

**CALCUL DES ECOULEMENTS VISQUEUX A SURFACE
LIBRE AUTOUR DE BATEAUX EN AUTOPROPULSION A
L'AIDE D'INTERFACES GLISSANTES**

***COMPUTATION OF FREE-SURFACE VISCOUS FLOWS
AROUND SELF-PROPELLED SHIPS USING SLIDING
INTERFACES***

**J. WACKERS, G.B. DENG, E. GUILMINEAU, A. LEROYER,
P. QUEUTEY, M. VISONNEAU,**

Laboratoire de recherche en Hydrodynamique, Energétique et Environnement Atmosphérique
CNRS UMR 6598 / Ecole Centrale de Nantes, BP 92101, 44321 NANTES Cedex 3
jeroen.wackers@ec-nantes.fr

Résumé

La simulation précise d'un bateau en autopropulsion est un défi important pour le calcul numérique. Une méthode d'interfaces glissantes a été implémentée récemment dans le code URANSE ISIS-CFD, qui fonctionne avec la technique de raffinement automatique de maillage disponible dans ce logiciel. Ce papier présente la validation du solveur pour des calculs de bateaux avec hélice. Le cas test est le porte-conteneurs KCS qui a été proposé pour les workshops Tokyo 2005 et Göteborg 2010.

Summary

Accurate prediction for a self-propelled ship is a challenging task for CFD computation. A sliding interface method has recently been implemented in the URANSE code ISIS-CFD, which works with the adaptive mesh refinement technique available in this code. This paper is devoted to the validation of the solver for ship-propeller flow computation. The test case chosen is the KCS test case proposed for the Tokyo 2005 and Gothenburg 2010 workshop.

I Introduction

L'interaction entre un navire et son hélice est un sujet d'importance majeure pour la conception de bateaux. Actuellement, un des sujets de recherche primaires de notre équipe est la simulation d'hélices dans des conditions opérationnelles extrêmes, tous les aspects physiques étant modélisés d'une manière aussi correcte que possible. Ceci nécessite la capacité de simuler une hélice en rotation derrière une navire en prenant en compte les effets de déformation de la surface libre, de cavitation et de ventilation du propulseur. Ces nouvelles fonctionnalités implantées dans le solveur volumes finis sur maillages non

structurés ISIS-CFD développés par les chercheurs de l'équipe DSPM du LHEEA [2, 6], en étendant considérablement le domaine d'application sans en réduire le degré de généralité. Ce code a par ailleurs été rigoureusement validé pour le calcul de la résistance à l'avancement et du sillage à l'aide de modélisations avancées de la turbulence comme le modèle de turbulence EASM (Explicit Algebraic Stress Model) avec correction de rotation.

Pour réaliser la simulation numérique d'une hélice, il est essentiel de développer une technique d'interface glissante qui permet à une partie du maillage de tourner à l'intérieur du maillage principal, tout en conservant la connexion entre les deux parties (voir la figure 1). De plus, une grande partie des phénomènes à étudier prend son origine dans des zones de basse pression très localisées, dont la simulation fiable peut être réalisée à l'aide du raffinement automatique adaptatif du maillage. C'est la raison pour laquelle cette méthode de traitement des interfaces glissantes récemment développée a été construite spécifiquement pour être combinée avec la technique existante de raffinement de maillage du code ISIS-CFD [8, 10, 9]. Les deux méthodologies sont suffisamment puissantes pour accepter les maillages hexaédriques non-structurés que nous utilisons habituellement.

Les méthodes d'interfaces glissantes pour des maillages non-structurés sont en général plus compliquées que pour des solveurs structurés. Entre autres, la connectivité entre les cellules des deux sous-domaines doit être reconstruite régulièrement, car elle n'a pas de progression répétitive. Il n'est également pas facile d'assurer la conservation des flux sur l'interface entre les sous-domaines. Nous avons fait le choix d'une connexion qui ne garantit pas explicitement la conservation ; elle est basée sur des liens entre les cellules et les faces qui imitent le plus fidèlement possible les connectivités habituelles des cellules.

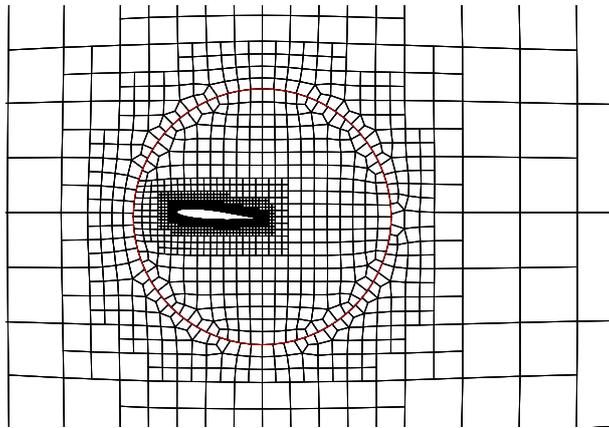


Figure 1 – Exemple d'une interface glissante autour d'un profil d'aile en rotation. Le cercle entre les deux parties non-conformes du maillage représente l'interface glissante.

La technique de raffinement automatique, comme celle des interfaces glissantes, est entièrement parallèle et il n'y a pas de limitation pour le partitionnement des sous-domaines : des parties de plusieurs sous-domaines peuvent se retrouver sur le même processeur. La combinaison avec les interfaces glissantes est obtenue en considérant les faces d'interface comme des faces appartenant à une frontière standard lors du raffinement de maillage.

