

**OPTIMISATION DES PERFORMANCES
DES VOILIERS DE COMPETITION
EN PARTICULIER DES « CLASS AMERICA »**

Par

Philippe PALLU DE LA BARRIERE

Centre de Recherche pour l'Architecture et l'Industrie Nautiques

Yaka Design Team

Mai 2000

SOMMAIRE

L'optimisation des performances des voiliers de compétition s'appuie sur des méthodes de prévisions des efforts aéro-hydrodynamiques ainsi que sur l'expérimentation comparative en vrai grandeur. En s'appuyant sur la démarche de conception du voilier 6è Sens, on décrit les méthodes de prévision et leur rôle dans la conception et le développement.

SUMMARY

Performance optimization of racing sail boats use extensively prediction methods for aero-hydrodynamics forces and performances as well as comparative sailing experimentations. Following the design process for the IACC 6è Sens, we describe the prediction methods and here influence on the design and the development.

Philippe Pallu de La Barrière ATMA Mai 2000

INTRODUCTION

La prévision des efforts hydro-aérodynamiques s'exerçant sur un voilier ainsi que la prévision des performances qui en découle est une méthode qui se développe rapidement. Elle est communément utilisée dans la conception des voiliers de course et de croisière avec un niveau de sophistication qui dépend de l'importance et des objectifs techniques du projet.

Le premier niveau de prévision utilise des formules de régression basées sur des essais systématiques d'origine universitaire [1]. Les performances et l'accessibilité des modélisations numériques (CFD) permettent d'affiner et d'enrichir ces prévisions dans le cadre de la plupart des projets de bateaux de course et même dans le cadre de projets de bateaux de croisière présentant des particularités (biquille ..). Enfin les essais sur modèles (bassin, soufflerie) sont systématiquement utilisés dans le cadre des projets America's Cup compte tenu de l'ampleur de ces projets et du niveau technique requis pour cette compétition. C'est d'ailleurs dans le cadre de ces projets America's Cup que les méthodes numériques et expérimentales sont développées et validées en intégrant les recherches de laboratoires et d'industriels parmi les plus performants [3],[5].

Cependant, malgré leur développement, les méthodes de prévision ne fournissent encore qu'un éclairage limité sur le fonctionnement des voiliers, en particulier pour ce qui concerne les aspects instationnaires et visqueux des écoulements.

L'intégration de ces méthodes dans la conception demeure donc un exercice délicat dont le succès repose sur une connaissance approfondie de la validité des méthodes ainsi que sur une bonne perception empirique des phénomènes qu'elles n'évaluent pas.

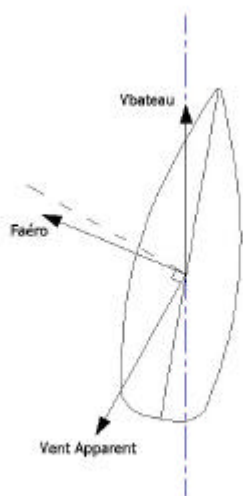
Dans cet exposé, nous décrivons les méthodes de prévision que le Yaka Design Team a employé pour étudier les formes du voilier Sixième Sens ainsi que la démarche de conception et de développement pour quelques aspects importants.

1- PHYSIQUE DU VOILIER

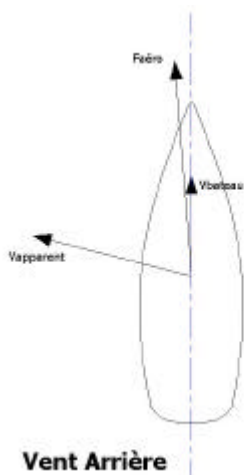
Le voilier fonctionne à l'interface de deux fluides : l'air et l'eau. Ses différentes parties (carènes, appendices, gréement) créent des forces hydrostatiques, hydrodynamiques et aérodynamiques. Le mouvement du voilier résulte de la composition de ces forces avec les forces de gravité.

