

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

5, 6, 7 MARS 2001 - NANTES

## **OPTIMISATION DE FORME POUR ECOULEMENTS DE FLUIDES VISQUEUX EN PRÉSENCE DE SURFACE LIBRE**

### **SHAPE OPTIMIZATION FOR VISCOUS FLOWS WITH FREE SURFACE**

**R. DUVIGNEAU, G.B. DENG, E. GUILMINEAU, P. QUEUTEY ET M. VISONNEAU**

Division Modélisation Numérique, Laboratoire de Mécanique des Fluides, CNRS UMR 6598  
Ecole Centrale de Nantes, B.P. 92101, 1 rue de la Noë 44321 Nantes Cedex 3

#### **Résumé**

Un outil d'optimisation de forme pour écoulements bi-dimensionnels, incompressibles et turbulents est développé. L'algorithme d'optimisation repose sur la méthode du simplexe non linéaire qui ne nécessite aucune évaluation de gradient de la fonctionnelle à minimiser. L'optimiseur est couplé au code ISIS qui résout les équations de Navier-Stokes en moyenne de Reynolds sur des maillages non structurés. La mise à jour du maillage est exécutée grâce à une analogie avec des ressorts de compression et de torsion. La validation est réalisée par un exercice de design inverse. La méthode est finalement appliquée à l'optimisation d'un profil immergé en présence de surface libre

#### **Summary**

A two dimensional shape optimization tool for incompressible and turbulent flows is developed. The non linear simplex method is used, which does not need any gradient evaluation of the functional to be minimized. The optimizer is coupled with the code ISIS, which solves Reynolds-averaged Navier-Stokes equations on unstructured grids. A analogy with both lineal and torsional springs is used for the mesh update. The validation is performed through an inverse design exercise. Then the method is applied to the optimization of an hydrofoil with free surface.

# I-INTRODUCTION

Durant ces dernières années, de nombreux progrès ont été réalisés dans le domaine de la simulation numérique. Le perfectionnement des schémas de discrétisation a donné naissance à des codes robustes, capables de traiter des géométries complexes, tandis que les progrès de l'informatique permettent actuellement d'effectuer des calculs bidimensionnels en quelques dizaines de minutes sur station de travail. Ces performances permettent aujourd'hui d'employer la simulation numérique dans un but d'optimisation, élargissant ainsi son cadre d'application habituel. Elle s'intègre de cette façon dans un contexte multidisciplinaire.

Les premiers développements en ce sens ont été réalisés en aérodynamique et appliqués aux équations d'Euler ([9]) puis de Navier-Stokes pour des écoulements compressibles sur des profils d'aile ([2, 6]). Le but de ces optimisations étaient généralement d'obtenir des profils à faible traînée et forte portance. Les problèmes appartenant au domaine de l'hydrodynamique, faisant intervenir des écoulements incompressibles, ont été plus rarement traités ([8]). Toutes ces applications reposent sur la théorie mathématique du contrôle optimal et utilisent des algorithmes d'optimisation sophistiqués, basés sur une évaluation de gradients pour déterminer la direction vers laquelle la recherche doit être effectuée. Ces approches sont lourdes à mettre en oeuvre, dans la mesure où l'évaluation des gradients exige la différentiation du code résolvant les équations de la mécanique des fluides. L'utilisation de codes complexes, mettant en jeu des schémas de discrétisation d'ordre élevé avec de fortes dépendances spatiales et des modèles de turbulence, rend dès lors la tâche difficile ([1]) et nécessite souvent des simplifications non justifiables a priori.

Une approche différente est testée dans cette étude, puisque la méthode d'optimisation utilisée considère la partie du code traitant la mécanique des fluides comme une "boîte noire", procurant ainsi plus de souplesse et de robustesse à l'algorithme global. L'optimiseur est couplé au code ISIS qui résout les équations de Navier-Stokes en moyenne de Reynolds sur maillages non structurés.

Cette méthode est finalement appliquée à un problème hydrodynamique, mettant en jeu un écoulement incompressible, turbulent, d'un fluide visqueux en présence d'une surface libre. A cette occasion, le calcul de surface libre est effectué par une nouvelle méthode pseudo-stationnaire.

## II-PROCÉDURE D'OPTIMISATION

### *1-Position du problème*

Un problème d'optimisation de forme en mécanique des fluides consiste à minimiser une fonctionnelle  $F$ , appelée *fonction de coût*, dépendant à la fois de paramètres géométriques  $D$  (*variables de forme*) et des variables d'écoulement  $U$ . La fonction de coût fait traditionnellement intervenir les efforts calculés sur un corps, mais on peut considérer une fonction de coût dépendant uniquement de paramètres physiques loin du corps, comme par exemple une élévation de surface libre. Dans ce cas, la dépendance entre la forme et la fonction de coût est indirecte.

Les équations de la mécanique des fluides imposent par ailleurs une relation implicite entre  $\mathbf{D}$  et  $\mathbf{U}$ . Les équations de Navier-Stokes en moyenne de Reynolds, utilisées dans le cadre de ce travail, fournissent finalement l'égalité  $\mathbf{R}(\mathbf{D}, \mathbf{U}) = \mathbf{0}$ . Ces conditions doivent être vérifiées à chaque étape de l'optimisation. En outre, un certain nombre de contraintes peuvent être ajoutées au problème d'optimisation. Certaines sont nécessaires à la résolution du problème, comme la limitation du domaine de variation des variables de forme. Ces limites sont notées  $\mathbf{L}_i$  et  $\mathbf{L}_s$ . D'autres sont liées à la physique du problème qu'on souhaite étudier. Par exemple, on peut vouloir imposer à un profil d'aile un volume fixe ou une portance minimale durant le processus d'optimisation. Ces contraintes d'égalités et d'inégalités sont notées  $C_e$  et  $C_i$ .

