

9<sup>èmes</sup> JOURNÉES DE L'HYDRODYNAMIQUE

10 - 11 - 12 MARS 2003

POITIERS - FUTUROSCOPE

## MODELISATION NUMERIQUE ET OPTIMISATION D'UN VIREMENT DE BORD

*NUMERICAL SIMULATION AND OPTIMIZATION OF A TACK*

G. GERMAIN\*, S. HUBERSON\*\*

\* IFREMER, Centre de Boulogne, 150 Quai Gambetta, BP699 62321 Boulogne Cedex

\*\* Laboratoire de Mécanique, Université du Havre, 25 Rue Philippe Lebon, BP540, 76058  
Le Havre Cedex

### Résumé

On étudie le comportement des voiles d'un bateau pendant un virement de bord. Le problème est décomposé en trois étapes : le bateau naviguant sous une amure donnée avec l'écoute sous tension pour la première, le virement pendant lequel la tension de l'écoute est complètement relâchée pour la deuxième, enfin la reprise de contrôle et le rétablissement de la marche du bateau sous l'autre amure. Le problème est étudié dans une configuration plane et les effets de la viscosité du fluide ne sont pris en compte qu'au voisinage des points de décollement. Pour se faire, un modèle de membrane élastique pour représenter la voile est utilisé. Le problème se ramène alors à une équation intégrale de frontière sur la voile avec un second membre représentant le sillage. L'influence de différents paramètres physiques : masse et dimension de la voile, vitesse du vent, ou caractérisant la conduite du bateau : trajectoire pendant le virement de bord, tension des écoutes, est analysée.

### Abstract

The flow around boat sails during a tack has been investigated. The problem has been split in three parts : the boat is steadily sailing windward, the second stage when the sail is free from any control and the optimization of the acceleration after the tack ending when the yacht is steadily running again. It has been supposed that the viscosity does not affects the flow except possibly in the vicinity of separation points. Another simplifying assumption was that only two-dimensional flows were considered. The sails has been represented by means of an elastic membrane yielding a boundary integral formulation of the problem which included the wake effect as a right hand side. The roles of the different physical parameters involved : wind speed, sails dimension and mass as well as the definition of the tack : trajectory, sheet tension have been investigated.

# 1 Introduction

L'objectif de ce travail est l'étude du comportement d'une voile de bateau au cours d'un virement de bord. Cette manœuvre est particulièrement importante pour plusieurs raisons. Un bateau remontant au vent suit une route dont les virements de bord constituent un élément essentiel. Chacun de ceux-ci correspond à une perte de vitesse et surtout à une dérive dans la direction du vent, c'est à dire une perte directe de gain au vent. La faculté du bateau à reprendre sa route rapidement après un virement de bord repose sur différents éléments dont la capacité des voiles à fournir rapidement une force propulsive après la remise sous tension de l'écoute. Ce problème est aujourd'hui un élément critique dans les courses dites de match racing dont la forme la plus connue est peut être la coupe de l'America.

L'aptitude d'un bateau à voile au virement de bord est également crucial pour la sécurité d'un bateau devant se dégager d'une côte contre le vent, surtout lorsqu'il ne dispose que d'une étendue d'eau limitée, par exemple par des massifs de roches ou simplement par la profondeur. Cette situation a été celle des bateaux de sauvetage avant le développement de la propulsion mécanique et reste essentielle de nos jours pour tout type de bateau voile.

Un dernier problème lié au virement de bord est l'usure des voiles. L'expérience des voiliers indique que c'est pendant ces manoeuvres qu'une voile s'use le plus. Il existe au moins deux causes possibles à cette usure : le fassèlement lorsque la voile se comporte un peu comme un drapeau car les rayons de courbures locaux sont fortement diminués et varient rapidement et la reprise de tension lorsque la nouvelle route est établie. Les efforts subis par la voile dans ce dernier cas dépassent la valeur atteinte en route normale d'un facteur complètement déterminé par les conditions de manœuvre.

La modélisation de ce problème est particulièrement difficile car les phénomènes d'interaction voile/carène y sont encore plus complexes que dans la plupart des conditions de navigation : la perturbation du vent apparent sur la voile par les mouvements du bateau peut représenter une part supérieure à celle du vent réel d'un facteur excédant largement deux. De plus, la forme de la voile se trouve libre pendant une partie non négligeable de la manœuvre avant que la tension de l'écoute ne vienne à nouveau la contrôler sous la nouvelle amure (figures 1 et 3).

Nous n'étudions pas ici le problème dans sa globalité et deux hypothèses fortement simplificatrices sont introduites :

- l'écoulement autour de la voile à une section donnée est supposé convenablement approché par un écoulement plan de fluide parfait rotationnel, c'est à dire un écoulement dans lequel on aura limité le rôle de la viscosité aux régions entourant les points de décollement,
- le problème sera considéré du point de vue de la voile, c'est à dire que les mouvements du bateau seront, à ce stade, considérés comme une donnée du problème aérodynamique caractérisée par quelques paramètres décrits sur la figure 2, alors que les réglages de la voile seront libres.

