

**COUPLAGE ÉCOULEMENT/MOUVEMENT AU SEIN D'UN
SOLVEUR RANSE : APPLICATIONS À L'HYDRODYNAMIQUE
NAVALE**

***FLOW/MOTION COUPLING IN A RANSE SOLVEUR : APPLICATIONS
TO SHIP HYDRODYNAMICS***

A. LEROYER, P. QUEUTEY ET M. VISONNEAU

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

Résumé

Ce papier présente les méthodologies associées aux calculs d'écoulements de carènes libres en utilisant un solveur Navier-Stokes associé à une méthode de capture d'interface. Après une description des méthodes utilisées, deux applications liées à la recherche de positions d'équilibre seront présentées.

Summary

This paper deals with Navier-Stokes simulations associated to interface capturing method around free moving hulls. Firstly, a description of the considered methods is given. Then, two applications involving the research of the equilibrium position (trim and sinkage) are shown.

I-INTRODUCTION

Les solveurs Navier-Stokes ont atteint un degré de maturité tel que l'on peut aujourd'hui y associer de nouveaux phénomènes physiques afin de dépasser le simple stade de soufflerie ou de bassin de traction numérique. L'étude d'écoulements réels autour de corps en mouvement fait partie de ces nouvelles applications qui deviennent désormais abordables avec les moyens de calculs actuels. Les applications industrielles de ce type de simulations sont nombreuses, notamment dans le domaine de l'hydrodynamique : position d'équilibre d'un bateau à une vitesse donnée, comportement dynamique, tenue à la mer,... Dans une première partie, on décrira succinctement le code de calcul **ISIS-CFD** développé au sein de l'Equipe Modélisation Numérique (EMN). Puis on donnera quelques détails sur les méthodes mises en place pour coupler les équations de Navier-Stokes avec le Principe Fondamental de la Dynamique (PFD) au sein du code. Enfin, l'ensemble des techniques présentées sera appliqué à la recherche de positions d'équilibre (enfoncement et assiette) d'un bateau en vitesse d'avance constante.

II-DESCRIPTION DU CODE ISIS-CFD

Le code **ISIS-CFD** est basé sur la résolution des équations de Navier-Stokes en moyenne de Reynolds (RANSE) sous une forme fortement conservative. Il repose sur une méthode de volumes finis généralisée à des maillages non-structurés composés de volumes polyédriques arbitraires.

Le champ de vitesse \vec{U} est obtenu à partir des équations de conservation de quantité de mouvement et la pression P est déterminée selon la contrainte d'incompressibilité transformée en équation de pression. Le couplage vitesse-pression est assuré par un algorithme de type SIMPLE. L'ensemble des variables est stocké au centre des volumes de contrôle. Les intégrales de volume et de surface sont évaluées par des approximations précises au second ordre. Le mode de discrétisation temporelle utilisé nominalement pour les calculs instationnaires est une méthode du deuxième ordre décentrée à deux pas de temps. Cependant, dans le cadre de recherche de position d'équilibre stationnaire, une méthode décentrée du premier ordre est utilisée puisqu'il n'y a pas de dépendance temporelle à convergence. A chaque pas de temps, une boucle interne (appelée "boucle non-linéaire") associée à une linéarisation de Picard est effectuée pour résoudre les non-linéarités. Le passage à l'itération temporelle suivante est opéré lorsque le résidu des équations a été réduit d'un certain gain (typiquement 3 ordres pour des calculs physiquement instationnaires). Les calculs multiprocesseurs sont gérés par MPI.

On a aussi la possibilité de simuler des écoulements avec surface libre ([1],[2]). Ils sont gérés par une méthode de capture d'interface. L'ensemble des deux phases est vu comme un fluide unique dont les propriétés varient avec un taux de présence c_i . Celui-ci est traité comme un Lagrangien emporté par le fluide global. Sa discrétisation nécessite des schémas appropriés pour éviter une diffusion trop importante de l'interface.

Les équations résolues sont présentées ci-dessous ($\delta/\delta t$ désigne la dérivée par rapport au temps selon le champs de vitesse \vec{U}_d , c'est-à-dire "en suivant le maillage dans son mouvement") :

Propriétés globales du fluide : $\sum_i c_i = 1$, masse volumique $\rho = c_i \rho_i$, viscosité $\mu = c_i \mu_i$

Loi de conservation géométrique : $\frac{\delta}{\delta t} \int_{\mathcal{V}} dV - \oint_S \vec{U}_d \cdot \vec{n} dS = 0$

Fonction de présence : $\frac{\delta}{\delta t} \int_{\mathcal{V}} c_i dV + \oint_S c_i (\vec{U} - \vec{U}_d) \cdot \vec{n} dS = 0$

Conservation de la quantité de mouvement :

$$\frac{\delta}{\delta t} \int_{\mathcal{V}} \rho \vec{U} dV + \oint_S \rho \vec{U} (\vec{U} - \vec{U}_d) \cdot \vec{n} dS = \int_{\mathcal{V}} (-\vec{\nabla} P + \rho \vec{g}) dV + \oint_S 2(\mu + \mu_t) \mathbb{D} \cdot \vec{n} dS$$

Conservation de la masse : $\oint_S \vec{U} \cdot \vec{n} dS = 0 \rightarrow$ équation de pression

III-GESTION DES CORPS EN MOUVEMENTS

1-Cadre général

ISIS-CFD a été étendu pour simuler les mouvements 3D d'un nombre quelconque de corps indéformables (solides) mais aussi déformables à déformation imposée (la forme du corps est alors imposée au cours du temps). Les degrés de liberté pour chaque corps peuvent être soit résolus soit imposés en donnant explicitement la loi d'évolution du paramètre dans le repère physique.

Pour les corps à un seul degré de liberté en rotation, la résolution du PFD ne pose pas de problème particulier : c'est notamment le cas des applications présentées dans ce papier. Cependant, dans le cadre d'une résolution générale tridimensionnelle, la représentation classique de l'orientation des corps par 3 rotations successives (de type angle d'Euler), notées (ψ, θ, ϕ) , s'est avérée inadaptée du fait de l'existence de configurations singulières pour lesquelles le triplet (ψ, θ, ϕ) n'est pas unique. L'utilisation de l'espace des quaternions \mathbb{H} , espace de dimension 4, (qui peut être vu comme une extension à l'espace de la représentation plane des nombres complexes) a permis de s'affranchir de ces problèmes. Pour plus de détails sur le paramétrage, on se reportera à [3] et à [2].

