

## **5<sup>e</sup> JOURNÉES DE L'HYDRODYNAMIQUE**

**22, 23, 24 mars 1995 – ROUEN**

### **Apports de quelques outils numériques pour la conception et l'amélioration des performances de voiliers de type Coupe America**

**T. Coudray, C. de Jouët, P. Le Buhan, Y.M Scolan**  
Principia R.D. ZI Brégaillon 83507 La Seyne sur Mer  
Tél : 94.06.06.00 - fax : 94.06.58.83

#### **Résumé**

La conception d'un voilier de compétition de type Class America est du ressort des architectes navals, mais s'effectue aujourd'hui conjointement avec des ingénieurs spécialisés dans les différents domaines pointus que sont l'hydrodynamique, l'aérodynamique ou encore le calcul de structures. Le travail classique pour l'hydrodynamicien consiste alors à mettre en œuvre les techniques les plus adaptées pour caractériser l'ensemble des phénomènes physiques influençant les performances du voilier, en tenant compte de différents impératifs : multiplicité des configurations, diversité des conditions de navigation, degré de précision nécessaire, coût et délais de mise en œuvre. Dans cet esprit, le numérique complète avantageusement, sur certains points, les outils expérimentaux classiquement mis en œuvre dans ce type de projets. L'article présente brièvement quelques outils numériques qui ont été utilisés ou développés dans le cadre d'un projet de Coupe America lancé par le Yacht Club d'Antibes.

#### **Abstract**

Yacht designers now rely on different scientists to choose between their miscillenaous concepts and to improve the accuracy of their traditional Velocity Prediction Programs (VPP), especially when designing competition yacht such as America's Cup yachts. In that way, hydrodynamicists may be consulted to characterize the different hulls, keels, bulbs, rudder, winglets the yacht designers want to test. As the number of configurations, sailing conditions are numerous and as time and money is a crucial point for such projects, hydrodynamicists have to proceed to rigorous choices between all the tools they can use, and especially between numerical or experimental tools. The paper gives an overview of the contribution of the numerical models that were used for the design of an America's Cup yacht for the challenge launched by the Yacht Club d'Antibes.

## 1 Introduction

Depuis 1982, chaque nouvelle édition de la Coupe America confirme l'importance pour un défi de disposer du voilier le plus rapide. Un avantage de 2% de vitesse pure est aujourd'hui reconnu par les régatiers comme suffisant pour s'assurer du succès. Au delà du mérite des navigateurs, la démarche de conception et d'estimation du potentiel de performances du voilier avant construction, constitue un point clé de la réussite du défi. L'évaluation des performances a jusqu'à présent surtout été effectuée à partir de caractérisations expérimentales à échelle réduite sur les différents composants des voiliers. La synthèse des performances des concepts est alors opérée dans les programmes de prédiction de vitesse (VPP) dont la validité dépend directement de la précision des efforts introduits et du découpage des efforts opéré. Le développement des outils numériques, cumulé à celui des moyens informatiques actuels, permet d'étendre leur champ d'application à la majeure partie d'un voilier de type coupe América (voir figure 1), avec toutefois des objectifs bien identifiés suivant les modèles. Pour les concepteurs que sont les architectes, l'apport des outils numériques s'effectue suivant deux aspects :

- l'aspect quantitatif, qui permet de tirer parti des résultats d'un modèle pour l'utilisation dans un programme de prédiction de vitesses (VPP);
- l'aspect qualitatif qui permet de mettre en évidence certains phénomènes tels que les décollements, les transitions, l'apparition de tourbillons et qui oriente le dessin de nouvelles formes.

## 2 Outils numériques quantitatifs

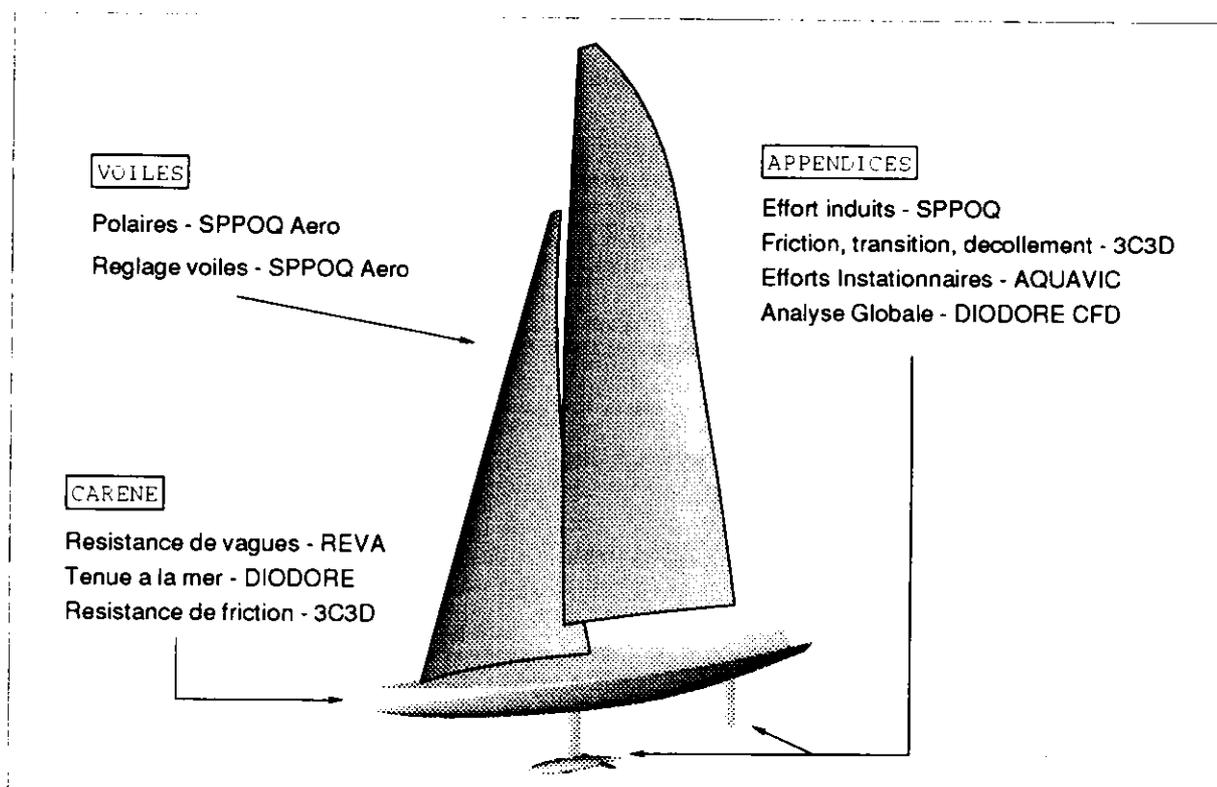


Figure 1: Outils numériques utilisables pour la conception d'un voilier de compétition

### 2.1 La résistance de vagues en eau calme

Le code Reva développé depuis 1985 par l'Ecole Centrale de Nantes et Sirehna a été largement utilisé pour caractériser les efforts liés aux effets de surface libre ([8], [15]). Le code, dont les

fonctionnalités sont régulièrement étendues, et dont le niveau de validation a été très sensiblement amélioré, s'est révélé un outil bien adapté aux carènes de type IACC (International America's Cup Class : longueur de 19 à 25 m, déplacement de 16 à 25 tonnes).

La démarche retenue pour la sélection d'une carène a été décomposée en plusieurs étapes. La première étape a consisté à étudier la sensibilité des résultats aux différents maillages (carène, surface libre).