Compte tenu de ces hypothèses, la décomposition d'un virement de bord fait apparaître deux problèmes particuliers sur lesquels nous concentrons notre attention : le problème du drapeau lorsque la voile, libérée de la tension de l'écoute, bat dans le vent, et le problème de la reprise de contrôle lorsque la tension de l'écoute est rétablie. Ces deux problèmes sont ici étudiés séparément après quoi nous aborderons l'étude d'un virement de bord complet. Le modèle numérique est rapidement présenté dans la section suivante.

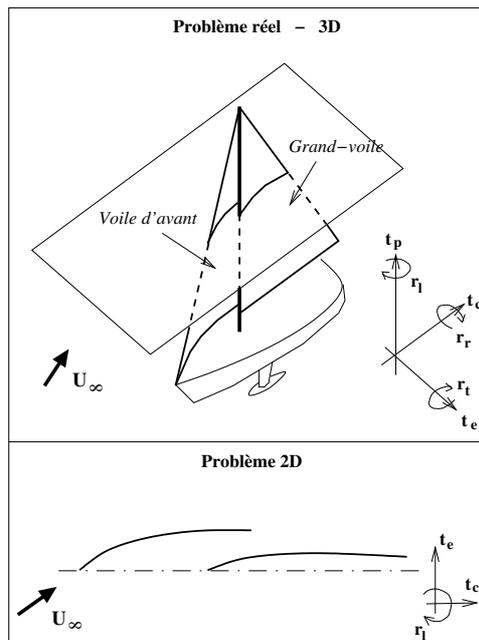


Figure 1 : Géométrie de la voilure d'un bateau (gréement de sloop)

## 2 Modélisation numérique

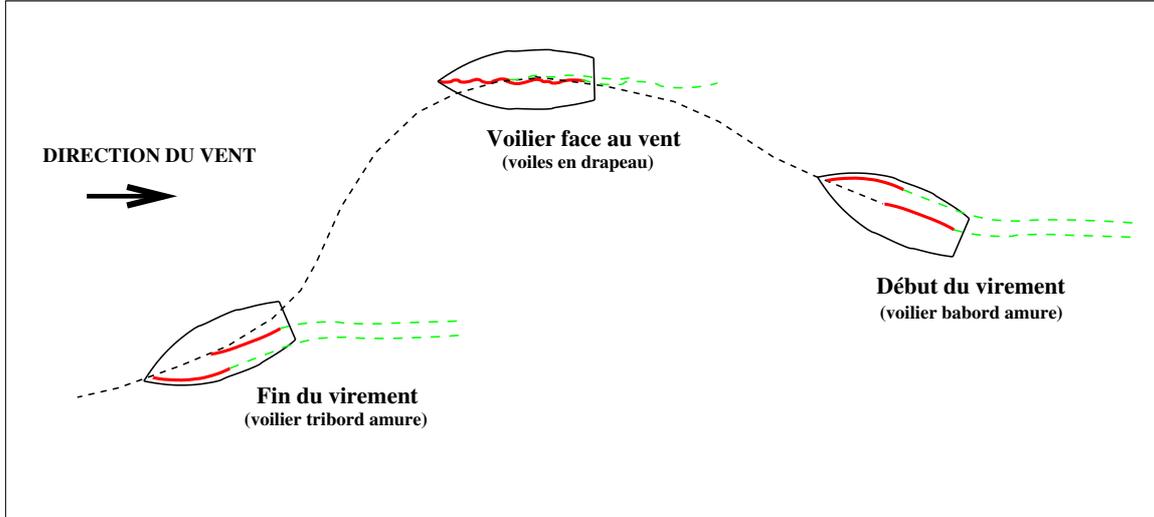
Nous avons utilisé un code de résolution du problème d'interaction fluide structure utilisant une méthode de discrétisation par éléments finis pour la membrane élastique représentant la voile, et un code aérodynamique utilisant une méthode intégrale de frontière pour modéliser la voile elle-même et une méthode particulière pour représenter son sillage tourbillonnaire. Les différents paramètres géométriques sont illustrés sur la figure 3

En considérant la voile comme étant une structure mince de masse non nulle, idéalement flexible (résistance à la flexion nulle), de raideur  $K$ , on peut représenter son comportement à l'aide d'un modèle de fil en grand déplacement pour le problème élastique. L'écoulement autour de la voile est, comme nous l'avons dit plus haut, non visqueux, sauf au voisinage des points de décollement. Cette modélisation permet d'écrire la formulation variationnelle du problème d'interaction entre la structure et l'écoulement :

$$\int_0^L \left[ \left( \int_0^l \frac{d\gamma}{dt} dl' \right) \mathbf{n} + \rho \gamma \mathbf{k} \wedge \mathbf{U}(\mathbf{x}) + \mathbf{t}(l) \cdot \partial l + \rho_s \frac{d^2 \mathbf{x}}{dt^2} \right] \cdot \mathbf{V} dl = 0 \quad \forall V \in \mathbf{V} \quad (1)$$

où  $\mathbf{V}$  est l'ensemble des vitesses virtuelles admissibles, définies sur la surface de la structure. Dans le cas d'un problème stationnaire, ces vitesses s'annulent aux extrémités de la voile notées  $\mathbf{x} = 0$  pour le bord d'attaque et  $\mathbf{x} = L$  pour le bord de fuite. Dans le cas que nous étudions ici, la vitesse en ce dernier point n'est pas nécessairement nulle. Dans cette équation variationnelle, on reconnaît successivement les puissances virtuelles des efforts de pression (deux premiers termes), des tensions élastiques et des efforts d'inertie.

