

SIMULATION NUMERIQUE DE L'ÉCOULEMENT
AUTOUR DES VOILES DE BATEAU

Thierry Charvet

L.I.M.S.I.-C.N.R.S.
bp.133 91403 Orsay Cedex

Cet article présente l'étude de l'écoulement autour d'une, puis de deux voiles de bateau en interaction à l'aide d'une méthode particulière tri-dimensionnelle. Est aussi présenté le principe d'un couplage fluide-structure permettant l'étude des déformations de la voile.

this paper presents an analysis of the flow around an isolated sail or around two interacting sails . The study is performed by means of a 3D particle method. The basis of a fluide-structure interaction method is also presented.

1 INTRODUCTION.

Si en pratique, la découpe des voiles est encore aujourd'hui laissée à l'initiative de maitre-voiliers expérimentés, il y a eu, depuis le début des années soixante, plusieurs tentatives afin d'adapter des méthodes numériques déjà existantes à l'étude aérodynamique des voiles. La ligne portante en est sans doute le meilleur exemple. Son principe est de représenter la surface portante étudiée par une unique ligne tourbillonnaire, le sillage étant projeté sur une surface de géométrie déterminée à l'avance. Cette méthode fut présentée par Milgram en 1968 [1] et est toujours utilisée au CRAIN (Centre de Recherche pour l'Architecture et l'Industrie Nautique, La Rochelle) où elle donne des résultats satisfaisants dans le cas stationnaire.

Cependant, il paraît plus difficile de se contenter d'un tel modèle dès lors que les phénomènes étudiés, tels que l'interaction foc/grand-voile ou la prise en compte de la déformabilité du tissu, nécessitent de connaître les efforts locaux. C'est pourquoi une méthode 3D particulière a été utilisée, d'une part seule pour traiter le problème de l'interaction foc/grand-voile, domaine dans lequel elle a fait l'objet d'une validation expérimentale et, d'autre part, couplée avec un code de calcul de coques par éléments finis afin de traiter l'interaction fluide/structure issue du caractère déformable du tissu.

Introduite par Rehbach, cette méthode fut étendue au cas de corps en mouvements par Huberson [2] et fut ensuite appliquée aux rotors d'hélicoptères par Cantaloube et Huberson [3], aux hélices par Hémon et Huberson [4] ainsi qu'aux éoliennes par Zervos *et al* [5]. Sa caractéristique principale est de traiter le sillage discrétisé sous forme de particules élémentaires dotées d'une intensité tourbillonnaire et d'une vitesse, leur évolution au cours du temps étant régie par l'équation de Helmholtz: cette approche lagrangienne permet un temps de calcul réduit tout en n'ayant pas à faire d'hypothèse préalable quant à la forme du sillage.

2 Présentation de la méthode

Régie par les hypothèses de fluide parfait incompressible, la méthode particulière utilise la formulation vitesse-tourbillon des équations Euler exprimées en coordonnées lagrangiennes ainsi que l'égalité intégrale de Biot-Savart reliant vitesse et vorticité. Les conditions aux limites sur le corps (condition de non-pénétration) sont satisfaites par la résolution de l'équation intégrale liée au problème de Neumann extérieur, tandis que le sillage est discr t s  sous forme de particules tourbillonnaires se déplaçant sur les caractéristiques de l'équation d'Euler -figure 1. Ainsi, la condition de glissement sur la surface portante est-elle satisfaite en superposant à la composante de vitesse \vec{U}_w induite par le sillage un écoulement dérivant d'un potentiel ϕ :

$$\vec{U} = \vec{U}_w + \vec{U}_\infty + \vec{\nabla}\phi \quad (1)$$

(2)

Dans tout le domaine autour du corps, le potentiel vérifie l'équation de Poisson:

$$\Delta\phi = 0. \quad (3)$$

et sur le corps, la condition de glissement s'écrit:

$$\frac{\partial\phi}{\partial n} = -(\vec{U}_\infty + \vec{U}_w) \cdot \vec{n} \quad (4)$$

