

SIMULATION AUTOMATISÉE DE LA RÉSISTANCE DES NAVIRES A L'AIDE DE MAILLAGES ADAPTATIFS

AUTOMATED SIMULATION OF SHIP RESISTANCE USING ADAPTED MESHES

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

jeroen.wackers@ec-nantes.fr

LHEEA, CNRS UMR 6598, Centrale Nantes, Nantes

Résumé

Ce papier montre l'utilisation du raffinement adaptatif de maillage pour la simulation automatisée de la résistance des navires en eau calme. Un protocole de simulation pour ces calculs est défini basé sur un cas test, puis appliqué tel quel à trois cas différents, avec des variations de géométrie et de nombre de Froude, ainsi que de l'autopropulsion. Les résultats montrent que les solutions ont une haute fidélité numérique et se comparent bien aux expériences. Les méthodes standard d'estimation numérique de l'incertitude sont efficaces pour les résultats, ce qui augmente la fiabilité des simulations.

Summary

This paper studies the use of adaptive grid refinement to perform automated simulations of ship resistance in calm water. A simulation protocol for these computations is fine-tuned on one test case and then applied unchanged to three different cases, which involve variations in geometry and Froude number, as well as self-propulsion. Results show that the solutions are numerically accurate and compare well with experiments. Standard methods of numerical uncertainty estimation are effective for the results, which increases the trustworthiness of the solutions.

I – Introduction

Aujourd’hui, la génération de maillages est un verrou pour la croissance de la mécanique des fluides numérique dans la recherche et l’industrie [10]. Le maillage exige plus d’expertise de la part des utilisateurs que tout autre aspect des simulations, tandis que pour les cas de plus en plus complexes, même les experts ne peuvent pas déterminer à l’avance quelle finesse de maillage fonction de la position est nécessaire pour résoudre correctement les caractéristiques de l’écoulement. Par conséquent, il peut s’avérer nécessaire de refaire les calculs plusieurs fois afin de corriger le maillage, ce qui entraîne des surcoûts et des délais imprévisibles. Ceci forme un obstacle à l’utilisation dans l’industrie.

Le raffinement automatique, qui ajuste localement le maillage pendant la simulation en fonction des exigences de l’écoulement, est une solution naturelle à ces problèmes. Cette approche peut simplifier les calculs, tout en augmentant leur précision. Cependant, l’adaptation de maillage n’est acceptable dans un contexte industriel que si elle s’effectue automatiquement, avec peu ou pas d’intervention de l’utilisateur, et si elle est suffisamment fiable pour l’application à une large gamme de situations.

Nous avons démontré [14] que le raffinement automatique pour la simulation des écoulements à surface libre autour des navires, avec le solveur fluide ISIS-CFD que nous développons, est suffisamment mûr pour envisager une application industrielle. Nous assurons la fiabilité des simulations adaptatives par deux moyens. Premièrement, des consignes généralisées [11] sont introduites pour définir automatiquement les paramètres de simulation pour chaque cas, indépendamment de l’écoulement et de la géométrie. Deuxièmement, l’adaptation est utilisée pour produire des séries de maillages de grossier à fin, qui sont combinés avec des estimations d’incertitude pour prédire la précision des résultats [13]. La convergence en maillage obtenue est remarquablement régulière pour les maillages non-structurés et les limites d’incertitude estimées sont précises.

Cet article présente un résumé de [14]. Après une présentation du solveur ISIS-CFD et son adaptation de maillage (section II), l’approche pour définir des directives universelles pour les calculs est présentée dans la section III. Ces protocoles sont ensuite appliqués à trois navires, allant d’un destroyer à un pétrolier (section IV). La conclusion V tire un bilan des tests et aborde l’extension des protocoles à d’autres situations.

II – Le solveur fluide ISIS-CFD

II – 1 Modèles physiques et discrétisation numérique

Les simulations sont réalisées avec le solveur Navier-Stokes ISIS-CFD développé au LHEEA, disponible dans la suite logicielle Fidelity Fine Marine de Cadence Design Systems. ISIS-CFD est un solveur volumes finis incompressible non-structuré pour les écoulements multifluides. Le champ de vitesse est obtenu à partir des équations de quantité de mouvement et le champ de pression est extrait de la contrainte de conservation de la masse transformée en équation de pression. La méthodologie s’appuie sur un algorithme de type SIMPLE avec une reconstruction des flux de vitesse basé sur l’interpolation Rhie et Chow, mais les équations sont adaptées aux écoulements avec des champs de densité discontinus. La surface libre est simulée à l’aide d’une équation de conservation de la fraction volumique de l’eau, discrétisée avec des schémas de discrétisation compressifs. Le solveur contient des modèles de turbulence sophistiqués, tels qu’un modèle EASM anisotrope et des modèles hybrides RANS/LES.

La discrétisation non-structurée est basée sur les faces. Les inconnues sont stockées aux

centres des cellules mais les systèmes d'équations pour l'intégration en temps implicite sont construits face par face. Par conséquent, des cellules avec un nombre arbitraire de faces constitutives de forme arbitraire sont acceptées, ce qui facilite grandement l'adaptation du maillage. Le code est entièrement parallèle et utilise le protocole MPI (message passing interface). Une description détaillée du solveur est fournie par [8].