D'un point de vue mathématique, le problème peut finalement se résumer à :

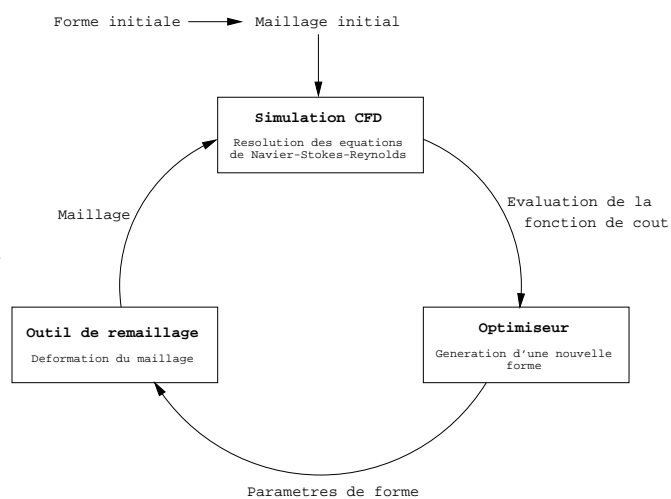
$$\begin{aligned} \text{Minimiser} \quad & F(\mathbf{D}, \mathbf{U}) \\ \text{Soumis à} \quad & \mathbf{R}(\mathbf{D}, \mathbf{U}) = \mathbf{0} \\ & \mathbf{L}_i \leq \mathbf{D} \leq \mathbf{L}_s \\ & C_e(\mathbf{D}, \mathbf{U}) = \mathbf{0} \\ & C_i(\mathbf{D}, \mathbf{U}) \leq \mathbf{0} \end{aligned}$$

On doit donc résoudre un problème d'optimisation faisant intervenir a priori une fonctionnelle et des contraintes non linéaires.

## 2-Schéma général

L'optimisation s'effectue de manière itérative à partir d'une forme initiale. A chaque itération, on cherche à modifier la forme courante de façon à l'améliorer du point de vue du critère choisi. Une simulation de l'écoulement doit être effectuée à chaque étape, pour chaque forme, afin d'évaluer la fonction de coût. A partir des informations données par  $F$ , l'algorithme d'optimisation doit alors déterminer une nouvelle forme, correspondant à une direction d'amélioration. Un maillage est finalement reconstruit autour de la nouvelle forme. La boucle d'optimisation décrite dans la figure 1 peut se résumer de manière synthétique par :

1. Choix d'une forme initiale et du critère d'optimisation  $F$
2. Choix d'une paramétrisation des formes  $\mathbf{D}$
3. Génération du maillage à partir de  $\mathbf{D}$
4. Résolution des équations régissant l'écoulement  $\rightarrow$  obtention de  $\mathbf{U}$
5. Evaluation de  $F(\mathbf{D}, \mathbf{U})$
6. Algorithme d'optimisation  $\rightarrow$  génération d'une nouvelle forme et mise à jour de  $\mathbf{D}$
7. Si critère d'arrêt atteint  $\rightarrow$  STOP  
Sinon retour étape 3.



**Figure 1. Boucle d'optimisation**

La procédure fait intervenir trois éléments principaux : l'optimiseur, le code traitant la mé-

canique des fluides et l'outil de remaillage. Ces différentes parties, chacune constituée d'algorithmes complexes, doivent interagir *automatiquement*, sans intervention humaine pour fournir un outil utilisable en pratique.

### ***3-Paramétrisation des formes***

Seuls des problèmes bi-dimensionnels sont étudiés dans cet article. Le choix d'une paramétrisation des formes, qui détermine la nature des *variables de forme*, est dictée par plusieurs obligations. On pourrait envisager de prendre comme variables de forme les positions de tous les points constituant la paroi du corps étudié et ainsi se passer de paramétrisation. Cependant, la résolution du problème d'optimisation est d'autant plus aisée que le nombre de variables est faible. Cette stratégie est donc délicate à mettre en oeuvre. D'autre part, il est nécessaire de conserver une forme régulière durant l'optimisation pour permettre la déformation du maillage et une bonne résolution de l'écoulement. Une paramétrisation des formes est donc préférable.

Une paramétrisation des formes par des B-splines a finalement été choisie. Les B-splines offrent en effet la possibilité de représenter des formes complexes par un faible nombre de points de contrôle, tout en garantissant la régularité des formes durant le processus d'optimisation, quelle que soit la position des points de contrôle ([3]).

Les variables de formes apparaissant dans l'algorithme d'optimisation correspondent donc à la position des points de contrôle des B-splines. Ce choix a une influence certaine sur la solution du problème dans la mesure où la paramétrisation détermine la nature de l'espace dans lequel la recherche s'effectue.

### ***4-Algorithme d'optimisation***

#### **4.1-Présentation**

Toutes les méthodes d'optimisation reposent sur une représentation de la fonctionnelle à minimiser. La méthode du simplexe non linéaire construit localement cette représentation en se basant uniquement sur la valeur de la fonctionnelle. Elle est donc notoirement plus simple à mettre en oeuvre que les algorithmes à base de gradient et permet de considérer le code traitant la mécanique des fluides comme une "boite noire".