Si l'on considère un état stationnaire pour un monocoque conventionnel, on peut considérer schématiquement que :

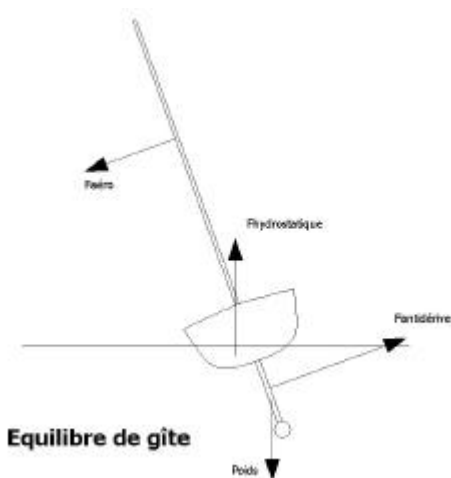
- la gravité est équilibrée par la force hydrostatique et par la force hydrodynamique verticale créée par la carène.
- le gréement crée une force aérodynamique dont l'orientation dépend de l'allure :
 - . au près serré cette force est orientée presque transversalement au mouvement
 - . au vent arrière cette force est orientée presque dans le sens du mouvement.
- la composante longitudinale (propulsive) de la force aérodynamique est équilibrée par la résistance à l'avancement de la carène et de ses appendices
- la composante transversale de la force aérodynamique (de dérive) est équilibrée par la portance des appendices et de la carène.
- au près serré, la force aérodynamique crée un moment de gîte qui est équilibré par le moment de la force hydrostatique par rapport au centre de gravité.
- l'équilibre en lacet est réalisé avec une répartition appropriée de la portance entre les différents appendices (quille, safran..).



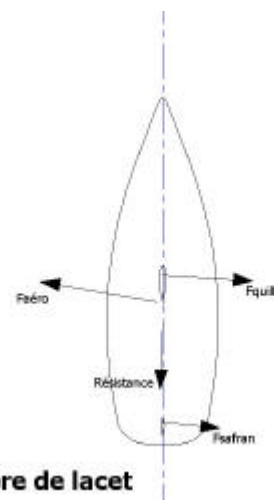
Prés Serré



Vent Arrière



Equilibre de gîte



Equilibre de lacet

Cette description sommaire du fonctionnement du voilier appelle des commentaires :

- au prés serré la force propulsive aérodynamique augmente avec la finesse aérodynamique alors qu'au vent arrière la force propulsive augmente avec la portance. La configuration idéale est donc différente pour chaque allure (voiles plates au prés serré, grande surface et creux au vent arrière).

- au prés serré la gîte augmente avec la portance aérodynamique. L'augmentation de la portance accroît a priori la force propulsive mais il faut tenir compte de l'effet néfaste de la gîte sur la finesse aérodynamique du gréement et la finesse hydrodynamique des appendices. Il y a donc une gîte optimale correspondant au meilleur compromis entre ces différents effets. Cette gîte optimale est obtenue pour un certain coefficient de portance aérodynamique et les profils de voile doivent être optimisés pour fournir la finesse la plus élevée pour ce coefficient.

- la forme de la carène doit être étudiée pour la position gîtée et pour la position droite.

- la répartition de portance entre les appendices pour laquelle l'équilibre en lacet est réalisé doit correspondre à la plus grande finesse générale du système d'appendice. Il est donc important de bien positionner le gréement longitudinalement et de pouvoir maîtriser par les réglages la position longitudinale du centre d'action aéro-

dynamique sans dégrader la finesse aérodynamique.

L'étude de la situation stationnaire est évidemment la plus accessible aux méthodes numériques et expérimentales. Cependant l'état stationnaire demeure une approximation de la réalité car :

- le voilier est soumis à l'effet de la houle ce qui occasionne des mouvements de tangage, de pilonnement et de lacet, qui créent source de la résistance à l'avancement et qui perturbent le fonctionnement des voiles et des appendices.

- le voilier « manœuvre » en particulier sur les ACC, où la « perte au virement de bord » est un critère sélectif.

Cependant, s'appuyant sur les résultats acquis et compte tenu des difficultés, les méthodes de prévision expérimentales et numériques les plus utilisées s'appliquent à la situation stationnaire.

2- LA PREVISION DE PERFORMANCES

Dans le cadre d'un projet America's Cup, la prévision des performances doit être la plus précise possible. En effet, les écarts de vitesse entre les différents concurrents sont très faibles mais déterminants. On considère par exemple qu'un écart de vitesse au près de 1% détermine entièrement l'issue de la régata. Cet écart correspond à une différence d'effort de propulsion (ou de résistance) de 15 kgs pour un effort total de 350 kgs.