II – 2 Adaptation de maillage

Le raffinement automatique dans ISIS-CFD est basé sur la division locale de cellules hexaèdres non-structurées [12, 13]. La décision de raffinement utilise un critère de raffinement métrique [4, 1] : un champ tensoriel $\mathcal{C}(x, y, z)$ calculé à partir de l'écoulement. Ce tenseur est déduit de la position de la surface libre et les dérivées secondes de l'écoulement, qui donnent une indication grossière des erreurs de troncature. Le maillage est raffiné jusqu'à ce que les dimensions $\mathbf{d}_{i,j}$ ($j = 1, 2, 3$) de chaque cellule hexaédrique i satisfassent :

$$\|\mathcal{C}_i \mathbf{d}_{i,j}\| = T_r. \quad (1)$$

Le critère de raffinement \mathcal{C}_i , basé purement sur l'écoulement, est presque invariant par rapport au raffinement de maillage [13], de sorte que la taille des cellules est partout proportionnelle au seuil constant T_r .

L'adaptation est intégrée dans ISIS-CFD et entièrement parallélisée. Les calculs sont effectués à partir d'une grille initiale grossière créée avec le mailleur Hexpress (figure 2) et la procédure de raffinement est appelée à plusieurs reprises pendant la simulation, jusqu'à ce que l'écoulement ait convergé et le maillage ne soit plus modifié par les adaptations successives.

II – 3 Critère de raffinement

Pour créer les maillages fins entièrement avec du raffinement adaptatif, le critère de raffinement doit détecter toutes les caractéristiques de l'écoulement qui sont pertinentes pour la traînée du navire. Cela nécessite de combiner un critère de capture de la surface libre et la matrice hessienne des dérivées secondes spatiales de la pression, qui est un indicateur approprié des champs de vitesse orbitaux dans les vagues [12]. Pour prédire correctement les forces visqueuses, la résolution précise de la couche limite et du sillage est également nécessaire, ce qui suggère un raffinement basé sur les hessiens de vitesse. Le critère combiné surface libre et hessiens des composantes des flux [13] est donc adopté.

La figure 1 montre un maillage généré avec ce critère de raffinement : le raffinement combiné à la surface et sous la surface est visible dans les vagues, tandis que le maillage autour de la coque est raffiné à l'avant et dans la couche limite.

III – Protocole de raffinement du maillage

Pour les simulations dans la pratique quotidienne, il faut des procédures pour choisir les paramètres de simulation, qui sont simples et fiables et ne nécessitent pas de procéder par tâtonnements. Ces consignes doivent être valables pour une gamme de longueurs de navires, de vitesses, de formes de coques, etc. Notre approche pour définir des consignes consiste à utiliser des arguments physiques, notamment l'analyse dimensionnelle, pour réduire le nombre de variables indépendantes à prendre en compte, puis à utiliser l'expérience pour trouver des consignes raisonnables pour les paramètres restants. Sans répéter le protocole complet présenté dans [14], nous donnons ici deux exemples de la manière dont les consignes sont définis.

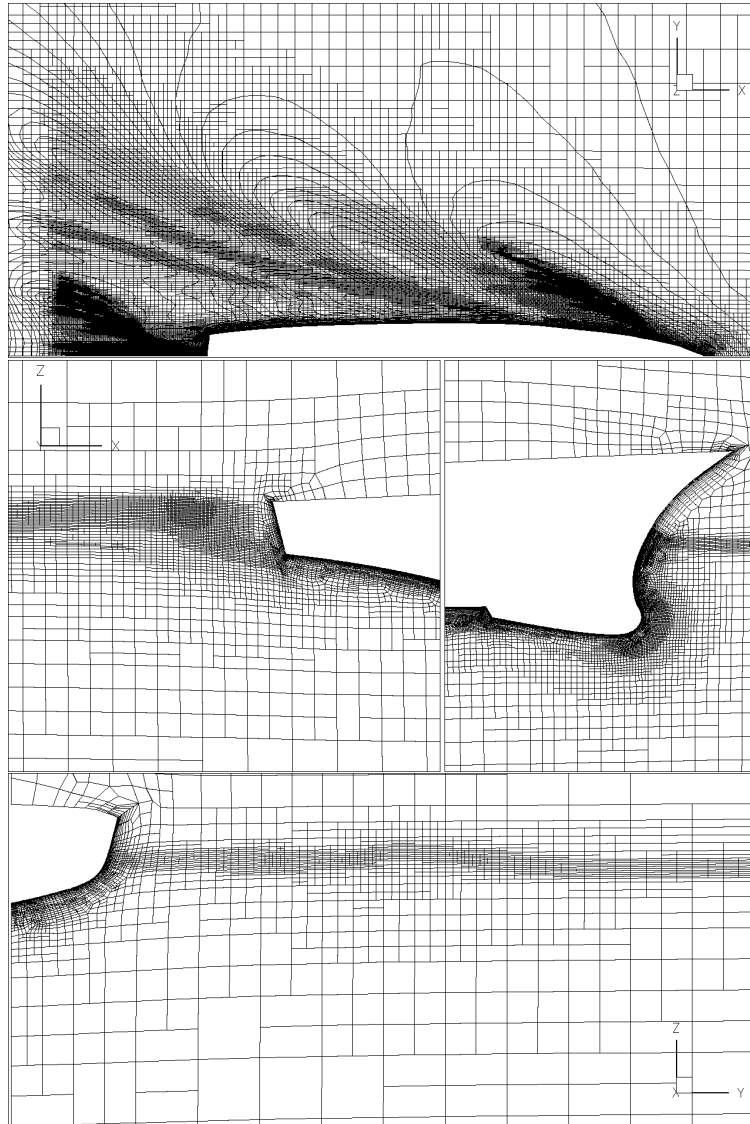


FIGURE 1 – Un maillage adapté selon le protocole de la section III. De haut en bas : surface libre, détails du plan de symétrie Y , coupe X à l'arrière du bateau. Le cas est le DTMB 5415 à $Fr = 0,41$ de la section IV – 2, avec $T_{r,H} = 0,07$.

