traînée (poussée) maximale au portant. Au près, les voiles doivent travailler comme des profils d'ailes avec une distribution de charge optimale et un phénomène de séparation faible. Or les voiles ne sont pas des ailes rigides, mais de fines surfaces flexibles, ce qui induit certains avantages et inconvénients. Un avantage majeur est l'ajustement de la forme de la voile, par modification de la tension des câbles (étais et itagues) et variation de la flexion du mât. La forme finale des voiles est obtenue lorsqu'on atteint l'équilibre entre la force aérodynamique s'exerçant sur les surfaces véliques et les tensions internes propres aux matériaux des voiles et du gréement. Le principal point faible des profils fins est l'éventuel décollement de l'écoulement, ce qui conduit la voile à ne plus travailler avec un angle d'attaque idéal.

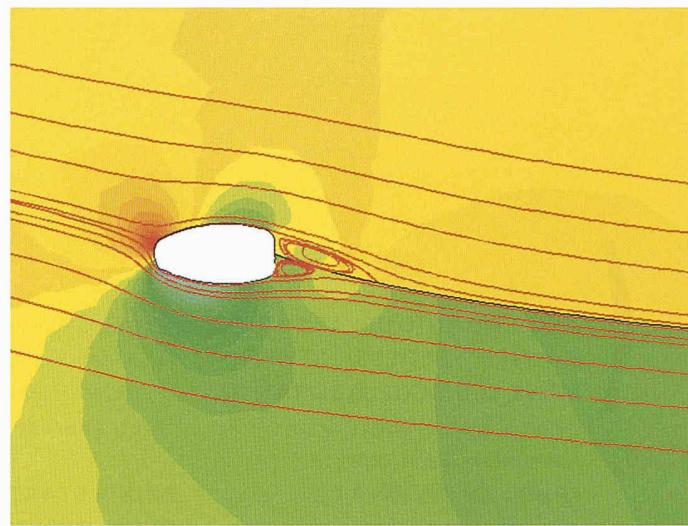
Détermination de la forme des voiles pleines («flying shape»)

Pour la conception des voiles de près (grand-voile et génois), il est préférable de pouvoir prédire leur forme définitive, après l'application de la force aérodynamique (voiles pleines ou «flying shape», en anglais). Le calcul de ces phénomènes aéroélastiques requiert un couplage fluide-structure, pour lequel on a fait appel aux codes *FLOW* et *MEMBRAIN*, développés par *North Sails Inc.* Utilisant une méthode à panneaux pour les fines surfaces portantes, *FLOW* est un logiciel qui offre une relaxation convenable du sillage aux bords de fuite des profils. A partir des données relatives aux formes initiales des voiles (sans les forces externes), il détermine la distribution de pression aérodynamique correspondant à une vitesse et une direction de vent particulières. *MEMBRAIN* est un code de calcul structurel, basé sur la méthode des éléments finis, qui permet d'obtenir les tensions et déformations des voiles et du gréement sous l'action de la distribution de charge aérodynamique précédemment calculée. *FLOW* et *MEMBRAIN* sont utilisés itérativement jusqu'à l'équilibre aérodynamique et structurel, afin de calculer la forme ultime des voiles et la déformation définitive du gréement. La figure 3 présente une comparaison de la forme initiale des voiles et de leur forme pleine («flying shape»), une fois le calcul aéroélastique effectué avec *FLOW-MEMBRAIN*.

Même à l'aide d'un PC conventionnel (300 MHz et 128 Mb), la résolution de tels problèmes aéroélastiques est peu coûteuse en temps (15-20 minutes), si bien qu'il est aisément de couvrir une vaste gamme de réglages des voiles.

Calcul de voiles en configuration au près

Un calcul d'écoulement potentiel au moyen d'un code de calcul à panneaux fournit une distribution précise de la charge aérodynamique uniquement si l'écoulement reste attaché (aucun décollement) aux profils des voiles. Dans cette hypothèse, la forme de la voile pleine («flying shape»), la portance et la traînée induite sont prédictives avec satisfaction. Cela étant, un faible phénomène de décollement est inévitable même avec des voiles parfaitement réglées, ce qui affecte leur efficacité finale. En pratique, il est donc important de savoir comment la courbure des voiles varie en fonction de la vitesse du vent et où se situe le compromis optimal entre la portance maximale que l'on peut obtenir et la résistance visqueuse minimale. De tels effets ne peuvent être déterminés qu'en tenant compte de la composante visqueuse des écoulements, ce qui a été effectué avec le logiciel *FLUENT/UNS* en utilisant la forme de voile pleine («flying shape») obtenue par *FLOW-MEMBRAIN*. Ces simulations numériques ont été



conduites sur un domaine de calcul comprenant plus d'un million de cellules et pendant cinq cents itérations. Un temps de calcul de huit heures sur douze processeurs d'une station *Silicon Graphics Origin2000* est requis pour que les variables de chaque simulation numérique atteignent la convergence souhaitée.

