

9^{èmes} JOURNÉES DE L'HYDRODYNAMIQUE

10 - 11 - 12 MARS 2003

POITIERS - FUTUROSCOPE

NOUVELLE METHODE DE DESIGN DES CARENES DE VOILIERS DE COMPETITION

NEW HULL DESIGN METHOD FOR COMPETITIVE SAILING YACHT

E. JACQUIN¹, B. ALESSANDRINI², D. BELLEVRE¹, S. CORDIER¹

¹ Bassin d'essais des Carenes, DGA, Val de Reuil

² Ecole Centrale de Nantes

Résumé

Le processus de design des voiliers de compétition est une boucle qui comprend trois étapes : dessin de la carène, évaluation de la carène et analyse de ses performances. Généralement, ce processus est répété de façon itérative tant que le projet dispose de suffisamment de temps ou d'argent : la carène est alors dite « optimisée ». Avec les progrès importants des outils numériques et des calculateurs, l'évaluation numérique de la carène ne prend maintenant que quelques heures, ce qui fait apparaître les deux autres étapes du processus de design comme les plus consommatrices de temps. De plus, un nombre important de paramètres sont nécessaires pour décrire convenablement une carène munie de ses appendices (une cinquantaine environ). Dès lors, il devient impossible de comprendre de façon intuitive l'influence des paramètres sur les performances du voilier dans diverses conditions de vent et de mer. Il est alors impossible d'optimiser réellement une carène sans l'apport de nouveaux outils et d'une nouvelle méthode. Cet article présente les outils développés ou simplement intégrés dans la chaîne d'optimisation du Bassin d'essais des carènes : le modèleur de carène, le logiciel de maillage, le solveur Navier-Stokes avec surface libre et le Velocity Prediction Program. Ces outils remplacent avantageusement l'ensemble des étapes du processus classique de design et avec l'aide d'algorithmes d'optimisation appropriés permettent d'obtenir beaucoup plus rapidement et efficacement des carènes plus performantes.

Abstract

The design process of a sailing yacht comprises three steps which are performed sequentially: hull design, hull evaluation, and performance analysis. Generally, this process is repeated iteratively while modifying the design until the designer either runs out of time or money: the design is then "optimized". As numerical tools and computers progress, the numerical approach has accelerated to about less than a day per form and hence outpaced considerably the classical experimental approach. Further more, a large number of parameters are necessary to describe a hull and its appendages in sufficient details (at least fifty). Hence, it is humanly impossible to understand intuitively how the design variables influence the performances of the yacht in various wind and sea condition. It is therefore impossible to efficiently optimize a hull without a methodology. This paper presents a numerical performance evaluation tool which integrates four essential elements: a hull modelling software, a mesh generator, a free-surface RANSE solver and a Velocity Prediction Program. This tool automatically performs faster and more efficiently the same steps as in the classical open loop design process.

1. INTRODUCTION

Le processus de design d'un navire est immuable et est composé des trois étapes suivantes : dessin de la carène, évaluation, puis analyse de ses performances, qui s'enchaînent tant que le projet dispose de temps et d'argent.



L'optimisation des formes de carène est quand à elle est aussi ancienne que la construction des navires. Même sans outils d'évaluation hydrodynamique, les premiers architectes essayaient de comprendre les phénomènes et de dessiner des formes de carènes performantes. Leur retour d'expérience basé sur le réel leur permettait alors de dessiner de nouvelles formes, et ainsi de suite, mais avec un temps de réponse très long. L'arrivée des essais en bassin de traction a été une révolution : il était enfin possible de tester plusieurs concepts de formes de carènes et de retenir le plus performant avant la construction. Dans le domaine de la voile de compétition, ce sont tout d'abord des projets comme la Coupe America qui montrèrent l'intérêt de l'optimisation des formes de carènes en bassin de traction. Leur recherche hydrodynamique était alors uniquement basée sur des dizaines de campagnes d'essais en bassin de traction.

Depuis le début des années 80, des méthodes numériques permettant de calculer la résistance à l'avancement des navires sont apparues. Ces méthodes ont constamment évoluées pour atteindre actuellement une certaine maturité. Ces calculs sont maintenant intensivement utilisés dans les phases de design de la plupart des projets de voiliers de compétition, même si les projets les plus consommateurs restent ceux de la Coupe America. Cependant, la manière d'utiliser les calculs a été calquée sur la façon de réaliser des essais en bassin, et les méthodes de design n'ont que très peu évoluées, ne tirant pas parti du principal atout du calcul sur les essais : la capacité d'automatisation complète de toute la chaîne de calcul.

Si l'étape d'évaluation décrite précédemment a énormément progressée, les deux autres étapes que sont le dessin de la carène et l'analyse des performances sont restées quant à elles entièrement manuelles, et n'ont que très peu évoluées. Ces deux étapes sont dès lors devenues les points faibles de la méthode de design traditionnelle.

Le premier point faible de ce processus est le temps passé à dessiner les nombreuses carènes ainsi que les pertes de temps liées aux échanges de fichiers et de résultats entre architectes et hydrodynamiciens. Il est en effet préjudiciable de passer plusieurs jours à dessiner une carène, et à transmettre le fichier, alors que seulement quelques heures suffisent à l'évaluer dans un processus automatique.

Le deuxième point faible est l'analyse des performances. En effet, les points de fonctionnement sont de plus en plus nombreux, et les carènes évaluées se sont multipliées, rendant la quantité d'information à traiter beaucoup trop volumineuse sans outils performants d'analyse. Il faut rappeler que cette étape de la boucle de design n'a que pour but la génération d'une nouvelle forme issue de l'analyse des résultats précédents. Cette carène devant être globalement plus performante compte tenu des objectifs et des contraintes du projet. Les algorithmes d'optimisation permettent de remplacer avantageusement l'analyse perfectible du cerveau humain lorsque les paramètres et les résultats deviennent trop nombreux.