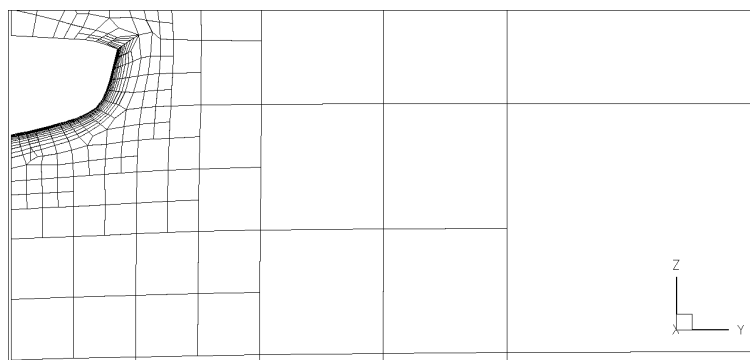


FIGURE 2 – Maillage initial correspondant à l'image en bas dans la figure 1.

Seuils La finesse du maillage appropriée est spécifiée ici par le seuil T_r de l'équation (1). De nombreux auteurs ajustent ce genre de paramètre de densité pour obtenir un nombre précis de cellules, par exemple en normalisant la métrique de telle sorte que le seuil spécifie directement le nombre cible de cellules [1].

Pour les écoulements à surface libre, nous préférons une approche différente. La taille des cellules cibles à la surface libre pour les maillages non-adaptés est habituellement spécifié en fonction de la longueur du navire L . Pour obtenir le même fonctionnement pour le raffinement adaptatif, le critère de raffinement surface libre est défini avec des vecteurs unitaires dans l'équation (1), de sorte que son seuil T_{rS} est égal à la taille des cellules normale à la surface libre, qui est choisie comme $L/1000$ conformément aux consignes standards pour ISIS-CFD.

Afin d'assurer la compatibilité des critères, un comportement similaire est recherché pour le critère de raffinement hessien : la densité du maillage sur la coque doit être proportionnelle à la valeur du seuil, indépendamment des paramètres du cas. Pour cette raison, le critère hessien est adimensionné par la longueur et la vitesse de référence. Grâce à cette adimensionnalisation, le choix de T_{rH} ne dépend plus de la longueur et de la vitesse du navire ; seule une (faible) dépendance à l'égard de Fr , Re et de la forme de la coque subsiste, qui peut être ignorée pour une classe spécifique de coques de navires (telles que les coques à déplacement). Les essais effectués dans [14] suggèrent une plage $T_{rH} \in [0, 2L, 0, 025L]$ pour obtenir des maillages de grossier à fin.

Taille minimale et boîte de limitation L'adaptation basée sur le critère de raffinement combiné permet de représenter les détails de l'écoulement dans l'ensemble du domaine. Cependant, pour une évaluation précise de la traînée des navires, tous ces détails ne sont pas forcément nécessaires. Le critère est donc modifié de deux manières.

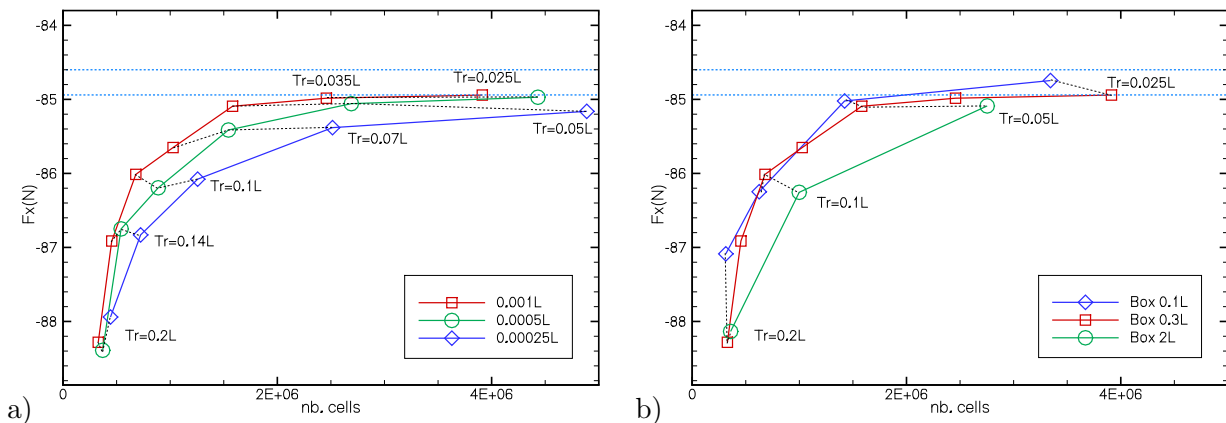


FIGURE 3 – KCS, effet de la taille minimale des cellules (a) et de la boîte de limitation (b) sur la convergence de la résistance par rapport à T_{rH} .

Le niveau de détails peut être ajusté en spécifiant une taille de cellule minimale, en dessous de laquelle les cellules ne sont plus raffinées. Une taille de cellule minimale élevée fonctionne comme un filtre de coupure : alors que le raffinement adaptatif capture toujours les principales caractéristiques du flux, les cellules très fines permettant de résoudre les petits détails ne sont pas créées. Pour le KCS de la section IV – 1, la figure 3a montre la dépendance de la traînée à la taille minimale des cellules. Ce paramètre a une influence prononcée : pour une taille minimale plus grande, le nombre de cellules est fortement réduit, pour une perte de précision modeste. De plus, les solutions pour toutes les tailles