La méthode du simplexe consiste à déplacer un simplexe à  $n + 1$  sommets dans  $\mathbb{R}^n$  ( un triangle dans  $\mathbb{R}^2$ , un tétraèdre dans  $\mathbb{R}^3$ , etc ), pour un problème à  $n$  paramètres, chaque sommet représentant une forme distincte. L'algorithme gère les déplacements de façon à réduire à chaque mouvement la valeur de la fonctionnelle estimée à chacun de ses sommets. Le sommet correspondant à la plus mauvaise valeur est projeté à travers l'hyperplan des sommets restants, de façon à définir une nouvelle forme susceptible d'avoir une meilleure valeur pour  $F$ . Le procédé est ainsi répété jusqu'à atteindre un critère d'arrêt. L'algorithme de base, développé par Spendley, Hext & Himsworth ([13]), a été perfectionné par Nelder & Mead ([11]) de façon à permettre au simplexe de changer de forme et de taille pour s'adapter localement à la topologie et ainsi accroître la robustesse et la rapidité de l'algorithme.

## 4.2-Algorithmme

La méthode décrite ci-dessous décompose le déplacement du simplexe en quatre mouvements : la *réflexion*, l'*expansion*, la *contraction* et la *réduction*. On note  $x_i^k$ ,  $i = 0, \dots, n$ , les  $n + 1$  sommets composant le simplexe à l'itération  $k$ .

**Initialisation** On crée au départ un simplexe de forme régulière, de manière à ne privilégier aucune direction de recherche. On évalue la valeur de la fonctionnelle correspondant à chaque sommet du simplexe.

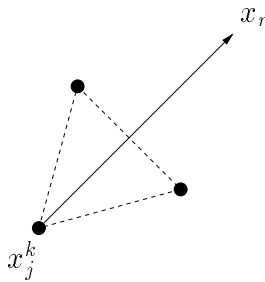
**Réflexion** A chaque itération, on détermine le sommet  $x_j^k$  auquel est associée la plus forte valeur de la fonctionnelle à minimiser, ainsi que le barycentre  $\bar{x}$  des sommets restants.

$$f(x_j^k) = \max_l(f(x_l^k)) \quad (1)$$

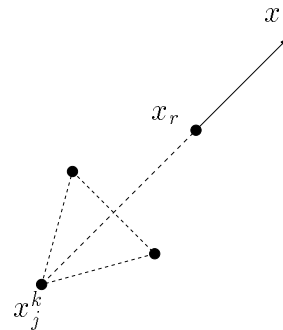
On calcule la projection  $x_r$  du sommet  $x_j^k$

$$x_r = (1 + \alpha)\bar{x} - \alpha x_j^k, \quad (2)$$

le paramètre  $\alpha$  étant généralement fixé à 1. Dans ce cas, le nouveau sommet est le symétrique de  $x_j^k$  par rapport au barycentre  $\bar{x}$  (figure 2).



**Figure 2. Mouvement de réflexion de  $x_j^k$  vers  $x_r$**



**Figure 3. Mouvement d'expansion de  $x_r$  vers  $x_e$**

Après évaluation de la valeur associée au nouveau sommet, plusieurs cas sont à envisager : Si on a  $\min_l(f(x_l^k)) < f(x_r) < f(x_j^k)$   $i \neq j$ , alors le sommet  $x_j^k$  est remplacé par  $x_r$  et l'algorithme se poursuit avec un nouveau simplexe qui conserve la même forme et la même taille. Si on constate que  $f(x_r) < \min_l(f(x_l^k))$ , alors on tente de déformer le simplexe dans cette direction en effectuant une expansion. Dans le cas où  $f(x_r) > f(x_j^k) \quad \forall i \neq j$ , on contracte le simplexe dans cette direction par un mouvement de contraction.

**Expansion** Lorsque le mouvement de réflexion est particulièrement bon, on essaie de prolonger le mouvement dans la même direction en modifiant la forme du simplexe. On définit le sommet expansé  $x_e$  par

$$x_e = \gamma x_r + (1 - \gamma)\bar{x}, \quad (3)$$

avec généralement  $\gamma$  pris égal à 2 (figure 3). Si  $f(x_e) < f(x_r)$ , on retient le simplexe déformé et  $x_e$  remplace  $x_j^k$ . Dans le cas contraire, l'expansion a échoué et  $x_r$  remplace  $x_j^k$ . On reprend ensuite l'algorithme au début avec un nouveau simplexe.



**Figure 4. Mouvement de contraction de  $x_r$  vers  $x_c$**

**Contraction** Lorsque le projeté  $x_r$  après la réflexion est encore le plus mauvais des sommets du simplexe, on contracte celui-ci dans la direction de réflexion. Si  $f(x_r) > f(x_j^k)$ , on définit le sommet contracté  $x_c$  par

$$x_c = \beta x_j^k + (1 - \beta)\bar{x}, \quad (4)$$

avec généralement  $\beta$  égal à  $1/2$ , ce qui place le nouveau sommet au milieu du segment  $[x_j^k\bar{x}]$  (figure 4(a)). Si  $f(x_r) < f(x_j^k)$ , le sommet contracté  $x_c$  est défini par

$$x_c = \beta x_r + (1 - \beta)\bar{x}, \quad (5)$$

et se situe au milieu du segment  $[x_r\bar{x}]$ (figure 4(b)). Le nouveau sommet  $x_c$  est retenu à moins que  $f(x_c) > f(x_r)$ . Dans ce cas la taille du simplexe n'est plus adaptée à la topologie du moment et on décide de le diminuer par une opération de réduction.