2.1- Méthodes d'évaluation des efforts

On se décrit ici les méthodes de prévision des efforts utilisée par le Yaka Design Team pour concevoir le voilier IACC Sixième Sens. Ces méthodes ne représentent pas l'ensemble des possibilités actuelles car la conception a été effectuée dans le cadre d'un budget restreint. Cependant elles sont représentatives, à notre connaissance, des méthodes utilisées par les concurrents étrangers qui selon leurs moyens

amplifient surtout les essais sur modèle en taille et en quantité.

2.1.1- Efforts hydrodynamiques

L'outil de base de l'analyse des carènes et des appendices est la CFD REVA (ECN/LHN, G.Delhommeau [4]). Il s'agit d'un modèle fluide parfait avec prise en compte de la surface libre et des corps portants. La surface de la carène, des appendices et de l'eau est représentée par des singularités de Rankine et la condition de surface libre est linéaire. Ce logiciel est utilisé par le CRAIN depuis 1992 et la confrontation avec de nombreux essais en bassin ainsi que les développements spécifiques réalisés par l'ECN ont permis de préciser et d'élargir le domaine de validité. En particulier, on a déterminé progressivement des maillages, des sillages et des protocoles de calcul. Les principales limitations théoriques de la méthode sont :

- la linéarité de la condition de surface libre qui empêche la prise en compte des œuvres mortes et notamment des élancements.

- l'hypothèse fluide parfait qui masque les effets de la viscosité alors que le comportement visqueux aux extrémités avant et arrière de la carène (vague d'étrave, sillage) peut être déterminant comme nous l'ont montré certains essais au bassin.

Par contre REVA apporte plus qu'une estimation des efforts hydrodynamiques. La description du champ de pression, de la déformée de la surface de l'eau et du champ de vitesse autour de la carène en particulier aux extrémités et dans la zone des appendices peuvent guider la conception. On peut aussi analyser comparativement les enfoncements et les assiettes dynamiques lesquelles influent sur la résistance de vague et la surface mouillée dynamique.

Dans la pratique, on s'aperçoit que Reva classe bien les formes de carènes (relativement aux essais en bassin) mais que l'on rencontre des difficultés pour modéliser correctement les configurations complexes de corps portants

(ailettes, plusieurs appendices, volet de bord de fuite).

Nous n'avons fait aucune tentative sérieuse de modélisation des effets visqueux, nous contentant de calcul de couche limite standard sur les profils, calculs auxquels nous accordons cependant une confiance limitée quand il s'agit par exemple d'optimiser un volet de bord de fuite.

La validation de la démarche numérique est effectuée en bassin de carène avec des maquettes à l'échelle 1/7 (ECN [6]). L'objectif est de comparer des formes de carène sachant que les nombres de Reynolds sur les appendices sont trop faibles pour que l'on puisse mener une analyse fine du fonctionnement de ceux-ci.

Les modèles sont cependant équipés d'appendices standards, ce qui permet d'évaluer l'influence de la carène sur le rendement des appendices.

Le modèle est libre en assiette et enfoncement et bloqué en gîte et dérive. L'orienteur étant situé au niveau du pont, le moment piqueur aérodynamique est simulé par un déplacement longitudinal des masses déterminé préalablement par le calcul hydrodynamique.

Les essais en bassin ont concerné 8 formes de carène parmi la centaine étudiée numériquement. Ils ont permis de vérifier que les effets visqueux notamment de sillage ne prennent pas le pas sur les effets de surface libre.

Compte tenu de l'impossibilité budgétaire de réaliser des essais sur les appendices, nous n'avons pu utiliser que des résultats d'essais en soufflerie (St Cyr, ESEM) et en bassin à l'échelle 1/4 (ECN) réalisés lors du précédent défi.

2.1.2- Efforts aérodynamiques

La prévision numérique des efforts aérodynamiques en fonction de la géométrie du gréement et de la cambrure des profils est effectuée :

- d'une part avec un modèle de ligne portante dont les coefficients bidimensionnels portance-trainée sont ajustés avec des résultats de soufflerie (Voilerie Incidences, M.Kermarec). Cette approche permet d'évaluer les performances du bateau dans son ensemble sachant que par

exemple la diminution de la stabilité implique un fonctionnement des voiles à C_L plus faible.