#### Maillages

Pour les carènes, une règle de maillage répartissant environ 10 à 12 facettes dans la direction longitudinale par longueur d'onde a été retenue. Comme celle-ci est reliée à la vitesse d'avance du bateau, ce sont les faibles vitesses considérées qui imposent la taille du maillage. Le nombre de facettes par longitudinale est de 100 environ. Ce qui fixe le nombre de facettes autour de 1800 par demi-carène pour une gamme de vitesses qui s'étend de 5 à 14 noeuds. La résistance de vagues, aux faibles vitesses d'avance est très sensible à une discrétisation trop grossière de la carène, car les valeurs à calculer sont très faibles. On ne constate naturellement pas les mêmes variations sur la résistance visqueuse qui est estimée forfaitairement par la formule de l'ITTC57.

L'influence de certains paramètres de dimensionnement de la surface libre a été analysée, tels que la variation de la longueur de maillage à l'avant  $ALAV$  et à l'arrière  $ALAR$  de la coque, ainsi que la variation de la longueur latérale du maillage. Si les résultats sont considérés comme stables à partir de  $ALAV = 0.75L$  et  $ALAR = 1.00L$ , où  $L$  est la longueur à la flottaison du bateau, on observe une grande dispersion des résultats sur la résistance à l'avancement des navires lorsque l'on fait varier le taille de la première facette latérale du maillage. Pour une taille minimale critique de cellules, on observe un comportement singulier de la courbe de résistance alors que pour des mailles plus grandes, la résistance de vagues converge vers une même limite, ce qui est à l'opposé de la tendance attendue. Etant donné la sensibilité de ce paramètre sur les valeurs calculées, un recalage du modèle numérique avec des données expérimentales est indispensable pour que les efforts de résistance de vagues puissent être exploités par un V.P.P. C'est ce qui a été réalisé dans la seconde étape.

#### Recalage expérimental

L'un des atouts du logiciel Reva est de pouvoir reconstituer un bassin d'essais numérique dont on spécifie la largeur et la profondeur en prenant en compte des parois verticales et un fond. Les calculs de résistance à l'avancement en traction droite ont été effectués en modèle libre à l'échelle de la maquette et au réel. Les comparaisons ont été effectuées avec des résultats d'essais réalisés sur des carènes de dimensions similaires, aux bassins d'essais de carènes de Southampton et du BMT en 1991. Différentes formes de carènes, munies ou non d'appendices ont été testées à l'échelle de 1:4 et 1:9. Les coefficients de formes ont été déterminés par la méthode de Prohaska, pour des cas de traction droite et de traction en gîte et dérive. En retenant les coefficients de formes déterminés expérimentalement, on constate une très bonne concordance entre l'effort total numérique et expérimental, que ce soit à l'échelle de la maquette ou du réel (voir figure 2). Dans la gamme de vitesse [6,11] noeuds, l'écart moyen sur la résistance totale à l'avancement à l'échelle de la maquette est de l'ordre de 2.5 %. Cet écart augmente légèrement au réel mais se situe aux alentours de 3.7 %.

Par contre, les comparaisons sur l'effort de vagues seul sont plus décevantes. Une grande partie de l'incertitude provient a priori de l'identification de la partie "vagues" lors des mesures expérimentales. Celle-ci est en effet estimée en enlevant la composante friction à l'effort total. Or la composante de friction est évaluée à partir d'une expression globale fournie par l'ITTC57. Pour les faibles vitesses, la composante vague est très faible, si bien que l'incertitude sur l'effort de friction et sur les capteurs ne permettent pas d'obtenir une grande précision sur ce terme. De même lorsque la vitesse augmente, le surenfoncement de la carène s'accroît, augmentant par la même, la surface mouillée. La précision sur l'effort est à nouveau altérée car les corrections de l'effort de friction liées aux variations de surfaces mouillées ne sont pas prises en compte.

Le recalage du modèle numérique utilisé nous a permis de déterminer le coefficient de forme ce qui fixe la valeur de l'effort total de résistance à l'avancement à insérer dans le VPP. Ce recalage a par ailleurs confirmé le choix de la discrétisation de la surface libre retenue pour l'ensemble des calculs.

#### Contribution des appendices

L'étape suivante consiste à identifier la contribution des appendices dans l'effort de vagues. Il est clair en effet que c'est avant tout l'identification d'une carène performante qui est recherchée, pour raisons de délais de construction. Rappelons que le Défi d'Antibes avait décidé la construction d'une seule carène. La recherche d'appendices est une tâche qui peut être poursuivie plus longuement.

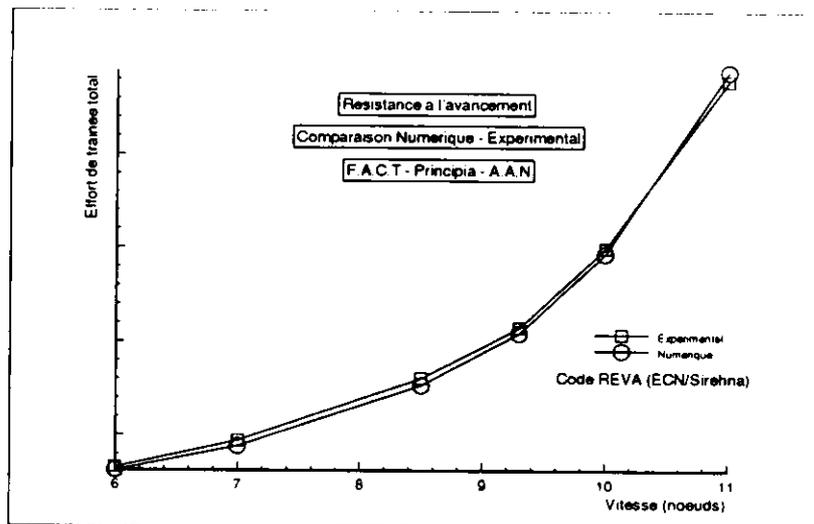


Figure 2: Comparaison Numérique (Reva) et expérimentale portant sur l'effort total de résistance à l'avancement

pour conduire à la fourniture de nouveaux appendices au cours des régates. Il est donc naturel de vouloir s'affranchir de l'influence des appendices pour la sélection d'une carène. En un mot, s'il reste clair que la contribution des appendices aux efforts totaux ne peut être pas négligée, il convient de s'interroger sur la nécessité de les prendre en compte pour établir le choix d'une carène. Rappelons que les appendices génèrent un effort global que l'on peut séparer en plusieurs composantes dont, une composante "friction", une composante "induite", et une composante "vague". Les deux premières composantes sont accessibles par différents outils (code Spooq présenté par la suite, 3C3D, formules analytiques ...). La composante vague, elle, peut être déterminée par le code Reva. Une question se pose alors. Les effets d'interactions entre carène et appendices, dus aux effets de surface libre seuls, sont-ils suffisamment importants pour inverser les tendances entre carènes ?

La démarche adoptée pour répondre à cette question a consisté à déterminer la contribution d'un élément d'appendice (voile de quille, bulbe, safran ...) dans l'effort global évalué par le code de résistance de vagues. A partir d'une carène, une série de calculs pour différentes configurations d'angles de gîte et de dérive sur des configurations hybrides de type carène + 1 ou plusieurs éléments d'appendices a été effectuée (carène + bulbe, carène + voile de quille, carène + safran, carène + voile de quille + bulbe, carène + voile de quille + safran, carène + voile de quille + bulbe + safran). Par analyse comparative des différentes configurations, on parvient à isoler la contribution "vagues" de chaque élément d'appendice ainsi que les interactions entre éléments.