2-Remaillage

ISIS-CFD, comme la plupart des solveurs RANSE utilise des maillages qui s'appuient sur la surface des corps ("body-fitted grid"). L'emploi de maillages exclusivement cartésiens "non body-fitted" dans lequel les corps sont immergés ("immersed boundary" avec éventuellement un raffinement local près des corps) reste en effet pour le moment inadapté pour représenter précisément les couches limites turbulentes près des corps. Le code utilise un seul maillage, excluant les méthodes à recouvrement de maillages de type "chimère". Cela permet d'éviter les problèmes d'interpolation entre les différents maillages. En contrepartie, il est nécessaire de gérer le déplacement au cours du temps des nœuds du maillage représentant chaque corps dans le repère physique. Pour conserver un maillage adéquat, différentes méthodologies ont été développées. Elles peuvent être utilisées de manière hybride suivant les degrés de liberté :

- remaillage par analogie à une pseudo-structure (résolution d'un problème d'élasticité linéaire avec coefficients de Lamé variables ou analogie du domaine fluide à un assemblage de ressorts)
- repositionnement en bloc
- remaillage par pondération analytique (pour les mouvements rigides et de type poutre)

Les techniques basées sur une pseudo-structure permettent des déformations de forme quelconque assez importantes mais nécessitent la résolution d'un système linéaire. Le repositionnement en bloc n'est pas à proprement parler une technique de remaillage puisque dans ce cas

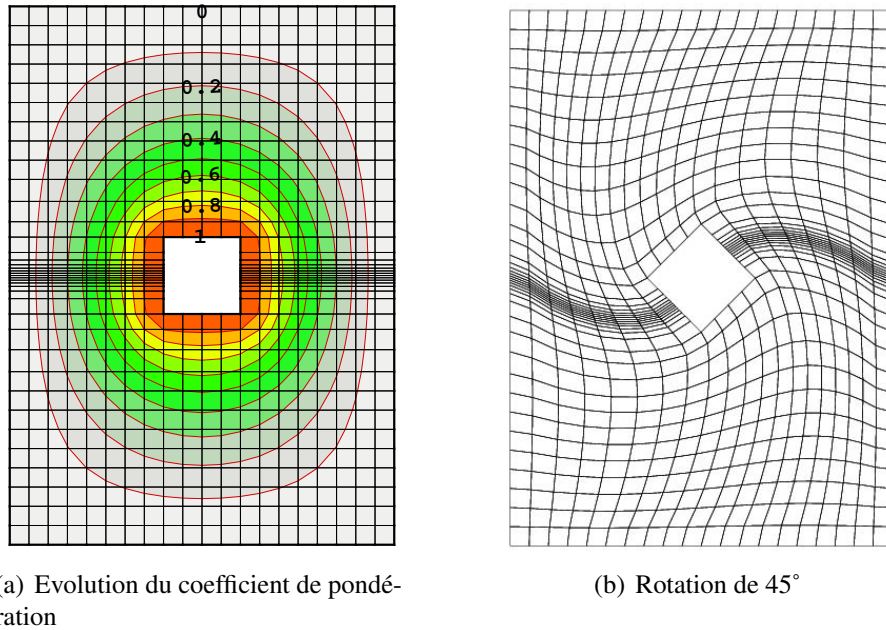


FIG. 1. Exemple de remaillage par pondération

le maillage suit exactement le mouvement du corps sans se déformer. La qualité du maillage est donc conservée, mais cela n'est applicable que pour des calculs mettant en jeu un corps unique en milieu infini. A noter que dans ce cas, l'évolution temporelle de la transformation rigidifiante (translation+rotation) appliquée aux points du maillage est décrite par un torseur cinématique dont les caractéristiques servent au calcul (exact) des flux de vitesse de déplacement des faces du maillage par rapport au repère physique.

Le remaillage par pondération analytique peut être vu comme une extension du repositionnement en bloc, mis à part que l'on pondère le mouvement du corps suivant la proximité du corps par un coefficient k_p calculé initialement. Celui-ci vaut 1 pour les nœuds du corps considéré, 0 pour ceux des autres frontières du domaine de calcul. Il est obtenu en début de simulation par résolution d'un Laplacien sur la configuration de référence. Un exemple pour un carré effectuant une rotation de 45° est donné sur la figure 1. Le temps CPU quasiment négligeable permet à cette technique de se substituer avantageusement aux méthodes pseudo-structure, notamment pour des amplitudes de déformation raisonnables. Une extension de cette technique a été réalisée pour les corps déformables de type poutre (voir [4] et [5]). Pour plus de détails sur ces stratégies de remaillage, on se reportera à [2].

3-Couplage écoulement-mouvement

Concernant le couplage avec la résolution de l'écoulement, celui-ci existe uniquement lorsque le mouvement (ou une partie du mouvement) est résolu par application du PFD. La cinématique des corps à l'instant de calcul est alors liée à l'écoulement à ce même instant par les efforts fluides qui s'exercent sur eux. En retour, le mouvement des corps influence l'écoulement par l'intermédiaire des flux de vitesse de déplacement (FIG. 2).

Pour obtenir un couplage stable, il s'est avéré obligatoire de remettre à jour l'interaction écoulement/mouvement non plus à l'issue de la boucle temporelle mais dans la boucle non-linéaire. Les efforts sont ainsi recalculés à chaque itération non-linéaire et servent à réajuster la position des corps pour l'itération non-linéaire suivante par l'intermédiaire du PFD. Après remaillage, les nouveaux flux de vitesse de déplacement engendrés par cette nouvelle cinématique sont

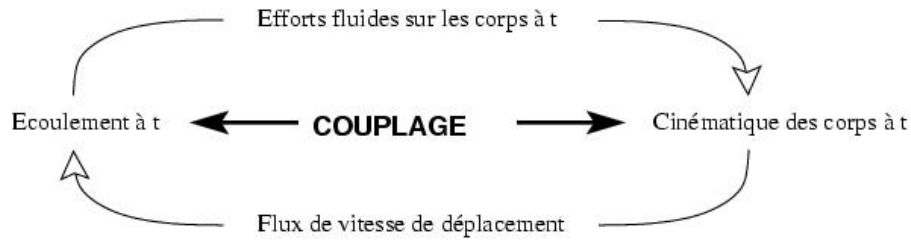


FIG. 2. Schématisation du couplage écoulement-mouvement

réévalués. On peut noter ici l'intérêt de disposer de procédures de remaillage analytique qui permettent de ne pas pénaliser le temps de calcul. L'interaction écoulement-mouvement est ainsi complètement actualisée à chaque itération non-linéaire. Cela se traduit par l'algorithme présenté sur la figure 3 .