L'équation variationnelle (1) est une intégrale sur le domaine solide dans laquelle la contribution du sillage est uniquement prise en compte dans le champ de vitesse de l'écoulement  $\mathbf{U}$  sur la surface de la voile. Ce champ de vitesse dans l'écoulement est la somme du champ de vitesse de l'écoulement incident non perturbé  $U_\infty$  et des champs de vitesse induits par la voile et son sillage, représentés respectivement à l'aide de deux nappes tourbillonnaires,



**Figure 2 :** Positions relatives du bateau et des voiles pendant un virement de bord

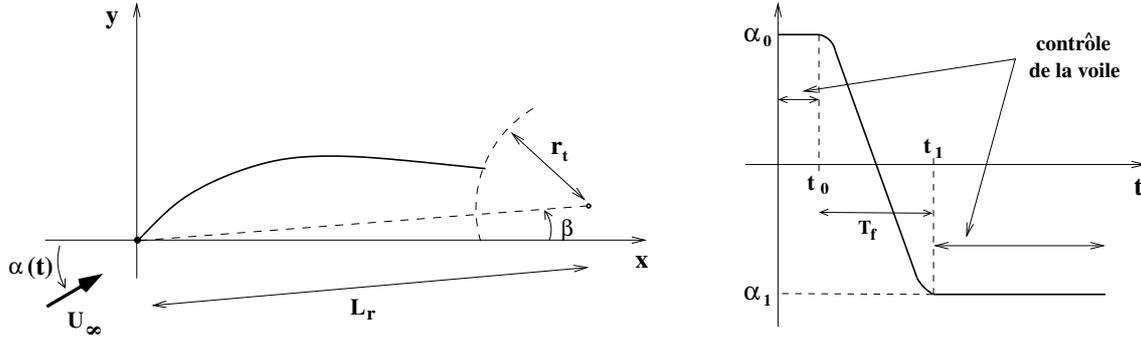
l'une liée à la structure, comportant une densité de circulation  $\gamma(l)$ , et l'autre libre portant une densité de circulation  $\Gamma(l)$  pour le sillage. Cette formulation du problème sur les frontières de l'écoulement permet de ne pas avoir à discrétiser le domaine fluide en entier, et l'approximation particulière du sillage permet de traiter naturellement les processus instationnaires et les cas de fortes interactions entre les nappes [1]. Seule la structure est ici discrétisée en  $N_e$  segments d'égale longueur, supportant une tension uniforme et une distribution linéaire de densité de circulation. Une discrétisation ordonnée permet de discrétiser dans le temps la cinématique de l'obstacle (l'équation variationnelle) à l'aide d'un schéma d'Euler implicite d'ordre 1.

La modélisation du réglage de la voile (l'écoute, système qui permet de modifier l'allure générale de la voile en astreignant la position du bord de fuite) par l'introduction d'un élément de très grande raideur au bord de fuite de la structure (équivalent au point d'écoute) pénalise le calcul de déformation du système, le coefficient de relaxation pour la mise en équilibre devant alors être faible. L'élasticité de l'écoute pouvant être négligée, on choisit, pour sa modélisation numérique, de contrôler la position du bord de fuite qui minimise l'équation variationnelle (1). Pour cela, on impose une distance maximale entre le point d'écoute (le bord de fuite) et le point de tire de l'écoute de la voile (on suppose donc ici que l'écoute a une limite élastique et est idéalement flexible). Cette modélisation permet de modifier en module et en direction l'effort extérieur appliqué sur la structure, sans pour autant bloquer le déplacement de l'extrémité aval de la membrane.

Le résidu de l'équation variationnelle, correspondant à cette liberté de mouvement, est donné par la projection, selon la tangente au cercle centré sur le point de tire et de rayon égal à la longueur d'écoute, de l'effort de déséquilibre. Des conditions de non glissement et de non pénétration de l'écoulement sur la structure sont également imposées. L'ensemble de ces conditions aux limites imposées à la voile (bord d'attaque fixe et déplacement du bord de fuite régi par le système de réglage) permettent de simuler un virement de bord

L'adimensionnalisation du problème, avec respectivement  $L$ ,  $U_\infty$  et  $M = \rho_s L^3$  les longueur, vitesse et masse caractéristiques, fait apparaître deux paramètres caractérisant la dynamique du système :

$$P_S = \frac{K}{\frac{1}{2}\rho L U_\infty}, \quad \text{et} \quad I = \frac{\rho_s}{\rho L} \quad (2)$$



**Figure 3 :** Définition géométrique de la structure et du système de réglage (à gauche), et de la variation de l'angle d'incidence pour un virement de bord (à droite)