- d'autre part avec le logiciel aéro-élastique Flow-MemBrain (North Sails, M. Richelsen) qui permet d'approfondir l'étude de la forme des voiles en prenant en compte la déformation du matériau et du mât.

Ce logiciel utilise la méthode des panneaux pour l'écoulement et un modèle éléments finis non linéaire pour les déformations.

2.2- Prévision de performances – VPP.

Les efforts aéro et hydrodynamiques ainsi que les efforts hydrostatiques sont injectés dans un solveur des équations d'équilibre appelé communément VPP (Velocity Prediction Program). Le solveur utilisé est le V2P du CRAIN conçu pour intégrer toutes sortes de formulation des efforts.

Le V2P fournit la vitesse au près et au vent arrière pour les différentes forces de vent mais aussi des paramètres de fonctionnement tels que la gîte, le creux des voiles, la portance sur les appendices...

Les résultats permettent de comparer des projets globaux entre eux en tenant compte des conditions météorologiques et de l'importance d'une allure par rapport à l'autre.

3- APPLICATION A LA CONCEPTION DE SIXIEME SENS : QUELQUES EXEMPLES.

3.1- Le cahier des charges de l'ACC

- règles de jauges : la jauge ACC est une jauge à restriction pour laquelle le déplacement, la longueur, la surface de voilure, le tirant d'eau, le tirant d'air sont encadrés. Cette jauge « oblige » à un type de bateau monocoque, 20-25 tonnes, 300-350 m² de voile au près, 22-23 m de long.

A l'intérieur du cadre, on peut ajuster le déplacement, la longueur, la surface de voilure à condition que ces trois valeurs respectent entre elles une relation donnée par la jauge. La longueur à la flottaison de jauge est mesurée au repos et elle peut être affectée par des largeurs d'élancement trop importantes (pénalités de chaîne avant et arrière). L'encadrement des

valeurs n'est pas tout à fait rigoureux puisque des valeurs hors cadre sont autorisées mais accompagnées de lourdes pénalités sur la longueur de jauge.

La stabilité n'est pas mesurée ce qui conduit à maximiser le poids d'un bulbe situé en bas de la quille en minimisant le poids de la structure (bulbe 20 t, structure 5 t).

- parcours, type de course : les régates se courent à deux bateaux sur un parcours prés/vent arrière. La course à deux bateaux conduit à des duels rapprochés où les manœuvres peuvent se succéder (parfois 30 virements successifs). La manoeuvrabilité est donc un critère sélectif qu'il faut prendre en compte pendant la conception.

- les conditions météorologiques : elles influencent la conception des bateaux. Les deux dernières éditions avaient lieu à San Diego, Californie où le vent dépassait rarement 8 nœuds. A Auckland, Nouvelle Zélande, les conditions sont beaucoup plus variées et les bateaux doivent être plus polyvalents. La fréquence de la houle est aussi à prendre en compte. A San Diego, la période de rencontre moyenne était 3,5 s, à Auckland 1,5 s.

- le temps, les moyens : la conception d'un ACC s'effectue dans le cadre d'une durée et d'un budget imparti qui varie selon les défis. Le budget limite en particulier les moyens d'expérimentation et notamment le nombre de bateaux que l'on peut réaliser. Dans le cas du défi BTT, nous ne pouvions construire qu'un bateau et nous ne disposons pas de bateau de référence alors qu'on sait par expérience que le développement et la validation par comparaison de vitesse de deux bateaux est un outil essentiel dans ce genre de projet. Le temps joue un grand rôle aussi. Il limite le développement des outils et la durée des expérimentations.

3.2- La conception de la forme de la carène

Dans le cadre de la règle ACC, il est maintenant admis que le meilleur « point de jauge » correspond au déplacement maximum, longueur maximum et surface de voilure maximum. Le terme « maximum » signifiant plus précisément que l'on choisit des valeurs qui sont proches du

cadre fixé par la jauge. On étudie donc une carène possédant un déplacement et une longueur à la flottaison qui sont fixés (la marge de manoeuvre étant 1 % du déplacement et 1 % de la longueur). Au premier ordre, il faut solutionner les problèmes suivants :

- une diminution de la largeur générale de la carène a pour conséquences :

- une augmentation de la longueur à la flottaison à la gîte ce qui diminue la résistance de vague.