Ce papier introduit d'abord le solveur ISIS-CFD (section II) en décrivant notamment le calcul des flux car cette partie est essentielle pour la construction des interfaces glissantes, présentée dans la section III. Une brève description de la méthode de raffinement automatique est donnée dans la section IV, suivie des détails de son couplage avec les interfaces glissantes. Finalement, la section V présente des calculs numériques pour l'hélice INSEAN E779A en eau libre et pour le navire KCS en autopropulsion.

II Le solveur ISIS-CFD

II- 1 Description générale du solveur

Le solveur fluide ISIS-CFD, disponible dans la suite de calculs FINETM/Marine distribuée internationalement par NUMECA Int., résoud les équations de Navier-Stokes instationnaires en moyenne de Reynolds (URANS) pour des écoulements incompressibles à surface libre ([2, 6]). Le solveur repose sur la méthode des volumes finis pour construire la discrétisation en espace des équations de transport. Le couplage vitesse – pression est obtenue avec une méthode de type Rhie & Chow SIMPLE : pour chaque pas de temps, les mises à jour de la vitesse viennent des équations de quantité de mouvement et la pression est donnée par l'équation de conservation de la masse, transformée en équation de pression. La discrétisation est basée sur les faces. Alors que les champs des inconnus sont stockés aux centres des cellules, les systèmes d'équations utilisés pour l'intégration implicite en temps sont construits face par face. Les flux sont calculés dans une boucle sur les faces et la contribution de chaque face est ajoutée aux deux cellules partageant cette face. Cette technique n'impose pas de contrainte spécifique sur la topologie des cellules. Les maillages peuvent alors être totalement non-structurés ; des cellules avec un nombre arbitraire de faces aux formes arbitraires sont permises.

Les écoulements à surface libre sont simulés par une approche multifluide. La surface libre est capturée à l'aide d'une équation de conservation pour la fraction volumique de l'eau, discrétisée par des schémas compressifs spécifiques [6, 11]. En outre, le solveur contient des modèles de turbulence sophistiqués [2] et la résolution des mouvements à 6 d.d.l. pour des navires en mouvement libre [4]. La parallélisation est effectuée à l'aide d'une décomposition de domaine. Les cellules du maillage sont réparties sur plusieurs partitions ; les faces d'interface sur les frontières sont partagées entre les partitions voisines et l'information sur ces faces est échangée avec le protocole MPI (Message Passing Interface).

II- 2 Reconstruction sur les faces

Les flux sur les faces sont calculés à partir des quantités connues aux centres des cellules, reconstruites vers les centres des faces (figure 2). Pour les flux diffusifs et les coefficients dans l'équation de pression, les quantités sur les faces et les dérivées normales sont obtenues avec des schémas centrés utilisant les données des centres des cellules L et R partageant cette face. Si ces centres ne sont pas alignés avec la normale à la face, des corrections non-orthogonales basées sur les gradients aux centres des cellules sont ajoutées. Pour les flux convectifs, le schéma AVLSMART [5] est appliquée dans le contexte du NVD (Normalised Variable Diagram) pour des maillages non-structurés où des schémas limités sont construits à partir d'une pondération du schéma centré et de l'extrapolation à partir du gradient dans la cellule amont. Le détail des reconstructions est décrit dans [6].

Pour ce qui suit, il est essentiel de rappeler que tous les flux à travers une face peuvent être reconstruits à partir des champs et des gradients aux centres de ses deux cellules voisines ainsi que des positions de ces centres. Pour la parallélisation, cette information sur les cellules voisines est la seule donnée qui est échangée à travers les faces d'interface entre partitions.

III Implémentation des interfaces glissantes

Pour le calcul des flux à travers une interface glissante, il faut établir des connexions entre les cellules situées de chaque côté de l'interface. La procédure de connection pour ces

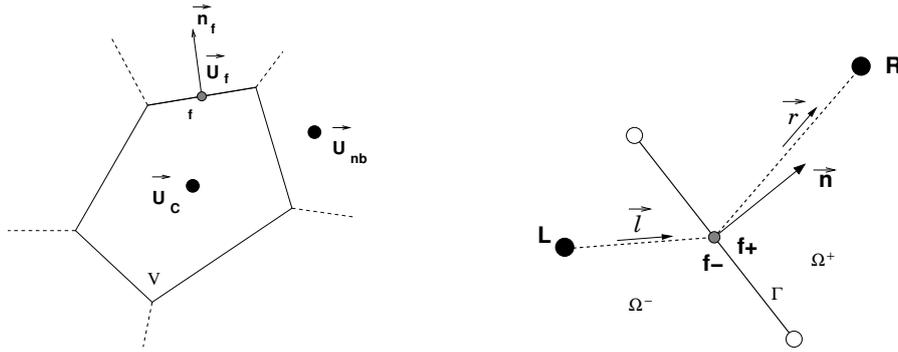


Figure 2 – Cellules, faces et voisines (à gauche) et la reconstruction sur une face (à droite).

cellules est réalisée à chaque pas de temps pour prendre en compte la rotation relative de chacun des deux sous-domaines. La procédure a été conçue pour s'écarter le moins possible de ce qui est fait pour les cellules standard. Par conséquent, il n'y a pas de procédure d'interpolation spécifique. Pour une cellule et une face sur l'interface, nous cherchons le centre de cellule (dans l'autre sous-domaine) qui est le mieux adapté à la face. Cette cellule est utilisée ensuite comme cellule voisine pour un calcul des flux identique à celui décrit dans la section II- 2.

Les cellules voisines sont recherchées à l'aide d'une procédure en trois étapes (fig. 3).