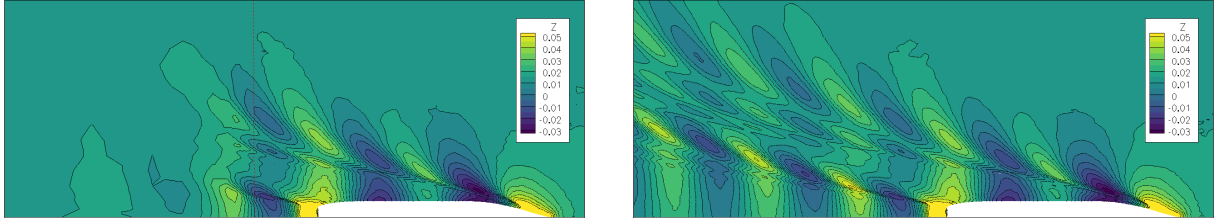


FIGURE 4 – KCS, élévation de la surface libre avec boîte de limitation à $0,3L$ derrière le bateau (gauche) et $2L$ derrière le bateau (droite). Seuil $T_{rH} = 0,05L$. La ligne en pointillé indique le bord arrière de la boîte limitante.

minimales convergent vers la même valeur lorsque T_{rH} est réduit. Ainsi, pour les simulations de résistance à l’avancement, la plus grande taille minimale testée, c’est-à-dire $L/1000$ comme le seuil de la surface libre, est préférable.

En outre, la résolution du sillage et du champ de vagues derrière le navire peut ne pas être nécessaire pour les calculs de résistance. C’est pourquoi nous avons testé des boîtes limitantes qui interdisent le raffinement horizontal à partir d’une certaine distance derrière le bateau (figure 4). L’interdiction du raffinement à partir de $0,3L$ derrière le bateau supprime la totalité du champ de sillage lointain mais ne modifie pas de manière significative les forces, tout en réduisant le nombre de cellules jusqu’à 40 % (figure 3b). Une boîte encore plus courte ($0,1L$ derrière le bateau) modifie la traînée convergée et n’est donc pas adoptée. La boîte de $0,3L$ constitue le meilleur compromis.

IV – Tests du protocole

Le protocole a été créé et ajusté d’abord pour le porte-conteneurs KCS (voir ci-dessus). Ensuite, il a été appliqué en aveugle à d’autres cas avec des formes de coques variées (figure 5) pour tester sa généralité ; les résultats sont comparés avec des expériences et des simulations sur des maillages non adaptés. Cette section présente un extrait des tests.

IV – 1 KRISO Container Ship

Le KRISO Container Ship (KCS) [6] est simulé en condition de remorquage à l’échelle modèle $Re = 1.257 \cdot 10^7$ et $Fr = 0.260$. Le modèle de turbulence SST $k - \omega$ est utilisé avec une loi de paroi. La configuration complète pour ce cas est donnée dans [14]. La figure 6a montre la convergence de la résistance par rapport au seuil hessien T_{rH} , ainsi que l’incertitude numérique évaluée avec la méthode d’Eça et Hoekstra [3] qui est basée sur la convergence en maillage (où T_{rH} est utilisé comme mesure de la taille du maillage, au lieu d’une taille moyenne de cellule). La convergence en maillage a un comportement

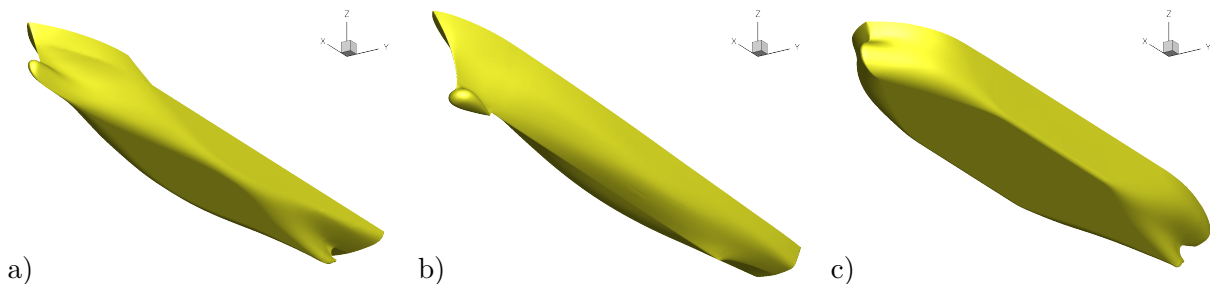


FIGURE 5 – Les carènes des modèles KCS (a), DTMB 5415 (b), et KVLCC2 (c).

de loi de puissance et les estimations de l'incertitude, qui se chevauchent pour les grilles les plus fines, sont cohérentes. La figure 7 montre que la surface libre est visuellement convergée à $T_{rH} = 0,05$, puisque la différence avec le seuil le plus fin est négligeable. Cela montre que varier T_{rH} est un moyen efficace pour obtenir la convergence en maillage et que l'intervalle choisi pour T_{rH} est approprié.