2. DESCRIPTION DE LA CHAÎNE D'OPTIMISATION

Afin de lever ces deux points faibles, et ainsi réduire le temps de conception et rendre le processus le plus efficace dans le temps de design imparti, une chaîne de design et d'optimisation complète a été mise en place avec les outils suivants :

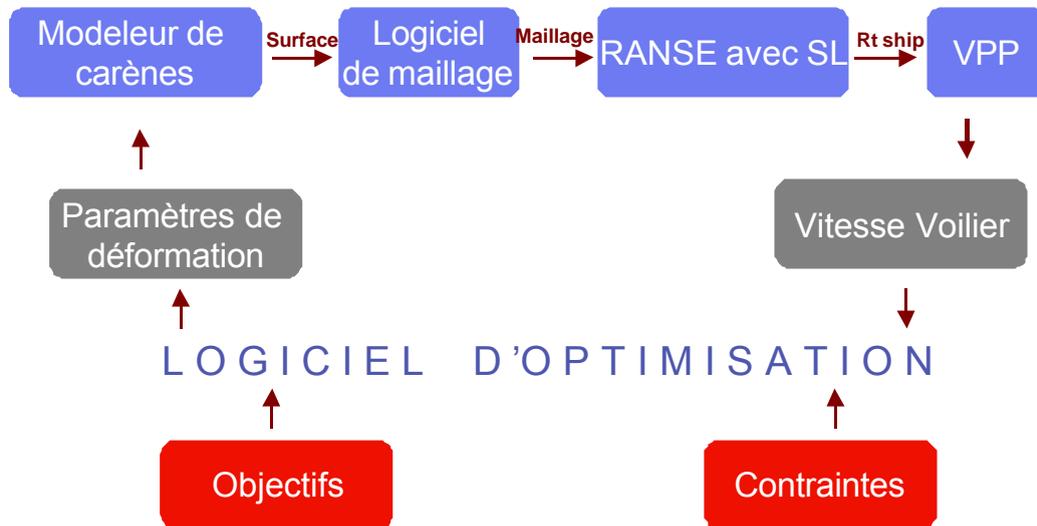


Figure 1 : Processus d'optimisation

Les paragraphes suivants présentent l'ensemble des outils spécifiquement développés ou simplement intégrés dans la chaîne d'optimisation.

2.1 Modeleur de carène

Le but du modeleur de carène est de générer des carènes issues d'une forme mère à partir de multiples déformations. Le Bassin d'essais des Carènes a fait le choix de développer son propre logiciel, ne trouvant pas sur le marché des modeleurs commerciaux d'outils capables de répondre à l'ensemble des caractéristiques nécessaires : importation d'une forme au format iges, paramétrisation complexe et complète de la forme, génération d'une surface lisible par le mailleur, mode interactif pour visualiser les carènes générées et mode batch dans la phase de calcul ...

Le modeleur est avec le solveur le point le plus important permettant la réalisation d'une optimisation réussie. C'est aussi un point particulièrement critique vis à vis des architectes, car le dessin de l'ensemble des formes leur incombait auparavant dans le processus classique de design. Lors d'une optimisation, c'est toujours l'architecte qui décide des formes qui seront générées, mais en dessinant la forme initiale et en définissant les paramètres de déformation sur lesquels il souhaite agir, ainsi que leurs bornes de variations. Plutôt que de dessiner un nombre incalculable de formes, l'architecte peut alors se concentrer sur l'analyse des résultats de l'optimisation ...

La première étape est donc l'importation de la carène initiale dessinée par l'architecte au format iges. BATAOS génère alors des lignes de Bezier extraites de cette surface qui lui serviront à réaliser les déformations. Ces lignes sont : les couples, la ligne de flottaison, une ligne de pont, la ligne de quille, la ligne d'étrave. La courbe des aires de la forme initiale est aussi calculée et peut être paramétrée.

Toutes ces lignes sont paramétrables et sont modifiées à l'aide de lois mathématiques issues d'une bibliothèque ou définies spécifiquement par l'utilisateur.

Les figures ci-dessous montrent deux exemples de déformations. A gauche, la déformation de la ligne de flottaison, et à droite la déformation de la ligne de quille (vue non orthonormée) d'un Class America.

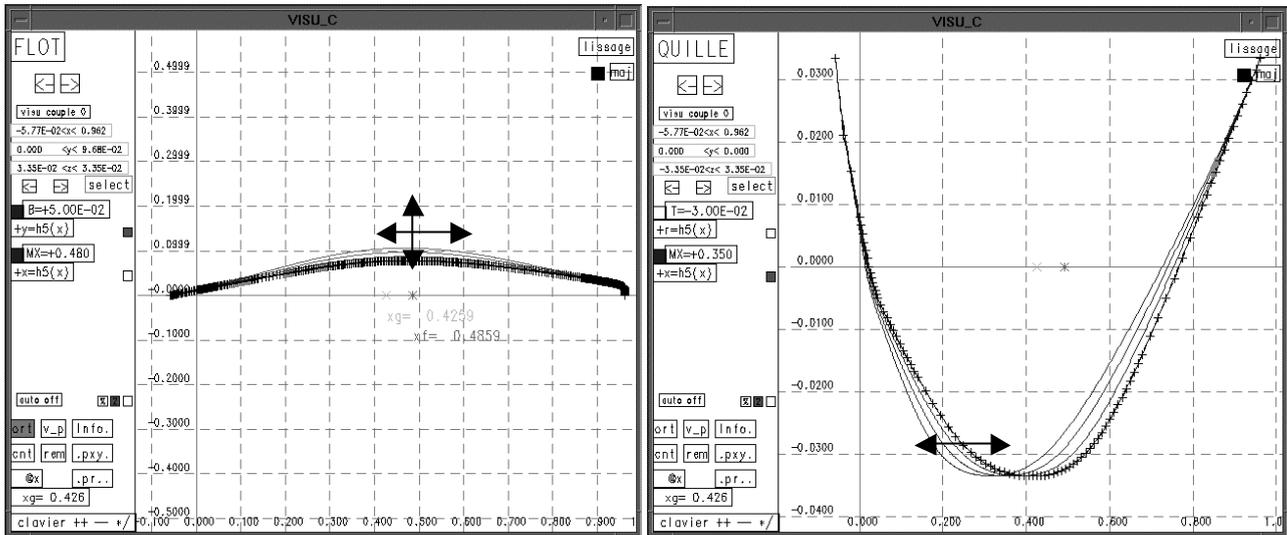


Figure 2 : Lignes de flottaison et de quille initiales et déformées d'un Class America

Une surface est alors générée en s'appuyant sur les courbes déformées pour créer ainsi une nouvelle forme de carène à partir de quelques paramètres de déformation.