1. Un point 'fantôme' temporaire est construit à l'extérieur de chaque face glissante. Ce point est l'image miroir du centre de la cellule à l'intérieur, sauf à proximité d'angles dans la géométrie de l'interface où le vecteur normal de la face est utilisé. Des points fantômes sont placés aux deux côtés de l'interface, pour fournir des reconstructions dans les deux sous-domaines (la figure 3 montre uniquement le point pour le sous-domaine à gauche). Les points fantômes ne sont pas utilisés pour l'interpolation, ils servent uniquement comme repère pour la suite de la recherche.
2. Les positions actuelles des interfaces glissantes sont agglomérées à travers l'ensemble des partitions pour former un tableau global. Ensuite, dans chaque partition un algorithme de recherche est lancé sur ce tableau afin d'obtenir pour chaque point fantôme local la face glissante globale la plus proche.
3. Les cellules voisines à l'intérieur des faces glissantes trouvées sont utilisées comme voisines extérieures pour les faces glissantes locales. Si la voisine extérieure est sur un autre processeur, une communication MPI est établie comme pour la décomposition

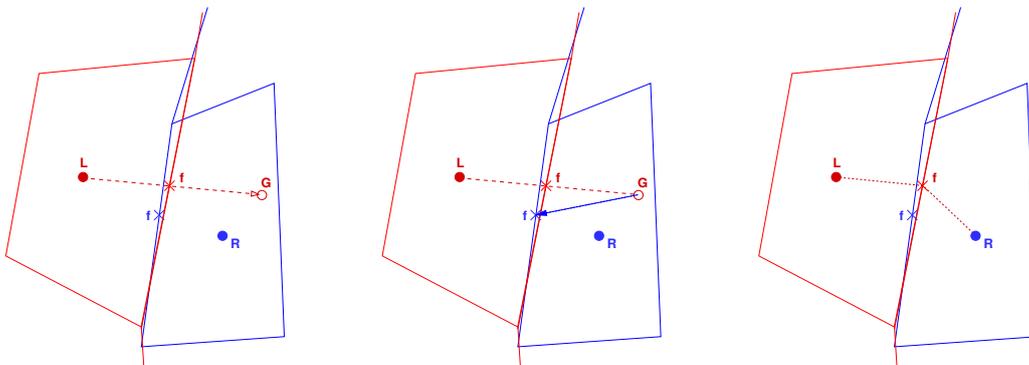


Figure 3 – Interface glissante : construction des points fantômes (à gauche), recherche parmi les faces globales (centre), la nouvelle cellule voisine (à droite).

de domaine habituelle. Si les deux cellules se trouvent sur le même processeur, la communication est effectuée en local. Une cellule sur une interface glissante peut être la voisine de plus d'une cellule, ou d'aucune.

Comme on le voit, nous ne divisons pas explicitement le maillage en deux par l'affectation d'un nombre fixe de processeurs à chaque sous-domaine, conséquence d'un partitionnement séparé des sous-domaines. Au contraire, le maillage global peut être distribué de façon arbitraire sur les processeurs ; une 'couleur' est donnée à chaque cellule afin d'indiquer à quel sous-domaine elle appartient. Ceci crée la flexibilité de lancer le code sur un seul processeur comme d'effectuer du raffinement automatique de maillage. En effet, lorsqu'un sous-domaine est plus raffiné plus qu'un autre, la distribution équilibrée de l'effort de calcul serait perdue si chaque domaine était calculé sur un nombre fixe de processeurs. Avec notre approche, il est possible de redistribuer librement afin d'assurer à tout moment un parfait équilibrage des efforts de calculs de chaque processeur.

IV Raffinement automatique de maillage

IV– 1 Description de la méthode

La technique de raffinement automatique de maillage incluse dans ISIS-CFD a été décrite par exemple dans [8, 9]. La méthode a été conçue afin d'être utilisée pour l'ensemble des applications du solveur et par conséquent, elle a été développée de façon générique et souple. La méthode permet le raffinement isotrope et anisotrope de maillages hexaédriques non-structurés, des cellules peuvent alors être raffinées en les divisant dans chacune de leurs directions ou dans seulement une direction. Des raffinements précédents peuvent être défaits pour adapter le maillage aux simulations instationnaires. Le critère de raffinement qui indique où le maillage doit être raffiné s'échange très facilement ; des critères de raffinement divers ont déjà été testés [10]. Et finalement, le raffinement automatique est effectué entièrement en parallèle et inclut une redistribution automatique du maillage sur les processeurs pour conserver l'équilibre du partitionnement.

Pour calculer l'interaction d'une hélice avec la surface libre, l'équation pour la fraction volumique qui indique la position de la surface libre doit être résolue avec précision. Le calcul des détails des structures tourbillonnaires autour de l'hélice nécessite également une simulation de haute fidélité ; des études préliminaires suggèrent par exemple que l'initiation de la ventilation de l'hélice par aspiration de l'air dépend en grande partie de la valeur minimale de la pression sur les pales de l'hélice. Par conséquent, le maillage doit être raffiné aussi bien à la surface libre qu'à proximité de l'hélice afin d'obtenir une bonne précision. Le critère de raffinement retenu est alors une combinaison de deux critères de base. Le premier crée du raffinement directionnel autour de la surface libre. Le deuxième provient de la matrice hessienne des dérivées secondes spatiales de la pression, ce qui est similaire aux critères utilisés habituellement pour le raffinement de maillages tétraédriques [1]. Ce deuxième critère détecte la présence de tourbillons par exemple. Le critère final est choisi comme le maximum (approximatif) de ces deux tenseurs. Une description plus complète du critère combiné est fournie dans [10].