Le paramètre d'élasticité  $P_S$  compare la tension élastique dans la voile à l'effort caractéristique dans le fluide. Ce paramètre étant fonction de la vitesse de l'écoulement incident  $U_\infty$ , qui dépend des conditions météorologiques, il peut prendre des valeurs comprises dans un grand intervalle :  $P_S \approx 50$  correspond à une situation où le chargement aérodynamique est important relativement à la raideur à l'allongement (vent fort  $> 30 \text{ m.s}^{-1}$ ) et  $P_S \rightarrow \infty$  correspond au cas d'un matériau inextensible (vent léger). Le paramètre d'inertie  $I$  compare quant à lui les efforts d'inertie de la structure aux efforts d'inertie dans le fluide. Pour une voile,  $I$  peut prendre des valeurs comprises entre 0 (tissus légers ou voile de grande surface) et 0.5 (tissus lourds ou voile de faible surface). Lorsque  $I$  est très petit, les effets d'inertie de la voile sont négligeables devant les autres efforts, et la voile s'adapte sans retard à l'écoulement [5].

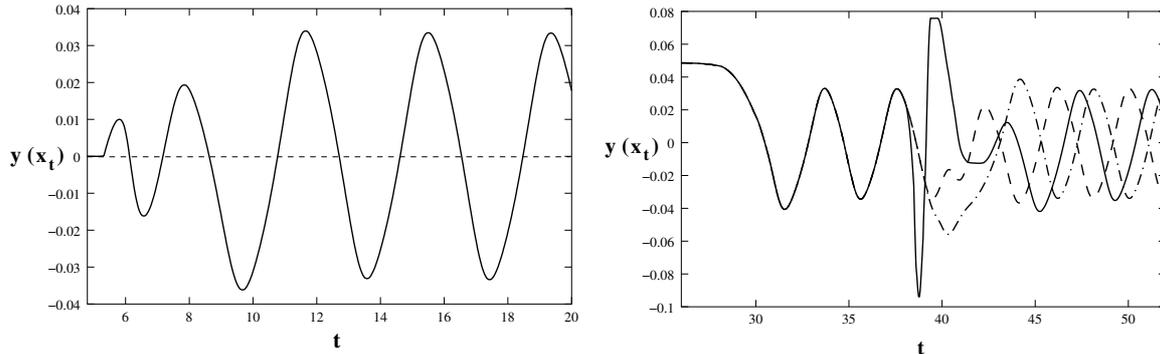
Enfin, la position du point de tire de l'écoute est définie par  $\beta$  et  $L_r$  (représentés sur la figure 3). On note  $r_t$  la longueur d'écoute adimensionnelle.

### 3 Le problème du drapeau

Le problème se présente de la façon suivante : la voile est tenue dans un courant initialement uniforme à l'une de ses extrémité par un point fixe. L'autre extrémité est libre de contrainte. En l'absence de perturbation, une voile initialement alignée avec le vent y restera. Cette solution est cependant généralement instable et une légère perturbation abouti à la mise en mouvement de la voile qui est alors parcourue par une onde instationnaire selon le mouvement familier d'un drapeau. Dans le cas d'un virement de bord, la voile est toujours perturbée puisque le bateau est en mouvement de rotation et on ne peut observer que le deuxième type de solution. Dans l'étude présentée ici, nous nous sommes intéressés à la caractérisation de l'onde de déformation de la voile et à la relation de ses propriétés avec d'une part les caractéristiques de la voile elle-même, d'autre part le type de la perturbation qui lui est initialement imposée. Le premier problème est illustré par la figure 4 où les mouvements du bord de fuite pour différentes valeurs des paramètres de masse et de longueur sont représentés.

Pour simplifier le problème, l'ensemble des résultats présentés ont été obtenus pour une configuration de réglage sans déplacement du point fixe auquel l'écoute est attachée. Le point de tire sera par conséquent situé sur l'axe du bateau en  $x$  ( $\beta = 0$ ), à une distance  $L_r = L + 0.3$  du bord d'attaque de la voile ( $r_t = 0.31$ ). Pour  $P_S = 500$ , cette phase de fonctionnement est obtenue pour  $|\alpha| < 1.7 \text{ deg}$ . En effet, pour  $|\alpha| \geq 1.7 \text{ deg}$  la structure est stable, le chargement aérodynamique étant suffisamment important pour "tendre" l'écoute. En se plaçant dans le cas où la voile se comporte comme un drapeau, c'est-à-

dire une voile initialement plane, parallèle au vent, et perturbée à un instant donné (ici à  $t = 5$ ), on remarque (figure 4 gauche) que la structure se met immédiatement en mouvement, avec une fréquence et une amplitude d'oscillation constantes (pour les paramètres  $I = 0.3$ ,  $P_S = 500$ ,  $r_t = 0.33$  et  $L_r = 0.3$ ). La dépendance des solutions périodiques obtenues par rapport à la perturbation génératrice est étudiée sur la figure 3 à droite où on a représenté l'évolution de la position du bord de fuite au court du temps pour plusieurs perturbations de la solution obtenue pour  $I = 0.3$  et  $P_S = 500$ . On remarque que, quelle que soit la perturbation imposée à la structure, les effets de celle-ci sont rapidement amortis et "oubliés", ce qui indique que les caractéristiques des différentes solutions obtenues, amplitude et fréquence, sont intrinsèques au problème.