**Réduction** Pour réduire la taille du simplexe, on effectue une homothétie autour du meilleur sommet  $x_m^k$ , tel que  $f(x_m^k) = \min_l(f(x_l^k))$ . Tous les sommets, sauf  $x_m^k$ , sont alors déplacés par

$$x_i^{k+1} = \frac{x_i^k + x_m^k}{2} \quad \forall i \neq m. \quad (6)$$

Si  $x_r > x_j^k$ , le sommet  $x_j^k$  subit la réduction (figure 5(a)). Dans le cas contraire  $x_r < x_j^k$ , le sommet  $x_r$  remplace auparavant  $x_j^k$  puis subit la réduction(figure 5(b)). On peut alors reprendre le début de l'algorithme avec un nouveau simplexe, mieux adapté à la topologie du problème.

### 4.3-Remarques

Les mouvements du simplexe permettent d'adapter la forme de ce dernier à la topologie locale. La capacité du simplexe à changer de forme est un point clé de l'algorithme. Cependant, une trop grande déformation, étirement ou aplatissement dans une direction, peut être nuisible à la convergence lors d'un changement de la topologie environnante. Ainsi, il est bon que le simplexe conserve une certaine régularité pour pouvoir réagir efficacement à une modification de la topologie. Il est donc conseillé de réinitialiser le simplexe par un ensemble régulier, au bout d'un certain nombre d'itérations ou lorsque l'étirement devient trop important.



**Figure 5. Mouvement de réduction**

Lorsque le simplexe se rapproche d'un minimum, sa taille se réduit grâce au mouvement de réduction. A terme, l'algorithme d'optimisation converge donc vers une forme unique.

La méthode est particulièrement adaptée à l'optimisation de forme, dans la mesure où seule *une comparaison entre les valeurs associées aux différentes formes* est nécessaire pour déterminer le plus mauvais sommet du simplexe et obtenir la direction de recherche. Ainsi, il n'est pas impératif d'avoir une forte convergence pour chacune des simulations effectuées lors de l'évaluation des sommets du simplexe.

#### 4.4-Prise en compte des contraintes

Deux types de contraintes sont à considérer : celles portant sur la limitation du domaine de variation des variables de forme et les contraintes physiques liées au problème traité. La limitation du domaine de variation des variables de forme peut être directement prise en compte dans l'algorithme du simplexe. Lorsque la topologie de la fonctionnelle crée un déplacement du simplexe au delà d'une limite  $L_i$  ou  $L_s$ , on "écrase" le simplexe sur cette limite. L'optimisation peut alors se poursuivre dans le sous espace de dimension  $n - 1$  correspondant à cette limite, avec un simplexe à  $n + 1$  sommets. Lors de la réinitialisation suivante, certains sommets se retrouveront dans le domaine initial et testeront si il convient de quitter la contrainte.

Les contraintes physiques liées au problème traité sont prises en compte par une méthode de pénalisation : on minimise la fonctionnelle pénalisée par deux termes :

$$F(\mathbf{D}, \mathbf{U}) + \alpha |\mathbf{C}_e| + \beta \max(\mathbf{C}_i, 0) \quad (7)$$

### 5-Remaillage

On utilise des maillages hybrides, constitués d'une partie structurée située autour du corps solide et d'une partie non structurée dans la partie périphérique du domaine de calcul, où les gradients sont faibles. Après la détermination par l'optimiseur d'une nouvelle forme, un nouveau maillage correspondant à cette nouvelle limitante doit être généré. Etant donné la difficulté à générer *automatiquement* un maillage adapté au calcul pour un écoulement visqueux, une stratégie de déformation du maillage initial a été adoptée.

Une méthode classique pour déformer un maillage revient à utiliser une analogie avec des ressorts de traction, le maillage étant alors perçu comme un système mécanique discret en équilibre quasi-statique, dont la position des frontières est imposée. Dans cette analogie, chaque segment reliant deux noeuds  $i$  et  $j$  est remplacé par un ressort de traction dont la raideur est inversement proportionnelle au carré de la distance entre les noeuds.

$$k_{ij} \propto \frac{1}{l_{ij}^2} \quad (8)$$

A chaque remaillage, la position des noeuds est obtenue en résolvant le problème quasi-statique