- une diminution de la stabilité transversale ce qui provoque soit une gîte plus importante pour une même force propulsive et par conséquent une augmentation de la traînée induite du gréement et des appendices soit une force propulsive moins importante à gîte égale.

- l'augmentation du coefficient prismatique réduit la résistance de vague mais augmente la surface mouillée et dégrade le comportement visqueux des extrémités (sillage, vague d'étrave).

Au second ordre, la forme de la carène influence le rendement des appendices. Par exemple, si la vitesse locale de l'écoulement au voisinage des appendices est plus élevée, leur rendement est meilleur. Un autre effet important est le positionnement longitudinal des appendices : la dépression créée par le voile de quille déforme la surface libre et cette déformation peut s'ajouter ou se retrancher, selon sa position, à la déformation créée par la carène seule ce qui fait varier la résistance de vague. La déformation de la surface libre dépend du champ de pression dynamique créé par le déplacement de la carène. A répartition de volume immergé égale, on peut faire varier le champ de pression et notamment son gradient en répartissant différemment la courbure de la surface.

Concernant les effets instationnaires, nous ne disposons que de quelques règles issues des rares essais systématiques en bassin [2].

Il s'agit donc de trouver le meilleur compromis. Pour la conception de Sixième Sens, nous avons choisi d'optimiser la forme de la carène sur le critère du code Reva, tout en nous imposant

trois étapes de validation en bassin en utilisant une carène de référence que nous considérons comme la meilleure carène de l'édition précédente.

A chaque étape de validation, nous avons mesuré des progrès et nous sommes parvenus à une famille de carènes qui se sont avérées assez originales si l'on se réfère à nos concurrents. Ces carènes sont plutôt étroites et « anguleuses ». Le processus d'optimisation basé sur les numérisations de la résistance de vague, de l'efficacité des appendices et de la surface mouillée conduit à ce type de forme en l'absence de prévision précise des effets visqueux (épaississement de couche limite, sillage, vague d'étrave). La représentation graphique des performances des différents projets entre lesquels il a fallu choisir une carène, démontre bien la difficulté du choix final.

un avantage sur ces concurrents au près dans le vent faible et au vent arrière. Nous avons eu par contre beaucoup de difficultés pour l'amener à un niveau correct au près dans la brise. Quand on considère rétrospectivement les régates, il est difficile de juger notre choix. En effet, notre avantage dans le petit temps et au vent arrière fut décisif pour se qualifier en demi-finales et il n'est pas certain qu'une option un peu plus typée pour le près dans la brise nous aurait permis de gagner suffisamment de régates contre les défis les mieux préparés.

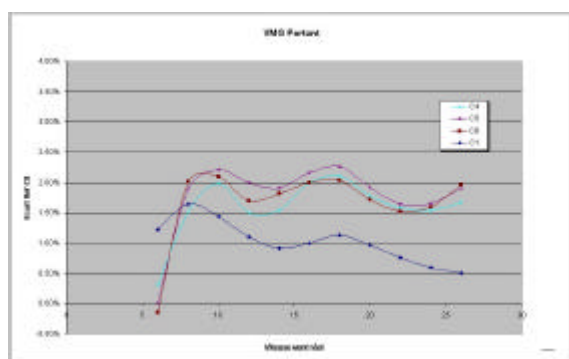
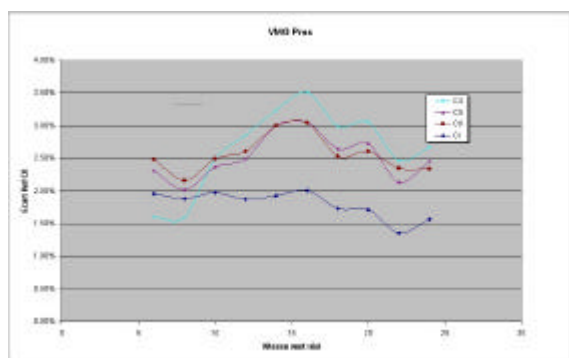
Au vu des performances globales du bateau, on peut conclure en tout cas que l'approche numérique fluide parfait nous a permis d'obtenir une carène compétitive tout en étant conscient de n'avoir gravi qu'une « colline » parmi d'autres peut-être plus un peu plus hautes.