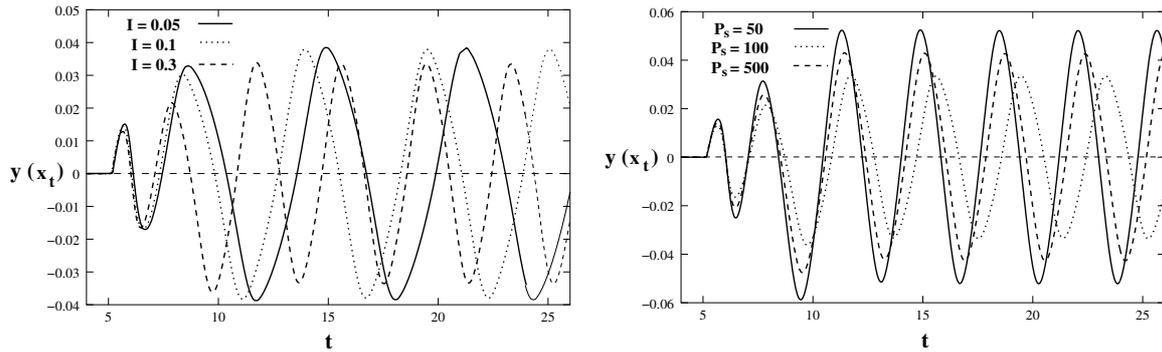


**Figure 4 :** Evolution temporelle de  $x_t$  pour une voile initialement plane (à gauche), et une perturbation de 4deg sur un temps de 1 et 2 respectivement à  $t = 40$  et  $t = 39$ , et une perturbation de 8deg sur un temps de 1 à  $t = 38$  (à droite)

Le caractère instable de la structure pour un positionnement initial sans forme imposée *a priori*, avec un angle d'incidence de 0 deg est mis en évidence par la figure 5, où l'évolution de la position du bord de fuite pour différentes valeurs des paramètres d'inertie  $I$  et d'élasticité  $P_S$  de la membrane a été représentée. On remarque qu'après un temps  $T_i$ , la structure se met à osciller de manière régulière, en se comportant comme un drapeau. La fréquence de ces oscillations augmente avec l'inertie de la structure. En fixant  $I = 0.3$  et en faisant varier le paramètre élastique  $P_S$  de la voile, on voit également (figure 5 droite) que l'augmentation de la charge aérodynamique sur la membrane avec une inertie relative constante favorise l'excitation de la structure : les amplitudes et les fréquences d'oscillation du mouvement sont de plus en plus élevées, alors que  $T_i$  est de plus en plus faible. Un phénomène similaire a été observé dans [2], lors de l'étude de la réponse d'un système de deux voiles soumis à des perturbations stochastiques de l'écoulement incident.

## 4 La reprise du contrôle

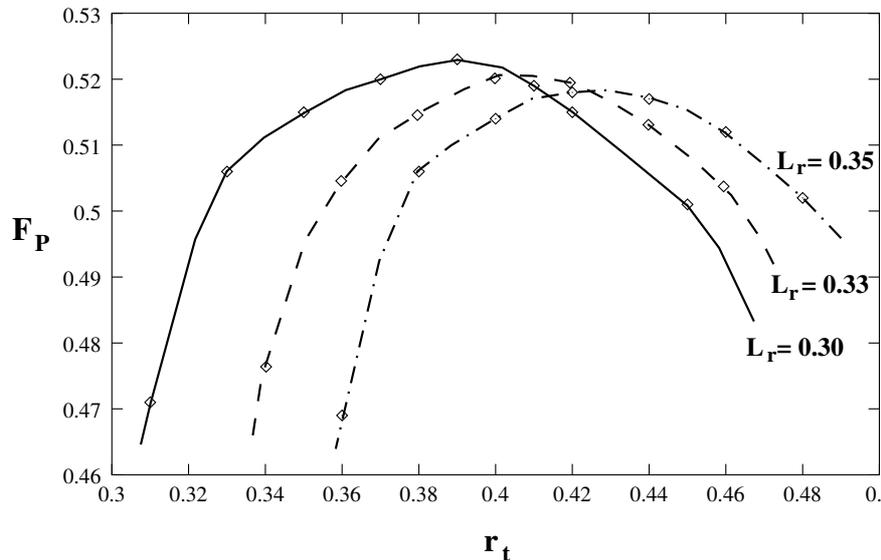
Le problème de la reprise du contrôle est celui correspondant à la fin du virement de bord lorsque la voile est établie après changement d'amure et que les intrados et extrados ont échangé leur rôle. L'optimisation de la force propulsive peut avoir plusieurs objectifs liés aux différents problèmes présentés dans l'introduction. Pour la compétition aussi bien que pour la sécurité, on cherche à améliorer la position du bateau dans le vent à un temps donné après le virement de bord. La trajectoire, comme nous l'avons dit plus haut, est supposée donnée et on essaie d'adapter la remise sous tension de l'écoute dans la période dite de relance pendant laquelle la voile travaille sous une incidence *a priori* plus élevée pour obtenir le meilleur résultat possible. Un autre objectif peut être de minimiser la surcharge de la voile au cours du virement de bord. La trajectoire dans ce dernier cas est