On se heurte, cependant à quelques difficultés lorsque l'on met en présence plusieurs profils portants. En particulier, le logiciel Reva fige le sillage de chaque profil (voile de quille et safran) dans une position donnée ce qui ne permet pas de rendre compte correctement des effets d'interactions entre profils.

Finalement, il apparaît que pour l'effort longitudinal, les effets d'interaction restent limités dans la gamme principale de fonctionnement de ce type de bateaux (voir [5]). Il reste qu'au delà d'une certaine vitesse, l'influence des appendices, en particulier sur le champ de vagues résultant, se trouve modifiée de façon significative. En deçà de ce seuil, les efforts d'interaction appendices/carène ou carène/appendices sont négligeables devant l'effort de trainée totale. Ce résultat autorise d'effectuer un classement fiable en terme de trainée à partir de calculs sur des carènes lisses. Des conclusions similaires ont été établies pour les autres composantes de l'effort.

#### Etude en traction droite

A partir des résultats des étapes précédentes, une étude en traction droite a permis d'établir un premier classement, complétée ensuite par une étude en gîte et dérive. D'une façon générale, des inversions de tendance des performances des navires se produisent pour différentes vitesses d'avance. Certains bateaux bons à vitesse réduite, perdent leur efficacité à grande vitesse et inversement. Néanmoins, on constate que les "bonnes" carènes ne subissent pas d'inversions, leurs performances

se situant nettement au-dessus des autres. Le principal avantage de cette méthode repose donc sur la rapidité de calcul qui permet la sélection d'une carène parmi un grand nombre de formes initialement proposées.

### Etude en gîte et dérive

La dernière étape consiste à réaliser des calculs en gîte et dérive et en modèle libre. Les valeurs d'efforts obtenus par cette méthode correspondent à un équilibre dynamique du navire, ce qui sous-entend que toutes les forces aérodynamiques et hydrodynamiques sont prises en compte. Ce qui n'est actuellement pas possible dans Reva qui ne prend en compte aucune modélisation d'efforts sur les voiles. Un calcul rapide montre que l'enfoncement dynamique de la carène est essentiellement dû à l'effort de résistance de vagues qui s'exerce sur la carène car les composantes verticales d'efforts sur les voiles et sur les appendices se compensent. Les résultats de ces calculs ont alors servi à constituer une base de données, exploitée dans le VPP développé pour la circonstance par le cabinet d'architecture Bouvet/Petit.

## 2.2 Les efforts sur les appendices

La modélisation des effets de portance et de traînée induite sur les appendices a été traitée à l'aide d'un modèle de fluide parfait incluant des nappes tourbillonnaires. Le modèle, baptisé Spooq (Système de Prédiction de Performance et d'Optimisation de Quille) s'inscrit dans une démarche d'optimisation d'appendices de voiliers développée conjointement par Principia, le cabinet d'architecture navale Bouvet/Petit et l'Ecole des Mines de Paris (antenne de Sophia Antipolis). Le développement de ce logiciel a été justifié par la nécessité de traiter correctement les effets tridimensionnels et en particulier la présence de bulbe rattaché aux profils, ainsi que l'éventualité de volets de braquage (trimmers). La prise en compte de profils multiples implique également de pouvoir traiter les différentes interactions entre les sillages.

Le logiciel est basé sur une méthode de singularités de type sources et doublets répartis sur le corps. La présence d'un bord de fuite sur les profils nécessite d'y appliquer une condition de Kutta-Joukowski pour éviter le contournement. La condition est appliquée sur le potentiel. Les nappes tourbillonnaires sont modélisées par des distributions constantes de doublets.

### Mise à l'équilibre des nappes tourbillonnaires

La mise à l'équilibre des nappes tourbillonnaires s'avère nécessaire dès qu'il existe une interaction entre un profil portant et un autre corps. Cette configuration est fréquemment rencontrée pour les appendices de Class America (interaction quille/bulbe, quille tandem, ailettes/bulbe). Elle est réalisée à l'aide d'un schéma itératif qui établit à convergence un transfert de masse nul au travers de la nappe tourbillonnaire, qui constitue donc une surface de discontinuité de potentiel, soit :

$$\int_{\text{sillage}} \vec{U}_m \cdot \vec{n} \, ds = 0 \quad (1)$$

où :  $\vec{U}_m = 1/2(\vec{U}_+ + \vec{U}_-)$  représente la vitesse moyenne sur la nappe.

La nappe tourbillonnaire s'étend sur toute la longueur du bord de fuite du profil et est placée initialement dans l'axe de symétrie du profil. Une première résolution du système linéaire donne accès aux valeurs du saut de potentiel sur la nappe. Une formulation en filet tourbillonnaire est alors utilisée pour calculer les vitesses aux milieux des segments tourbillonnaires en utilisant la formule de Biot et Savart :

$$\vec{v}(M) = \frac{\gamma}{4\pi} \int_{d\Gamma} \frac{M\vec{M}'}{\|M\vec{M}'\|^3} \wedge d\vec{l}_{M'} \quad (2)$$

où  $\gamma = [\varphi] = (\varphi^+ - \varphi^-)$  représente le saut de potentiel sur la nappe.

Les différents nœuds de la nappe sont ensuite déplacés dans un plan perpendiculaire à l'axe initial de la nappe pour satisfaire (1). Le schéma est initié aux nœuds voisins du bord de fuite. Un paramètre de relaxation est introduit pour éviter de trop fortes oscillations principalement au début du processus (voir [17]).

Le déplacement des nœuds de la nappe impose théoriquement de résoudre à nouveau le système linéaire complet, fournissant ainsi une nouvelle valeur du saut de potentiel sur la nappe. En pratique, ces variations sont faibles, et il est donc possible de n'effectuer cette nouvelle résolution qu'au bout d'un certain nombre d'itérations sur la position de la nappe.

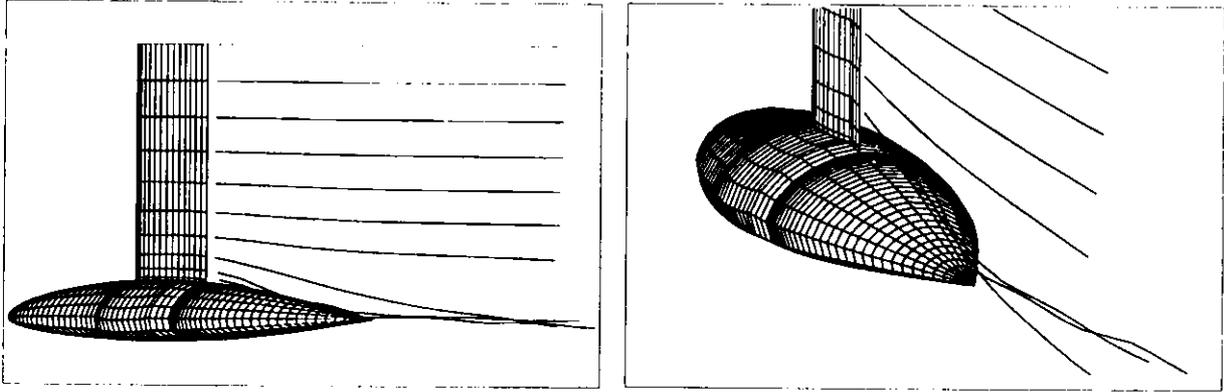


Figure 3: Enroulement d'une nappe tourbillonnaire derrière un ensemble voile de quille - trimmer braqué - bulbe

Certains filets tourbillonnaires nécessitent un traitement particulier. Notamment pour les 2 segments de tourbillons placés aux extrémités d'envergure des profils, le déplacement des nœuds n'est pas autorisé dans la direction de l'envergure. Cette contrainte supplémentaire permet de s'affranchir de la pénétration des filets dans la carène ou le bulbe, qui entraîne généralement une convergence difficile.