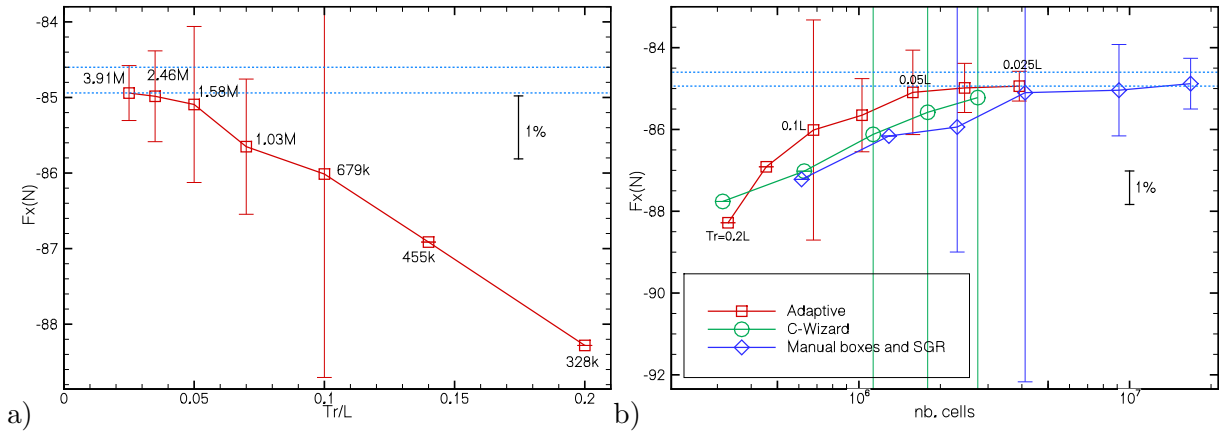


FIGURE 6 – Résistance du KCS, convergence en fonction de T_{rH} (a) et du nombre de cellules (b), avec incertitude numérique estimée. Les lignes bleues montrent l'intervalle d'incertitude des résultats expérimentaux [6].

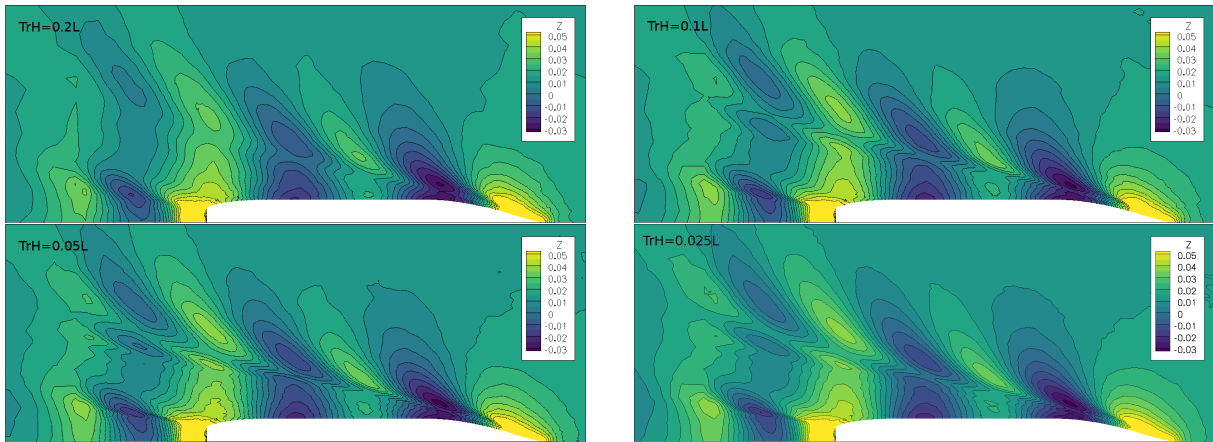


FIGURE 7 – KCS, convergence en maillage de l'élévation de la surface libre. En haut : $T_{rH} = 0.2L$ et $0.1L$, en bas : $0.05L$ et $0.025L$.

Les résultats sont comparés à des simulations sur des maillages créés avec Hexpress et son outil de configuration automatique C-Wizard, qui fournit des tailles de cellules uniformes sur la coque. Une approche combinant Hexpress et le raffinement systématique de la grille (SGR) est également présentée : les trois maillages les plus grossiers sont générés par Hexpress, avec un raffinement manuel à l'étrave et l'arrière du bateau. Les maillages les plus fins sont créés à partir de ces maillages grossiers en raffinant toutes les cellules une seule fois, à l'aide du raffinement automatique. La figure 6b compare les trois résultats. La série adaptative converge beaucoup plus rapidement vers sa valeur finale que les deux autres. Une précision numérique donnée est donc obtenue sur des grilles plus grossières : le même écart par rapport à la valeur convergée est typiquement obtenue avec 1,5 à 2 fois moins de cellules que la série C-Wizard. En outre, les séries adaptative et

SGR convergent vers des valeurs à peu près identiques pour la traînée, ce qui souligne la fiabilité des deux séries. Les maillages de la série C-Wizard ne sont pas emboîtés : pour Hexpress, les maillages de la couche limite deviennent plus fins à mesure que le maillage extérieur est raffiné. Par conséquent, la série converge vers une traînée plus faible que les deux autres.

IV – 2 DTMB 5415

Le protocole développé pour le KCS est appliqué sans modification pour la frégate DTMB 5415 à $Fr = 0,41$ et $Re = 1,74 \cdot 10^7$ en accord avec les mesures de [7]. Ce cas représente un navire militaire à pleine vitesse, où le déferlement des vagues est important à la fois à l'avant et à l'arrière (figure 8b).