**Figure 5 :** Evolution temporelle de  $x_t$  en fonction de  $I$  (à gauche),  $P_S = 500$ , et de  $P_S$  (à droite),  $I = 0.3$

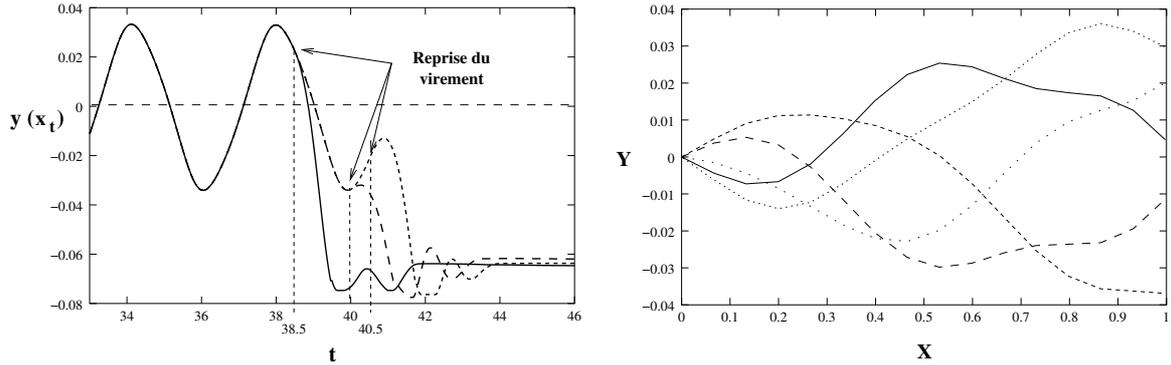
encore considérée comme une donnée du problème.

La figure 6 présente un exemple de l'évolution de la force propulsive en fonction de différentes longueurs d'écoute. La variation des maxima montre à quel point il est nécessaire de développer un système d'optimisation permettant la recherche des points de fonctionnement suivant les conditions extérieures rencontrées ([5]).



**Figure 6 :** Exemple d'évolution temporelle de la force propulsive au cours d'un virement de bord

Pour ces calculs, on utilise pour condition initiale l'un des cas de la section précédente obtenu pour  $I = 0.3$  et  $P_S = 500$ . Pour cela, on a représenté, figure 7 gauche, l'évolution de la position du bord de fuite de la structure en fonction du temps pour différents instants de reprise du virement de bord (aux instants  $t = 38.5, 40$  et  $t = 40.5$ , on impose une évolution linéaire à l'angle d'incidence de  $0$  à  $-20$  deg). La réponse de la voile est ici très sensible à l'inertie de mouvement de la structure en drapeau (figure 7 droite). On voit donc ici la nécessité de prendre en compte la masse de la voile pendant le virement de bord pour adapter le déplacement du bateau, afin de réaliser un virement dont la durée pour la reprise de vitesse et de direction du bateau sera la plus courte possible.



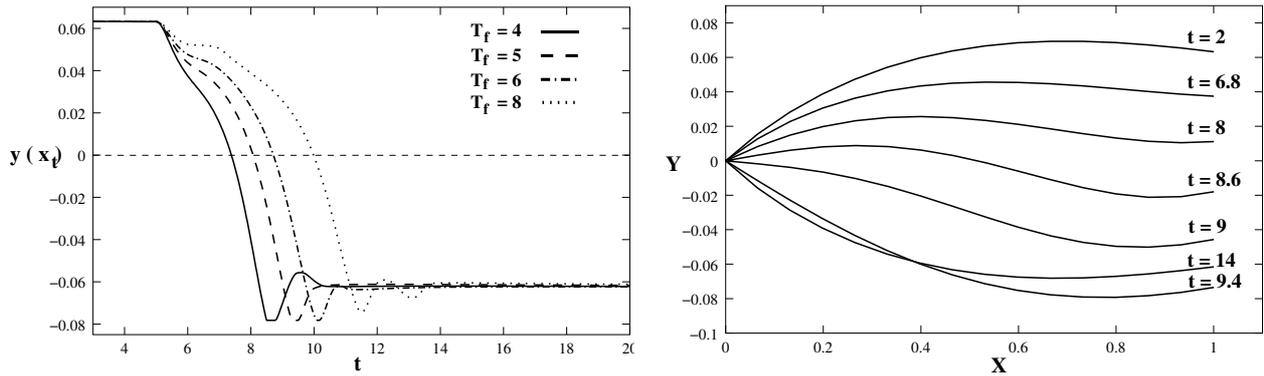
**Figure 7 :** Evolution temporelle de  $x_t$  pour une reprise du virement (à gauche) et représentation de la configuration d'une voile pendant un fonctionnement en drapeau (à droite)