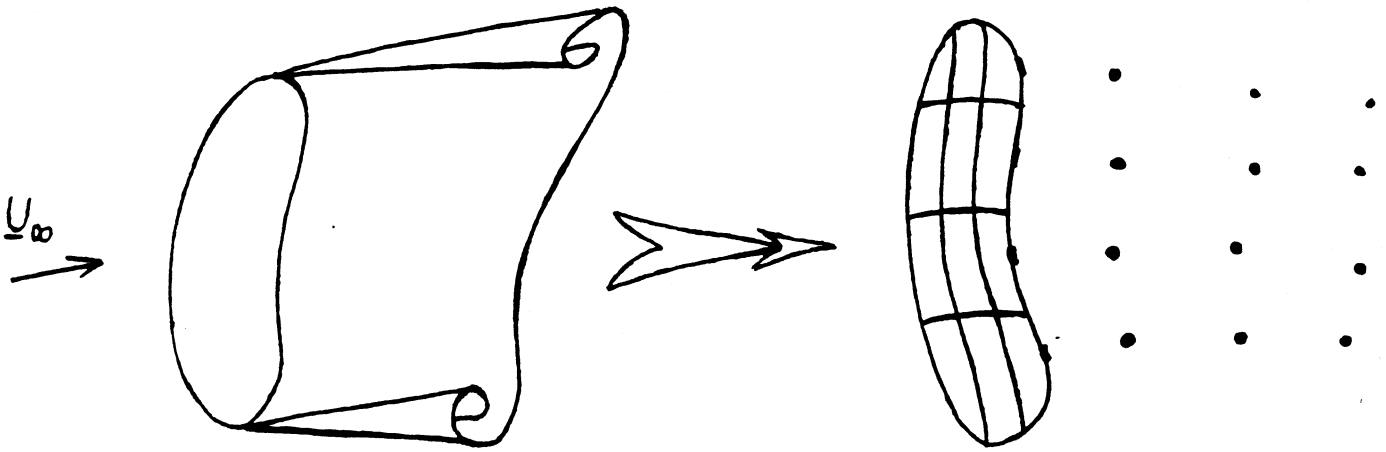


Figure 1: *Passage du problème continu au problème discret.*

où \vec{n} est la normale à la surface. Exprimée en coordonnées lagrangiennes, l'équation d'Euler s'écrit:

$$\frac{\partial \vec{X}_i}{\partial t} = \vec{U}_i \quad (5)$$

$$\frac{d\vec{\Omega}_i}{dt} = (\vec{\Omega}_i \cdot \vec{\nabla}) \vec{U}(\vec{X}_i) \quad (6)$$

où Ω est le rotationnel de \vec{U} . Utilisant alors la relation de Biot-Savart, on peut exprimer de façon explicite le second membre de l'équation (6), qui s'écrit de façon discrète:

$$\begin{aligned} \frac{d\vec{\Omega}_i}{dt} = \frac{3}{8\pi} \sum_{i \neq j} \frac{1}{|\vec{X}_i - \vec{X}_j|^5} \\ [((\vec{X}_i - \vec{X}_j) \cdot \vec{\Omega}_i)((\vec{X}_i - \vec{X}_j) \wedge \vec{\Omega}_j) + (((\vec{X}_i - \vec{X}_j) \wedge \vec{\Omega}_j) \cdot \vec{\Omega}_i)(\vec{X}_i - \vec{X}_j)] \end{aligned} \quad (7)$$

Parallèlement, la surface portante est représentée par N facettes rectangulaires, portant chacune une répartition surfacique constante de doublet μ . Le potentiel s'exprime ainsi en fonction de cette distribution de doublets et l'intensité μ est calculée à partir de l'équation de Fredholm de deuxième espèce:

$$\iint_s \mu(\vec{x}) \vec{\nabla} \frac{1}{|\vec{x} - \vec{y}|} \cdot \vec{n}(\vec{y}) dx = (\vec{U}_\omega(\vec{y}) + \vec{U}_\infty(\vec{y})) \cdot \vec{n}(\vec{y}) \quad (8)$$

qui traduit la condition de glissement sur la surface portante.

Cette équation est satisfaite au centre de chaque facette engendrant ainsi un système linéaire de N équations à N inconnues $(\mu_i)_{1,N}$. μ_i caractérisant l'intensité de doublet sur la facette i.

Enfin, la représentation discrète de μ sur la surface et la valeur de l'intensité tourbillonnaire sont reliées par une modélisation de l'émission du sillage au bord de fuite, régie par la condition de Kutta instationnaire: l'intensité initiale des particules est soumise à l'équation de Bernoulli écrite de part et d'autre de la surface portante (l'intrados étant noté - et l'extrados +) -figure 2:

$$\frac{\partial \Gamma}{\partial t} = \frac{1}{2} (\vec{U}_+ + \vec{U}_-) \cdot (\vec{U}_+ - \vec{U}_-) \quad (9)$$

Connaissant donc l'intensité tourbillonnaire sur la ligne d'émission, il est aisé de créer de nouvelles particules à chaque pas de temps, correspondant à l'intensité émise le long d'un segment du bord de

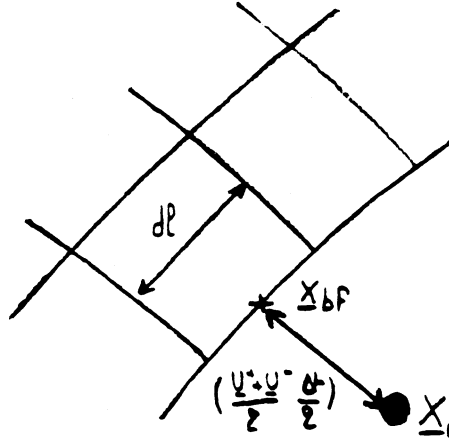


Figure 2: émission de particules.

fuite de longueur δl_i durant l'intervalle de temps Δt :

$$\bar{\Omega}_i = \Delta t \delta l_i (\bar{U}_m \cdot [\bar{U}]) \bar{\pi}_i \quad (10)$$

$$\bar{U}_m = \frac{1}{2}(\bar{U}_+ + \bar{U}_-) |_{\bar{X}_{bf,i}} \quad (11)$$

$$[\bar{U}] = (\bar{U}_+ - \bar{U}_-) |_{\bar{X}_{bf,i}} \quad (12)$$

$$\bar{X}_i = \bar{X}_{bf,i} + \frac{1}{2} \Delta t \bar{U}_m \quad (13)$$

où $\bar{X}_{bf,i}$ caractérise la position du point d'émission et $\bar{\pi}_i$ le vecteur unitaire normal au bord de fuite. Notons enfin que la représentation d'une voile par une surface portante requiert un calcul d'efforts capable de prendre en compte la force de succion induite par la singularité de bord d'attaque propre aux corps sans épaisseur. Le calcul utilisé ici fut proposé par Luu et Dulieu [6]: à l'aide de l'équation de Hess, la surface de doublets est remplacée par une répartition de segments tourbillonnaires. La force élémentaire associée à un segment d'intensité Γ_i porté par un côté de la i -ème facette s'écrit:

$$\vec{f}_{w,i} = \vec{U}(\bar{X}_{M,i}) \wedge \vec{\Gamma}_i \quad (14)$$

où $\vec{U}(\bar{X}_{M,i})$ est la partie finie de la vitesse au milieu $\bar{X}_{M,i}$ du côté i . Globalement, forces et moments sont donnés par:

$$\vec{F} = \sum_i \vec{f}_{w,i} \quad (15)$$

$$\vec{M}_o = \sum_i \vec{f}_{w,i} \wedge O\bar{X}_i^M \quad (16)$$

3 Validation sur une seule voile

Avant d'aborder le problème plus complexe que constitue l'interaction entre deux voiles, une série de calculs fut effectuée sur une seule voile à partir de données expérimentales obtenues dans la soufflerie de l'ENSMA: il s'agit ici de cinq génois différents de type 12 m J.I. placés dans un écoulement à 11,15 et

19 degrés d'incidence. La bordure des génois étant en contact avec le sol du tunnel, un double modèle numérique fut utilisé de manière à prendre en compte la présence d'un plan de glissement. Les résultats sont présentés sous la forme de coefficient de portance et de traînée dans les tableaux suivants.

foc type 1.	11 degrés	15 degrés	19 degrés	foc type 2.	11 degrés	15 degrés	19 degrés
expérience				expérience			
Cl	0.88	1.21	1.44	Cl	0.75	1.10	1.37
Cd	0.095	0.14	0.22	Cd	0.066	0.11	0.18
numérique				numérique			
Cl	0.88	1.14	1.37	Cl	0.80	1.17	1.32
Cd	0.053	0.09	0.13	Cd	0.05	0.10	0.13
foc type 3.	11 degrés	15 degrés	19 degrés	foc type 4.	11 degrés	15 degrés	19 degrés
expérience				expérience			
Cl	1.07	1.33	1.48	Cl	1.08	1.37	1.54
Cd	0.11	0.17	0.26	Cd	0.13	0.18	0.25
numérique				numérique			
Cl	1.08	1.34	1.55	Cl	1.08	1.38	1.55
Cd	0.08	0.12	0.16	Cd	0.085	0.13	0.17
	foc type 5.	11 degrés	15 degrés	19 degrés			
	expérience						
	Cl	0.83	1.19	1.41			
	Cd	0.08	0.13	0.21			
	numérique						
	Cl	0.82	-	1.49			
	Cd	0.05	0.07	0.14			

Comme on pouvait l'espérer, les résultats concernant la portance sont remarquables (moins de 5 % d'écart); ce constat est cependant à nuancer, l'écart entre un calcul fluide parfait et la solution réelle étant supposée être en deçà de 10 %: Il n'y a donc pas de moyen théorique de justifier une telle précision du calcul. En ce qui concerne la traînée, celle-ci est sous-évaluée, ce qui n'est pas pour nous surprendre puisque seule la traînée induite (i-e la composante aérodynamique parallèle à l'écoulement incident) est calculée.

4 Interaction foc/grand-voile.

4.1 Présentation du phénomène.

Comme Marchaj l'explique de façon très détaillée [7], on peut tenter de résumer l'effet du foc sur la grand-voile par l'incidence sur l'écoulement suivante:

l'écoulement en amont de la grand-voile est dévié par la présence du foc, induisant une incidence réelle de la grand-voile plus faible que si elle était seule; ainsi, la portance se trouve nettement diminuée mais en revanche, pour un même angle par rapport à l'écoulement à l'infini, le risque de voir apparaître un décollement au bord d'attaque se trouve lui aussi fortement diminué.

En conséquence, la contribution de la grand-voile est nettement affaiblie par la présence du foc mais en contrepartie, celle-ci garde une efficacité réelle sur une plage d'incidence plus étendue.

De la même manière, le foc se trouve positivement affecté par la présence de la grand-voile. En effet, juste derrière le bord de fuite du foc se trouve l'extrados de la grand-voile qui constitue une zone de

dépression par rapport à la pression moyenne de l'écoulement. On peut donc observer une aspiration de l'écoulement du foc qui se trouve alors accéléré, créant une surportance très substantielle. De plus, ce phénomène d'accélération diminue lui aussi les risques de décollement, sur l'extrados du foc dans ce cas.

4.2 Résultats qualitatifs.

Comme il est décrit dans le paragraphe précédent, un des phénomènes notoires de l'interaction foc/grand-voile est une diminution globale du risque de décollement. Ceci n'est pas observable à l'aide de la méthode numérique utilisée puisqu'elle est régie par les hypothèses de fluide parfait et ne prend donc pas en compte les phénomènes étroitement liés à l'existence de la couche limite.

Notre propos ici est donc simplement de retrouver les accroissement et diminution de portance respectives sur le foc et la grand-voile.

Pour ce faire, un grément type 12 m.J.I. a été utilisé avec un léger décalage de la grand-voile vers le haut afin de pouvoir obtenir simultanément une zone perturbée par le foc et une zone où l'influence de celui-ci reste faible (figure 3). Les maillages utilisés sont de simples maillages de huit tranches de huit facettes pour les deux voiles.

