
Aéroélasticité non linéaire appliquée à la déformation des voiles

Sébastien Mounoury — Frédéric Hauville — Mathieu Durand — Jacques-André Astolfi

Institut de Recherche de l'École Navale - EA3634
École Navale et GEP
BP600, 29240 BREST ARMÉES, FRANCE
{mounoury,hauville,durand,astolfi}@ecole-navale.fr

RÉSUMÉ. Les outils de simulation numérique permettant de prédire le comportement d'un voilier en navigation réel sont de plus en plus utilisés par les architectes navals. Nous présentons et comparons dans cet article deux modèles de structure (réseaux de fils et membrane CST) utilisés dans le calcul aéroélastique d'une structure tridimensionnelle idéalement flexible avec un écoulement instationnaire. L'écoulement aérodynamique est modélisé par une méthode de surface portante associée à une méthode particulière. Après validation du comportement mécanique des tissus utilisés pour la fabrication des voiles, nous présentons les résultats d'un calcul aéroélastique d'une voile sur son étai avec ses différents réglages.

ABSTRACT. The tools of numerical simulation allowing to predict the behavior of a sailing yacht in real sailing conditions are used more and more by the naval architects. We present and compare in this paper two structure models (string network model and CST membrane) used in aeroelastic computations of a three-dimensional structure ideally flexible with an instationary flow. The modelisation of the aerodynamic flow is achieved by the lifting surface method coupled with the vortex method. After validation of the mechanical behavior of the woven materials used for the manufacture of the sails, we present the results of an aeroelastic computation of a sail on its stay with its various adjustments.

MOTS-CLÉS : interaction fluide structure, membrane CST, réseau de fils, méthode particulière

KEYWORDS: fluid structure interaction, CST membrane, string network, vortex method

1. Introduction

Le coût élevé des essais en bassin de carène associé aux performances accrues des moyens de calcul amènent les architectes navals à utiliser de plus en plus les outils de simulations numériques pour la conception de voiliers. Ces outils, basés sur la modélisation aéroélastique des voiles couplée à un modèle d'écoulement hydrodynamique avec surface libre autour de la carène, permettent la modélisation numérique d'un voilier en navigation réelle. Une part importante du travail numérique a été effectué ces dernières années en ce qui concerne le problème de l'interaction fluide structure. L'originalité des voiles tient dans sa flexibilité importante, si bien qu'une théorie non linéaire a dû être développée pour les calculs de structure. Dans ce travail, nous comparons les résultats issus de deux calculs aéroélastiques dans lesquels seul le modèle de structure diffère. Le premier modèle repose sur la théorie de la membrane avec des éléments à trois nœuds de type CST [IMB 95]. Le deuxième modèle met en œuvre le système de réseau de fils développé par J.E. Souza De Cursi et O. Le Maître [LEM 98]. L'écoulement aérodynamique est quant à lui modélisé par une méthode de surface portante associée à une méthode particulière [CHA 96].

2. Modèle de structure membranaire

Afin de simuler correctement le comportement des voiles des bateaux, notre modèle, idéalement flexible, doit prendre en compte des variations importantes de caractéristiques de tissu (les voiles 3DL et D4 sont des voiles dont les fils comportent des orientations et des densités différentes en chaque point de la voile), prendre en compte des variations relativement importantes de courbures et simuler les plis nés de "déplacement de type compression" (comportement unilatéral). Aucun élément évolué ne permet de modéliser correctement tous ces comportements en même temps. Dans notre cas, il est préférable de choisir un élément simple mais en affinant fortement le maillage là où cela est nécessaire. L'élément le plus simple est dit CST (Constant Strain Triangle) : un triangle à 3 nœuds (9 degrés de liberté en 3D), auquel nous ajoutons une analyse des contraintes.

Nous proposons d'étendre l'utilisation de l'élément CST décrit par Imbert [IMB 95] dans un espace à trois dimensions, dont les non-linéarités proviendront de la géométrie et de la prise en compte des plis de compressions. Le passage de 2 à 3 dimensions entraîne l'hypothèse de flexibilité nulle entre deux éléments au niveau de leur frontière. Cependant, l'élément possédant une flexibilité d'origine géométrique influençant les calculs là où les variations de courbures sont importantes, il est nécessaire d'orienter correctement les éléments dans ces zones ou d'affiner le maillage. L'influence de l'orientation des triangles par rapport à la courbure a été étudiée par Heppel [HEP 02]. La matrice $[\Lambda]_{6 \times 3p}$ permet de lier les efforts globaux aux efforts locaux associés à chaque triangles (p , le nombre de points total) :

$$\{ F_{<g>} \}_{3p} = \sum_{triangles} [\Lambda]^t \{ F_{<l>} \}_6 \quad [1]$$

avec :

$$\{ F_{<l>} \}_6 = A [B]^t e [C] [B] ([\Lambda] \{ X_{<g>} \}_{3p} - \{ X_{initial<l>} \}_6) \quad [2]$$

où e est l'épaisseur de la membrane, A son aire, $[C]$ la matrice (3×3) de comportement du matériau constante pendant tout le calcul, $[B]$ une matrice (3×6) d'origine géométrique et $\{ X \}$ le vecteur position des nœuds dans le repère local ou global. Le repère local est calculé à chaque itération, ce qui permet à la matrice $[B]$ d'être également constante pendant tout le calcul.