## 5 Application à un virement de bord complet

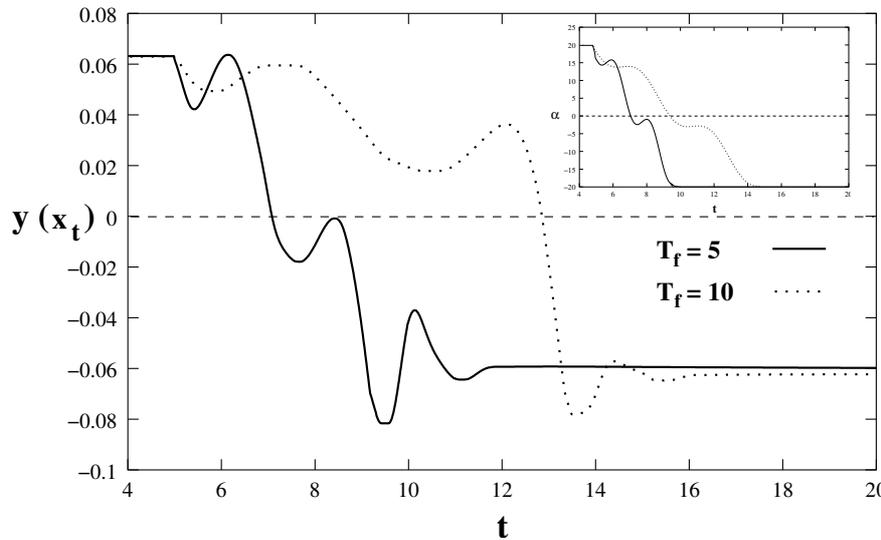
L'objectif de cette section est l'étude d'un virement de bord complet incluant trois étapes : le bateau naviguant sous une amure donnée avec l'écoute sous tension pour la première, le virement pendant lequel la tension de l'écoute est complètement relâchée ce qui correspond au premier problème présenté dans la section 3, enfin la reprise de contrôle et le rétablissement de la marche du bateau sous l'autre amure qui correspond au problème de la section 4.

On analyse d'abord la réponse du système voile-réglage pour différentes durées d'un virement de bord, et l'influence des paramètres caractéristiques sur la réponse de la voile. On note  $T_f$  le temps de variation de l'angle d'incidence  $\alpha(t)$  imposé à la structure, pendant lequel celui-ci évolue linéairement entre  $+20$  deg et  $-20$  deg. Cette variation linéaire entre les instants  $t_0 = 5$  et  $t_1 = t_0 + T_f$  est justifiée par l'évolution régulière (suivant les conditions extérieurs rencontrées) du changement de direction, et par conséquent de l'angle du vent perçu par les voiles, pendant un virement de bord. Sur la figure 8 gauche, on a représenté l'évolution de la position du bord de fuite de la voile en fonction du temps pour différentes valeurs de  $T_f$  ( $4 \leq T_f \leq 8$ ). On remarque qu'il existe un temps de virement minimum au dessous duquel une variation trop rapide de l'angle d'incidence provoque des oscillations de la structure en fin de virement, défavorable à une relance rapide du bateau (on retrouve des oscillations similaires à celles observées dans le cas de la reprise du virement). De manière à illustrer les mouvements de la voile pendant un virement de bord, on a tracé sur la figure 8 droite la géométrie de la structure à différents instants  $t$ . On remarque que le retour à une forme de la voile parfaitement symétrique à la forme initiale est obtenue rapidement dans le cas d'un virement de durée optimum (égale ici à 5). Contrairement aux modes de déformations du premier ordre observés dans [3] pour une structure de rigidité non nulle, on remarque que le système possède plusieurs modes de déformation (les courbures de la voile s'inversent).

Tout ces résultats étant donnés en temps adimensionnés, on peut envisager le cas où la structure oscille pendant le virement de bord. Ce cas extrême peut avoir lieu par vent fort, lorsque la durée adimensionnelle du virement  $T_f$  devient grande, la manoeuvre de virement ne pouvant être effectué plus rapidement, ou suite à des excitations extérieures : perturbations de l'écoulement incident, mouvements du bateau dus aux variations de la surface libre (roulis, tangage), ... On constate, figure 9 que l'on retrouve bien les différentes phases de la décomposition proposée dans les deux sections précédentes, avec des oscillations de la structure pendant et en fin de virement.



**Figure 8 :** Evolution temporelle de  $\mathbf{x}_t$  (à gauche) et représentation de la configuration d'une voile (à droite),  $T_f = 5$ , pour un virement de bord complet



**Figure 9 :** Evolution temporelle de  $\mathbf{x}_t$  pour un virement de bord avec un vent fort ( $T_f$  grand)

Cette modélisation d'un virement de bord peut également être utilisée pour caractériser la fatigue de la voile. Nous avons considéré deux phénomènes essentiellement : l'endommagement des fibres par flexions répétitives pendant la période où la voile est en drapeau et les contraintes maximales calculées pendant la phase de reprise de contrôle. Le premier point est illustré par la figure 10 qui donne le cumul de la courbure de la voile au cours d'un virement de bord complet. La fatigue de la voile est une fonction croissante de cette quantité qui est répartie, comme on peut le voir, de façon très irrégulière sur la corde. Le dernier point est illustré par la figure 11 où la tension dans la voile a été rapportée pour différentes durées du virement de bord.