2.2 ICEM Cfd

Cette surface est ensuite transmise au logiciel de maillage commercial ICEM Cfd. Un premier maillage est réalisé sur la surface initiale, et est ensuite projeté sur chaque nouvelle surface issue de BATAOS pour générer le maillage de la nouvelle carène. Ce processus est entièrement automatique, et la qualité du maillage est vérifiée avant la réalisation des calculs.

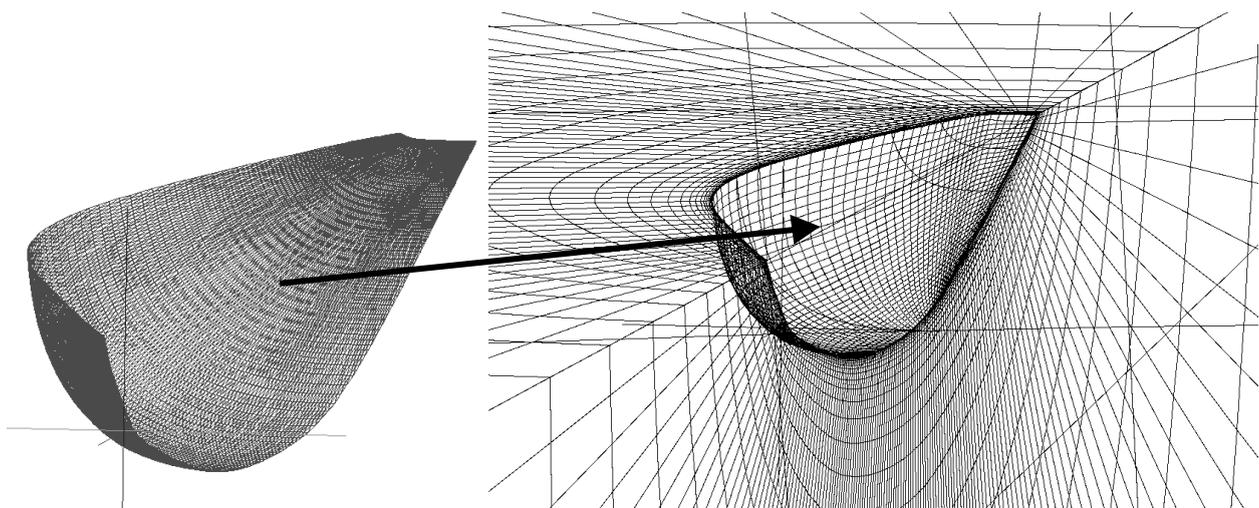


Figure 3 : Surface générée par BATAOS (à gauche) et maillage tridimensionnel crée par ICEM Cfd (à droite)

2.3 ICARE

Le logiciel de simulation hydrodynamique utilisé ici est le logiciel ICARE développé au Laboratoire de Mécanique des Fluides de l'Ecole Centrale de Nantes [1], [2], [3], [4], [5] et [6]. Ce code est aujourd'hui suffisamment robuste et précis pour être intégré dans une boucle d'optimisation. Ce programme permet de reproduire exactement un essai de traction sur une maquette (nombre de Reynolds faible) ou au contraire de simuler l'écoulement réel autour de la carène réelle (nombre de Reynolds élevé). Des grandeurs purement locales (hauteur de vague, pression ou frottement local, champ de vitesses, lignes de courant) ainsi que des grandeurs globales (résistance à l'avancement) peuvent ainsi être analysées et corrélées.

L'ensemble des termes de la résistance totale est calculé avec une précision accrue par rapport aux outils fondés sur l'hypothèse du fluide parfait encore utilisés il y a peu.

2.3.1 Equations

La forme convective des équations de Navier-Stokes moyennées sont écrites à travers une transformation partielle permettant de passer des coordonnées cartésiennes (x_1, x_2, x_3) aux coordonnées curvilignes ($\mathbf{x}^1, \mathbf{x}^2, \mathbf{x}^3$) s'appuyant sur la carène et la surface libre à chaque pas de temps. Les inconnues du problème sont alors l'élévation de surface libre, les trois composantes de la vitesse (u_i), la pression (p) incluant les termes de gravité ($\mathbf{r}g\mathbf{x}^3$) et l'énergie cinétique turbulente ($\frac{2}{3} \mathbf{r}k$).

Les équations de conservation de la quantité de mouvement s'écrivent dans un référentiel non fixe :

$$u_{,j}^a + (a_i^j (u^i - u_g^i) - \mathbf{n}_{eff} f^i - a_k^i \mathbf{n}_{t,i} a_k^j) u_{,j}^a + \frac{1}{\mathbf{r}} a_a^k p_{,k} - \mathbf{n}_{eff} g^{ij} u_{,ij}^a - a_k^i \mathbf{n}_{t,i} a_j^a u_{,j}^k + q^a = 0$$