IV– 2 Couplage entre raffinement automatique et interfaces glissantes

Puisque les méthodes des interfaces glissantes et du raffinement automatique fonctionnent séparément, le couplage entre ces deux techniques est relativement facile. Pourtant, certains points méritent d'être exposés plus précisément.

Le premier point concerne le raffinement des faces glissantes. Contrairement aux faces d'interface entre partitions qui nécessitent une procédure de raffinement complexe afin de préserver la connexion avec les faces dans la partition voisine, la connectivité des faces glissantes peut être détruite pendant le raffinement car elle est recalculée après. Ces faces sont alors raffinées indépendamment comme toute autre face de frontière (par exemple les faces pariétales, les faces d'entrée ou de sortie). Il n'y a pas de garantie explicite que le maillage raffiné contienne des cellules avec des tailles identiques des deux côtés de l'interface glissante. Pourtant, le critère de raffinement qui impose la taille des cellules est calculé à partir de l'écoulement simulé qui est continu à travers l'interface. On en déduit que le critère de raffinement est également continu à travers l'interface, ce qui induit une variation continue de la taille des cellules d'un côté de l'interface à l'autre.

Un autre aspect concerne la redistribution dynamique. Une partie de cette procédure est le repartitionnement du maillage par l'outil ParMETIS. Ce logiciel est un partitionneur de graphes qui cherche à établir une distribution équilibrée des nœuds du graphe et un nombre minimal d'arêtes coupées ; dans son graphe d'entrée, les centres des cellules représentent les nœuds et les faces forment les arêtes. Dans la construction du graphe il n'y a pas d'arêtes créées à travers les interfaces glissantes, toutes ces connectivités sont entièrement ignorées. Par conséquent, ParMETIS a une tendance naturelle à placer les interfaces entre partitions sur les interfaces glissantes, car ces divisions ne coûtent rien en matière d'arêtes du graphe coupées. Ceci constitue un avantage en termes de convergence des solveurs linéaires de ISIS-CFD car les données sur les faces glissantes et les faces d'interface entre partitionnements sont mises à jour dans les solveurs linéaires, mais pas dans les boucles les plus extérieures. Une convergence plus rapide est alors obtenue si ces faces sont les mêmes, car leur nombre total est réduit ainsi.

V Simulations

Le but des simulations présentées ici est double. Il s'agit d'abord de démontrer le caractère opérationnel des interfaces glissantes combinées au raffinement automatique puis, en second lieu, d'évaluer la performance de chacune de ces méthodologies pour la simulation numérique des écoulements autour d'hélices.

V- 1 Profil d'aile en rotation

Le premier cas test permet d'étudier en détail l'interaction entre les interfaces glissantes et le raffinement. Il s'agit d'un écoulement bidimensionnel autour d'un profil NACA0012 placé dans un écoulement uniforme, puis mis en rotation autour de son bord de fuite, générant ainsi une série de tourbillons intenses. Le nombre de Reynolds basé sur la corde est $Re = 40$. Le cas est modélisé avec un sous-domaine circulaire autour du profil qui tourne dans le maillage extérieur, voir la figure 1. Le raffinement automatique est basé sur le critère hessien, car cette configuration ne comprend pas de surface libre.

La figure 4 montre des images de l'écoulement à trois instants différents. L'aile en rotation crée des tourbillons isolés mais aussi des surfaces de vorticité dans le sillage. Même si quelques perturbations mineures peuvent être observées, ces structures traversent l'interface glissante sans problèmes et elles persistent dans l'écoulement loin de l'aile. Les maillages montrent que le critère identifie correctement les zones de vorticité, aussi bien à proximité du profil qu'à distance. Sans aucun ajustement explicite (section IV- 2), la taille des cellules varie de façon continue à travers l'interface. De même, les raffinements liés aux instants précédents sont déconstruits correctement : il ne reste pas de raffinement