La figure 3 présente la position de la nappe obtenue à convergence sur un ensemble quille/bulbe. Le voile de quille est équipé d'un trimmer qui est braqué à 8 degrés. L'incidence de l'écoulement non perturbé est de -5 degrés par rapport à l'axe du profil. On observe un enroulement tourbillonnaire prononcé dès que le sillage dépasse l'extrémité du bulbe. Au dessus du bulbe, la nappe vient tangenter le bulbe tout en se décalant suivant la direction du braquage du trimmer.

### Le calcul des efforts

L'évaluation des efforts sur les profils portants en écoulement de fluide parfait irrotationnel est classiquement effectuée suivant deux principales méthodes : l'intégration directe de la pression sur le corps ou l'utilisation de la méthode de Trefftz. Cette dernière formulation donne une expression des efforts sur le profil par une analyse du comportement du sillage. Dans le cas général d'une nappe mise à l'équilibre, l'effort s'écrit :

$$\vec{F} = \rho \vec{U}_\infty \wedge \oint_C \varphi \vec{ds} + \frac{1}{2} \rho \oint_C \varphi \vec{V}_T \wedge \vec{ds} \quad (3)$$

où la vitesse de perturbation  $\vec{V}$  est décomposée suivant une composante parallèle à l'écoulement infini  $\vec{U}_\infty$  et une composante normale, comme suit :

$$\vec{V} = u \vec{e}_x + \vec{V}_T \quad (4)$$

L'intégration est effectuée le long d'un contour  $C$  englobant la trace du sillage dans un plan perpendiculaire à l'écoulement infini et rejeté à l'infini aval. En introduisant les valeurs des sauts de potentiel et de vitesse au travers de la nappe, l'expression de l'effort de traînée s'écrit :

$$\begin{aligned} \mathcal{T} &= \vec{F} \cdot \vec{e}_x = \frac{1}{2} \rho \vec{e}_x \cdot \oint_C \varphi \vec{V}_T \wedge \vec{ds} \\ &= \frac{1}{4} \rho \vec{e}_x \cdot \int_\Gamma [\varphi] (\vec{V}_T^+ + \vec{V}_T^-) \wedge \vec{ds} + \frac{1}{4} \rho \vec{e}_x \cdot \int_\Gamma (\varphi^+ + \varphi^-) [\vec{V}_T] \wedge \vec{ds} \end{aligned} \quad (5)$$

Lorsque la nappe tourbillonnaire est mise à l'équilibre, le saut de vitesse tangentielle  $[\vec{V}_T]$  est perpendiculaire à l'élément de surface  $\vec{ds}$ , si bien que seule subsiste la première intégrale. La traînée induite s'écrit alors :

$$\mathcal{T} = \frac{1}{2} \rho \int_\Gamma [\varphi] \vec{e}_x \cdot (\vec{U}_m \wedge \vec{ds}) \quad (6)$$

De même l'effort transversal au profil s'écrit alors simplement :

$$\vec{P} = \vec{F} \wedge \vec{e}_x = \frac{1}{2} \rho \vec{U}_\infty \wedge \int_\gamma [\varphi] \vec{d}s \wedge \vec{e}_x = U_\infty \int_\Sigma [\varphi] \vec{d}s \quad (7)$$

- **Stabilité des efforts suivant le lieu d'intégration.**

Le calcul des efforts par la méthode de Trefftz doit s'effectuer dans un plan placé à l'infini aval, qui reste perpendiculaire à l'écoulement infini amont. Cela nécessite a priori d'utiliser des filaments tourbillonnaires semi-infinis pour les filaments les plus en aval. Cette option a été mise en place, mais ne s'est pas révélée satisfaisante. En particulier pour l'effort de traînée, on observe que l'évolution de l'effort en fonction de la localisation du plan d'intégration présente un palier horizontal à mi-longueur de la nappe, et que l'effort chute ensuite assez brutalement lorsque le plan d'intégration est déplacé en aval. En conséquence, la valeur de l'effort retenue est celle correspondant à la meilleure stabilité de l'effort.

#### Calcul par intégration de la pression

D'un point de vue numérique, le calcul des efforts par intégration des pressions obtenues en théorie potentielle se heurte à quelques difficultés. La pression dépendant quadratiquement des vitesses sur le profil, la précision du calcul d'effort dépend directement de la précision sur les vitesses. Dans le cas du logiciel Spooq, l'utilisation de singularités de type sources et doublets conduit naturellement à une bonne précision de la composante normale de la vitesse. Par contre, la composante tangentielle est d'autant plus mal évaluée que les distributions de singularités adoptées sont constantes par facettes. Ainsi l'utilisation des vitesses reconstituées à partir des coefficients d'influence déterminés lors de la résolution du système, s'est révélée inadaptée pour déterminer les efforts, et en particulier la traînée induite.

L'évaluation des vitesses a donc été effectuée en adoptant un schéma de différences finies classique, similaire à celui proposé dans [16]. Le potentiel, connu au centre des facettes est dans un premier temps évalué aux nœuds des facettes en écrivant :

$$\varphi(\text{nœud } i) = \frac{\sum_{j=1}^{\text{Nbre facettes}} \frac{\varphi(X_j^f)}{\|X_i^p - X_j^f\|}}{\sum_{j=1}^{\text{Nbre facettes}} \frac{1}{\|X_i^p - X_j^f\|}} \quad (8)$$

où l'indice  $n$  désigne un nœud du maillage et l'indice  $f$  le centre d'une facette et  $X$  les coordonnées du point considéré. Le schéma de différences finies est alors appliqué pour évaluer  $\text{grad}\varphi$ .

#### Comparaison avec des valeurs expérimentales

Plusieurs campagnes d'essais ont été effectuées à l'Institut de Mécanique des Fluides de Lille pour caractériser différentes formes génériques d'appendices, et en particulier les interactions entre les composants (voiles de quilles, ailettes, bulbes, trimmers...) (voir [18]). Des mesures du torseur d'effort aérodynamique ainsi que des visualisations d'écoulements pariétaux par bouillie ont été réalisées dans la veine horizontale (diamètre 2.4m) à une vitesse de 55 m/s. A l'échelle des maquettes (1/3), le Reynolds obtenu est alors 3 fois plus faible qu'au réel, ce qui impose d'effectuer des recalages sur les efforts de friction pour reconstituer les efforts au réel.

La figure 4 présente une comparaison des efforts induits évalués par Spooq avec les résultats expérimentaux. La configuration présentée est un voile de quille équipé d'un trimmer braqué à 8 degrés et d'un bulbe d'extrémité arrière pointue. L'accord est satisfaisant en particulier dans la gamme d'incidences correspondant au fonctionnement des voiliers.