IV-APPLICATIONS

Ces méthodologies mettant en jeu le couplage écoulement/mouvement ont déjà été mises à profit dans le cadre du P.I.R. CNRS Robea qui vise à concevoir un robot-anguille auto-propulsé [4]. Des calculs bidimensionnels d'impacts associés à des techniques de raffinement automatique ont aussi été réalisés [6]. Une étude d'écoulement à surface libre très complexe (avec déferlement) a aussi été initiée : elle concerne l'écoulement autour d'une palette d'aviron et s'appuie sur des essais réalisés sur le bassin de traction de l'ECN. Dans ce dernier cas, il s'agit d'un mouvement imposé de translation/rotation. Le fluide n'agit donc pas en retour sur la cinématique de la palette.

Les applications présentées ici ont pour objectif de rechercher la position d'équilibre d'un bateau (assiette et enfoncement) en eau calme pour une vitesse d'avance donnée. Deux cas vont être présentés : le premier concerne le DTMB5415 (David Taylor Model Basin), qui est en fait le design préliminaire d'un navire de combat (muni d'un dôme à l'avant pour loger un sonar et d'un tableau arrière droit (voir FIG. 4). Le deuxième s'appuie sur des expériences réalisées sur la carène à échelle modèle d'un porte-containers moderne, dénommé Hamburg Test Case (HTC), représenté sur la figure 5. Les configurations des deux cas-tests sont rassemblées dans le tableau 1. T_f et T_a représentent les deux tirants d'eau, respectivement au niveau des perpendiculaires avant et arrière. Pour le DTMB, les valeurs sont données pour une carène adimensionnée ($L_{pp} = 1$ m), alors que pour la carène HTC, les caractéristiques sont données par rapport à la maquette de longueur $L_{pp} = 6.4$ m. Les simulations ont été réalisées dans ces mêmes conditions, adimensionnées pour le DTMB, et dans la configuration maquette pour la carène HTC.

Carène	Re	Fr	L_{pp}	T_f	T_a
DTMB5415	$1.26e7$	0.28	1 m	0.0434 m	0.0434 m
HTC	$11.77e6$	0.238	6.4 m	0.429 m	0.383 m

TAB. 1. Configuration des deux cas-tests.

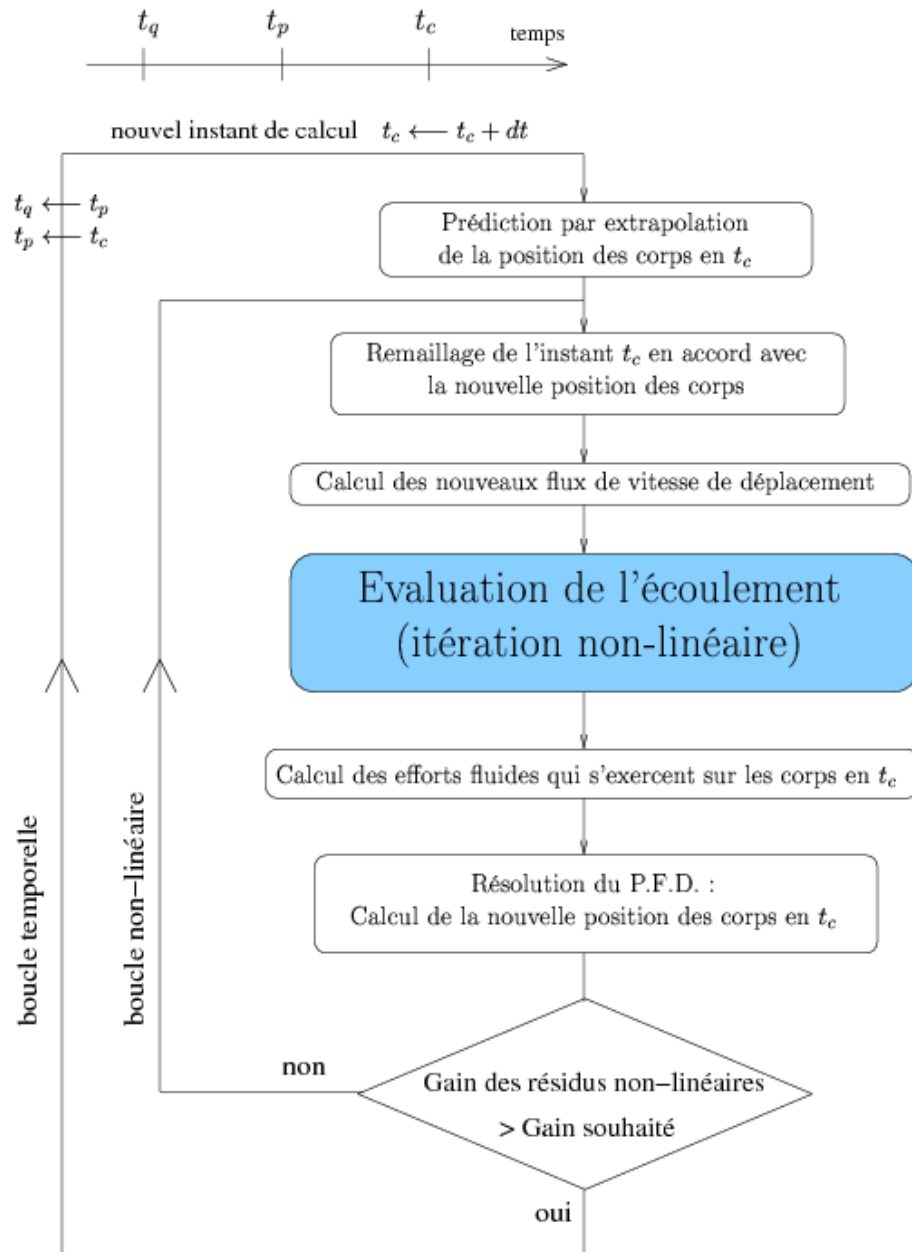


FIG. 3. Algorithme du couplage non-linéaire

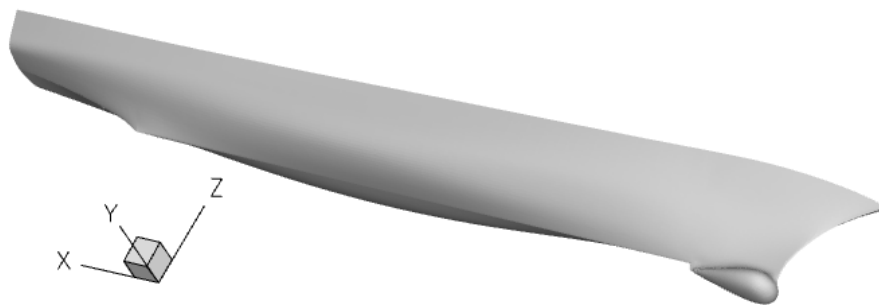


FIG. 4. David Taylor Model Basin 5415 (DTMB)