La conservation de la masse est exprimée par l'équation de continuité :

$$a_i^j u_{,j}^i = 0$$

Finalement, pour fermer les équations précédentes, le modèle de turbulence $k - \mathbf{w}$ proposé par Wilcox [6] est utilisé, introduisant un taux de dissipation spécifique \mathbf{v} sans nécessité d'utiliser de formulation bas Reynolds. Les équations de transport de l'énergie cinématique et du taux de dissipation sont écrites de la façon suivante :

$$\begin{cases} k_{,i} + (a_i^j (u^i - u_g^i) - (\mathbf{n} + \mathbf{s} * \mathbf{n}_t) f^j - a_k^i \mathbf{s} * \mathbf{n}_{t,i} a_k^j) k_{,j} - (\mathbf{n} + \mathbf{s} * \mathbf{n}_t) g^{ij} k_{,ij} - \text{Pr} + \mathbf{b} * \mathbf{v} k = 0 \\ \mathbf{v}_{,i} + (a_i^j (u^i - u_g^i) - (\mathbf{n} + \mathbf{s} \mathbf{n}_t) f^j - a_k^i \mathbf{s} \mathbf{n}_{t,i} a_k^j) \mathbf{v}_{,j} - (\mathbf{n} + \mathbf{s} \mathbf{n}_t) g^{ij} \mathbf{v}_{,ij} - \mathbf{g} \mathbf{v} \text{Pr} / k + \mathbf{b} \mathbf{v}^2 = 0 \end{cases}$$

avec :

$$\begin{cases} \mathbf{b} = \frac{3}{40}; \mathbf{s} = 0.5; \mathbf{g} = \frac{5}{9} \\ \mathbf{b}^* = 0.09; \mathbf{s}^* = 0.5; \mathbf{g}^* = 1 \end{cases}$$

et

$$\mathbf{n}_t = \mathbf{g}^* \frac{k}{\mathbf{v}}$$

2.3.2 Conditions de surface libre

Les conditions de surface libre sont la condition cinématique, les deux conditions dynamiques tangentielles, et la condition dynamique normale.

La condition cinématique, provenant des hypothèses de continuité, exprime le fait qu'une particule fluide de la surface libre y reste.

$$h_{,j} + (b_i^j (u^i - u_g^i) h_{,j})_{(i,j) \in \{1,2\}} - u^3 = 0$$

où b^i est la base contravariante bi-dimensionnelle calculée uniquement sur la surface libre discrétisée.

Les conditions dynamiques sont obtenus en écrivant la continuité de la pression à travers la surface libre. La pression P est supposée constante à travers la surface libre et la condition dynamique normale s'écrit alors :

$$p - \mathbf{r}g h - 2 \frac{\mathbf{m}_{eff}}{\|a^3\|^2} a_i^3 a_j^3 a_k^i u_{,k}^i - \frac{\mathbf{I}}{r} = 0$$

où \mathbf{g} est le coefficient de tension superficiel et r le rayon de courbure moyen de la surface libre

Les conditions dynamiques tangentielles sont simplement données par une combinaison linéaire des dérivées premières des vitesses :

$$a_{ai} g^{j3} u_{,j}^i = 0$$

2.4 Velocity Prediction Program

Lorsque l'on souhaite optimiser la carène d'un voilier, on ne cherche pas à minimiser la traînée, mais à maximiser la vitesse car la stabilité de la carène joue un rôle fondamental sur les performances. A la chaîne d'optimisation classique utilisée au bassin pour les navires à moteur, un Velocity Prediction Program (VPP) a été ajouté afin de déterminer la vitesse du voilier à partir d'une surface de réponse hydrodynamique issue d'ICARE.

Le VPP détermine pour une vitesse et un angle de vent réel donné le point de fonctionnement du voilier (vitesse, gîte et dérive ...) en équilibrant les torseurs aérodynamiques et hydrodynamiques qui s'y exercent.

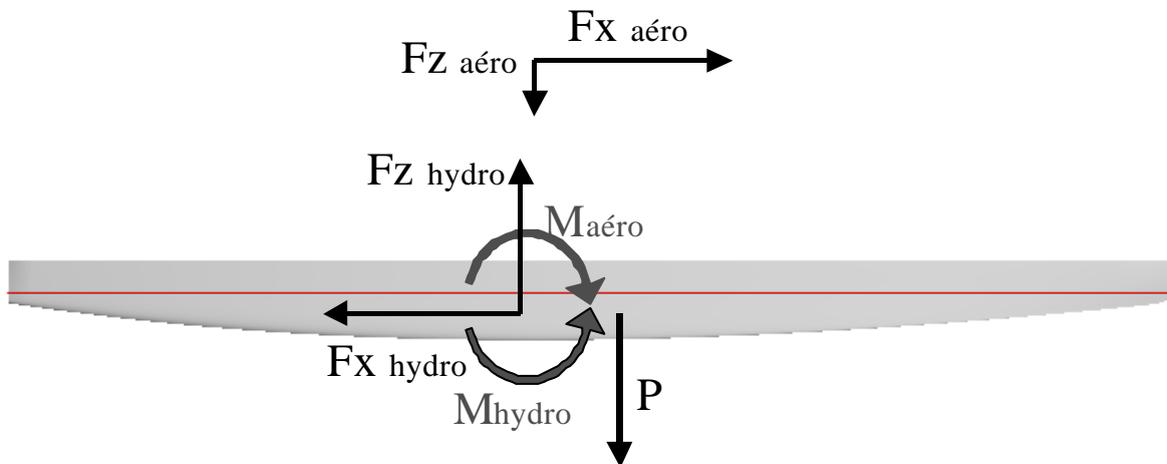


Figure 4 : Torseurs aérodynamique et hydrodynamique dans le plan (x,z)

fonctionnement du voilier. De plus, la robustesse des algorithmes génétiques permet d'assurer que l'optimum obtenu est un optimum global du problème. Le prix à payer est une vitesse de convergence faible, heureusement compensée par la capacité de l'algorithme à utiliser les résultats de calculs simultanés réalisés sur plusieurs processeurs.

2.5.2 Algorithmes génétiques

Les algorithmes génétiques fonctionnent par analogie avec un processus d'évolution naturel. Des carènes initiales sont utilisées comme points de départ de l'optimisation et constituent la première génération.