Une des principales sources de traînée aérodynamique est le mât, lequel peut considérablement augmenter la résistance aérodynamique totale des voiles. Usuellement, l'écoulement se détache sur les deux côtés du mât et se rattaché sur la grand-voile (fig. 4). Si la portance n'est en général pas affectée, l'efficacité des voiles s'en trouve en revanche diminuée. Du point de vue de la conception pure, il est donc important d'analyser ce phénomène afin d'élaborer un profil de mât qui minimise la séparation de l'écoulement sur ses flancs. Un certain nombre de profils de mât ont été étudiés à l'aide du logiciel *FLUENT/UNS*.

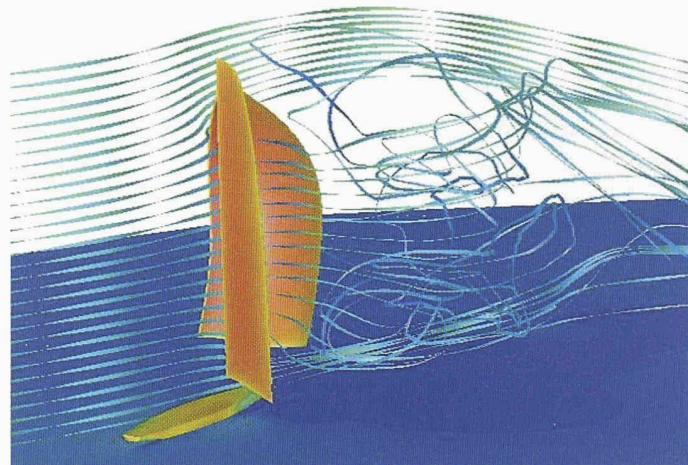
Calcul de voiles en configuration au portant

Bien que les codes de calcul à panneaux aient été utilisés avec succès pour déterminer les forces agissant sur les voiles réglées au près, cette méthode ne se prête pas à la modélisation de configurations au portant en raison des larges zones de séparation. Un potentiel certain réside toutefois dans le recours à des codes de calcul visqueux pour la résolution des écoulements en configuration au portant. Les simulations des écoulements autour de telles configurations - qui intègrent un spinnaker (ou gennaker), une grand-voile et la partie exposée à l'air de la coque -, ont été effectuées avec le logiciel *FLUENT/UNS*. Comme le montre la figure 5, un large sillage composé de tourbillons est présent en amont du spinnaker. Bien qu'il ne soit à l'heure actuelle pas encore possible de calculer avec sûreté toutes les caractéristiques comportementales de ces écoulements complexes, de telles simulations peuvent fournir des connaissances détaillées sur les interactions entre le spinnaker, la grand-voile et la coque.

Conclusions

Le présent travail a mis en évidence un certain nombre d'approches utilisées pour la simulation numérique d'écoulements autour de voiliers. Il a été montré que, malgré l'extrême complexité du comportement des écoulements, un tel travail apporte des indications supplémentaires. Cette information est soit une évaluation quantitative des forces aéro- et hydro-dynamiques exercées sur les composants d'un voilier, soit un aperçu qualitatif du comportement local des écoulements.

La conception de yachts de régate est désormais entrée dans une nouvelle ère avec l'utilisation de logiciels détermi-



nant le comportement des écoulements fluidiques autour de profils et l'installation de tels outils sur des systèmes informatiques hautement performants. Associés à des méthodes intuitives et des données empiriques, ces outils avant-gardistes sont un moyen supplémentaire à disposition de l'architecte naval pour la recherche d'un design performant et novateur.

Participants au projet

Mario Caponetto, Alessandro Castelli, collaborateurs du Laboratoire de machines hydrauliques de l'EPFL
Bernard Bonjour, Pierre-Louis Mathey, Stéphane Sanchi, Mark L. Sawley, collaborateurs du Laboratoire de mécanique des fluides de l'EPFL.

Remerciements

Les études résumées ci-dessus ont été entreprises en étroite collaboration avec les membres du *Fast 2000 Design Team*. Les discussions entre ces derniers et les ingénieurs de l'EPFL ont abouti à une compréhension approfondie des principes gouvernant la conception et l'optimisation d'un voilier de type «Class America». Ce travail a par ailleurs reçu une assistance continue de la voilerie *North Sails Inc.* et de *Silicon Graphics Inc.*, ainsi qu'un apport financier provenant de la Commission pour la Technologie et l'Innovation (CTI).