#### Les efforts sur les voiles

Une extension immédiate du modèle concerne le traitement de profils minces tels que les voiles. Les singularités utilisées sont alors de type doublet. Deux formulations ont été mises en œuvre, l'une de type potentielle, l'autre de type vitesse (voir [10],[16]). Le logiciel est étendu au traitement de deux voiles en interactions. En effet, le réglage de l'incidence des voiles entre elles apparaît comme un paramètre supplémentaire qui impose de rechercher numériquement le meilleur accord entre les deux profils. Un balayage sur la position angulaire relative des deux voiles est donc opéré

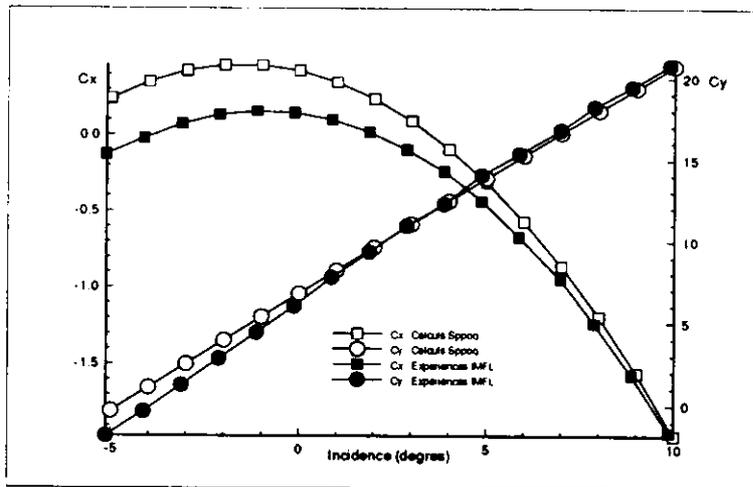


Figure 4: Evolution des efforts de traînée et de portance sur un ensemble quille - trimmer - bulbe

pour rechercher le meilleur rendement de l'ensemble. L'option de mise à l'équilibre des nappes tourbillonnaires trouve par ailleurs ici une nouvelle justification.

Le domaine de validité du modèle reste évidemment limité puisque seuls les détachements tourbillonnaires prenant naissance aux bords de fuite sont pris en compte. En pratique, seules les conditions de navigation au près peuvent être analysées; pour les allures plus abattues, le recours aux équations de Naviers-Stokes est indispensable. Un travail de thèse est engagé sur ce thème avec les mêmes partenaires que ceux retenus pour le développement de Sppoq.

### 2.3 La tenue à la mer

Généralement, les performances établies par les VPP ne tiennent compte que d'effets stationnaires. La présence de houle est donc omise, alors que celle-ci influence directement les performances. La mise en œuvre de moyens expérimentaux pour caractériser la tenue à la mer d'un voilier navigant sur houle est difficile. En effet, les conditions de navigation à reproduire (gîte, incidence de houle, mouvements libres, amortissements dus aux efforts aérodynamiques...) nécessitent des moyens techniques importants. Le recours aux outils numériques semble donc préférable, bien qu'il subsiste un certain nombre de difficultés. En effet, la prise en compte de l'effet de vitesse d'avance reste délicate dans les modèles aujourd'hui disponibles. Les raisons sont liées aux hypothèses simplificatrices de linéarisation de la surface libre et de faibles mouvements des structures. Ces hypothèses sont rarement vérifiées pour ce type de bateau pour lesquels les houles pénalisantes sont proches du clapot (donc assez cambrées) et les mouvements suffisamment importants pour que les variations de surfaces et volumes immergés ne puissent pas être négligées.

Le code Diodore hydro a néanmoins été utilisé efficacement à la fois d'un point de vue qualitatif et quantitatif (voir [12]). A partir des conditions de houles recueillies par la société Météomer sur le site des régates (bouée Cork Endeco), une analyse des réponses au premier ordre a été effectuée. Elle a permis notamment de caractériser différents effets tels que la position du maître bau, la forme des étraves (rondes ou franches), l'influence des inerties.

La seule donnée aisément transmissible au programme de prédiction de vitesse concerne la résistance ajoutée sur houle qui a été évaluée à partir de la formulation de Lagally. Le programme de prédiction de vitesse a donc été étendu par le cabinet Bouvet/Petit pour prendre en compte les différentes conditions météorologiques fréquemment rencontrées (vent, spectre d'état de mer). Il reste que les données expérimentales sur les efforts de dérive concernant des carènes de voiliers sont insuffisantes et un effort de validation du calcul de ces efforts reste à faire.

## 3 Outils numériques qualitatifs

La caractérisation des phénomènes physiques reste nécessaire pour orienter le choix d'une forme. Dans ce cadre, les outils s'appuyant sur une modélisation assez complète des écoulements (équations

de Navier-Stokes, d'Euler, de Prandtl) sont aujourd'hui utilisables, en particulier pour le choix des formes d'appendices (quille, voile de quille, safran, ailettes). Leurs fonctionnalités sont particulièrement intéressantes lorsqu'elles permettent d'avoir accès à des données difficilement accessibles par l'expérience (étude de couche limite, comportement instationnaire...)

### 3.1 Les outils de couche limite - code 3C3D

L'utilisation d'un code de couche limite tridimensionnel tel que 3C3D [13] développé par le CERT-/ONERA constitue une bonne alternative aux essais expérimentaux pour étudier la laminarité des profils, les zones de transition, les décollements.

Une des utilisations majeure du logiciel concerne l'analyse de la couche limite autour des appendices et en particulier du bulbe. Dans ce dernier cas, une validation préalable a été effectuée autour d'un ellipsoïde en incidence à partir de résultats expérimentaux AGARD [1]. Les expériences ont été réalisées en soufflerie, à une vitesse de 55 m/s autour d'un ellipsoïde de grand axe  $2a = 2.4m$  et de petit axe  $2b = 0.4m$  placé à 10 degrés d'incidence. Le taux de turbulence était de 0.3 %. La transition laminaire-turbulent était imposée par une bande de rugosité placée en  $X/2a = 0.2$ . Des mesures ont permis de disposer des valeurs du coefficient de frottement pariétal en différentes sections de l'ellipsoïde. La précision des mesures est estimée à environ 10 %.

Du point de vue numérique, le modèle Spooq a été mis en œuvre autour de trois maillages de raffinements différents (1130, 4852 et 9605 nœuds) afin de déterminer l'écoulement de fluide parfait autour du corps. La solution de fluide parfait a été contrôlée par rapport à une solution analytique fournie par Lamb [11]. L'accord est très satisfaisant sauf au voisinage immédiat du point d'arrêt où des écarts de l'ordre de 10 % sont observés tant sur le module que sur la directionnalité du vecteur vitesse. Au delà des premiers 10 % du corps, les écarts sont de l'ordre de 1 à 2 %. Néanmoins, ce sont les valeurs de la solution analytique qui ont été retenues pour la poursuite de l'étude en couche limite, et utilisées sur les 3 différents maillages afin de tester l'influence de la discrétisation.

Les calculs avec 3C3D ont été réalisés sur un demi-ellipsoïde avec des conditions de symétries sur les frontières latérales (voir [9]). L'initialisation de la couche limite a été réalisée par une condition initiale de similitude avec point d'arrêt 3D. Les conditions d'écoulement de la soufflerie ont été partiellement reproduites (écoulement dans l'air, transition imposée), mais l'éventuel effet de confinement n'a pas été analysé. Plusieurs modèles de turbulence disponibles dans le code ont été mis en œuvre :

- 1 modèle de longueur de mélange dans toute la couche limite
- 2 modèle de longueur de mélange dans la sous-couche et modèle  $k - \epsilon$  dans la couche externe
- 3 modèle en  $k$  dans la sous-couche et modèle en  $k - \epsilon$  dans la couche externe.