Trois types de processus sont alors appliqués pour générer la génération suivante de carènes :

- sélection : sélection des carènes les plus performantes
- mutation : modification de paramètres de design d'une carène
- croisement : échange de paramètres de design entre deux carènes

Les nouvelles carènes ainsi produites peuvent être évaluées simultanément et ainsi de suite jusqu'à convergence des paramètres vers des carènes performantes vis à vis des objectifs et respectant les contraintes.

3. EXEMPLE DE CALCULS ICARE

ICARE est utilisé maintenant au Bassin d'essais des Carènes depuis plusieurs années pour réaliser des études de prédiction de performances de navires. Les résultats obtenus sont systématiquement comparés aux résultats d'essais, ce qui a permis de bien maîtriser son utilisation, du tanker au floteur de multicoque.

L'utilisation d'un code de calcul dans un processus d'optimisation est d'abord subordonnée à sa capacité à prédire correctement la résistance du navire, mais surtout à classer deux carènes dans le même ordre que les expériences ou qu'au réel. Ce chapitre montre que le code ICARE répond parfaitement à ces deux critères.

3.1 Comparaison de deux formes de Class America

Deux formes de Class America ont été évaluées avec le code ICARE et les résultats sont comparés à des résultats d'essais réalisés au Bassin d'essais des Carènes, avec la participation de l'Ecole Centrale de Nantes. Les résultats traction droite sont présentés dans la figure ci-dessous.

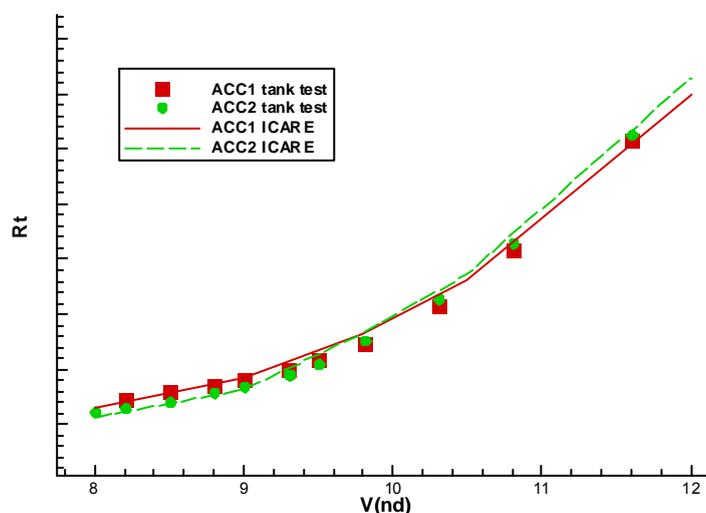


Figure 6 : Comparaison des résultats ICARE et expérimentaux sur deux formes de Class America

Les résultats ICARE sont en très bon accord avec les expériences, et de plus, le classement des deux formes de Class America est identique à celui des expériences sur la plage de vitesse considérée. Les résultats s'écartent plus des expériences pour les vitesses plus importantes, principalement à cause de la modélisation du déferlement qui est impossible dans un code à déformation de maillage.

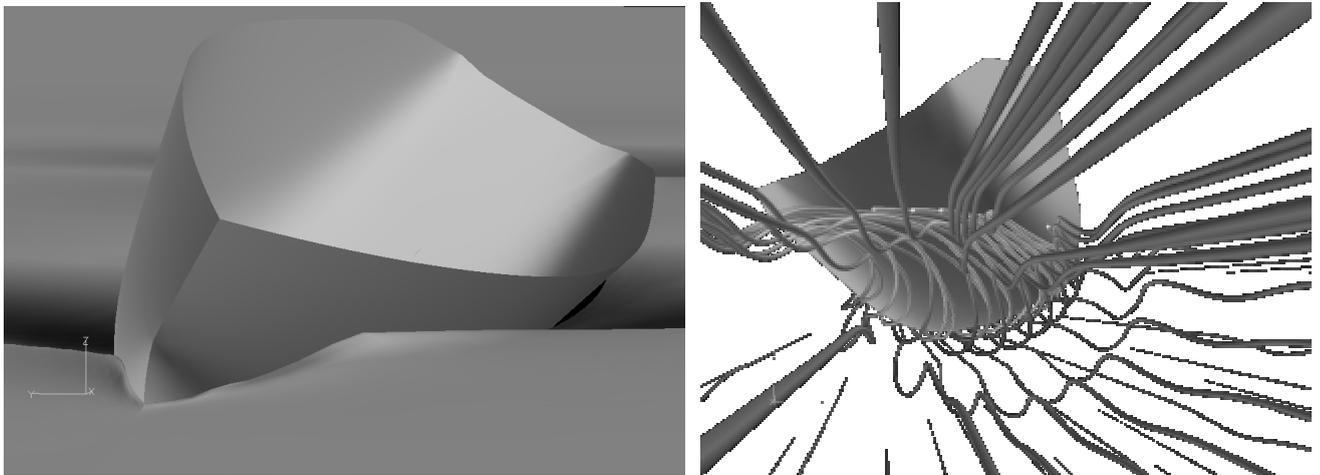


Figure 7 : Champ de vague et lignes de courant autour d'un ACC à 9 nœuds, 30° de gîte et 2° de dérive

Avec un code Navier-Stokes à surface libre, on accède aussi à la connaissance de l'ensemble de l'écoulement autour de la carène, ce qui permet de relier les résultats scalaires (résistance, portance, enfoncement et assiette ...) à des caractéristiques de l'écoulement ou de la surface libre.

3.2 Comparaison de deux flotteurs de multicoque océanique

Le Bassin d'essais des Carènes a récemment réalisé des calculs avec le code ICARE et des essais en bassin permettant l'évaluation du concept novateur de catamaran océanique planant d'Yves PARLIER. Le graphique ci-dessous montre une comparaison des résultats issus du calcul et des essais. Pour des raisons de confidentialité, seuls les écarts sont présentés.