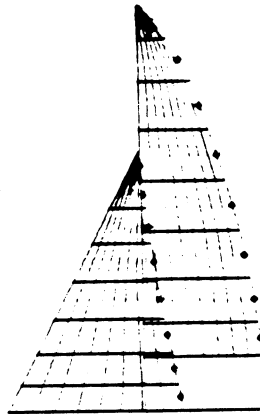


Figure 3: Grément type 12mJI avec grand-voile décalée.

Les résultats obtenus sont présentés ici sous la forme de deux graphes: d'une part, la portance de la grand-voile avec et sans voile d'avant, portance exposée en fonction de l'envergure (figure 4) et d'autre part, la portance du foc, toujours selon l'envergure, avec et sans grand-voile (figure 5).

On retrouve ainsi les accroissement et diminution prévus, en remarquant qu'en haut de la grand-voile, il n'y a quasiment aucune différence entre les deux configurations.

De manière plus locale, nous pouvons étudier les variations du champ de pression engendrées par l'interaction. Pour ce faire, on se place respectivement au quart bas de la grand-voile et au quart haut du foc (zones très influencées par l'interaction) afin d'observer les écarts du saut de pression sur une corde - figures 6 et 7. On peut ainsi remarquer l'accroissement significatif de la portance sur le foc dans le cas où la grand-voile est présente mais surtout la suppression du pic de bord d'attaque sur la grand-voile dès lors qu'elle est en interaction avec une voile d'avant. Notons enfin que l'approche particulière du sillage prend ici tout son sens puisqu'elle permet d'observer l'aspiration du sillage du

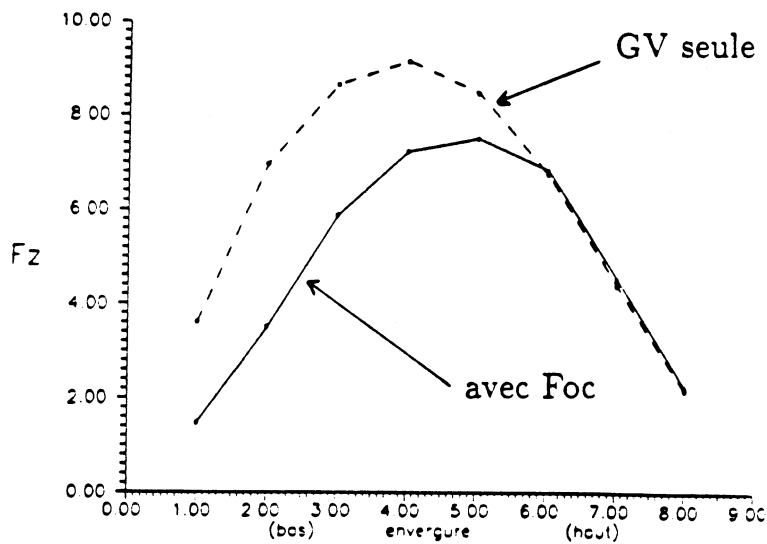


Figure 4: Portance de la grand-voile en fonction de son envergure.

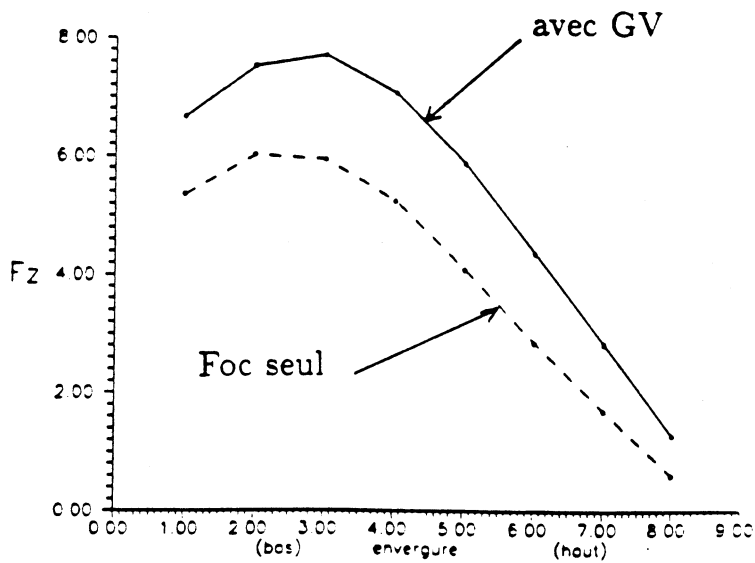


Figure 5: Portance du foc en fonction de son envergure.

foc par la dépression sur l'extrados de la grand-voile (figure 8). Cette remarque qualitative en amène une autre plus quantitative en terme d'efforts: en effet, la liberté qu'ont les particules de se rapprocher de la grand-voile participe de façon active à la perte de portance sur celle-ci: on peut donc apprécier tout l'intérêt de cette méthode en regard de calculs nécessitant une détermination *a priori* de la forme du sillage.