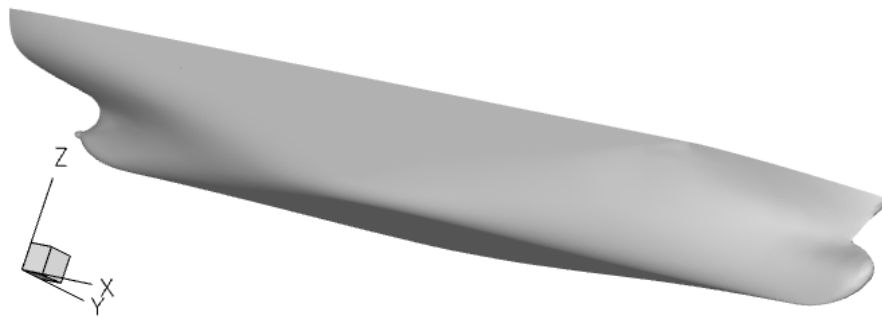


FIG. 5. Hamburg Test Case (HTC)

1-Méthodologies

Les mouvements du bateau sont gérés de la façon suivante : le mouvement d'avance (translation d'axe X d'amplitude très importante) est "récupéré" par un mouvement en bloc du maillage de même caractéristique, tandis que les deux degrés de liberté résolus (translation suivant Z et rotation d'axe Y), tous deux de faibles amplitudes sont repris par un remaillage par pondération. A noter que pour obtenir un maillage de très bonne qualité proche du corps, le coefficient de pondération k_p (obtenu au centre des cellules par résolution d'un Laplacien sur la configuration de référence) est interpolé au deuxième ordre pour obtenir les valeurs aux noeuds puis corrigé pour obtenir un mouvement en bloc du maillage sans déformation à proximité du corps. Cette correction permet de garantir un maillage de bonne qualité dans une zone proche du corps. Ce type de remaillage est très bien adapté aux simulations dans lesquelles les mouvements mis en jeu sont de faibles amplitudes, ce qui est le cas des configurations étudiées.

Pour toutes les simulations, le couplage entre l'écoulement et le mouvement est mis à jour à chaque itération non-linéaire (ce qui n'est pas pénalisant en terme de temps CPU du fait de l'utilisation d'une technique de remaillage analytique).

En ce qui concerne la procédure pour rechercher la position d'équilibre, deux approches instationnaires ont été testées :

- la première, que l'on désignera dans la suite par "démarrage couplé" consiste à reproduire un essai de traction en mouvement libre dans lequel la mise en vitesse progressive se fait en laissant la carène libre dès le début. Une fois la vitesse nominale atteinte, la simulation se poursuit jusqu'à l'obtention de la position d'équilibre de la carène. A noter que l'on est capable de réaliser facilement des reprises successives permettant d'obtenir une mise en vitesse progressive et par paliers pour tester différents nombres de Froude dans une même simulation.
- la deuxième technique, dénommée "démarrage figé", se déroule en deux étapes. Dans un premier temps, la carène est "tractée" rigide sans degré de liberté, jusqu'à obtenir d'un écoulement établi (ou presque établi) à la vitesse désirée. Ensuite, une reprise du calcul est effectuée avec la carène libre. Pour éviter des oscillations importantes pouvant mener à la divergence de la procédure lors du lâcher, un terme en " $-k_v.V$ " par analogie à un système masse-ressort amorti (où V représente la vitesse (linéaire ou angulaire) du d.d.l. considéré) est ajoutée aux équations de la dynamique pour amortir la phase transitoire.

Les figures 6 montrent les résultats de calculs préliminaires comparant les deux approches sur

le cas DTMB5415. Pour la technique du "démarrage figé", l'étape de lâché pour le démarrage fixe a été effectué après 8,5 s de calcul comprenant la phase de mise en vitesse avec la carène fixe. Malgré l'ajout d'un amortisseur, cette technique possède de brusques variations lors du lâcher, pouvant être préjudiciable à la robustesse du calcul.

Il semble donc que le démarrage couplé, plus physique et plus facile à mettre en oeuvre puisque le calcul est effectué en une seule étape, soit la meilleure solution. Cette technique a été systématiquement utilisée dans les résultats présentés ci-dessous.

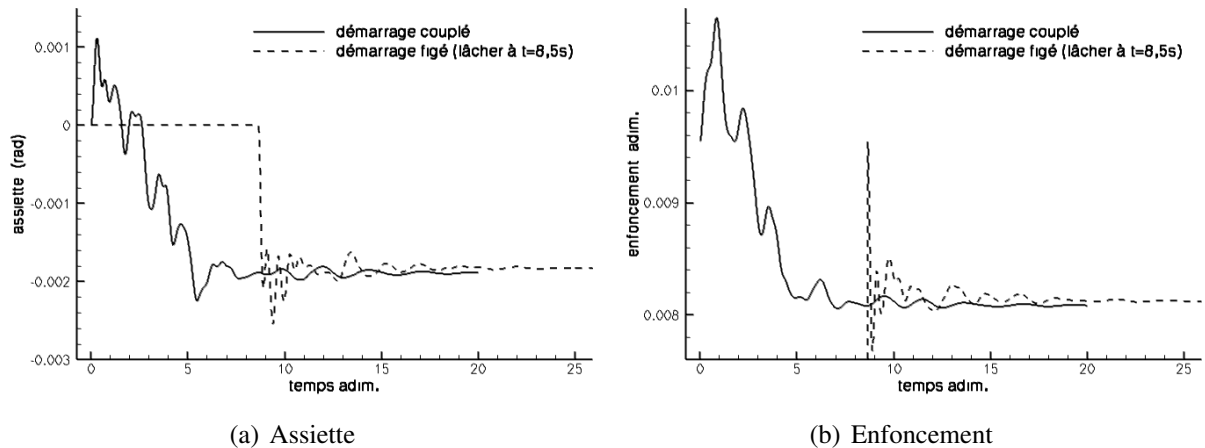


FIG. 6. Comparaison des deux approches pour l'obtention de la position d'équilibre

2- Caractéristiques des simulations

Pour le moment, seuls des maillages assez grossiers ont été utilisés pour réaliser ces premiers calculs couplés avec le mouvement. Pour les deux cas, la symétrie en $Y = 0$ a été mise à profit pour réduire le domaine de calcul à un demi-espace ($Y > 0$).