	15 nds	20 nds	25 nds
Gerris 3 t	2%	-1%	-10%
Gerris 5 t	2%	1%	-7%
Flotteur classique	1%	-3%	-8%

Figure 8 : Ecarts de résistance totale entre les calculs ICARE et les essais

Le tableau ci-dessus montre que la validité du code ICARE est bonne jusqu'à 20 nœuds, avec des écarts inférieurs à 3% sur cette gamme de vitesse pour les deux flotteurs. A 25 nœuds, ICARE sous-estime la résistance, principalement à cause du déferlement qui devient trop important. Cependant, sur toute la gamme de vitesse, ICARE classe les deux flotteurs dans le même ordre que les essais.

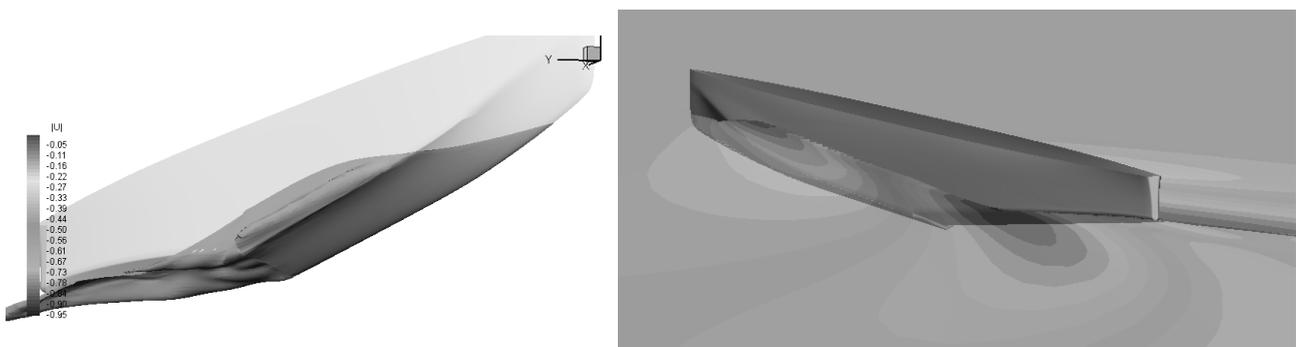


Figure 9 : Couche limite et champ de vague autour du flotteur du catamaran

4. EXEMPLES D'OPTIMISATIONS

4.1 Trimaran océanique Groupama II

Dans le cadre de l'étude de conception du futur trimaran océanique de Frank CAMMAS, Groupama II, des études d'optimisation de la coque centrale et du flotteur ont été réalisées en collaboration avec le cabinet Architecture Navale (V. Lauriot-Prevost & M. Van Peteghem). L'outil d'optimisation présenté dans cet article n'a pas été utilisé dans sa globalité. En effet, un Velocity Prediction Program spécifique a été utilisé, ce qui interdisait son couplage avec tous les outils au Bassin d'essais des Carènes, et une technique de morphing de plusieurs carènes initiales a été préférée au modelleur BATAOS. Cependant, cet exemple montre l'intérêt de la démarche d'optimisation réalisée en collaboration avec des architectes.

L'optimisation a été réalisée sur des critères de résistance, sans inclure de VPP. Pour une coque centrale de trimaran, la stabilité n'est pas liée à sa forme, ce qui permet d'utiliser la résistance totale de la coque comme objectif pour l'optimisation.

Six points d'évaluation ont été utilisés pour comparer les carènes issues de l'optimisation, correspondant à différents points de fonctionnement représentant la plupart des couples (déplacement / vitesse) rencontrés en navigation. La figure suivante montre un exemple de résultat obtenu permettant d'identifier la frontière de Pareto (ensemble des meilleures carènes) pour deux objectifs.

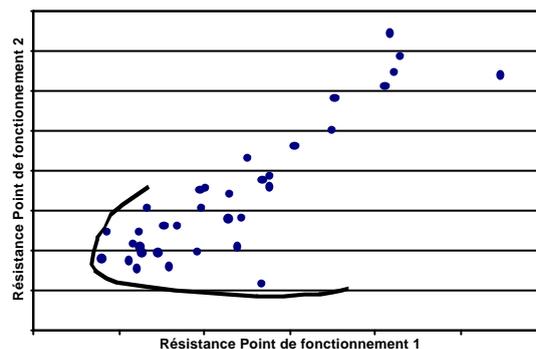


Figure 10 : Frontière de Pareto pour les points de fonctionnement 1 & 2

Les résultats des carènes les plus prometteuses ont alors été manuellement entrés dans un VPP (M. Kermarec / G. Provincelli) afin de déterminer plus finement leurs performances. Pour finir, ces résultats ont permis de déterminer un temps de parcours moyen sur la Route du Rhum, à partir de conditions météorologiques statistiques rencontrées sur cette épreuve.

Les vues ci-dessous montrent les champs de pression et champs de vagues calculés par ICARE sur deux formes de coque centrale.