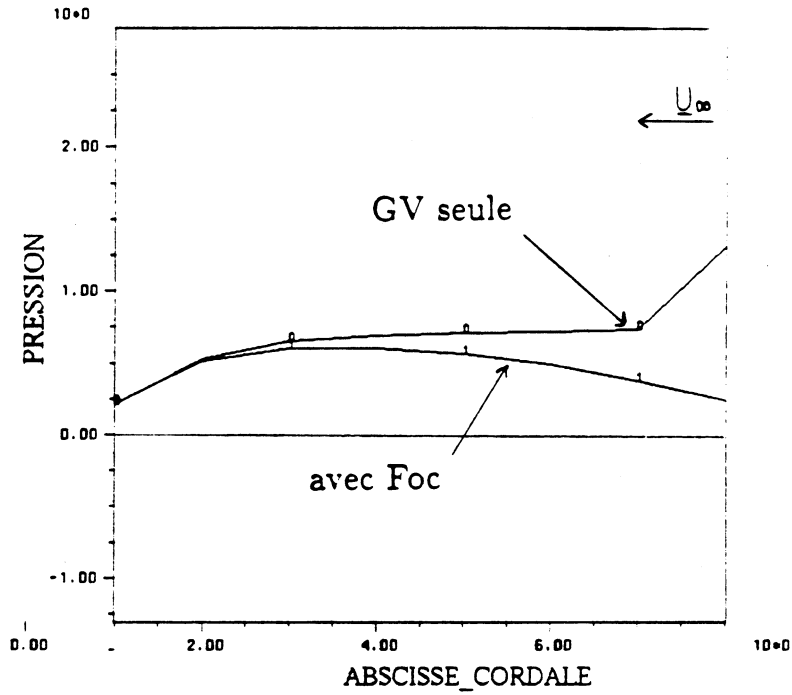


Figure 6: Saut de pression sur une corde de la GV.

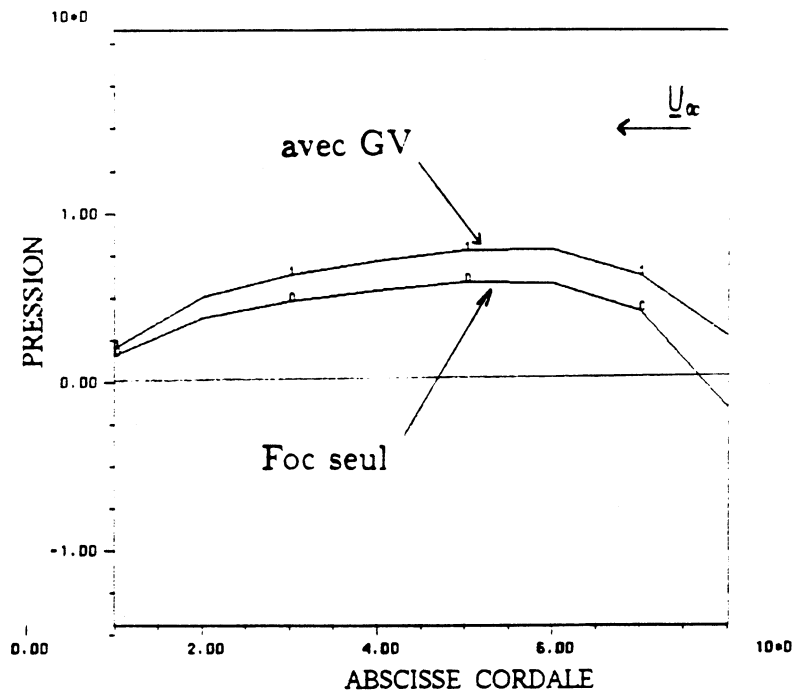


Figure 7: Saut de pression sur une corde du foc.

4.3 Influence du réglage des deux voiles.

Ayant pu constater l'influence de l'interaction sur chacune des deux voiles par rapport au cas où elles sont seules, il est de même intéressant de comparer l'évolution de cette interaction lors de différents