Le maillage du DTMB5415 possède environ 300 000 cellules et une hauteur de maillage à proximité de la surface libre de 1 mm pour une carène de longueur $L_{pp} = 1$ m (voir FIG. 7). Celui-ci a été auparavant validé sur des simulations "classiques" avec une carène figée et donne des résultats d'une précision raisonnable par rapport à des maillage plus fins (du moins pour les efforts).

En ce qui concerne la carène HTC, le maillage réalisé est un peu plus fin et contient environ 1000000 de cellules. Une vue globale dans le plan de symétrie est donnée sur la figure FIG. 8. La hauteur des cellules à proximité de la surface libre est ici de 8 mm pour une longueur de carène de 6,4 m.

Dans les deux cas, les maillages sont adaptés à une modélisation de la turbulence par une approche loi de paroi. Pour cette étude, seul le modèle $k - \omega$ SST de Menter a été utilisé. L'objectif étant ici d'obtenir une position d'équilibre (donc indépendante du temps), un simple schéma du 1^{er} ordre en temps a été utilisé.

Les données nécessaires aux calculs des deux configurations sont rassemblées dans le tableau 2. La masse et la position horizontale du centre de gravité des carènes ont été déduites d'une initialisation hydrostatique dans laquelle le taux de présence n'est pas encore diffusé. La position verticale du centre de gravité ne peut par contre pas être déduite de cette initialisation et doit donc être spécifiée expérimentalement. Pour ce qui est du moment d'inertie J_Y suivant l'axe Y (qui n'a pas d'influence sur la position d'équilibre), il a été spécifié expérimentalement dans le cas du DTMB par son rayon de giration r_g égal à $0.25L_{pp}$ ($J_Y = M.r_g^2$, avec M la masse du

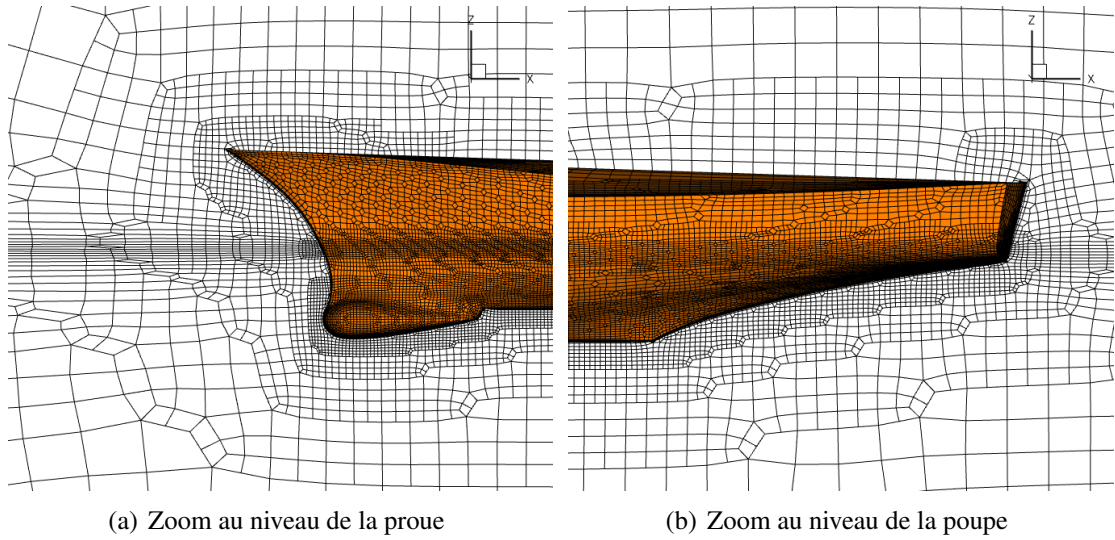


FIG. 7. Vues du maillage de surface du DTMB5415

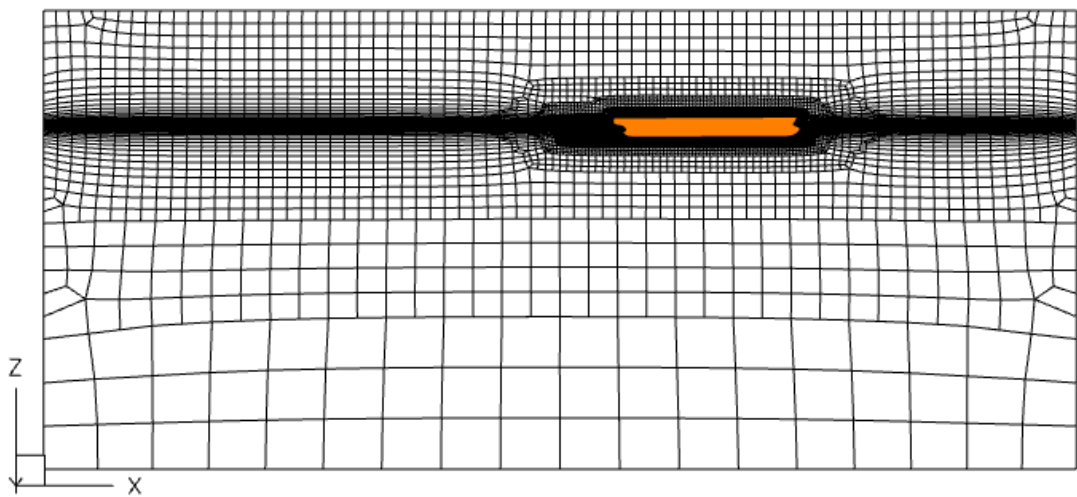


FIG. 8. Vue du maillage dans le plan de symétrie $Y=0$

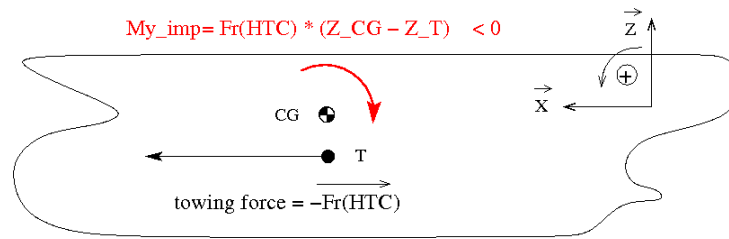


FIG. 9. Moment à imposer engendré par la force de traction

corps). Pour la carène HTC, une valeur similaire a été choisie : il s'agit en fait d'une valeur proposée par le HSVA qui a aussi effectué ces calculs (idem pour la position du centre de gravité).