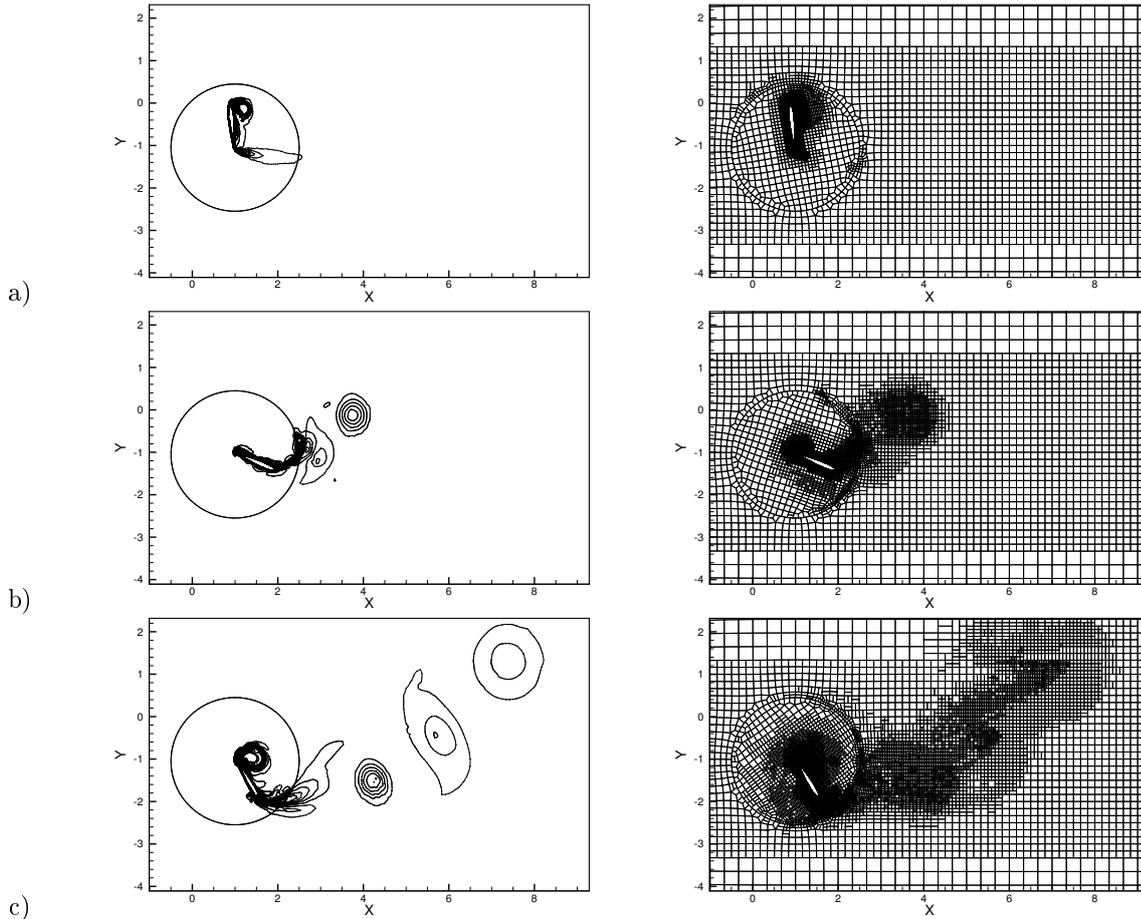


Figure 4 – Contours de vorticité et maillages raffinés pour le profil d’aile en rotation à $t = 0,7$ (a), $t = 1,05$ (b) et pendant la deuxième révolution à $t = 2,2$ (c).

sur la partie amont de l’interface glissante, même pour cette partie du maillage intérieur qui avait été raffinée quand elle se trouvait en aval de l’aile.

V– 2 L’hélice INSEAN E779A

Ensuite, des calculs ont été effectués pour évaluer la performance de ISIS-CFD pour la simulation d’hélices en eau libre avec des maillages générés par HEXPRESS. Le cas-test est l’hélice INSEAN E779A [7]. Dans les calculs, la surface libre n’a pas été prise en compte. Le diamètre de l’hélice est $D = 0.22727m$, la vitesse de rotation est $n = 11.7881rps$ et le coefficient d’avancement $J = 0.895$. Pour les calculs, la densité de l’eau est $\rho = 1000kg/m^3$ et la viscosité $\mu = 1.1099 \cdot 10^{-3}kg/(ms)$. La force F_x et le moment M_x sont calculés uniquement sur les pales, contrairement aux expériences où la force mesurée sur l’axe seule est soustraite de la force mesurée sur l’ensemble des pales et de l’axe. Le domaine de calcul est un cylindre entre $X = -1,25D$ et $X = 4,0D$ avec un diamètre de $2.942D$. Les conditions aux limites sont une loi du paroi sur les pales et l’axe, des conditions de Dirichlet lointaines sur la face d’entrée et les côtés et une pression imposée en sortie. Le pas de temps est choisi pour donner 180 pas par révolution de l’hélice.

Simulation avec interfaces glissantes Une simulation à $J = 0.895$ a été effectuée afin d’évaluer la méthodologie des interfaces glissantes. La figure 5 présente une coupe à $Y = 0$ du maillage avec l’interface glissante indiquée.   l’intérieur du cylindre délimité

par l'interface glissante, le maillage tourne et à l'extérieur il est figé. Le calcul est comparé avec le résultat obtenu sur un maillage unique équivalente, sans interfaces glissantes. Le maillage avec interfaces glissantes a $2.0M$ cellules, le maillage monolithique $1.86M$.

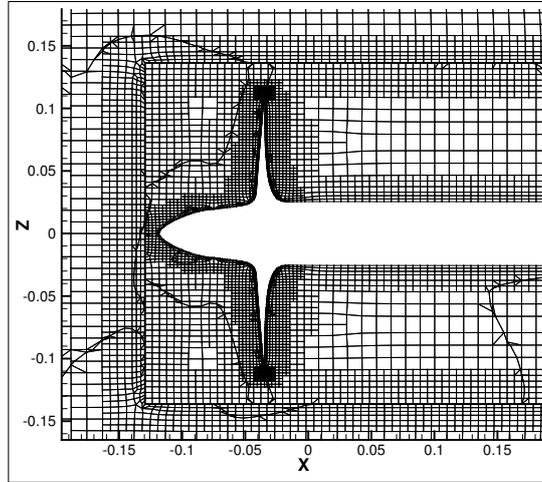


Figure 5 – Coupe à $Y = 0$ pour le maillage avec interface glissante (indiquée par la ligne épaisse).

TABLE 1 – Forces, déviations et différences entre pales (1G : maillage monolithique, SG : avec interfaces glissantes).