$$K_{trac}q = 0 \quad q = \bar{q} \quad \text{aux frontières} \quad (9)$$

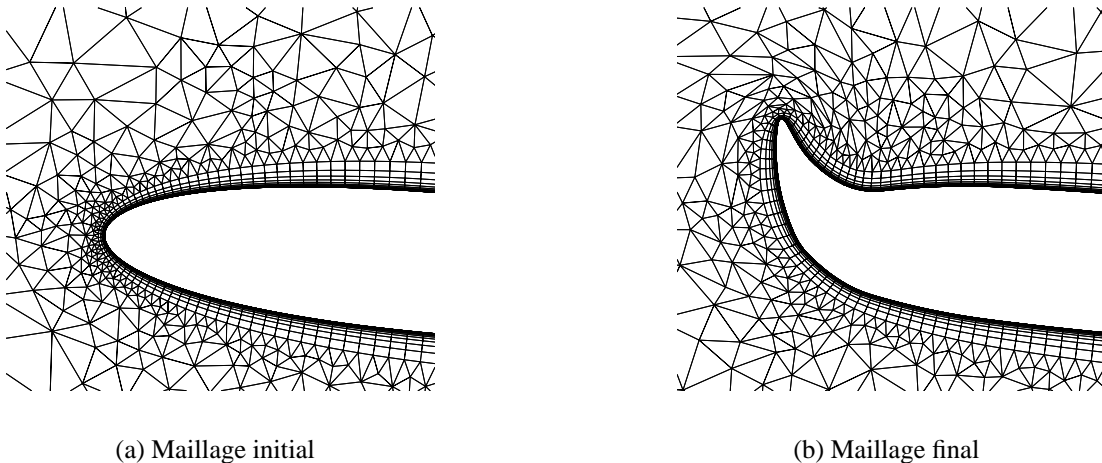
où  $K_{trac}$  est la matrice raideur et  $q$  le déplacement des noeuds. Cette stratégie est très efficace pour déformer des maillages triangulaires mais peut échouer lors de la déformation de maillages structurés près des parois, où l'étirement des mailles est important, générant des croisements de segments ([2]). Pour remédier à ce problème, on associe à chaque angle  $\theta_i^{ijk}$  entre deux segments  $[ij]$  et  $[ik]$  un ressort de torsion, de raideur inversement proportionnelle à la mesure de l'angle ([7]) :

$$C_i^{ijk} \propto \frac{1}{\sin^2(\theta_i^{ijk})} \quad (10)$$

Le problème devient alors

$$(K_{trac} + K_{tors})q = 0 \quad q = \bar{q} \quad \text{aux frontières} \quad (11)$$

L'association des ressorts de traction et torsion fournit un outil robuste, susceptible de traiter des maillages complexes pour des déformations importantes, comme le montre l'exemple des figures 6(a) et 6(b), représentant la déformation d'un maillage du bord d'attaque d'un NACA 0012.



**Figure 6. Exemple de déformation de maillage**



## 6-Résolution des équations de Navier-Stokes

Les équations de Navier-Stokes en moyenne de Reynolds sont résolues à l'aide du code ISIS qui repose sur une méthode de discrétisation de type volumes finis utilisant des volumes de contrôle ayant un nombre de faces arbitraires. Cette approche générale permet d'utiliser des maillages hybrides (structuré près des parois et non-structuré au loin) et rend possible l'implantation de procédures de raffinement automatique de maillage en fonction de l'estimation à-posteriori de l'erreur.

La modélisation de la turbulence est assurée par des modèles de turbulence à viscosité turbulente (modèles à une équation ([12]) ou à deux équations ([10])) ainsi que par des modèles à équations de transport des contraintes turbulentes  $R_{ij} - \omega$  ([5]). Tous ces modèles sont munis de formulations bas-Reynolds proche paroi évitant ainsi le recours aux conditions aux limites de type fonction de paroi.

Les écoulements à surface libre sont modélisés à l'aide de deux approches complémentaires, l'approche monofluide avec suivi de la surface libre et maillage mobile, et l'approche multi-fluides avec capture de la surface libre sur un maillage fixe ([4]).

Chaque variable dépendante est stockée aux centres de chaque volume de contrôle et les intégrales de surface et de volume sont évaluées par des approximations précises au second ordre en espace et totalement implicite en temps. Le couplage entre les équations de transport de quantité de mouvement et la contrainte de continuité est assuré par l'algorithme PISO.

## III-APPLICATIONS

### 1-Design inverse

La validation de la procédure d'optimisation est réalisée par un exercice de design inverse. Il s'agit d'atteindre une distribution de pression sur un profil d'aile correspondant à une forme connue. Plus précisément, un profil NACA 0012 est paramétré par des B-splines, dont on déplace manuellement les points de contrôle de manière à obtenir une forme cible. Une simulation de l'écoulement est effectuée et fournit une distribution de pression. Une optimisation est ensuite réalisée, durant laquelle on minimise la différence entre les distributions de pression sur la forme cible et sur la forme courante. La fonction de coût est :

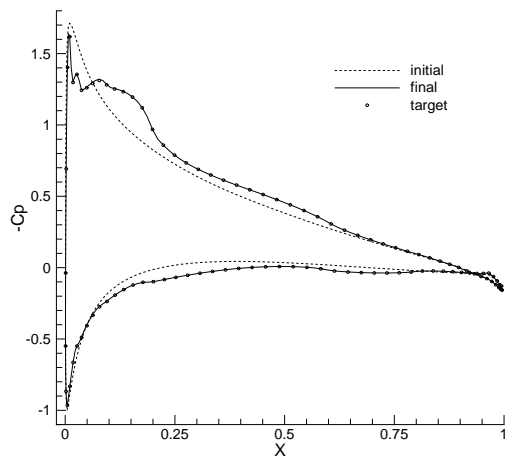
$$F = \|P - P_{cible}\| \quad (12)$$

Les figures 7 et 8 montrent que la distribution de pression est bien atteinte et la forme cible parfaitement restituée, ce qui valide le processus d'optimisation.

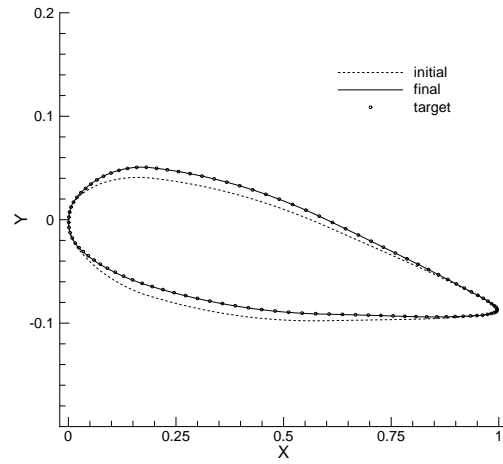
### 2-Profil immergé

#### 2.1-Configuration initiale

On considère comme profil initial un NACA 0012 de longueur unité, en incidence  $5^\circ$ , immergé à une cote  $z = -1,034$ . L'écoulement est caractérisé par les nombres de Reynolds  $Re = 1,62.10^5$  et de Froude  $Fr = 0,567$ . La figure 9 montre la configuration du problème.