Carène	DTMB5415	HTC
L_{pp}	1 m	6.4 m
X_{avP} (proue)	-0,5 m	6.4 m
X_{arP} (poupe)	0,5 m	0 m
position de la surface libre Z_{SL}	0 m	0 m
(X_{CG}, Y_{CG}, Z_{CG}) , en m	(0.0055, 0, 0.00955)	(3.1252, 0, -0.0697)
masse M (corps entier)	2.9839×10^{-3} kg	2×961.6 kg
moment d'inertie J_Y (corps entier)	1.865×10^{-4} kg.m ²	2×2463.8 kg.m ²
vitesse nominale U_0 ($\vec{U}_0 = U_0 \vec{X}$)	-1 m.s ⁻¹	1.886 m.s ⁻¹
gravité g ($\vec{g} = -g \vec{Z}$)	12.755 m.s ⁻²	9.81 m.s ⁻²
masse volumique de l'eau ρ_e	1 kg.m ⁻³	$998,94$ kg.m ⁻³
viscosité dynamique de l'eau μ_e	7.9365×10^{-8} Pa.s	1.0244×10^{-3} Pa.s
masse volumique de l'air ρ_a	0.001 kg.m ⁻³	1.2 kg.m ⁻³
viscosité dynamique de l'air μ_a	9.5238×10^{-11} Pa.s	1.23×10^{-6} Pa.s

TAB. 2. Caractéristiques des simulations

Remarque : pour le cas-test HTC, l'effort de traction du chariot n'est pas situé au niveau du centre de gravité, mais à $Z_T = Z_{CG} - 2T_m/3$ (où T_m est le tirant d'eau moyen pris au milieu de la carène). La résolution du principe fondamental de la dynamique s'effectuant au centre de gravité, il convient donc de rajouter un moment imposé suivant Y (dépendant de la force de traînée du corps) pour prendre en compte cette caractéristique (voir FIG. 9). Il est à noter que celui-ci n'a pas été pris en compte pour le calcul présenté. Cependant, considérant de précédents calculs réalisés, il n'a a priori que peu d'influence (il devra quand même être rajouté pour les prochains calculs). Pour le DTMB, aucune précision sur la position de ce point d'application n'était donnée dans les documents décrivant les expériences. Par défaut, il a donc été supposé que la force de traction du chariot s'exerçait à proximité du centre de gravité, de sorte que ce moment soit négligeable.