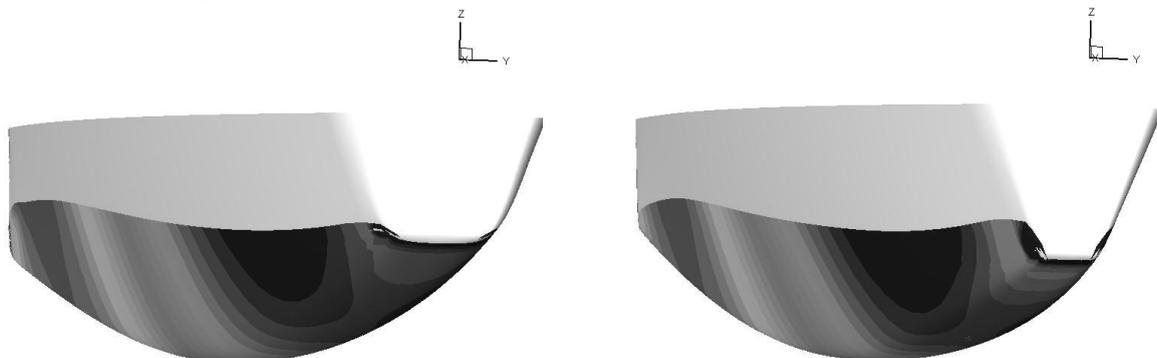


Figure 11 : Champ de pression sur deux formes de coque centrale

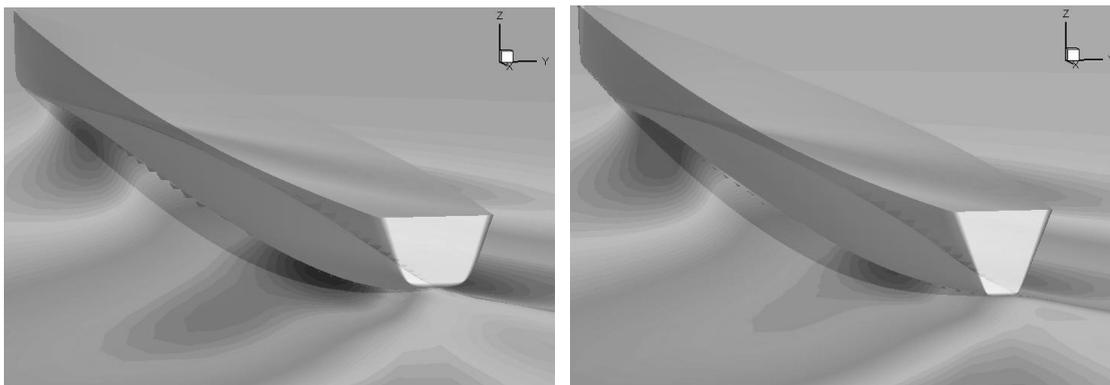


Figure 12 : Champ de vague sur deux formes de coque centrale

4.2 Optimisation de la carène d'un Class America

Plus que pour toute autre compétition de voiliers, la carène d'un Class America est un facteur ultra déterminant de ses performances. Pour les bateaux les plus rapides, les écarts à l'arrivée sont de quelques dizaines de secondes, ce qui correspond à des écarts de quelques centièmes de nœuds sur les vitesses des bateaux. Ces écarts sont facilement induits par de faibles modifications de la forme de la carène ou des appendices. Disposer d'un outil d'optimisation de forme de carène capable d'évaluer des centaines de formes dans un minimum de temps est donc primordial pour disposer d'un bateau performant.

La chaîne d'optimisation complète a été utilisée pour cette étude, du modelleur BATAOS au VPP. Cependant, le but de cette étude est de prouver la faisabilité et l'intérêt de cette méthode de design, ce qui a limité pour des raisons de temps de calcul le nombre de paramètres de carène (trois), le nombre d'objectifs (quatre), ainsi que la taille du maillage (120 000 cellules).

Les objectifs de l'optimisation sont de maximiser la vitesse du voilier au près et au portant pour 10 et 20 nœuds de vent réel. Le respect de la jauge a été réalisé en ajustant la surface de voile, après calcul à partir de la surface de la carène des différents coefficients de jauge, pour un déplacement donné. Seuls trois paramètres de carène ont été utilisés : la largeur maximum, la position du maître couple et la forme de la ligne de quille.

Bien que cet exemple puisse être considéré comme simpliste, il n'y a aucune limitation sur le nombre de paramètres de modélisation de la carène ou sur le nombre d'objectifs.

Pour des études pratiques, une douzaine de paramètres globaux et une demi-douzaine de paramètres locaux sont nécessaires pour générer une très grande partie des possibilités des formes de carènes de Class America. Une évaluation complète de toutes ces possibilités (20 paramètres), avec un pas de discrétisation de dix pour chaque paramètre amène à étudier près de 20^{10} carènes, soit plus de dix mille milliards de carènes ! Seul l'utilisation d'algorithmes d'optimisation permet de résoudre ce problème, et de déterminer à partir d'un minimum d'évaluations les carènes les plus performantes selon les objectifs et les contraintes spécifiées.

Dans cet exemple, l'algorithme MOGA a été utilisé avec une population initiale de dix carènes et vingt générations ont été nécessaires pour obtenir la convergence, soit l'évaluation de deux cents carènes. La figure ci-dessous montre l'historique de la convergence d'un des quatre objectifs.

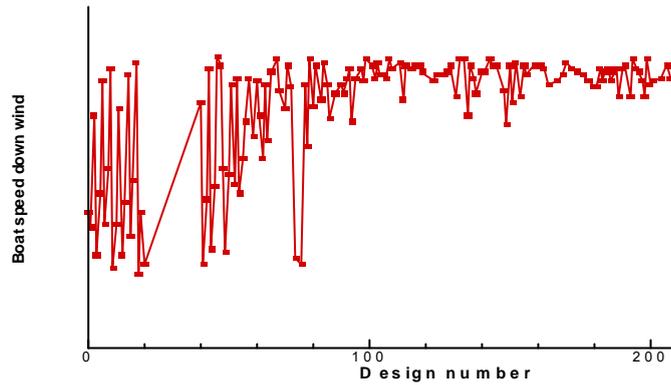


Figure 13 : Convergence de l'objectif vitesse au portant

Une fonctionnalité intéressante du logiciel d'optimisation est aussi son module d'analyse statistique qui permet de déterminer l'influence des paramètres sur les objectifs. Cela permet notamment dans une première phase d'éliminer les paramètres les moins influents, et ainsi réduire la complexité du problème.