Mesh	K_T	$\Delta F_{X,blade}/F_X$	$\tilde{F}_{X,t}/F_X$	K_Q	$\Delta M_{X,blade}/M_X$	$\tilde{M}_{X,t}/M_X$
1G	0.1440	0.022	$5.8 \cdot 10^{-4}$	0.0311	0.019	$3.7 \cdot 10^{-4}$
SG	0.1442	0.032	$1.6 \cdot 10^{-3}$	0.0310	0.024	$1.2 \cdot 10^{-3}$

La table 1 décrit le résultat des forces et moments pour les simulations avec et sans interfaces glissantes. Elle permet aussi de comparer la différence maximale entre les forces sur deux pales individuelles $\Delta F_{X,blade}$ et la magnitude des fluctuations dans le temps $\tilde{F}_{X,t}$ calculée comme la déviation standard du signal. Les forces moyennes des deux calculs sont très proches avec une différence relative d'environ 0,1% pour la force et 0,3% pour le moment. Les différences entre les pales sont également du même ordre à 2 – 3%, par contre les fluctuations dans le temps sont plus importantes pour le calcul avec interfaces glissantes. Cette augmentation vient du changement des connectivités vers les cellules voisines sur les interfaces glissantes. Ce changement arrive de temps en temps entre les cellules tournantes et les cellules figées. Même si l'interpolation a une précision du second-ordre, le changement discontinu dans la topologie du maillage qui se produit notamment quand un grand nombre de cellules change de voisine au même temps est suffisant pour provoquer un pic dans la pression. Une amélioration possible serait d'avoir une interpolation continue dans le temps pour trouver les valeurs à l'extérieur des faces glissantes.

Raffinement automatique Le paramètre d'avance $J = 0,880$ et la vitesse de rotation $n = 25rps$ ont été retenus pour les études de l'effet du raffinement automatique de maillage, parce que des mesures PIV sont disponibles pour ces conditions [7]. Le critère hessien de la pression a été choisi car il réagit aux fortes variations de la pression liées aux structures tourbillonnaires intenses [10, 9], comme les tourbillons d'extrémité sur chaque pale et de noyau, où des pics de basse pression peuvent produire le phénomène de la cavitation. Pour le raffinement, une taille minimale des cellules de 0.35 mm est imposée.

La solution obtenue en activant le raffinement automatique à partir d'un maillage grossier (770k cellules) est comparée avec celle sur le maillage monolithique à 1,86M cellules, ce qui est l'équivalent du maillage raffiné qui en a environ 1,92M à la fin de la simulation. La figure 6 compare les isosurfaces de la pression qui correspondent à une pression de $p = -10kPa$. L'effet du raffinement automatique est clairement perçu dans la forme de l'isosurface, l'intensité et la définition du tourbillon augmentent. D'autres expériences nous ont montré que l'amortissement du tourbillon dans le cas du raffinement est due principalement à la modélisation RANS de la turbulence. Pour la solution avec raffinement, K_T augmente d'environ 5% et K_Q de 4%. Ceci s'explique par la sous-évaluation de l'intensité des tourbillons sur des maillages non-adaptés. Par conséquent, on peut supposer que l'intensité des tourbillons sur le maillage sans raffinement est plus faible qu'en réalité, ce qui mène à des valeurs trop faibles de K_T et K_Q .

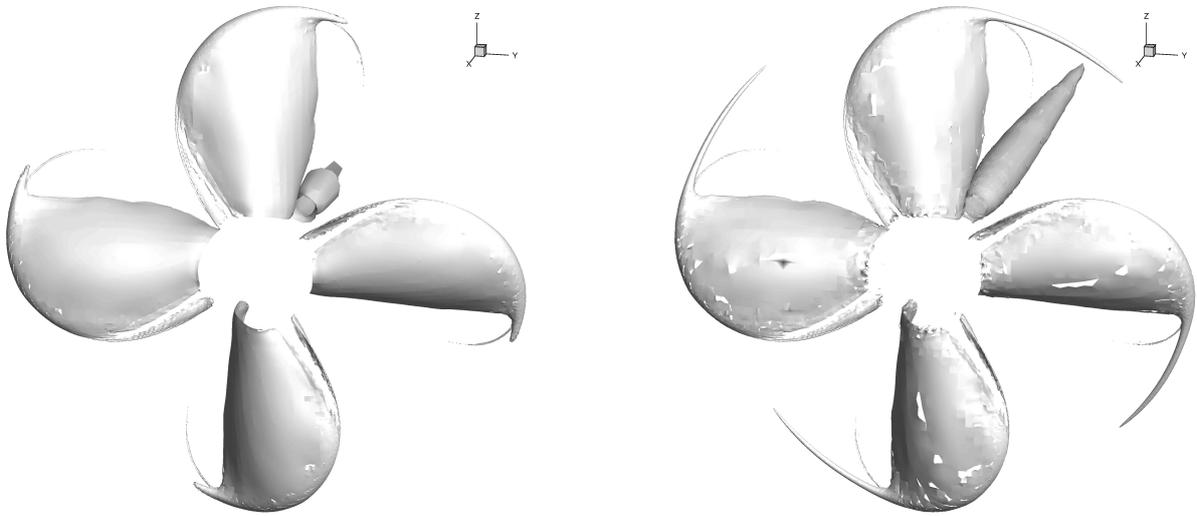


Figure 6 – Isosurface de la pression $p = -10kPa$ pour $J = 0,880$: le maillage fin non-raffiné (1.86M) à gauche ; le maillage raffiné (1.92M) à droite.

V- 3 Le porte-conteneurs de MOERI (KCS)

Le porte-conteneurs KCS testé par le Korea Research Institute for Ships and Ocean Engineering (actuellement MOERI) a été conçu pour fournir une analyse physique de l'écoulement autour d'un porte-conteneurs moderne et pour permettre la validation des méthodes de simulation numériques. L'étude actuelle concerne le cas 2.3a [3] utilisé dans le dernier workshop de Göteborg en 2010, un cas d'autopropulsion à l'échelle modèle. Les interfaces glissantes sont utilisées pour simuler l'interaction hélice-carène complète.