3. Modèle du réseau de fils

Nous présentons le modèle de déformation élastique en grands déplacements développé par O. Le Maître et J.E.Souza De Cursi [MAI 98] permettant d'approcher une structure bidimensionnelle sans épaisseur (une voile) à l'aide d'un ensemble de structure unidimensionnelle (le fil). Le réseau est constitué par l'enchevêtrement de deux familles de fil perpendiculaires, de module élastique linéique K_i , appelées trame indicée 1 et chaîne indicée 2. Chaque nœud est repéré par ses coordonnées curvilignes $(a_1, a_2) \in \Omega_m$ auquel sont associés les vecteurs position $\underline{\mathbf{r}}(a_1, a_2)$ et accélération $\ddot{\underline{\mathbf{r}}}(a_1, a_2) \in \mathcal{R}^3$ dans le repère absolu. L'équation du mouvement pour un élément de surface $da_1 da_2$ traduisant l'équilibre dynamique est le suivant :

$$\frac{d\underline{\mathbf{T}}_i(a_1, a_2)}{da_i} + \underline{\mathbf{F}}_s(a_1, a_2) - \rho \ddot{\underline{\mathbf{r}}}(a_1, a_2) = 0 \quad [3]$$

avec, pour $i = 1, 2$, les expressions de la tension et de la dilatation :

$$\underline{\mathbf{T}}_i(a_1, a_2) = l_{i\perp} K_i (\alpha_i(a_1, a_2) - 1) \underline{\mathbf{t}}_i(a_1, a_2) \geq 0 \quad [4]$$

$$\alpha_i(a_1, a_2) = \left\| \frac{d\underline{\mathbf{r}}(a_1, a_2)}{da_i} \right\| \quad [5]$$

$\underline{\mathbf{t}}_i(a_1, a_2)$ est le vecteur unitaire normal à la section du fil dans la direction i , $l_{i\perp}$ la longueur courante de l'élément perpendiculaire à la direction i , $\underline{\mathbf{F}}_s(a_1, a_2)$ le chargement surfacique extérieur appliqué sur Ω_m et $\underline{\mathbf{F}}_b(a_1, a_2)$ le chargement extérieur appliqué sur la frontière $\partial\Omega_m$ notée Γ . La formulation variationnelle de l'équation [3] (principe des puissances virtuelles) donne :

$$\iint_{\Omega_m} \left(\underline{\mathbf{T}}_i \cdot \frac{d\underline{\mathbf{V}}^*}{da_i} \right) da - \iint_{\Omega_m} (\underline{\mathbf{F}}_s - \rho \ddot{\underline{\mathbf{r}}}) \cdot \underline{\mathbf{V}}^* da - \int_{\Gamma} \underline{\mathbf{F}}_b \cdot \underline{\mathbf{V}}^* d\Gamma = 0 \quad \forall \underline{\mathbf{V}}^* \quad [6]$$

Le modèle du réseau de fils est complété par deux autres familles de fils, le biais, indicée $3a$ et $3b$, disposées selon les bissectrices du réseau orthotrope. L'expression de la tension dans le biais est donné par l'équation [4] avec $i = 3a, 3b$. Dans ce modèle, la déformation n'apparaît pas sous forme vectorielle, et la raideur n'est pas sous forme matricielle. L'intensité des forces internes de chaque fil est calculée puis projetée sur les tangentes aux fils. La résolution numérique repose sur la méthode des éléments finis avec un schéma de Newmark pour les termes d'accélération.

4. Cas test : déformation d'une membrane isotrope circulaire

Les deux codes numériques présentés ci-dessus ont été testés sur un problème de déformation d'une membrane circulaire constituée d'un tissu isotrope. Elle est fixe en translation sur son périmètre et soumise à une surpression uniforme. Une solution analytique est calculée à partir des travaux de R. Bouzidi [BOU 03]. Nous considérons un disque de rayon $r = 0,1375 \text{ m}$, constitué d'un tissu isotrope ayant pour module d'élasticité $K = 600\,000 \text{ N.m}^{-1}$ et pour module de Poisson $\nu = 0,30$. A l'état initial, le disque est contenu dans le plan (Oxy) de normale Oz , centré en $(0, 0)$ et se caractérise par aucune pré-tension. L'ensemble des solutions est comparé sur la figure 1.