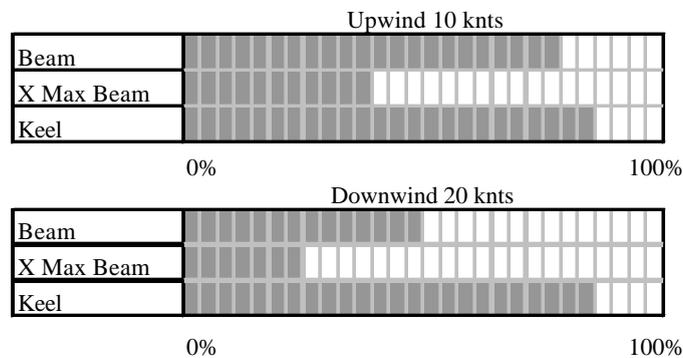


Figure 14 : Analyse statistique de l'influence des paramètres de design sur les objectifs

Comme nous l'avons vu dans l'exemple précédent, le résultat d'une optimisation multi-objectif n'est pas une unique carène, mais un ensemble de carènes optimums situés sur la frontière de Pareto.

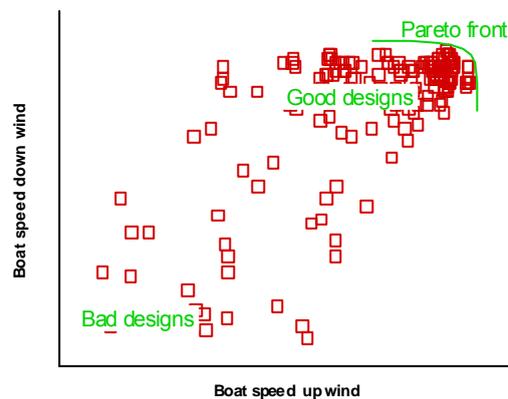


Figure 15 : Exemple de frontière de Pareto pour 2 des 4 objectifs

C'est alors à l'architecte d'analyser les résultats et de faire les compromis en connaissant précisément les pertes et gains de chaque carène par rapport aux objectifs et en intégrant des critères non pris en compte dans l'optimisation : tenue à la mer, manœuvrabilité ...

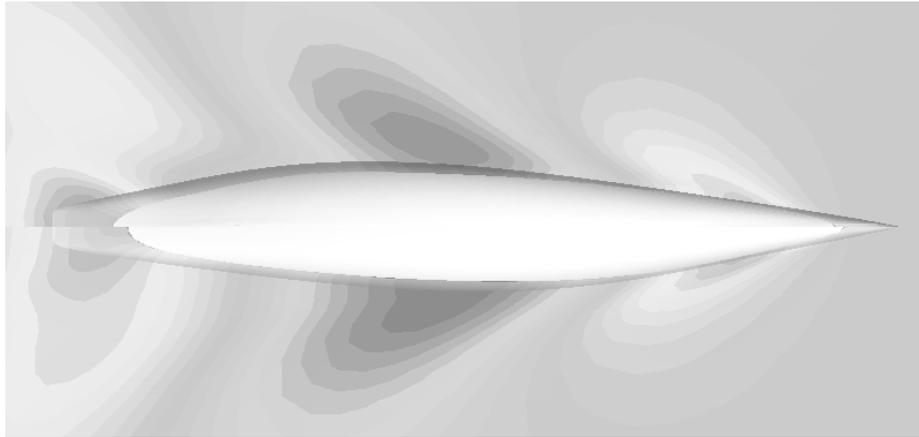


Figure 16 : Elévation de surface libre sur deux formes de Class America

5. CONCLUSIONS

Dans cet article, nous avons présenté une chaîne d'optimisation automatique de formes de carènes. Les principaux avantages de cette méthode par rapport à la méthode de design classique sont :

1. Un gain de temps important permettant l'évaluation d'un nombre très important de carènes
2. L'utilisation d'algorithmes d'optimisation qui assurent que l'on a déterminé les meilleures carènes avec un minimum d'évaluations
3. L'utilisation d'un outil d'analyse statistique qui permet de déterminer l'influence des paramètres de design sur les objectifs

Cependant, cette méthode a les mêmes limites que la méthode de design classique :

1. Les carènes optimums issues de l'optimisation appartiennent à l'espace de design qui a été défini initialement (carène initiale et déformations autorisées)
2. Les carènes optimums ne le sont que pour le solveur et le VPP qui ont été utilisés. Même si une grande confiance peut être accordée aux résultats du code ICARE des validations en bassin sont toujours nécessaires

Remerciements

Les auteurs remercient les architectes et skippers ayant acceptés la publication des résultats présentés dans cet article : Y. PARLIER et l'Aquitaine Design Team, F. CAMMAS et le cabinet Architecture Navale. Pour finir, un remerciement particulier à L. GELUSSEAU, directeur technique du défi Areva, et son Design Team pour l'autorisation de publication des comparaisons des résultats ICARE aux résultats expérimentaux sur les deux Class America.

Références

- 1 B. Alessandrini, G. Delhommeau, "Simulation of three-dimensional unsteady viscous free surface flow around a ship model", *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, vol 19, pp 321-342, 1994

- 2 B. Alessandrini, G. Delhommeau, "A fully coupled Navier-Stokes solver for calculations of turbulent incompressible free surface flow past a ship hull", *International Journal for Numerical Methods in Fluid*, vol 29, pp 125-142, 1999
- 3 B. Alessandrini, G. Delhommeau, "Flow simulation past a ship in drift and in rotating motion", Proceedings of *Symposium on Forces Acting on a Manoeuvring Vessel*, Val de Reuil, septembre 1998.
- 4 B. Alessandrini, G. Delhommeau, "Viscous free surface flow past a ship in drift and in rotating motion", Proceedings of *22th Symposium on Naval Hydrodynamics*, Washington, août 1998
- 5 B. Alessandrini, L. Gentaz, "A Fully Coupled Theory for Viscous Free Surface Flow Computation", *CFD Workshop*, Göteborg, septembre 2000
- 6 D. C. Wilcox, "Multiscale model for turbulent flows", *AIAA Journal*, Vol 26, pp. 1211-1320, November 1988.
- 7 E. JACQUIN, "Description du Velocity Prediction Program", document personnel.
- 8 Mode FRONTIER user Manual, ESTECO software