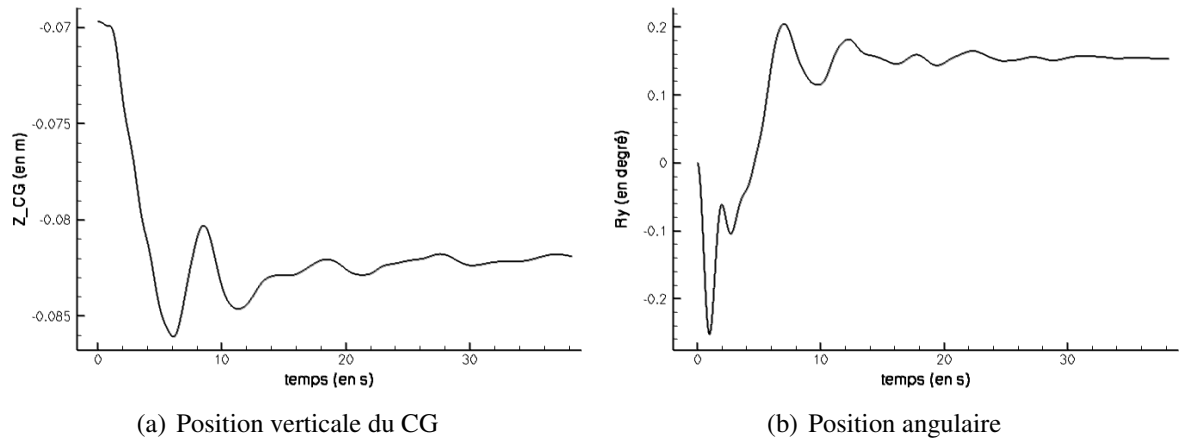


FIG. 10. Evolution de la position de la carène HTC

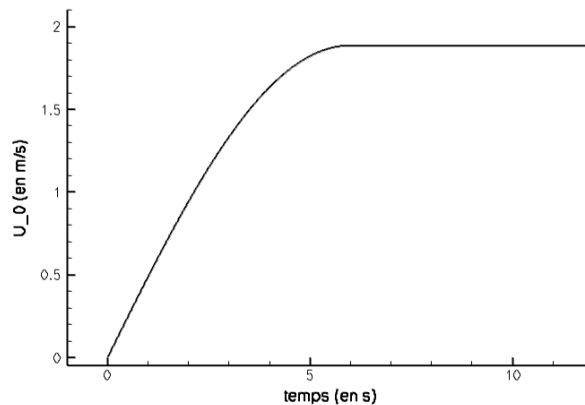


FIG. 11. Loi de mise en vitesse

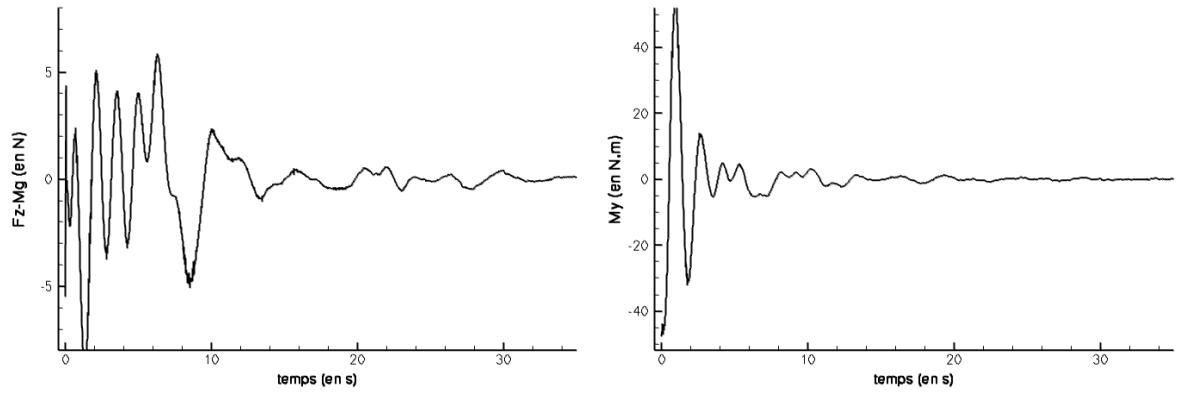
3-Résultats

Les figures 10 montrent, pour le cas HTC, l'évolution de la position de la carène au cours du temps jusqu'à sa stabilisation. A noter que dans ce cas, la mise en vitesse a été effectuée sur une durée de 6 s en suivant la loi de vitesse représentée FIG. 11. Les figures 12 qui représentent l'évolution des efforts, mettent aussi en évidence, malgré de légères oscillations résiduelles, la stabilisation vers un état d'équilibre.

Au niveau quantitatif, ces premiers calculs montrent globalement de bonnes tendances par rapport aux données expérimentales pour les deux cas-tests (voir TAB. 3 et TAB. 4).

Seule l'assiette pour la carène HTC semble assez éloignée. Cependant, cette valeur est similaire à celle obtenue par différents codes (utilisant des méthodes de suivi et de capture d'interface) lors d'un workshop effectué dans le cadre du projet européen Virtue (WP1). Il semble qu'il y ait à ce point de fonctionnement, une forte dépendance de l'assiette au nombre de Froude ce qui pourrait expliquer l'écart trouvé (en effet, une interpolation entre deux points voisins donnerait 0.16° et non 0.09° !). Mais ceci devra être confirmé par la suite en comparant les assiettes obtenues à d'autres nombres de Froude.

D'autre part, il apparaît clairement dans les deux cas que la taille des mailles à proximité de la surface libre (si elle reste suffisante pour capturer le champ de vagues) n'est pas assez fine pour obtenir une bonne précision de l'enfoncement. En effet, étant donné que l'enfoncement des carènes pour les deux cas traités est du même ordre de grandeur que l'épaisseur des mailles au niveau de la surface libre ($1.10^{-3} \times L_{pp}$ dans le cas de la carène du DTMB pour un enfoncement



(a) Ecart entre la force hydrodynamique verticale et le poids de la carène (b) Moment hydrodynamique au centre de gravité

FIG. 12. Evolution des efforts sur la carène HTC

expérimental de $1,8 \cdot 10^{-3} \times L_{pp}$!), on ne peut guère s'attendre à une précision supérieure sur un tel maillage associé à de si faibles déplacements. La masse étant calculée à partir d'une initialisation hydrostatique dans laquelle le taux de présence n'est pas diffusé, la seule diffusion du taux de présence sur 2 ou 3 mailles autour de la surface libre va modifier légèrement la force verticale qui s'exerce sur la coque, et donc la position d'équilibre verticale. La valeur de l'enfoncement est donc affectée par cette diffusion. En visualisant l'iso-surface de taux de présence égale à 0.5, on s'aperçoit que celle-ci n'est pas au loin strictement égale à zéro. Sur les deux cas-testés, celle-ci oscille à un niveau positif correspondant à environ 25 % de la hauteur verticale des mailles autour de la surface libre (cette valeur reste tout de même à considérer avec précaution, car elle est issue d'une reconstruction aux nœuds). Cependant, on peut noter qu'en corrigeant l'enfoncement obtenu avec cette valeur moyenne, on améliore significativement les résultats.

Pour améliorer plus directement la précision des résultats, il faudrait travailler avec des maillages possédant des tailles de mailles inférieures à proximité de la surface libre. Pour le moment, cela pose quelques difficultés lors de l'étape de projection pour le mailleur *HexPress*, mais ce problème devrait être résolu à court terme. On peut noter que la diffusion du taux de présence s'exerçant uniformément le long de la coque, l'assiette est beaucoup moins influencé par ce phénomène.

DTMB5415	Sim.	Expé.
enfoncement T_z ($10^{-3}/L_{pp}$, négatif vers le bas)	-1.5	-1.82
enfoncement T_z corrigée par $Z(c_i = 0.5)$ moyen	-1.74	-1.82
assiette R_y (en degré, positif proue vers le haut)	-0.107°	-0.108°

TAB. 3. Comparaison Expérience/Simulation pour le cas-test DTMB5415

HTC	Sim.	Expé.
enfoncement T_z (en m, négatif vers le bas)	-12.5 ± 0.4	-16
enfoncement T_z corrigée par $Z(c_i = 0.5)$ moyen	-15	-16
assiette R_y (en degré, positif proue vers le bas)	0.154°	0.09°

TAB. 4. Comparaison Expérience/Simulation pour le cas-test HTC

Les surfaces libres obtenues dans les deux cas-tests sont représentées FIG. 13 et FIG. 14. Au-

cune comparaison détaillée des écoulements n'a encore été effectuée sur ces calculs. Cependant, dès lors que la position d'équilibre est obtenue, le fait d'avoir une carène libre ne modifiera pas de manière notable les résultats par rapport à un calcul classique où la carène est figée. Ainsi, on peut sereinement s'attendre pour un maillage donné à des résultats similaires à ceux obtenus sur une carène fixe et pour lesquels le code a été validé sur de nombreux cas.

V-CONCLUSION

L'objectif de ce papier était de présenter les méthodes numériques liées au couplage écoulement/mouvement au sein d'un solveur RANSE utilisant une méthode de capture d'interface et les premiers calculs sur des applications d'hydrodynamique navale.

Les procédures utilisées pour la recherche d'une position d'équilibre sont très satisfaisantes en terme de robustesse et de temps CPU par rapport à une simulation classique "corps fixe". Des investigations supplémentaires restent cependant à effectuer pour affiner et optimiser ces procédures. L'amortissement visqueux ajouté dans le cas de la deuxième procédure (qui s'annule lorsque la position d'équilibre est atteinte) devrait notamment être testé sur la technique de "démarrage couplé" pour étudier son influence sur la durée du transitoire. Une étude de convergence en maillage va aussi être nécessaire pour valider complètement les résultats obtenus. Ensuite, des calculs plus conséquents pourront être envisagés, par exemple en utilisant des paliers de vitesse successifs pour étudier l'évolution du positionnement de la carène sur une large gamme de vitesse.