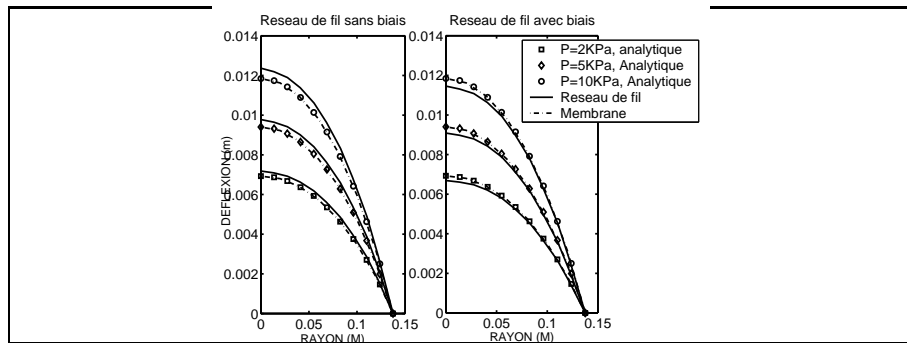


Figure 1. Comparaison des déformées du rayon du disque issue de la solution analytique (symboles), du modèle réseau de fils (lignes continues) et du modèle membrane (lignes pointillées).

Pour les faibles pressions, l'erreur de la deflexion prédite par le modèle de membrane est inférieure à 1 % du rayon. Celle issue du modèle de réseau de fils prédit une deflexion supérieure à celle calculée analytiquement (3 à 4 %) lorsque le biais n'est pas pris en compte et inversement dans le cas contraire. C'est dans la direction radiale que les deflexions sont les plus importantes. Les elongations des fils disposés selon le rayon sont respectivement pour les pressions de 2, 5 et 10 kPa de l'ordre de 0, 2 ; 0, 4 et 0, 7 % de la longueur naturelle du fil. Ce qui correspond aux ordres de déformation rencontrés pour les voiles.

5. Modèle fluide : la méthode particulière

Le calcul de l'écoulement autour des voiles est effectué par la méthode particulière développé par Rehbach [REH 80] (fluide parfait incompressible). Dans le domaine fluide, le rotationnel des vitesses est produit au voisinage des surfaces est libéré dans le sillage. Les non-linéarités du sillage sont évaluées en discrétisant la nappe tourbillonnaire par une méthode particulière qui est bien adaptée au traitement de l'interaction sillage-obstacle dans le cas de plusieurs voiles. Une distribution de doublets

(l'inconnue du problème fluide) permet de vérifier la condition de glissement. La méthode est par essence non stationnaire et permet de prendre en compte les conditions aux limites de vitesses de déplacement de la surface (dues à ses déformations ou au mouvement du voilier) ainsi qu'un gradient de vent atmosphérique.

Le couplage des deux problèmes exprime les effets de l'interaction [HAU 03]. Pour les modèles de structure et de fluide qui ont été choisis, les équations de couplage sont de deux type. Les équations cinématique imposent la continuité de la vitesse normale des milieux fluide et solide sur l'interface dans sa configuration déformée. Les équations dynamiques décrivent la continuité de l'effort normal sur l'interface : les efforts extérieurs exercés sur la structure sont les efforts aérodynamiques exercés par le fluide parfait sur sa frontière (efforts de pression).

6. Résultats numériques préliminaires

Nous présentons des résultats obtenus par le couplage aéroélastique. Nous prenons en compte la déformation de l'étai, et les différents réglages (position du roller, longueur d'écoute et de drisse). Sur la figure 2 nous représentons les lignes de niveau de creux des voiles en équilibre dans l'écoulement (13 *knts*, 18°), dans le plan *Oxy*. Le tableau 1 présente les efforts aux points de fixation de la voile et de l'étai. Entre les deux codes, les formes ont des similitudes au niveau du guindant et du point d'écoute. Par contre, la voile prédite par le code filaire est plus déformée au niveau du point d'écoute et du point d'amure. A ces endroits, les facettes d'origine "carrés" prennent des formes de losanges témoignant d'une déformation importante. Ces défauts se répercutent sur les frontières de la voile (chute et bordure) en prévoyant un creux plus important et reculé. Sur une voile réelle, les renforts ne sont pas qu'un ensemble chaîne/trame/biais, mais une superposition importante de fils qui décrivent toutes les directions. Or, dans le modèle filaire, le point d'amure ne peut reprendre correctement que des efforts situés à 0°, 45° ou 90°. Ces résultats sont cependant à nuancer, car la coupe de la voile utilisée ici, qui est fortement sollicitée dans le biais, n'est pas une coupe existante : les fils ne sont pas disposés sur les directions principales d'efforts.