3.3- La forme de la partie basse de la quille

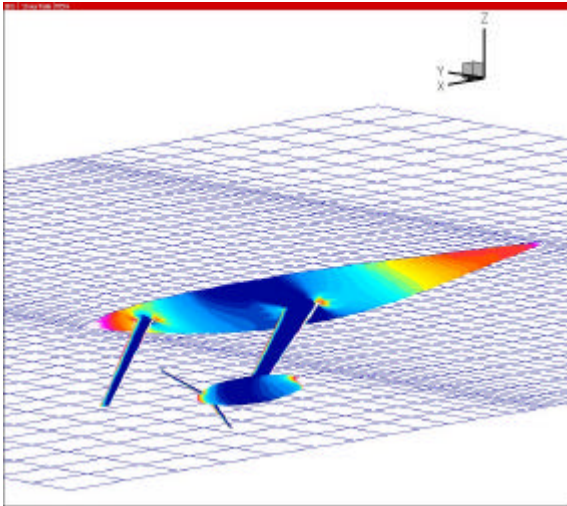
Le tirant d'eau des IACC est limité à 4 mètres par le règlement, l'optimisation de la stabilité impose la présence d'un bulbe volumineux (20 tonnes, 1,8 m³) et, au près serré, la gîte est importante (environ 30°). Il en résulte que le tirant d'eau « effectif » (au sens de la résistance induite) de l'ensemble voile de quille bulbe n'est pas très élevé.

Dans la partie basse de la quille, la résistance induite découle de l'énergie cinétique qui est dissipée par l'enroulement de l'écoulement autour du bulbe. Cet enroulement se prolonge par une corde tourbillonnaire en arrière du bulbe.

La forme du bulbe influence la résistance induite (largeur, cambrure..) mais il faut aussi prendre en compte sa surface mouillée, sa traînée de forme ainsi que l'altitude de son centre de gravité (stabilité).



La carène C6 a été choisie alors qu'elle n'est pas la plus performante au près au-dessus de 12 nœuds de vent. On a considéré que C4 était trop lente dans le vent faible et au vent arrière. Le Sixième Sens issu de cette carène a justement



Depuis 1983 avec le 12m JI Australia 2, les concepteurs ont adopté le principe des ailettes pour augmenter le tirant d'eau « effectif ». Ces plans porteurs positionnés transversalement au bulbe ont deux fonctions :

- l'enroulement autour du bulbe de l'écoulement crée de l'incidence sur les ailettes et donc un tourbillon à l'extrémité de celles-ci. La dispersion du tourbillon initial de bulbe en trois tourbillons diminue l'énergie cinétique totale. Les ailettes réduisent donc la résistance induite même en l'absence de gîte et de dérive.

- quand la quille fonctionne en gîte et en dérive, la portance des ailettes est modifiée par la dérive. L'ailette « sous le vent » porte plus que l'ailette « au vent » car l'incidence sur l'ailette sous le vent est la somme de l'incidence due à l'enroulement et de l'incidence due à la dérive, alors que l'incidence sur l'ailette au vent est la différence entre l'incidence due à l'enroulement et l'incidence due à la dérive. Cet effet peut être accentué par le dièdre et le calage en incidence des ailettes. Si on choisit d'augmenter la charge sur l'ailette sous le vent, on diminue la dispersion tourbillonnaire mais on développe une portance qui participe à la force anti-dérive ce qui diminue la contribution du voile de quille et donc l'enroulement autour du bulbe qui en découle.

La difficulté de l'optimisation réside dans la recherche d'un bon compromis entre ces deux effets auxquels s'associent la résistance vis-

queuse créée par la présence des ailettes ainsi qu'une modification de l'équilibre en lacet.

Les études numériques que nous avons effectuées avec REVA nous ont montré que des ailettes de taille moyennes semblaient être un bon compromis. Malheureusement, nous n'avons pas pu modéliser l'effet du calage en incidence des ailettes ce qui nous a amenés, en l'absence d'expérimentation préalable en soufflerie et en fonction de la solution retenue par le vainqueur de l'édition 1995, à prévoir deux jeux d'ailettes (envergure moyenne et envergure maximum).