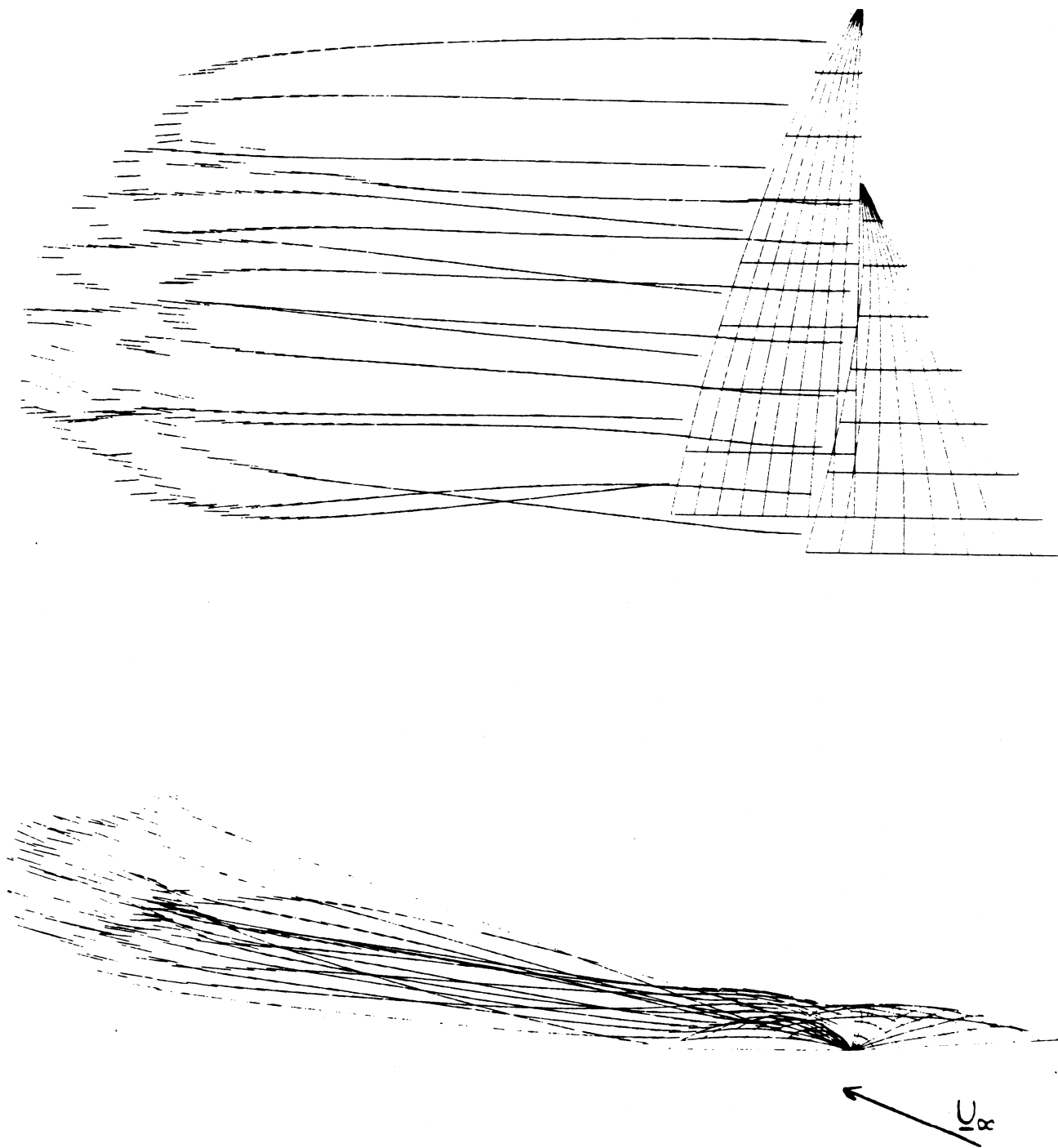


Figure 8: *Aspiration du sillage du foc.*

réglages: ce problème est abordé ici de façon simple, le principe étant de modifier séparément l'incidence du foc puis celle de la grand-voile: ainsi, partant d'un grément de type 12 m.J.I. sur un bateau de cap (angle entre l'axe du bateau et le vent apparent) égal à 22 degrés avec une ouverture (angle entre l'axe

du bateau et le bas de la voile) respective de la grand-voile et du foc de 0 et 7 degrés. on modifie tout d'abord l'ouverture du foc en lui attribuant successivement 6,7,9,10 et 12 degrés: puis, pour une ouverture du foc de 7 degrés, l'on fait varier celle de la grand-voile de 0 à 4 degrés. Les résultats sont présentés dans les tableaux ci-dessous où sont reportées les différentes forces propulsives en fonction de l'ouverture.

ouverture gv.	0 deg.	1 deg.	2 deg.	3 deg.	4 deg.
force prop. gv.	8.63	8.35	8.05	7.73	7.4
force prop. foc	7.10	6.94	6.79	6.64	6.48
somme des deux	15.7	15.3	14.8	14.4	13.9

ouverture foc	6 deg.	7 deg.	8 deg.	10 deg.	12 deg.
force prop. gv.	8.32	8.63	9.30	9.65	10.4
force prop. foc	7.41	7.10	6.38	5.97	5.48
somme des deux	15.7	15.7	15.7	15.6	15.5

L'on peut ainsi remarquer qu'à grand-voile fixe, la force propulsive totale varie peu en fonction de l'ouverture du foc: la raison en est que l'augmentation d'incidence du foc tend à diminuer l'incidence effective sur la grand-voile. En revanche, à foc fixe, l'ouverture de la grand-voile semble un paramètre plus sensible car, dans ce cas, une augmentation de l'incidence de la grand-voile induit une incidence effective du foc plus importante. Il convient donc de constater que si la voile d'avant, proportionnellement à sa surface, contribue de façon prédominante à la propulsion du voilier, il semble que la grand-voile reste la pièce maîtresse de la manoeuvre. Ceci reste un résultat très général, une analyse plus fine des différentes configurations pouvant tout à fait être envisagée pour l'étude d'un cas précis.