	Effort pt. Amure (N)	Effort pt. Drisse (N)	Tension Écoute (N)	Tension Étai (N)
Code réseau de fils	528,97	919,67	647,42	1257,84
Code membranaire	353,5	651,33	534,98	1281,69

Tableau 1. Comparaisons des efforts aux points de fixation issus des deux codes numériques.

7. Conclusions et perspectives

Le modèle membranaire est aujourd'hui capable de prendre en compte les lattes et le gréement dormant en grands déplacements. Nous travaillons sur l'analyse des critères permettant d'augmenter la vitesse de convergence, et la validation du modèle de plis. Le modèle filaire prédit des déformations trop importantes, due à une modéli-

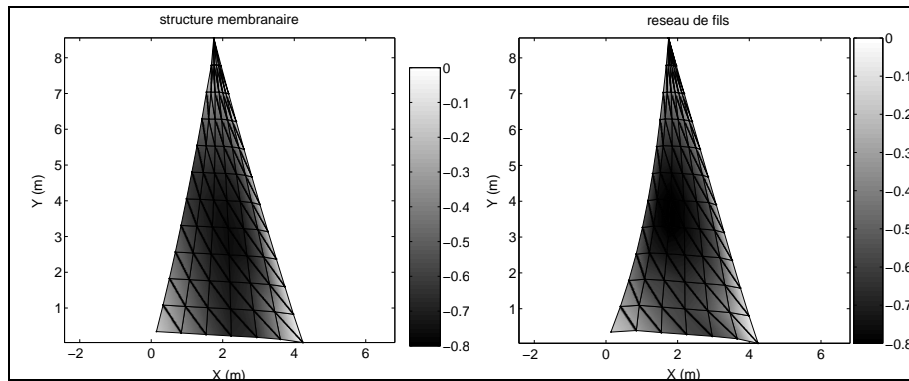


Figure 2. Lignes de niveau de creux des voiles issues du modèle membranaire (à gauche) et du réseau de fils (à droite).

sation incomplète des efforts disposés selon des directions intermédiaires aux principales, en particulier au niveau des zones de renforts. Les perspectives sur le modèle filaire sont d'améliorer les modélisations des forces internes hors directions principales chaîne/trame/biais, de prendre en compte la déformation des voiles à coupe orientées tissées (bi-radiale...) ou non (D4, 3DL). Les développements en cours permettent, d'une part, de prendre en compte la déformation de plusieurs voiles simultanément par une approche multi-obstacle, et d'autre part, d'intégrer les éléments rigidifiant (lattes). La comparaison des modèles numériques avec des résultats expérimentaux, est un point important de nos perspectives.

8. Bibliographie

- [BOU 03] BOUZIDI R., RAVAUT Y., WIEGLOSZ C., « A finite-strain energy based solution for an axi-symmetrical inflated membranes », *Computers & Structures*.
- [CHA 96] CHARVET T., HAUVILLE F., HUBERSON S., « Numerical simulation of the flow over sails in real sailing conditions », *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics - Special Issue of Sail Aerodynamics*, vol. 63, n° ISSN 0167 - 6105, 1996, p. 111-129.
- [HAU 03] HAUVILLE F., ROUX Y., « Réglage dynamique d'une voile par une méthode d'interaction fluide / structure », 9^{èmes} Journées de l'Hydrodynamique, 10-12 Mars 2003.
- [HEP 02] HEPPEL P., « Accuracy in sail simulation : wrinkling and growing fast sails », *High Performance Yacht Design Conference*, Auckland, 4-6 December 2002.
- [IMB 95] IMBERT J., *Analyse des structures par éléments finis*, Cepadues Edition, 1995.
- [LEM 98] LE MAÎTRE O., SOUZA DE CURSI J.E., HUBERSON S., « Large Displacements Analysis For Ideally Flexible Sails », *European Journal of Mechanics A/Solids*, vol. 17, 1998, p. 619-636.
- [MAI 98] LE MAÎTRE O., « Contribution numérique à la résolution de problèmes d'interaction fluide structure », Thèse de doctorat, Université du Havre - INSA Rouen, 1998.
- [REH 80] REHBACH C., « Calcul d'écoulements tri-dimensionnels instationnaires de fluide parfait avec nappes tourbillonnaires », Document ONERA - Rapport 10/1737 AY 306, 12/1737 AY 308 et 13/1737 AY 312, 1979 - 1980.