Génération du maillage Le maillage est créé avec une interface glissante pour séparer les sous-domaines de l'hélice et de la carène. Le maillage de l'hélice contient environ 2M cellules, comme pour l'hélice E779A. Une bosse hémisphérique a été ajoutée à l'axe de l'hélice. Les interfaces glissantes en amont et en aval se trouvent à 0.114D et 0.249D du centre de l'hélice, l'interface cylindrique se trouve à 0.6D. Le maillage pour la carène avec des cellules fines autour de l'étrave, de l'arrière et de la surface libre contient environ 3,5M cellules. Tous les maillages sont générés avec HEXPRESS.

Calcul et résultats Une simulation instationnaire est effectuée pour toute la durée de la mise en place d'un écoulement quasi-stationnaire avec l'hélice qui tourne. L'attitude du



Figure 7 – Vue de l’arrière de la pression instantanée (moins la pression hydrostatique) sur la carène et l’hélice.

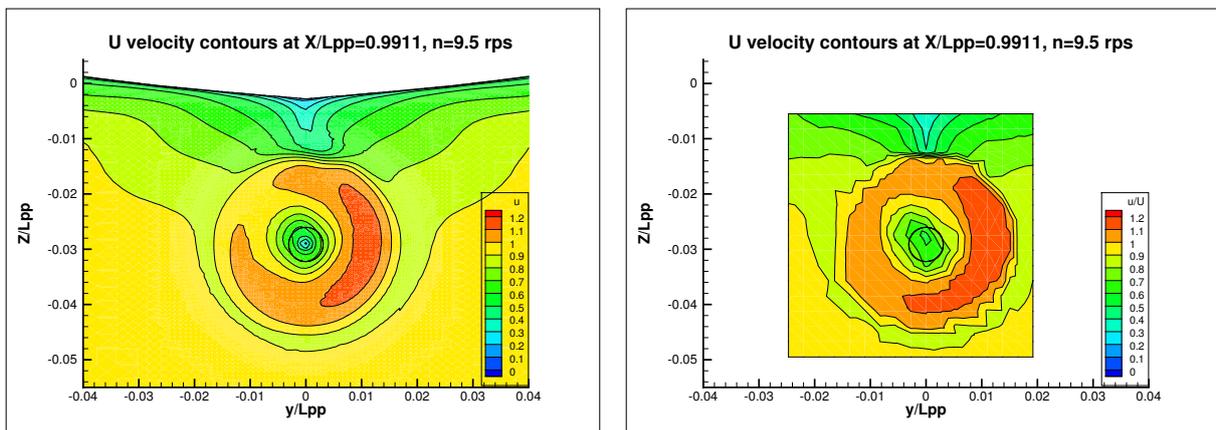


Figure 8 – Isolignes de la vitesse axiale à $x/L_{pp}=0.9911$, $n=9.5$ rps. Calculé (à gauche) et mesuré (à droite).

bateau est fixe. Il est accéléré jusqu’à sa vitesse maximale avec une hélice figée et il arrive à un état presque stationnaire après 800 pas de temps. Un grand pas de temps $\Delta t = 0.03s$ est utilisé pendant cette période. Ensuite, la simulation est poursuivie avec l’hélice en rotation et un pas de temps adapté au calcul de l’hélice en eau libre, $\Delta t = 0.000526s$, pour 200 pas par révolution à $n = 9.5$ rps. Il s’est avéré qu’une telle procédure est très coûteuse en temps de calcul. La poussée de l’hélice commence à se stabiliser après 12 révolutions, ce qui veut dire 1.26s de temps physique. La résistance du bateau prend plus de temps pour converger : elle descend d’une valeur maximale de 91.5N obtenue au moment où la poussée de l’hélice se stabilise à une valeur à peu près convergée de 88.4N, 1.5s plus tard. Le coût du calcul est 10 fois plus élevé que pour un calcul de résistance sans hélice. Nous avons cependant découvert plus tard qu’une solution convergée est obtenue beaucoup plus rapidement si le calcul initial aux grands pas de temps est effectué avec l’hélice mise en rotation.

Les vitesses axiales et les vecteurs d’écoulement transversaux sont disponibles en aval de l’hélice à $X/L_{pp} = 0.991$, voir les figures 8 et 9. Les contours de vitesse axiale de la

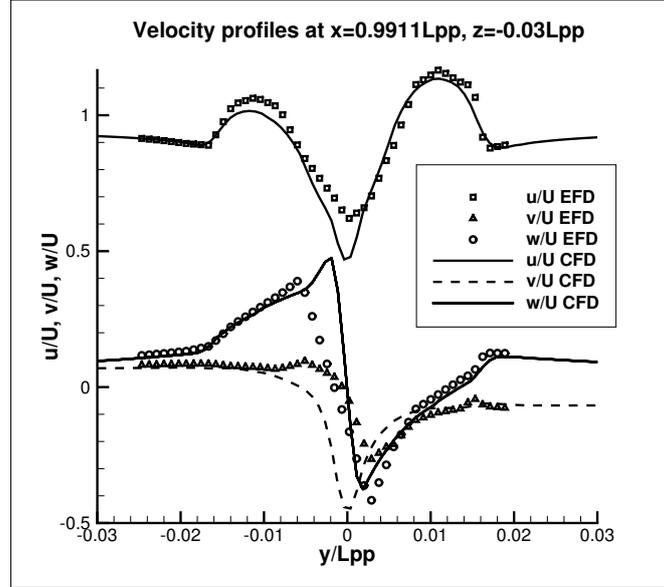


Figure 9 – Vitesses à $x/L_{pp}=0.9911$, $z/L_{pp}=-0.03$, $n=9.5$ rps.

figure 8 montrent deux régions séparées, à l'intérieur et à l'extérieur du disque hélice. A l'intérieur on note un comportement asymétrique avec une région de vitesse élevée en forme de croissant de lune (entre $u/U = 1.1$ et 1.2). L'asymétrie de l'écoulement n'est pas surprenante si on considère la pression calculée sur l'hélice (figure 7) et la correspondance globale des contours de vitesse aux expériences est excellente.