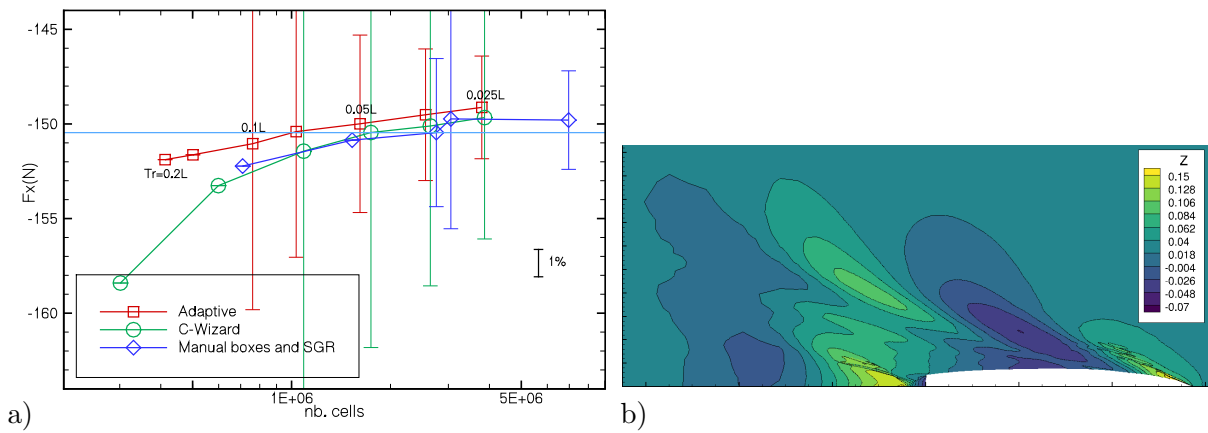


FIGURE 8 – DTMB 5415, convergence en maillage et incertitudes (a), champ de vagues pour $T_{rH} = 0.025L$ (b).

La résistance calculée sur des maillages adaptatifs est à nouveau comparée aux maillages uniformes du C-Wizard et aux maillages avec raffinement manuel et SGR (figure 8a). La série adaptative converge rapidement avec des estimations de l'incertitude fiables et faibles ; cependant, les résultats expérimentaux sont sous-estimés, probablement à cause de la difficulté de modéliser les vagues déferlantes. Les séries non adaptatives semblent mieux correspondre aux expériences, mais elles convergent vers la même solution sous-estimée, bien que plus lentement. Ainsi, la convergence plus rapide et l'incertitude plus faible signifient que les résultats des maillages adaptés sont les plus fiables.

IV – 3 KVLCC2

Le pétrolier KVLCC2, un navire lent et volumineux, est simulé à $Fr = 0,14232$ et $Re = 4,6 \cdot 10^6$, conformément aux expériences de [6]. Le modèle de turbulence anisotrope EASM, recommandé pour résoudre les sillages de bateaux volumineux [2], est utilisé. En outre, la loi de paroi est comparée avec une résolution bas-Reynolds de la paroi. Tous les autres paramètres sont les mêmes que pour le KCS.

Pour les résultats avec la loi de paroi (figure 9a), la convergence de la résistance pour les maillages adaptés est presque parfaite avec une incertitude finale très faible de 0,2%. Ceci montre que le protocole de raffinement est applicable sans modifications au modèle EASM. La série C-Wizard est en meilleur accord avec les expériences, mais il s'agit d'un artefact de la loi de paroi : pour les couches limites résolues (figure 9b), la série adaptative donne le meilleur accord. La différence entre les solutions est due à l'écoulement autour

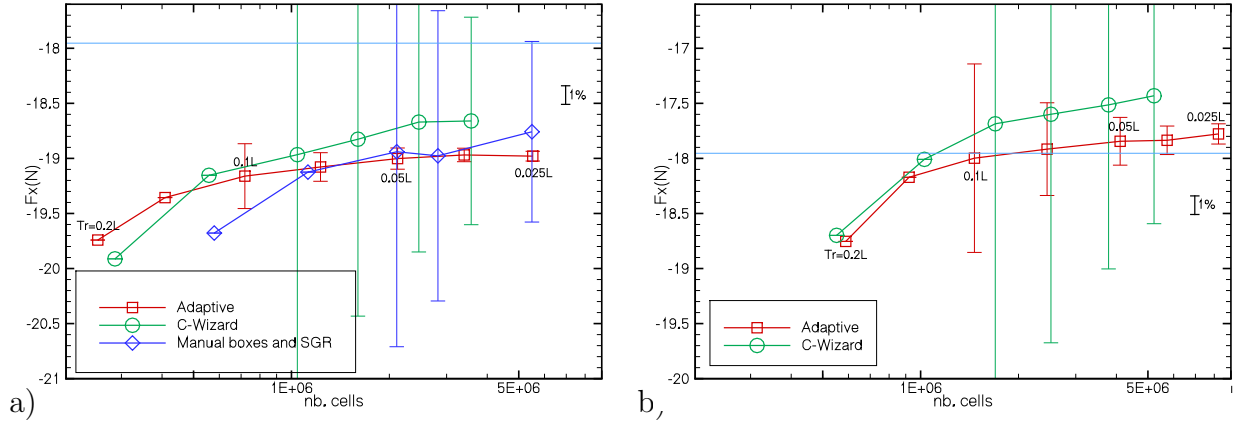


FIGURE 9 – Résistance du KVLCC2, convergence en maillage pour la loi de paroi (a) et la paroi résolue (b).

de l'arrière-corps. Les expériences montrent un 'crochet' caractéristique dans la vitesse axiale (figure 10c), dû à un tourbillon longitudinal. Ce tourbillon est bien représenté par la solution adaptative (figure 10a), mais sous-estimé pour les maillages uniformes (figure 10b). La création d'un tourbillon consomme de l'énergie, ce qui explique la résistance plus faible de la série C-Wizard.