Les comparaisons ont été effectuées à différentes sections de l'ellipsoïde placées dans la deuxième moitié du corps. Un exemple de résultat est reproduit sur la figure 5 et présente l'évolution du coefficient de frottement pariétal en fonction de l'angle polaire ( $\varphi = 0$  correspond à l'intrados). On observe que l'allure générale de l'évolution est bien reproduite avec 3C3D, et que le modèle de turbulence le plus complet est en meilleur accord avec les résultats expérimentaux. Compte tenu des imprécisions sur les mesures expérimentales, l'accord sur les amplitudes est satisfaisant, avec probablement une légère tendance à la sous-estimation pour les valeurs numériques.

Le logiciel a été plus particulièrement utilisé d'un point de vue qualitatif, en particulier pour étudier la laminarité des écoulements sur les appendices, mettre en évidence la présence de décollements, et effectuer un classement entre les différentes formes.

Le logiciel a permis de tester une série de profils de quille qui retenait l'attention d'un certain nombre de spécialistes lors de la précédente édition de la Coupe America. Elle consiste à définir un profil de quille équipé d'un trimmer qui offre un extrados sans rupture de pente lorsque le trimmer est braqué (voir figure 8). L'idée consiste donc à privilégier la section du profil lorsque le trimmer est braqué (navigation au près) quitte à disposer d'un profil moins performant au vent arrière. On peut ainsi se rapprocher de profils de finesse élevée tels que ceux retenus en aéronautique. Une série de profils de ce type a donc été comparée à une série de profils classiques équipés de trimmer également. L'analyse a montré que la cassure due au braquage du trimmer n'entraînait pas de décollements particuliers, ce qui s'explique par le fait que la transition est généralement placée en amont de la zone du trimmer. De ce fait, la nature turbulente de la couche limite à cet endroit la rend plus résistante au décollement.

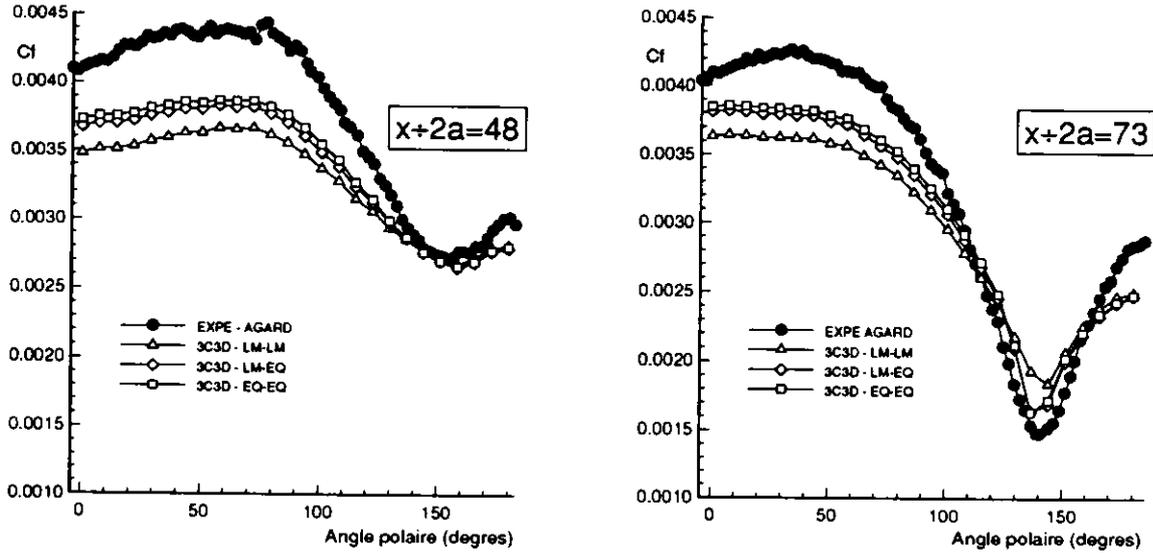


Figure 5: évolution du frottement pariétal dans les sections  $x/2a = 0.57$  et  $x/2a = 0.73$  en fonction de l'angle polaire

### 3.2 Un modèle de Vortex Discrets

La rapidité de calcul des ordinateurs permet actuellement d'accroître de façon très substantielle, la vitesse d'intégration des équations de Navier-Stokes instationnaires sous des hypothèses finalement assez peu restrictives. Par exemple, pour modéliser un écoulement sub-critique autour d'une section droite d'un corps de grand allongement, le faible coût informatique des méthodes dites Mixtes Euler-Lagrange les désigne très naturellement pour rendre compte des propriétés non seulement globales mais surtout locales de l'écoulement.

Ce principe est mis en œuvre dans le modèle Aquavic (voir [20] et [19]) mis au point à l'Université de Trondheim (Norvège) et actuellement développé à Principia. C'est un programme qui couple:

- une résolution eulérienne du transport de vorticité sous l'effet de la convection: c'est la Méthode Vortex-In-Cell (voir [7]),
- une méthode de marche aléatoire (Random Walk) qui modélise la diffusion de la vorticité dans le fluide (voir [4]).

Le couplage est mis en œuvre grâce à la technique de séparation des opérateurs (Operator Splitting) appliquée à l'équation de Navier-Stokes instationnaire. Le problème est formulé à l'aide des fonctions courant ( $\psi$ ) et vorticité ( $\omega$ ) qui, dans la limite des écoulements plans, sont des fonctions scalaires. Deux équations régissent la cinématique du fluide:

$$\Delta\psi = -\omega \quad (9)$$

$$\frac{\partial\omega}{\partial t} + \vec{u} \cdot \vec{\nabla}\omega = \nu\Delta\omega \quad (10)$$

où  $\vec{u}$  est le champ de vitesse et  $\nu$  la viscosité cinématique. Le champ de vorticité est discrétisé à l'aide d'un nuage de vortex que l'on déplace sous l'effet combiné de la convection et de la diffusion; ce champ peut s'écrire:

$$\omega(x, y) = \sum_{l=1}^{N_v} \delta(x - x_l)\delta(y - y_l)\Gamma_l \quad \text{où} \quad \delta \equiv \text{fonction Dirac} \quad (11)$$

où  $\Gamma_l$  et  $(x_l, y_l)$  sont la circulation et la position lagrangienne d'un vortex dans le fluide. Leur nombre  $N_v$  varie au cours du temps; il dépend essentiellement du nombre de Reynolds et du type d'écoulement.

Toujours afin de profiter de l'hypothèse d'écoulements plans, des transformations conformes élargissent considérablement le champ d'application du modèle. Actuellement les formes que peut gérer le code varient du cercle (le cas le plus simple) à des profils allongés présentant ou non des angles vifs. Les transformations les plus couramment utilisées sont celles de Karmann-Trefftz (voir [14]) qui "enlèvent" les coins ou celles de Theodorsen-Garrick (voir [22]) qui transforment un contour presque circulaire en un cercle parfait. Ce sont précisément ces transformations qui ont été mises en œuvre ici.

Que ce soit pour le voile de quille, le safran ou les ailettes du bulbe, il s'agit de volumes ayant une grande dimension par rapport aux deux autres. L'hypothèse du modèle bidimensionnel ne se justifie que si les effets de bord ne sont pas trop importants.

Pratiquement, Aquavic a permis de mener une étude paramétrique autour de plusieurs données relatives à la géométrie et à l'écoulement comme par exemple: l'épaisseur du profil, la position de l'axe de rotation du trimmer ou encore l'incidence du courant uniforme. Les résultats obtenus -d'ordre plutôt qualitatifs- ont permis de rendre compte de l'efficacité relative des différents profils proposés initialement par les architectes. Les critères d'efficacité sont en l'occurrence liés à la présence ou non de décrochement tourbillonnaire et bien évidemment au rapport entre la traînée et la portance. Les paramètres d'écoulement retenus correspondent à un régime laminaire: à savoir que le nombre de Reynolds reste inférieur à  $Re = \frac{UL}{\nu} = 10^5$  où  $U$  est la vitesse de l'écoulement non perturbé et  $L$  la corde du profil.