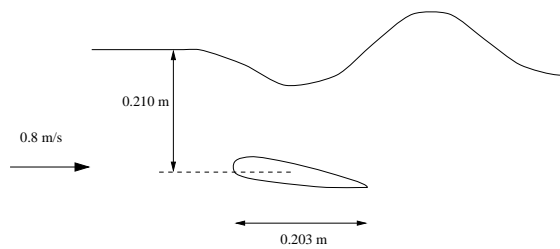


**Figure 7. Distributions de pression**

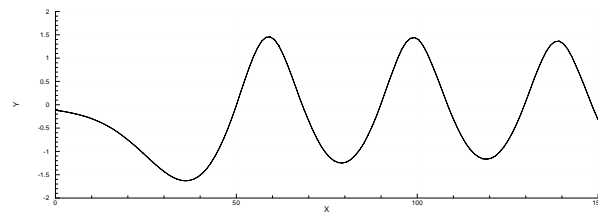


**Figure 8. Formes des Profils**

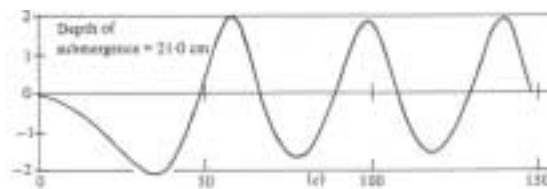
Elle correspond au cas limite pour une surface libre stationnaire sans déferlement. On utilise un maillage de 24736 noeuds, comprenant un maillage structuré en O de  $298 \times 40$  noeuds autour du profil, la zone extérieure jusqu'à la surface libre étant complétée par des volumes triangulaires. Le modèle de turbulence utilisé est le modèle de Spalart-Allmaras ([12]).



**Figure 9. Configuration du cas test**



(a) Calcul



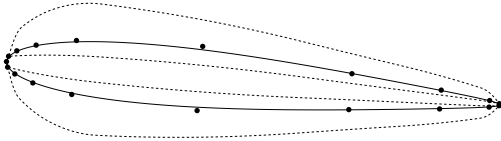
(b) Experience

**Figure 10. Comparaison élévations de surface libre**

La comparaison des élévations de surface libre obtenues par calcul (figure 10(a)) et par expérience (figure 10(b)) montre une bonne prédiction de la période et de la phase, tandis que l'élévation est légèrement sous estimée. Le choix de traiter un cas limite pour le déferlement est probablement la cause de ce phénomène ([4]). Le champ de pression, incluant le terme de gravité, est illustré par les figures 19 et 23. La figure 12 représente quelques lignes de courant, tandis que les figures 21 et 25 montrent deux vues du maillage après déformation.

## 2.2-Optimisation

On cherche à déterminer une forme de profil qui minimise l'élévation maximale de la surface libre dans le domaine de calcul, en partant d'une forme initiale NACA 0012. Une première optimisation est effectuée, pour laquelle la seule contrainte prise en compte est la limitation du domaine de variation des variables géométriques. La paramétrisation est réalisée à l'aide de B-splines cubiques comportant 21 points de contrôle, le bord d'attaque et le bord de fuite étant maintenus fixes durant l'optimisation. La figure 11 montre les profils extrêmes pouvant être atteints, ainsi que la position des points de contrôle paramétrant la forme initiale.



**Figure 11. Paramétrisation**

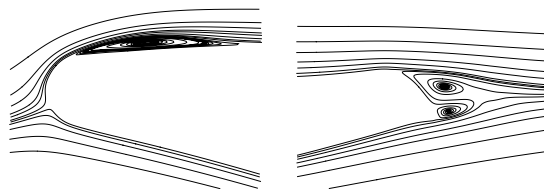


**Figure 12. Lignes de courant cas initial**

La forme finale obtenue, illustrée par la figure 13, génère une élévation de surface libre réduite de 70%. Le champ de pression et le maillage correspondant sont présentés sur les figures 20, 22, 24 et 26. Quelques lignes de courant sont reportées sur la figure 14. On remarque que la forme finale atteint les limites du domaine de variations autorisées en plusieurs points. Ces frontières sont donc nécessaires à l'optimisation et conditionnent la forme finale. On constate que l'optimiseur tend à éloigner l'extrados de la surface libre, afin de minimiser l'effet du corps sur l'élévation de la surface. Au cours de l'optimisation, l'algorithme cherche finalement à réduire la dépression créée par le profil. L'interprétation des effets de la partie arrière du profil est plus délicate. La complexité de l'écoulement, comprenant plusieurs recirculations, justifie a posteriori le choix de réaliser un calcul incluant des effets de viscosité.