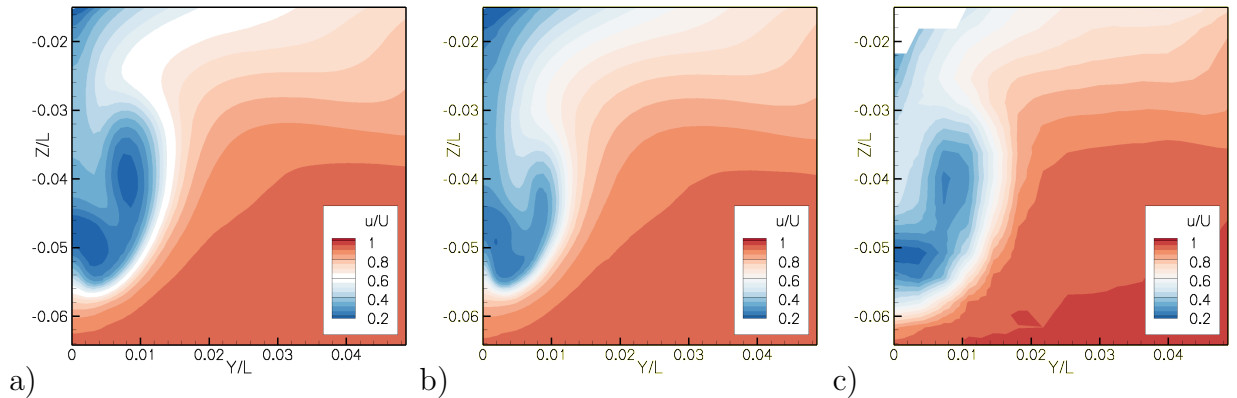


FIGURE 10 – KVLCC2, vitesse axiale dans le plan de l'hélice pour les solutions avec loi de paroi. Adaptative $T_{rH} = 0.025L$ (a), C-Wizard 3.6M cellules (b) et expériences (c).

IV – 4 KCS en autopropulsion

Pour tester la polyvalence du protocole de raffinement, il est appliqué à un cas pour lequel il n'a jamais été prévu : le KCS en autopropulsion [5] avec un modèle de force volumique pour représenter l'hélice. Il s'agit ici du premier test de notre raffinement automatique pour un champ de force. De plus, l'hélice d'un navire est minuscule par rapport au navire lui-même. Un objet aussi petit peut-il être capturé par l'adaptation de maillage configuré pour l'écoulement autour de tout le navire ?

Le maillage Hexpress initial est égal à celui de la section IV – 1 ; aucun raffinement particulier n'est appliqué autour du disque actionneur. Pourtant, le maillage raffiné (figure 11b) capture bien l'écoulement de l'hélice, même pour le seuil grossier $T_{rH} = 0.1L$. Ainsi, le raffinement basé sur l'échelle de longueur du navire est approprié pour un détail tel que le disque actionneur. Cependant, la taille des mailles dans toute la région du disque est égale

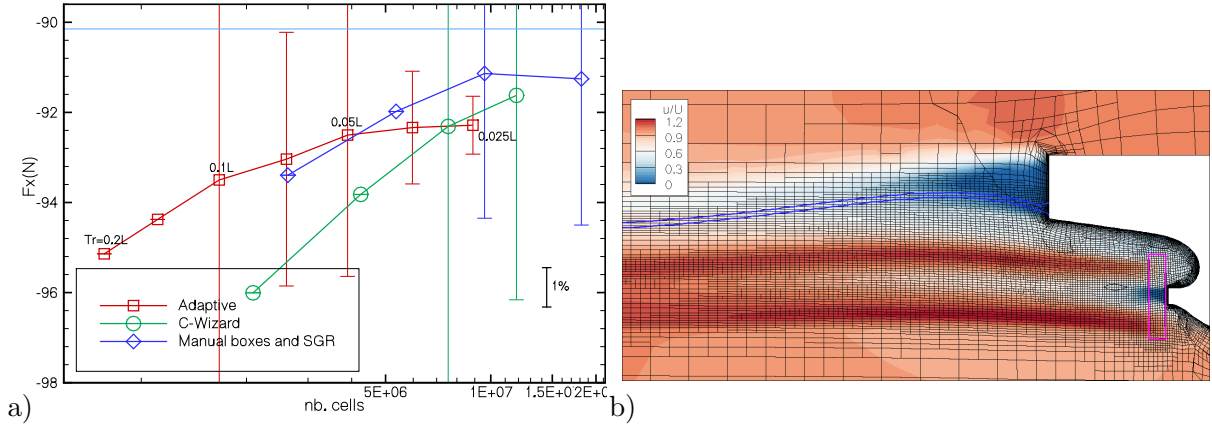


FIGURE 11 – Autopropulsion KCS : (a) résistance, convergence de la grille pour trois stratégies de maillage et incertitude numérique estimée; la ligne bleue représente le résultat expérimental de [5]. (b) vitesse axiale dans le plan de symétrie y pour $T_{rH} = 0.1L$ et emplacement de la force du corps (boîte rose).

à la taille minimale des cellules. Bien que ce maillage soit suffisamment fin pour le champ de force, il est possible que la taille minimale des cellules empêche la convergence vers une solution indépendante du maillage. Tous les résultats de traînée (figure 11a) concordent bien avec les expériences; la différence entre les séries est similaire à celle du KVLCC2 par exemple. Ces résultats confirment que le protocole d'adaptation de la maille peut être utilisé pour l'autopropulsion.

V – Conclusions et discussion

Cet article, basé sur [14], présente un protocole d'adaptation de maillage pour calculer la résistance en eaux calmes des coques à déplacement, et évalue la généralité de ce protocole. Le protocole convient pour des formes de coques allant des frégates aux pétroliers, et à des vitesses allant de la navigation lente aux vitesses de pointe. Il fonctionne pour différents modèles de turbulence RANS et modèles de paroi, et il est adapté aux modèles d'hélice à champ de force. D'autres navires comme des coques rapides n'ont pas été testées. Cependant, [9] montre qu'un protocole avec le même critère et des seuils similaires existe pour les hydrofoils portants. Par conséquent, même si le protocole de la section III doit être modifié pour la simulation d'autres types de navires en eaux calmes, il est probable qu'un protocole similaire existe pour n'importe quel cas. Ainsi, l'utilisation systématique de l'adaptation de maillage pour les simulations de résistance est réaliste aujourd'hui.