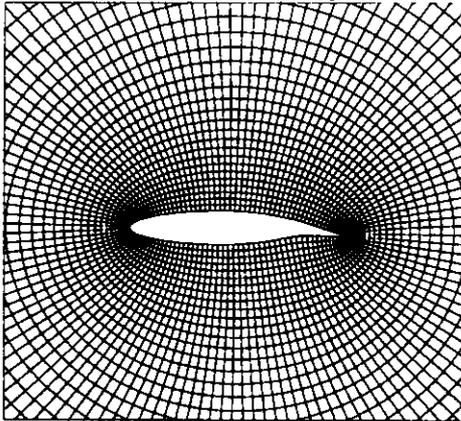


Figure 6 : Maillage autour d'un profil muni d'un trimmer généré par transformation conforme

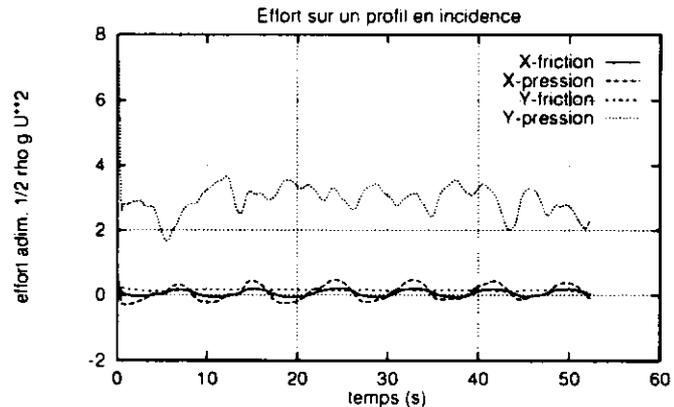


Figure 7 : Signaux temporels des efforts (effets de la friction et de la pression) sur un profil placé dans un écoulement uniforme à incidence de  $4.5^\circ$

La figure (6) montre un maillage type du domaine de calcul. Le raffinement du maillage au voisinage du corps doit tenir compte des effets de couche limite dont l'épaisseur varie approximativement comme  $\frac{1}{\sqrt{Re}}$  en régime laminaire. On note aussi que la taille de maille variable sur le pourtour est l'un des "bons" effets des transformations conformes. On sait, effectivement, que ces transformations géométriques concentrent "naturellement" le maillage aux changements rapides de courbure: c'est le cas aux bords de fuite et d'attaque.

La figure (7) montre les signaux temporels des deux composantes des efforts qui s'exercent sur le profil. On distingue l'effort lié à la pression (contrainte normale) et l'effort lié à la friction (contrainte tangentielle). La moyenne temporelle ainsi qu'un écart type peuvent être calculés pour chaque effort dès que le régime d'écoulement est établi. Il faut noter que les oscillations de l'effort transversal rendent compte des détachements tourbillonnaires dans le sillage. Des simulations ont donc pu être menées de façon systématique afin de mettre en évidence l'influence des paramètres sur les différents efforts.

L'effort n'est qu'une propriété globale de l'écoulement. Il s'avère, en fait, nécessaire d'examiner localement la cinématique ambiante. On s'est intéressé ici, à étudier l'évolution temporelle des points de décollement des gros tourbillons. On sait, en effet, que ce phénomène affecte considérablement l'efficacité d'un profil et que c'est l'incidence qui en est la cause. Une simple simulation accompagnée

d'une visualisation de l'écoulement permet, pour chaque cas traité, de comparer qualitativement les profils selon que se forment ou non des tourbillons. La figure (8) illustre cette étude. Il s'agit

*AQUAVIC (Software)*

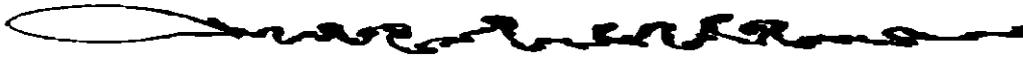


Figure 8: Sillage derrière un profil placé dans un écoulement uniforme à incidence de  $4.5^\circ$  par rapport à la direction des  $x$ .

des trajectoires de convection des vortex discrets sur un pas de temps.

Il convient de noter que les résultats obtenus sont relatifs aux écoulements laminaires alors que la physique imposerait des hypothèses de régime turbulent. C'est là une approximation que l'on peut admettre dans le cadre du modèle de vortex discrets. En effet les expériences menées sur la représentation des contraintes de Reynolds mettent en œuvre un modèle de longueur de mélange de type Baldwin-Lomax (voir [21]). Pratiquement, les champs de vitesse et vorticité sont véritablement affectés dans le voisinage immédiat du corps. Loin du corps dans le sillage, où la diffusion n'est pas proprement modélisée, la cinématique n'est guère modifiée par les hypothèses sur le régime d'écoulement. Le développement d'un modèle turbulent, propre aux méthodes de vortex discrets, reste de toute façon un problème ouvert.

Les perspectives qu'offre un modèle comme Aquavic sont multiples. Dans le cadre de cette étude, seules quelques fonctionnalités du code ont été vraiment exploitées. En effet, les profils n'ont été étudiés que dans des écoulements uniformes. Hors dans la réalité les appendices sont soumis à des cinématiques beaucoup plus complexes. C'est le cas, par exemple, de la combinaison d'un courant, de la houle et du mouvement propre du navire. En outre, il est possible de modifier l'orientation instantanée du trimmer. Finalement, un modèle instationnaire comme Aquavic, peut rendre compte des phénomènes qui se produisent lors d'un virement de bord. La simulation directe et l'optimisation des commandes des appendices sont donc désormais possibles.

Il semble aussi raisonnable d'envisager un couplage de deux modèles:

- un programme tridimensionnel de tenue à la mer qui fournirait la cinématique ambiante,
- un modèle de fluide réel rapide qui tiendrait compte des effets de l'écoulement détaché (couche limite et sillage).

C'est là un développement qui, de part son coût réduit d'utilisation, offre une alternative intéressante aux codes tridimensionnels de résolution des équations de Navier-Stokes instationnaires.

### 3.3 Les modèles tridimensionnels s'appuyant sur les équations de Navier-Stokes

La prise en compte des effets de surface libre dans un modèle s'appuyant sur les équations de Navier-Stokes tridimensionnelles reste à ce jour du domaine de la recherche. Néanmoins l'outil Navier-Stokes peut être raisonnablement utilisé pour les parties les plus immergées que sont les appendices, pour lesquels les effets de surface libre sont pris en compte par une condition de symétrie. Le logiciel Thétis (ex Diodore - CFD) est basé sur une méthode de pseudo-compressibilité. Un schéma de type volumes finis centrés en espace, est utilisé conjointement avec une viscosité artificielle du 2<sup>ème</sup> et 4<sup>ème</sup> ordre. Les équations d'Euler ou de Navier-Stokes sont résolues en multidomaines pour des

écoulements stationnaires ou instationnaires avec un schéma totalement implicite en temps. Les modèles de turbulence disponibles dans le code sont de type Baldwin Lomax ou  $k - \epsilon$  (voir [2]). Le maillage de formes complexes représente généralement une part importante du temps d'étude. La diversité des configurations à étudier nous a poussé à développer un maillage surfacique d'appendices baptisé Inter. Il permet de générer des maillages surfaciques structurés ou non à partir de données CAO ou de définitions analytiques, qui sont alors utilisées dans les logiciels Spqoq et 3C3D. Les maillages surfaciques constituent également une entrée de maillages industriels qui restent incontournables pour réaliser des maillages volumiques structurés par blocs. La taille des maillages retenus varie de 60 000 nœuds pour des bulbes seuls, à 140 000 nœuds pour des ensembles quille - trimmer - bulbe.