4- LA PREVISION DES PERFORMANCES ET LA DEMARCHE GENERALE DE CONCEPTION ET DE DEVELOPPEMENT DU BATEAU.

Pendant la phase de conception, il faut faire des choix en prenant en compte les effets qui ne sont pas bien décrits par les méthodes de prévision de performances. En général, on consacre plus de moyens de prévision aux parties irréversibles du bateau tels que la forme générale de la carène, le plan de voilure, le système général d'appendices et son implantation. On optimise ensuite les appendices et la forme des voiles par validation comparative en navigation. Dans le cadre du développement de Sixième Sens nous ne disposons pas de moyens de validation comparative et il a fallu attendre les premiers essais comparatifs contre nos concurrents pour valider le bateau. Lors de ces premiers essais, les performances se sont avérées décevantes au près serré et nous sommes immédiatement rentrés dans une démarche de remise en question et de modifications du bateau et de sa conduite.

Le déficit de vitesse au près par rapport aux meilleurs étant évalué à 0,2 nœuds au près, il s'agissait de diminuer la résistance à l'avancement ou d'augmenter la propulsion de 30 kgs environ.

S'appuyant sur les nombreuses discussions que le groupe avait eues lors de la conception ainsi que sur les références que représentaient les quelques bateaux concurrents observables, le Yaka Design Team a proposé une série de modifications à essayer lors des compétitions.

La partie la plus spectaculaire de ses modifications a concerné les appendices pour lesquels nous avons choisi initialement des surfaces importantes pour se garantir de problèmes de

manoeuvrabilité et de fonctionnement dans la mer formée. Ces choix se sont avérés beaucoup plus conservatifs que ceux de nos concurrents et nous avons rapidement réduit la surface du voile de quille et du safran. Des dizaines de modifications moins spectaculaires ont été apportées au gréement, au pont, aux voiles et aux appendices qui, associées à la recherche permanente des meilleurs réglages par l'équipage nous ont permis de combler progressivement notre handicap. Au dernier stade de son développement, Sixième Sens était considéré par son équipage et ses concurrents comme le bateau le plus rapide au vent arrière et au près dans le petit temps, performant au près quand la mer est plate et encore insuffisant quand la mer est agitée et dans les virements de bord.

Parmi toutes ces modifications, il est difficile de dire aujourd'hui quelles furent les plus pertinentes car une grande partie d'entre elles n'étaient pas d'un intérêt évident au sens de la prévision de performances et qu'il fut impossible de les valider une par une par navigation comparative.

On peut simplement conclure que la part irréversible du bateau, largement privilégiée au niveau des études et de la prévision de performance, possède un potentiel intéressant et que le Yaka Design Team a réussi, sur la base de ces observations, de ses intuitions et de celles de l'équipe navigante, à progresser sur les domaines qui ont échappé à la prévision par manque de moyens ou à cause de la complexité des phénomènes.

Pour le plus grand plaisir des concepteurs, l'art du dessin des voiliers de compétition modernes repose donc toujours sur l'utilisation judicieuse de l'analyse numérique ou expérimentale des phénomènes physiques associée à l'expérience, l'intuition et l'observation.

REFERENCES

[1] J. Gerritsma, J.A Keuning, R. Onnink. Result and Analysis of the Delft systematic series II Yacht Hull Form Experiments. Proceedings of the 10th Chesapeake Sailing Yacht Symposium. Annapolis 1991.

[2] J. Gerritsma, J.A Keuning, R. Onnink. Sailing Yacht Performance in calm water and in waves. Proceedings of the 11th Chesapeake Sailing Yacht Symposium. Annapolis, 1993.

[3] L. Larsson. Scientific Methods in Yacht Design. Annual Review of Fluid Mechanics, 1990.

[4] J.J. Maisonneuve. Résolution du problème de la résistance de vagues des navires par une méthode de singularités de Rankine. Thèse de Doctorat, Université de Nantes, 1989.

[5] J.H. Milgram. Fluid Mechanics for Sailing Vessel Design. Ann. Rev. Fluid Mech. 1998.30 : 613-53.

[6] C. Tallote. Adaptation des procédures expérimentales au cas des voiliers en gite et en dérive. Thèse de Doctorat, Université de Nantes, 1994.