REFERENCES

- [1] G. Deng, E. Guilmineau, P. Queutey, and M. Visonneau, "Capture et suivi d'interfaces d'écoulements de fluides visqueux incompressibles non-miscibles," in *8ème Journées de l'Hydrodynamique*, (Nantes, France), pp. 17–30, Mars 2001.
- [2] A. Leroyer, *Etude du couplage écoulement/mouvement pour des corps solides ou à déformation imposée par résolution des équations de Navier-Stokes. Contribution à la modélisation numérique de la cavitation*. PhD thesis, Ecole Centrale de Nantes, France, 2004. disponible en ligne
ftp://ftp.ec-nantes.fr/pub/DMN/Thesis/these_leroyer.ps.gz.
- [3] A. Leroyer and M. Visonneau, "Simulations d'écoulements autour de corps en mouvement," in *9ème Journées de l'Hydrodynamique*, (Nantes, France), Mars 2003.
- [4] A. Leroyer and M. Visonneau, "Numerical methods for RANSE simulations of a self-propelled fish-like body," *Journal of Fluids and Structures*, vol. 20, pp. 975–991, 2005.
- [5] A. Leroyer and M. Visonneau, "Simulation d'un robot-anguille par résolution des équations de navier-stokes," *Mécaniques & Industries*, no. 7, pp. 189–199, 2006.
- [6] A. Hay, A. Leroyer, and M. Visonneau, "H-adaptive navier-stokes simulations of free-surface flows around moving bodies," *Journal of Marine Science and Technology*, vol. 11, no. 1, pp. 1–18, 2006.

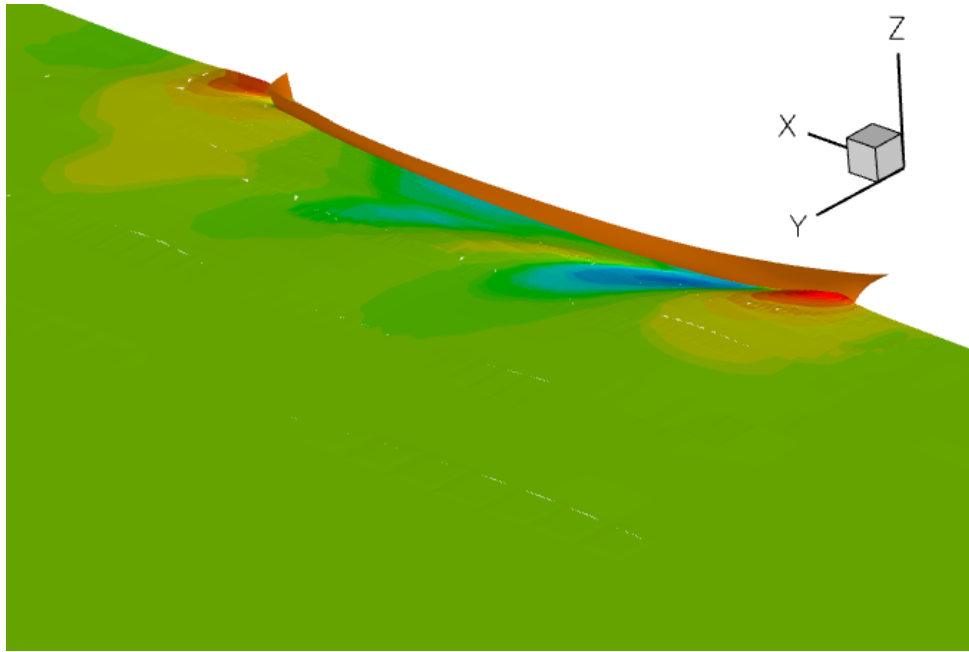


FIG. 13. Surface libre stationnaire obtenue autour de la carène DTMB

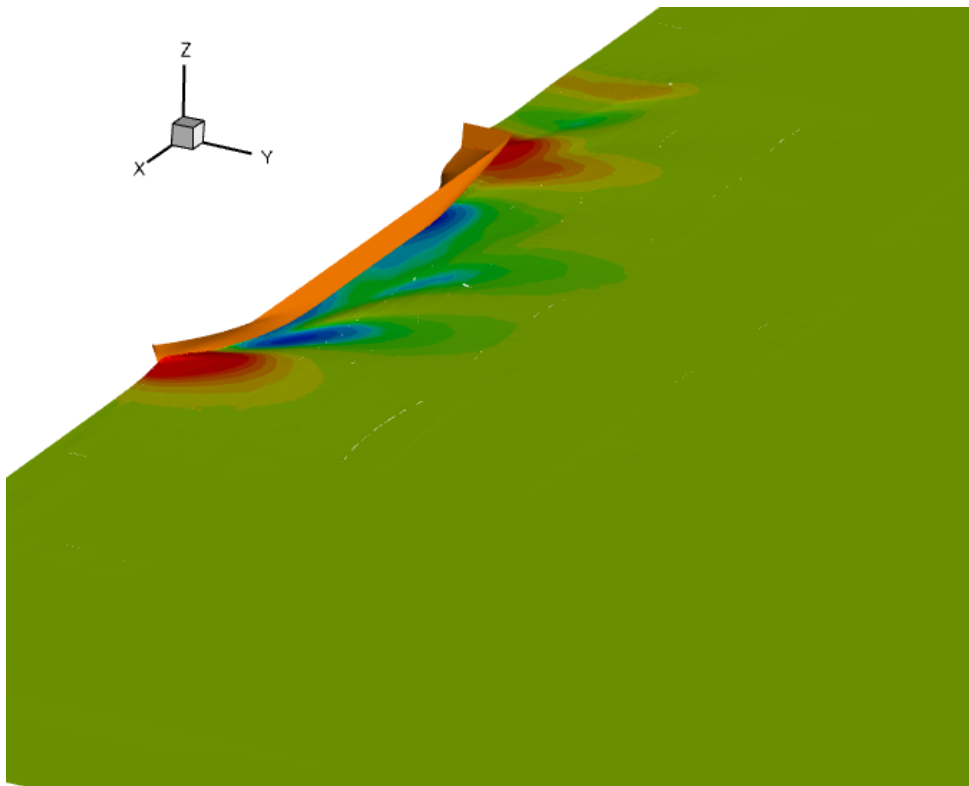


FIG. 14. Surface libre stationnaire obtenue autour de la carène HTC