## 6 Conclusion

L'ensemble des résultats présentés ici montre qu'avec la prise en compte du système de réglage (adaptation des conditions aux limites de la structure), la modélisation d'une voile effectuée dans [1] et [2] permet d'étudier la phase transitoire du mouvement pendant un

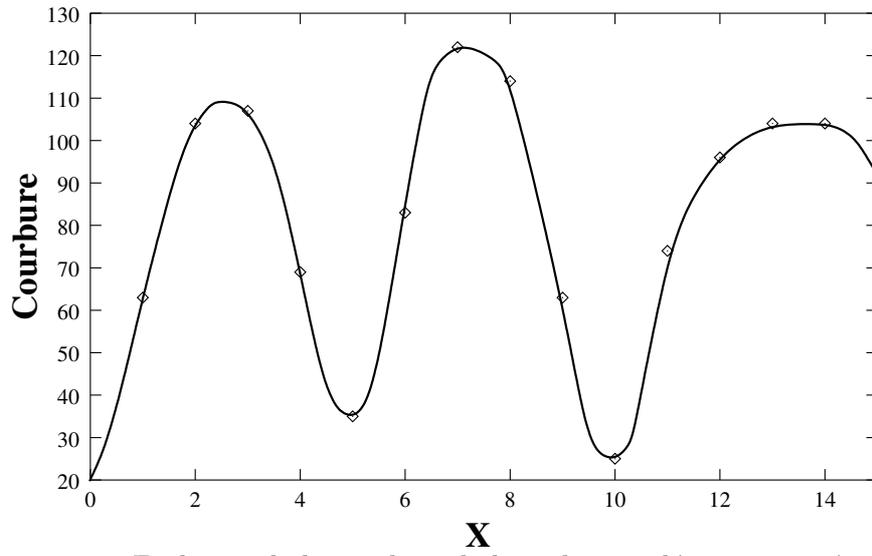


Figure 10 : Evolution de la courbure de la voile cumulée sur une période de fonctionnement en drapeau

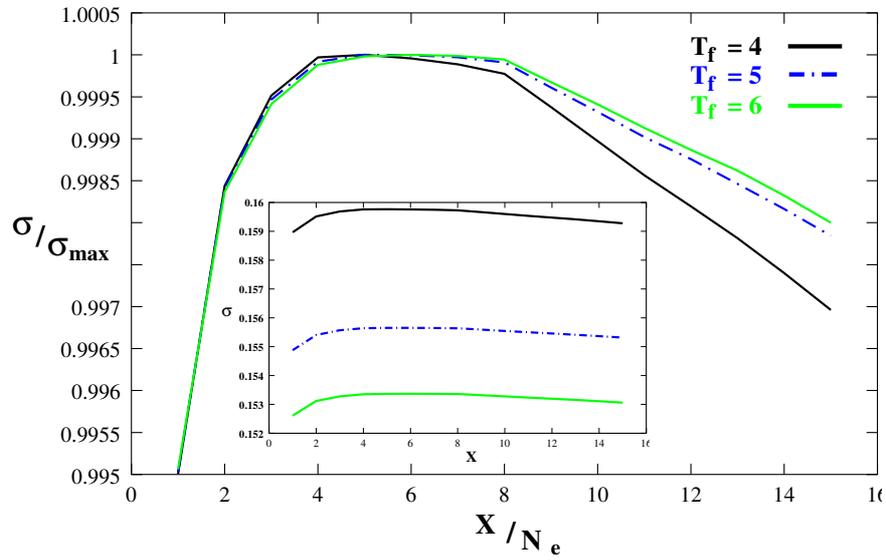


Figure 11 : Evolution de la tension locale en fonction de la corde pour différentes durées du virement  $T_f$

virement de bord. Grâce à cette modélisation, l'ensemble des conditions de navigations rencontrées (de caractère aléatoire) peut être simulé en reprenant, par exemple, l'approche stochastique proposée dans [1] pour s'affranchir des difficultés liées à la définition des conditions aux limites réelles. Une analyse de la fatigue de la voile dans de telles conditions d'utilisation pourra également être menée. L'extension de cette étude au cas de deux voiles en interaction [5] permettra de comparer l'ensemble de nos résultats numériques aux quelques données expérimentales existantes (par exemple dans [4]), celles-ci concernant essentiellement l'optimisation du temps nécessaire à l'accomplissement d'un virement de bord, ainsi qu'à la relance du bateau.

## References

- [1] Le Maître O., Contribution numérique à la résolution de problèmes d'interaction fluide-structure non linéaires, Thèse de l'Université du Havre, 1998.
- [2] Germain G., Huberson S., Le Maître O., Etude bidimensionnelle de l'interaction entre deux voiles flexibles, 8ème Journée de l'Hydrodynamique, Nantes, 2001.
- [3] Fitt A.D., Lattimer T.R.B., On the unsteady motion of two-dimensional sails, IMA Journal of Applied Mathematics, Vol. 62, Issue 2, 2000.
- [4] Masuyama Y., Fukasawa T., Tacking simulation of sailing yachts - Numerical integration of equations of motion, 12th Chesapeake sailing yacht symposium, SNAME, 1995.
- [5] G. Germain, Etude numérique et expérimentale de l'interaction entre les voiles de bateaux - Optimisation des réglages, Thèse de l'Université du Havre, 2002.