**Figure 13. Forme finale cas 1**

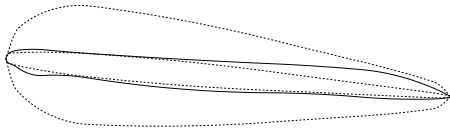


**Figure 14. Lignes de courant cas 1**

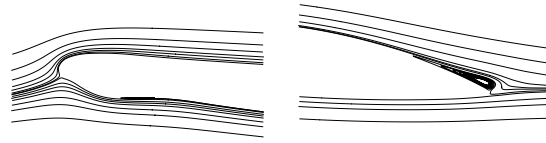
L'optimisation est effectuée en 300 heures sur une machine mono-processeur et correspond à 400 simulations. L'évolution de l'élévation de la surface libre au cours de l'optimisation est représentée par la figure 17. On note que la portance décroît fortement durant le processus, comme l'atteste la figure 18.

Une seconde optimisation est alors réalisée, à laquelle on adjoint une contrainte sur la portance. La réduction de l'élévation de surface libre se limite alors à 14% mais la portance est conservée (figures 17 et 18). La forme finale, illustrée par la figure 15, est fort différente du cas précédent, de même que les caractéristiques de l'écoulement (figures 16, 27 et 28). Le processus d'optimisation tend toujours à éloigner le corps de la surface, du moins sur la partie avant du corps. Le profil final ne génère pas de décollement sur le bord d'attaque, contrairement au cas

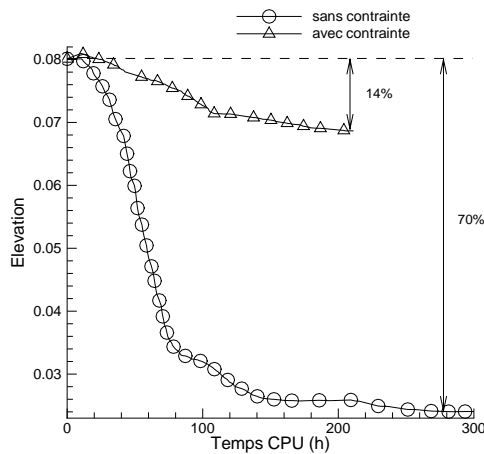
précédent, et a une forme intrados très différente. Le temps de calcul est légèrement inférieur au cas précédent.



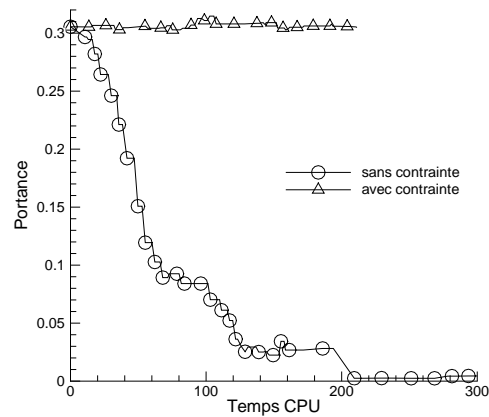
**Figure 15. Forme finale cas 2**



**Figure 16. Lignes de courant cas 2**



**Figure 17. Evolution de l'élévation**

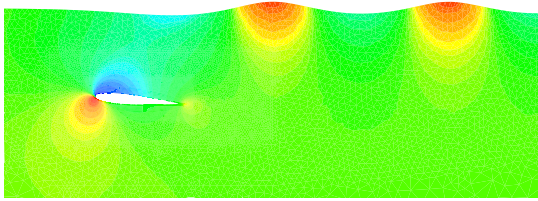


**Figure 18. Evolution de la portance**

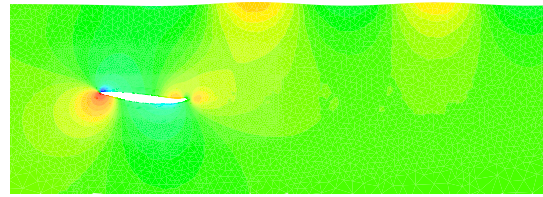
## IV-CONCLUSION

L'objectif de cette étude était la réalisation d'un outil d'optimisation de forme applicable à des problèmes faisant intervenir des écoulements complexes. La méthode du simplexe non linéaire, ne nécessitant pas de calcul de gradient, a été couplée au code ISIS qui résout les équations de Navier-Stokes en moyenne de Reynolds sur maillages non structurés. La mise à jour du maillage est réalisée par une analogie avec des ressorts de torsion et de compression.

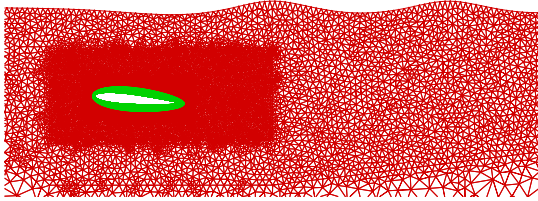
Le produit s'est révélé être particulièrement robuste et adapté à ce type d'étude, comme le montre son application à un problème faisant intervenir un écoulement de fluide visqueux avec surface libre. Néanmoins, le coût de calcul d'une optimisation reste important et une stratégie de parallélisation semble souhaitable, tout particulièrement pour des calculs tridimensionnels.