Une analyse plus détaillée de l'évolution transversale des trois composants de la vitesse est possible grâce aux mesures effectuées à $X/L_{pp} = 0.9911$, $Z/L_{pp} = -0.03$, figure 9. L'analyse des vecteurs d'écoulement transversaux révèle l'existence d'un tourbillon principal intense qui provient évidemment de l'écoulement induit par l'hélice. On note cependant une valeur trop faible de U proche du plan de symétrie pour la simulation numérique, environ $U = 0.5$ tandis que la valeur expérimentale est de $U = 0.7$. En dehors de cette région, l'asymétrie de la composante axiale de la vitesse est bien reproduite, tout comme le comportement des composantes transversale et verticale. Même si le changement de signe de ces composantes à la traversée du plan central est trop rapide, les valeurs minimales et maximales sont bien prédites.

VI Conclusion

Ce papier présentait un calcul d'écoulements visqueux à surface libre autour d'hélices et navires en autopropulsion à l'aide d'une technique d'interfaces glissantes. La méthode fonctionne en parallèle et les différents sous-domaines peuvent être distribués de façon arbitraire sur les processeurs. Il n'y a pas d'interpolation explicite pour trouver les champs sur les faces glissantes, l'algorithme de couplage identifie plutôt des cellules réelles qui sont utilisées comme voisines pour l'autre sous-domaine.

Le couplage avec le raffinement automatique est obtenue en traitant les faces glissantes comme des faces de frontière ordinaires lors du raffinement. Les tailles des cellules ne sont pas explicitement synchronisées à travers l'interface, par contre la continuité du critère de raffinement à l'interface produit une variation continue de la taille des cellules. Pour la redistribution des cellules sur les processeurs, les interfaces des partitions sont placées le plus possible sur les interfaces glissantes, ce qui améliore la convergence des solveurs.

Un cas-test initial montre que les interfaces glissantes et le raffinement automatique fonctionnent ensemble. Ensuite, une hélice en eau libre est utilisée pour comparer l’approche des interfaces glissantes à un maillage unique. Les valeurs moyennes des forces ont moins de 0,3% d’écart, par contre les fluctuations dans le temps sont multipliées par un facteur 3. Ces oscillations sont probablement liées à l’interpolation sur les interfaces et pourraient être réduites par une interpolation plus lisse en temps. Finalement, le raffinement automatique pour ce cas améliore la résolution des tourbillons d’extrémité. L’étude de l’écoulement autour d’un porte-conteneurs nous a permis de tester la capacité du solveur de prédire le couplage carène-hélice en autopropulsion. Vue la complexité de cette exercice, les premiers résultats sont très prometteurs.

Rémerciements

Ce travail a bénéficié d’un accès aux ressources HPC de l’IDRIS sous l’allocation 2011-21308 du GENCI (Grand Equipement National de Calcul Intensif).

Références

- [1] F. Alauzet and A. Loseille. High-order sonic boom modeling based on adaptive methods. *Journal of Computational Physics*, 229(3) :561–593, 2010.
- [2] R. Duvigneau and M. Visonneau. On the role played by turbulence closures in hull shape optimization at model and full scale. *Journal of Marine Science and Technology*, 8 :11–25, 2003.
- [3] T. Hino, editor. *Proceedings of CFD Workshop Tokyo 2005*. National Maritime Research Institute, Tokyo, Japan, 2000.
- [4] A. Leroyer and M. Visonneau. Numerical methods for RANSE simulations of a self-propelled fish-like body. *Journal of Fluids and Structures*, 20(3) :975–991, 2005.
- [5] V. Pržulj and B. Basara. Bounded convection schemes for unstructured grids. In *15th AIAA Computational fluid dynamics conference*, AIAA paper 2001-2593, Anaheim, CA, 11-14 June 2001.
- [6] P. Queutey and M. Visonneau. An interface capturing method for free-surface hydrodynamic flows. *Computers & Fluids*, 36(9) :1481–1510, November 2007.
- [7] F. Salvatore. *The INSEAN E779A Propeller Experimental Dataset*. Deliverable 4.1.3 of the VIRTUE Project, 2007.
- [8] J. Wackers, K. Ait Said, G. B. Deng, P. Queutey, M. Visonneau, and I. Mizine. Adaptive grid refinement applied to RANS ship flow computation. In *Proceedings of the 28th Symposium on Naval Hydrodynamics*, Pasadena, California, 2010.
- [9] J. Wackers, G. B. Deng, A. Leroyer, A. Queutey, and M. Visonneau. Adaptive grid refinement for hydrodynamics flows. *Computers & Fluids*, 55 :85–100, 2012.
- [10] J. Wackers, G. B. Deng, and M. Visonneau. Combined tensor-based refinement criteria for anisotropic mesh adaptation in ship wave simulation. In *Proceedings of Adaptive Modelling and Simulation 2011*, Paris, France, 2011.
- [11] J. Wackers, B. Koren, H. C. Raven, A. van der Ploeg, A. R. Starke, G. B. Deng, P. Queutey, M. Visonneau, T. Hino, and K. Ohashi. Free-surface viscous flow solution methods for ship hydrodynamics. *Archives of Computational Methods in Engineering*, 18 :1–41, 2011.