4.4 Validation expérimentale.

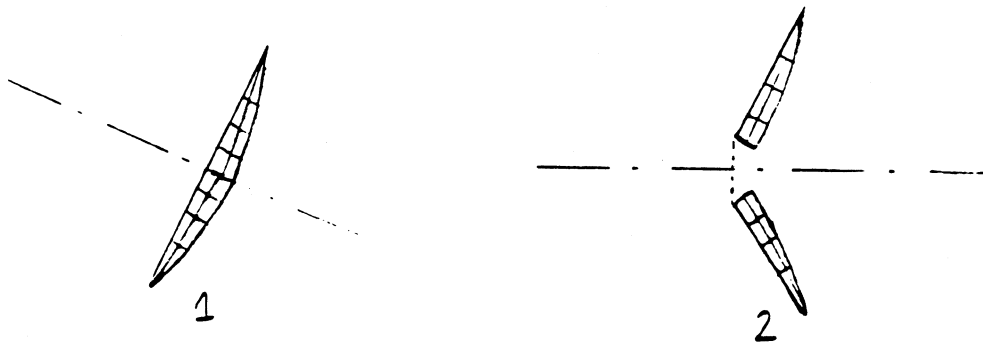
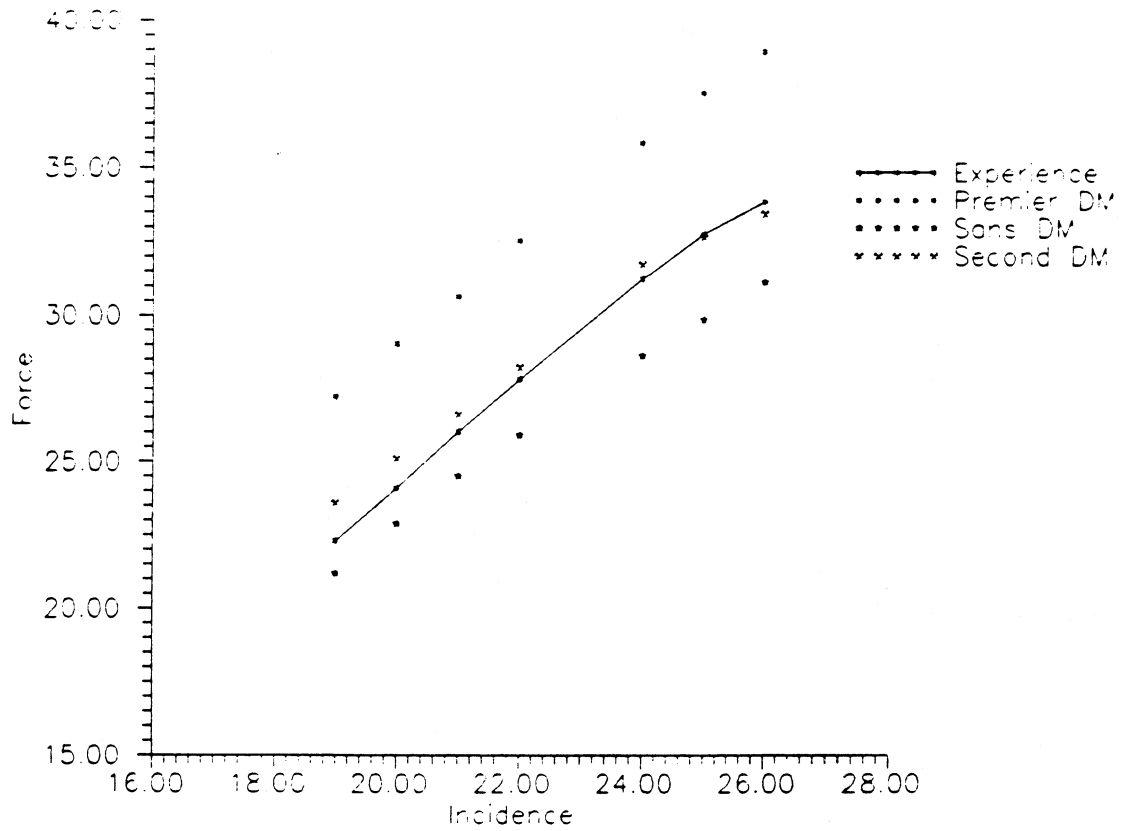
Les résultats expérimentaux utilisés proviennent d'essais effectués dans la soufflerie de l'ENSMA sur un grément type 12 m J.I., le grément étant placé sur une carène gîtée (angle de gîte: 20 degrés.) L'ouverture du foc et de la grand-voile par rapport à l'axe de la carène sont respectivement de 3,5 et de 7 degrés, le cap (i-e l'angle entre l'axe de la carène et l'écoulement incident) variant de 19 à 26 degrés. Pour espérer obtenir des résultats réalistes, il est ici nécessaire de prendre en compte l'effet de sol ainsi que celui de la carène. Ayant choisi de rester dans un premier temps avec des modèles simples, deux types de double modèle sont présentés, l'un ne prenant en compte que l'effet de sol, l'autre considérant uniquement la présence du pont du bateau (figure 9). La portance est présentée sur le graphe ci-dessous (figure 10) pour les deux types de double modèle ainsi que pour un calcul effectué sans aucun double modèle. Les résultats tendent à prouver que c'est la prise en compte du sol qui s'avère la plus pertinente: la raison en est sans doute que le foc de la maquette utilisée n'était pas en contact réelle avec le pont, ce qui explique la portance exagéré qu'induit un double modèle simple prenant en compte le pont du bateau. Cependant, il serait osé de dire que l' précision du calcul prenant en compte la surface du sol démontre que l'influence du pont est négligeable: plus réaliste est sans doute de remarquer qu'à l'inverse de l'influence du pont qui tend à augmenter la portance se trouvent des phénomènes tels que la perturbation due à la présence du mât, phénomènes non pris en compte dans le calcul et qui, eux, tendent à diminuer la portance.

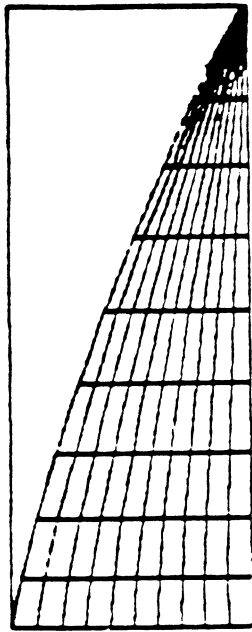
5 Interaction fluide-structure.