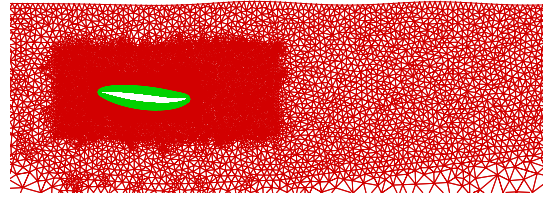
**Figure 19. Pression cas initial**



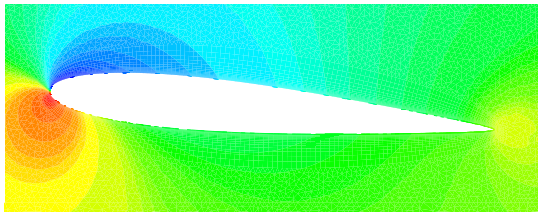
**Figure 20. Pression cas 1 final**



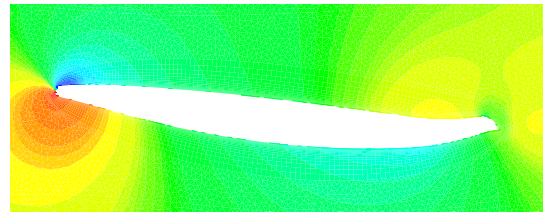
**Figure 21. Maillage cas initial**



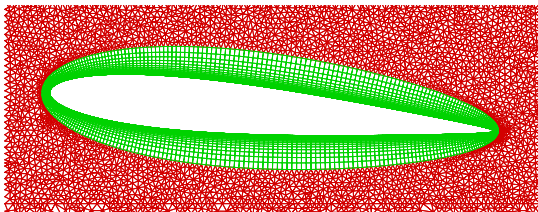
**Figure 22. Maillage cas 1 final**



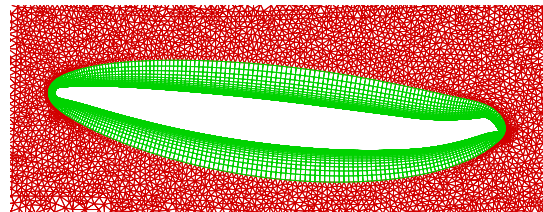
**Figure 23. Pression profil cas initial**



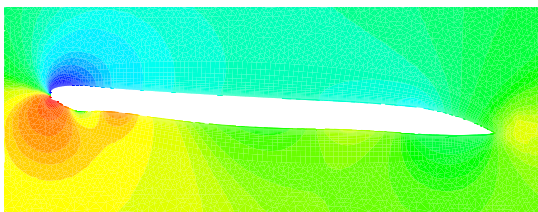
**Figure 24. Pression profil cas 1 final**



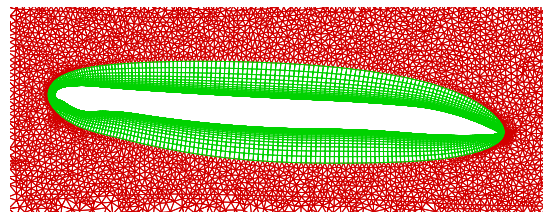
**Figure 25. Maillage profil cas initial**



**Figure 26. Maillage profil cas 1 final**



**Figure 27. Pression profil cas 2 final**



**Figure 28. Maillage profil cas 2 final**

## REFERENCES

- [1] W. K. ANDERSON AND D. L. BONHAUS, *Aerodynamic Design on Unstructured Grids for Turbulent Flows*. NASA Technical Memorandum 112867, June 1997.
- [2] W. K. ANDERSON AND V. VENKATAKRISHNAN, *Aerodynamic Design Optimization on Unstructured Grids with a Continuous Adjoint Formulation*. AIAA Paper 97-0643, 1997.
- [3] C. DE BOOR, *A Practical Guide to Splines*, Springer Verlag, 1978.
- [4] G. DENG, E. GUILMINEAU, P. QUEUTEY, AND M. VISONNEAU, *Capture et Suivi d'Interfaces d'Écoulements de Fluides Visqueux Incompressibles non Miscibles*, in 8e Journées de l'Hydrodynamique, Ecole Centrale de Nantes, Mars 2001.
- [5] G. DENG AND M. VISONNEAU, *Comparison of Explicit Algebraic Stress Models and Second-Order Turbulence Closures for Steady Flows around the KVLCC2 Ship at Model and Full Scales*, in A Workshop on Numerical ship hydrodynamics, L. Larsson, F. Stern, and V. Bertram, eds., Göteborg, September 2000.
- [6] J. ELLIOTT AND J. PERAIRE, *Aerodynamic Optimization using Unstructured Meshes with Viscous Effects*. AIAA Paper 97-1849, 1996.
- [7] C. FARHAT, C. DEGAND, B. KOOBUS, AND M. LESOINNE, *Torsional Springs for Two Dimensional Dynamic Unstructured Fluid Meshes*, Computational Methods in Applied Mechanics and Engineering, 163 (1998), pp. 231–245.
- [8] T. HINO, *Shape Optimization of Practical Ship Hull Forms using Navier-Stokes Analysis*, in Proceedings of the 7th International Conference on Numerical Ship Hydrodynamics, 1999.
- [9] A. JAMESON, *Aerodynamic Design via Control Theory*, Journal of Scientific Computing, 3 (1988), pp. 233–260.
- [10] F. MENTER, *Zonal Two-Equations  $K - \omega$  Turbulence Models for Aerodynamic Flows*, AIAA paper, 93-2906 (1993).
- [11] J. A. NELDER AND R. MEAD, *A Simplex Method for Function Minimization*, Computer Journal, 7 (1965), pp. 308–313.
- [12] P. R. SPALART AND S. R. ALLMARAS, *A One-Equation Turbulence Model for Aerodynamic Flows*. AIAA Paper 92-0439, 1991.
- [13] W. SPENDLEY, G. R. HEXT, AND F. R. HIMSWORTH, *Sequential Application of Simplex Designs in Optimisation and Evolutionary Operation*, Technometrics, 4 (1962), pp. 441–461.