L'adaptation de maillage offre-t-elle des avantages par rapport aux maillages existants? Tout d'abord, les tests montrent que les maillages raffinés fournissent un excellent niveau de précision, obtenant souvent une différence de 1% par rapport à la valeur convergée à partir de 1 million de cellules, ce qui est beaucoup moins que pour des maillages non adaptés. En outre, l'adaptation de maillage rend la simulation plus fiable, car elle garantit que le maillage convient pour chaque écoulement. Ceci est observé ici pour le KVLCC2, où seuls les maillages adaptés capturent le sillage en forme de crochet. Enfin, la convergence en maillage de tous les cas présentés ici est régulière, ce qui donne des estimations d'incertitude fiables; [13] font le même constat pour les écoulements mono-fluides et [1] pour les avions, avec des écoulements compressibles et une adaptation de maillage tétraédrique. Ainsi, les bonnes estimations de l'incertitude sont probablement une propriété des critères métriques.

Pour la traînée, l'accord avec les expériences est souvent moins bon que pour les maillages non-adaptés. Cependant, toutes les différences ont été attribuées à des problèmes liés aux maillages non-adaptés, tels que la résolution insuffisante des vagues déferlantes et des sillages. Les modèles de turbulence industriels (comme le $k - \omega$ SST avec des lois de paroi) sont approximatifs, tandis que les maillages fixes conduisent à des erreurs numériques non négligeables. Par conséquent, les méthodes de simulation existantes jugées les plus 'fiables' dépendent, dans une certaine mesure, de la compensation des erreurs pour obtenir une précision optimale : au fil des années, les modèles de turbulence ont été ajustés pour fonctionner correctement sur les maillages industriels standard. Or, le raffinement adaptatif de maillage réduit les erreurs numériques d'un ordre de grandeur par rapport aux maillages classiques, ce qui perturbe l'équilibre de la compensation des erreurs et entraîne des erreurs globalement plus importantes. Peut-être que la modélisation de la turbulence doit être ajustée spécifiquement pour les maillages raffinées de manière adaptative ?

Il existe donc des questions ouvertes autour du protocole de simulation, qui sera probablement amélioré et étendu dans l'avenir. Néanmoins, il a prouvé sa généralité et ses avantages potentiels sont évidents. Les résultats actuels montrent que le raffinement automatique est suffisamment mûr pour commencer l'application pratique dans l'industrie.

Remerciements

Ce travail a bénéficié de l'accès aux ressources HPC du CINES dans le cadre de l'allocation A0092A01308 faite par GENCI (Grand Equipement National de Calcul Intensif), que nous remercions chaleureusement.

Références

- [1] F. Alauzet and L. Frazza. Feature-based and goal-oriented anisotropic mesh adaptation for RANS applications in aeronautics and aerospace. *J Comput Phys*, 439 :110340, 2021.
- [2] R. Duvigneau and M. Visonneau. On the role played by turbulence closures in hull shape optimization at model and full scale. *J Mar Sci Tech*, 8 :11–25, 2003.
- [3] L. Eça and M. Hoekstra. A procedure for the estimation of the numerical uncertainty of CFD calculations based on grid refinement studies. *J Comput Phys*, 262 :104–130, 2014.
- [4] P. L. George, F. Hecht, and M. G. Vallet. Creation of internal points in Voronoi's type method. Control adaptation. *Adv Eng Software*, 13(5/6) :303–312, 1991.
- [5] T. Hino, editor. *CFD Workshop Tokyo 2005*. National Maritime Research Institute, Tokyo, Japan, 2005.
- [6] W. J. Kim, D. H. Van, and D. H. Kim. Measurement of flows around modern commercial ship models. *Exp Fluids*, 31 :567–578, 2001.
- [7] A. Olivieri, F. Pistani, A. Avanzini, F. Stern, and R. Penna. Towing tank experiments of resistance, sinkage and trim, boundary layer, wake, and free surface flow around a naval combatant INSEAN 2340 model. Technical Report 421, IIHR, Iowa, 2001.
- [8] P. Queutey and M. Visonneau. An interface capturing method for free-surface hydrodynamic flows. *Comput Fluids*, 36(9) :1481–1510, November 2007.
- [9] P. Robin, A. Leroyer, J. Richeux, D. de Prémoré, and J. Wackers. Starting off the right foot with foil sock approach and agr criterion. In *24th Numerical Towing Tank Symposium (NuTTS 2022)*, Zagreb, Croatia, 2022.

- [10] J. Slotnick, A. Khodadoust, J. Alonso, D. Darmofal, W. Gropp, E. Lurie, and D. Mavriplis. CFD vision 2030 study : A path to revolutionary computational aerosciences. Technical Report NASA/CR-2014-218178, NASA, 2014.
- [11] J. Wackers. *Adaptivity for complex flows*. HDR thesis, Université de Nantes, France, 2019.
- [12] J. Wackers, G. B. Deng, E. Guilmineau, A. Leroyer, P. Queutey, and M. Visonneau. Combined refinement criteria for anisotropic grid refinement in free-surface flow simulation. *Comput Fluids*, 92 :209–222, 2014.
- [13] J. Wackers, G. B. Deng, E. Guilmineau, A. Leroyer, P. Queutey, M. Visonneau, A. Palmieri, and A. Liverani. Can adaptive grid refinement produce grid-independent solutions for incompressible flows? *J Comput Phys*, 344 :364–380, 2017.
- [14] J. Wackers, G. B. Deng, C. Raymond, E. Guilmineau, A. Leroyer, P. Queutey, and M. Visonneau. Adaptive grid refinement for ship resistance computations. *Ocean Eng*, 250 :110969, 2022.