Le principe de couplage entre la méthode particulaire et le code éléments finis a déjà été présenté dans un rapport interne [8]: rappelons en ici les grandes lignes. Il s'agit tout d'abord de restreindre l'utilisation du code Coqtri (code de calculs de coques 3D du laboratoire de Mécanique du solide de l'Ecole Polytechnique) au calcul d'une réponse élastique instantanée couplée avec un calcul particulaire instationnaire afin d'obtenir, après convergence, une forme de voile réaliste dans le cas stationnaire. Ce calcul permettra par exemple de traiter les faibles incidences où il n'est pas concevable de considérer que la voile reste uniformément gonflée. De la même façon, on peut espérer observer l'évolution au cours du temps de la forme d'une voile soumise à un mouvement périodique tel qu'un mouvement de tangage ou de pilonnement. Sont présentés ici les premiers tests effectués sur une grand-voile (figure 11) sous formes de courbes d'isodéplacements, la figure en haut à droite montrant les déplacements relatifs d'une itération à l'autre (ces courbes ne prenant pas en compte l'intensité des déplacements, l'allure reste la même d'une itération à l'autre), les courbes du bas témoignant des déplacements absolus. Il y a peu à dire sur ces premiers résultats si ce n'est que les zones les plus déformées correspondent dans la réalité aux zones les plus renforcées de la voile (lattes, renfort plastique). Cependant, nous avons tout lieu de croire que dans le cas stationnaire, des résultats plus approfondis auront vu le jour avant la fin de l'hiver 1990/91.

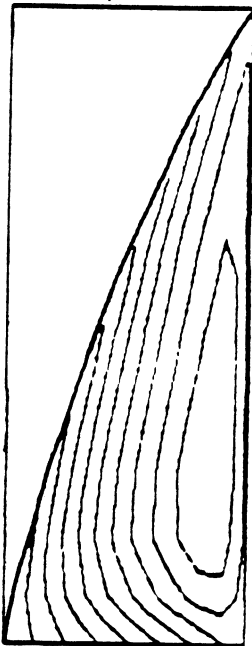
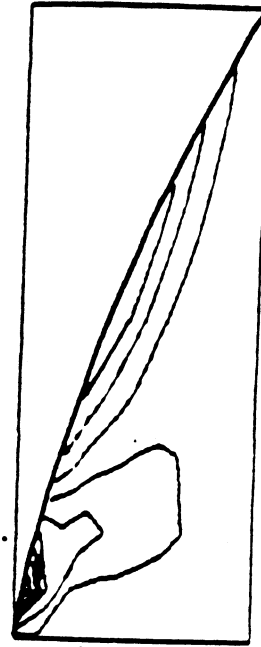
Références

- [1] J.H. Milgram : " *The analytical design of yacht sails* . " Transactions S.N.A.M.E., 1968.
- [2] B. Cantaloube et S. Huberson : La recherche aérospatiale 6, pp. 403-415, 1984.
- [3] S. Huberson et B. Cantaloube : " *Numerical calculation of rotor performances in real flight configurations* " ONERA.
- [4] A. Hémon et S. Huberson : " *Résolution numérique de problèmes non linéaires de l'hydrodynamique navale* " J.H.D. de Nantes 1989.
- [5] A. Zervos, S. Huberson, A. Hémon : J. of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics 27, pp. 65-76.
- [6] T.S.Luu, A.Dulieu: " *Calcul de l'hélice fonctionnant en arrière d'un corps à symétrie axiale* " ATMA vol.77 (1977) p.30
- [7] C.A. Marchaj : " *Aero-Hydrodynamics of sailings*. Dood, Mead & Company, 1979, pp. 639-650.
- [8] C. Carte, T. Charvet, M. Coulomb, F. Rouffi : " *Résolution numérique de problèmes d'hydrodynamique navale*. " Notes et documents L.I.M.S.I., 89-5.

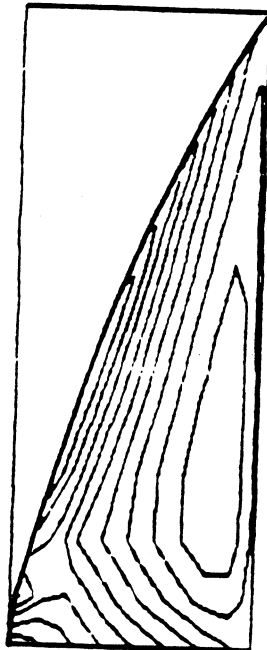
Figure 9: *Deux doubles modèles.*Figure 10: *Portance fonction du cap.*



déplacements relatifs
entre deux itérations.



forme initiale
de la voile.



déplacements absolus
au cours du temps.

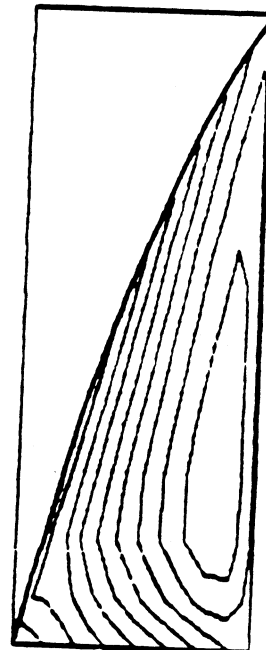


Figure 11: *Déformation de la voile au cours du temps.*