Des calculs d'écoulements stationnaires sur des bulbes seuls à l'aide des équations d'Euler ont permis de cerner la précision des modèles et en particulier d'améliorer la qualité des résultats en jouant sur le maillage (voir [3],[6]). Par la suite, un voile de quille avec trimmer a été rajouté pour tester les résultats sur les effets de portance (voir figure 9). Le gain de précision ne peut servir à justifier l'utilisation d'un modèle de ce type comparativement à un modèle comme Spqoq d'autant plus que le rapport des temps CPU est de l'ordre de 30. Par contre, certaines données comme que le champ de vorticités s'avèrent intéressantes pour la caractérisation des formes.

L'étude du comportement instationnaire de l'écoulement sur les appendices (navigation sur houle) peut également justifier l'utilisation d'un logiciel de ce type. Un bulbe seul a ainsi été soumis à un mouvement couplé de pilonnement et de tangage. On a ainsi pu mettre en évidence le détachement de tourbillons au voisinage de l'extrémité arrière et modifier la forme en conséquence.

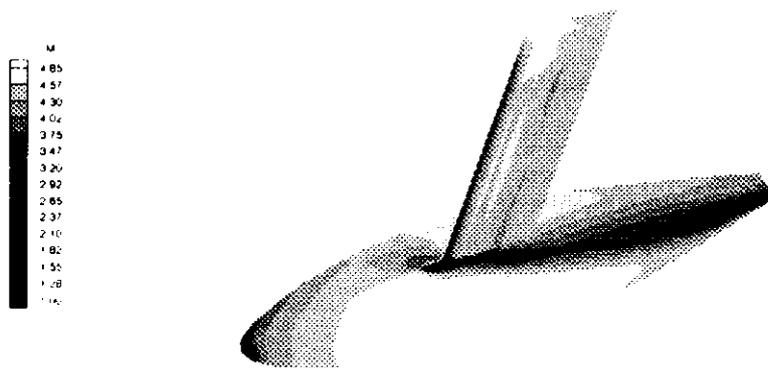


Figure 9: Champ de vitesse autour d'un appendice en écoulement stationnaire (logiciel Thétis). Modèle Euler

## 4 Conclusion

La présentation de quelques outils de prédiction numériques montre qu'ils complètent avantageusement les moyens expérimentaux utilisés pour l'étude et l'optimisation des voiliers de compétition. L'évolution constante des puissances informatiques disponibles et des algorithmes de calcul permet d'apporter des réponses aux questions que se posent les architectes dans des délais extrêmement courts (quelques jours, voire quelques heures) comparés aux délais nécessaires pour une caractérisation expérimentale.

## References

- [1] **AGARD** "Calculation of 3D separated turbulent flows in boundary layer limit", Report of the fluid dynamic panel working group 10, AGARD Advisory Report 255, 1990.
- [2] **C. Calm - de Jouët** "Développement d'une méthode de pseudo-compressibilité pour le calcul des écoulements de fluide incompressible - Applications aux écoulements instationnaires en présence d'une surface libre." Thèse de l'université de Nice, déc 1994.
- [3] **A. Chabod** "Etude d'appendices de voiliers de type coupe America à l'aide du code de mécanique des fluides Diodore CFD" rapport de stage Principia, juillet 1994.

- [4] **A.J. Chorin** , "Numerical study of slightly viscous flow.", *J. Fluid Mech.*, Vol. 57, part 4, pp. 785-796, 1973.
- [5] **T. Coudray, C. de Jouët, O. Put**, "Contributions des appendices à la résistance de vagues des carènes de type IACC. Etude en gîte et dérive", *Rapport Principia RET45.468.01*, Avril 1994.
- [6] **T. Coudray, E.A. Ogden, L. Bouvet et B. Nivel**, "A french Challenge for the 1995's America's Cup", 13th Symposium on Yacht Design and Yacht Construction, Amsterdam Nov 1994.
- [7] **J.P. Christiansen** , "Numerical simulation of hydrodynamics by the method of point vortices.", *J. Comp. Physics* 13, pp. 363-379, 1973.
- [8] **G. Delhommeau**, "Computation of nonlinear wave and wave resistance" 7ième Workshop on Water Waves and Floating Bodies, Val de Reuil, mai 1992.
- [9] **J.M. Gaillard**, "Calculs de couche limite 3D stationnaire autour d'appendices de voiliers de type class America", rapport de stage Principia, juin 1994.
- [10] **Y. Guido et J.C. Aguilar**, "Extension du modèle Spooq au cas des profils minces. Applications aux voiles" rapport d'étude Principia/A.A.N/I.N.L.N, novembre 1994.
- [11] **Sir Horace Lamb**, "Hydrodynamics", Dover publication, Inc. New York, 1932.
- [12] **P. Le Bihan, et E. Chaumeton**, "Etude comparative de la tenue à la mer de carènes de type IACC", rapport d'étude pour France America's Cup Technologies, Avril 1994.
- [13] **R. Houdeville et P. Malecki**, "Calculs de couches limites tridimensionnelles - Description et mode d'emploi du code 3C3D - Version 5.1" Rapport technique de CERT/DERAT 54/5625.47. Novembre 1993.
- [14] **Y. Lecoq et J. Piquet** , "Compact finite-difference methods for solving incompressible Navier-Stokes equations around oscillating bodies", *Lecture Series* 1985-04, Von Karman Institute for Fluid Dynamics, 1985
- [15] **J.J. Maisonneuve**, "Résolution du problème de la résistance de vagues des navires par une méthode de singularités de Rankine". Thèse de doctorat de l'Ecole Nationale Supérieure de Mécanique de Nantes, décembre 1989.
- [16] **F. Mazzouji**, "Contribution à l'étude des écoulements stationnaires et instationnaires autour des voiles de navires", thèse de l'université de Poitiers, mars 1992.
- [17] **S. Recher** "Etude d'appendices de voiliers de type Coupe America à l'aide d'un modèle fluide parfait avec nappe tourbillonnaire", rapport d'étude Principia, septembre 1994.
- [18] **C. Verbeke et P. Bailleux**, "Caractérisation en soufflerie d'une quille de voilier", *Rapport IMFL* pour le compte de France America's Cup Technologies, mars 1994.
- [19] **Y.M. Scolan, et H. Le Ny** "Viscous Flow Visualisation Around Cylinders of Arbitrary Shape by a vortex method", conférence CADMO, Southampton, Septembre 1994.
- [20] **Y.-M. Scolan et O.M. Faltinsen** , "Numerical prediction of viscous flows around multi-bodies by a Vortex Method.", 6<sup>th</sup> International Conference on Numerical Ship Hydrodynamics, Iowa, USA., 1993.
- [21] **P.A. Smith et P.K. Stansby** , "Postcritical flow around a circular cylinder by the vortex method.", *J. Fluids and Structures*, Vol. 3, pp 275-291, 1989.
- [22] **A. Suddho** , "Inviscid compressible flow past multi-element airfoils", PhD thesis of the University of Manchester, 1985