

Titre : Analyse CFD haute-fidélité de l'hydrodynamique d'un sous-marin et des caractéristiques de l'écoulement en champ proche à l'aide de différents modèles de turbulence et conditions opérationnelles

Mots clés : Sous-marin BB2, hydrodynamique numérique, RANS, hybride RANS-LES, WALE, caractéristiques de l'écoulement

Résumé : Cette thèse développe un cadre méthodologique systématique de mécanique des fluides numérique (CFD) haute-fidélité pour l'analyse hydrodynamique et hydroacoustique des sous-marins, structuré en trois phases de complexité numérique et physique croissante. Les simulations ont été réalisées sur un sous-marin conventionnel BB2 à l'échelle 1:35,1, pour des nombres de Reynolds de $3,6 \times 10^6$ en navigation en ligne droite, avec déclenchement de transition et en dérive pure de 10° , ainsi que de $0,16 \times 10^6$ en condition de remontée d'urgence, en considérant des stratégies de maillage de basse à haute résolution (LMR-HMR) avec résolution de l'écoulement proche paroi (WR) et avec loi de paroi (WM). La Phase 1 a établi une base de référence pour la prédiction de la résistance à l'aide de simulations RANS stationnaires sur des maillages WM-LMR générés sous OpenFOAM et des maillages WR-HMR développés avec Cadence Fidelity. La Phase 2 a étendu l'analyse par des simulations RANS avec résolution de l'écoulement proche paroi afin d'évaluer les modèles de turbulence, la représentativité de la couche limite, les dimensions du domaine numérique, les effets des appendices et l'influence de la densité de l'eau de mer. La Phase 3 a ensuite fait évoluer la méthodologie vers des simulations transitoires résolues en échelles (SRS), utilisant des modèles hybrides RANS-LES et WALE sur des maillages WM-HMR paramétrés et guidés par la micro-échelle de Taylor. La convergence de maillage et la robustesse numérique ont été validées par comparaison avec les références DARPA SUBOFF et OTAN AVT-301, avec des écarts sur la résistance inférieure à 5 % sur PC et réduits à 0,3 % sur systèmes HPC.

Les résultats indiquent que les configurations LMR-PC sont adaptées aux analyses hydrodynamiques préliminaires, tandis que les configurations HMR-HPC sont indispensables pour atteindre une haute précision dans des analyses complexes et industrielles. Les simulations SRS en HMR ont permis de capturer la dynamique du sillage, les structures tourbillonnaires, la décroissance de l'énergie turbulente selon la loi de Kolmogorov en puissance $-5/3$ et le bruit hydrodynamique en champ proche, tandis qu'une décroissance prématurée a été observée pour les cas LMR déclenchés et le modèle DES $k-\omega$ SST. Pour la condition en dérive pure de 10° , les tourbillons principaux ont été correctement reproduits conformément aux observations expérimentales et aux résultats LES WR-HMR de la littérature. Les champs de pression instationnaires résolus ont permis une analyse du bruit hydrodynamique local, révélant un rayonnement acoustique asymétrique dominé par des dipôles lors de la remontée d'urgence et fournissant une base validée pour la prédiction acoustique en champ lointain par la formulation FW-H. Parmi les modèles évalués, l'IDDES-SA a montré les performances les plus équilibrées et physiquement cohérentes sur l'ensemble des conditions étudiées. Globalement, ce travail propose un processus de calcul CFD évolutif reliant simulations stationnaires et résolues en échelles, conciliant précision, coût de calcul et représentativité physique pour les applications sous-marines.

Title: High-Fidelity CFD Analysis of Submarine Hydrodynamics and Near-Field Flow Characteristics Using Various Turbulence Models and Operating Conditions

Keywords : BB2 Submarine, Numerical Hydrodynamic, RANS, hybrid RANS-LES, WALE, Flow Characteristics

Abstract: This thesis develops a systematic high-fidelity Computational Fluid Dynamics (CFD) framework for submarine hydrodynamic and hydroacoustic analysis through three phases of increasing numerical and physical complexity. Simulations were conducted on a 1:35.1 scaled SSK-class BB2 submarine at Reynolds numbers of 3.6×10^6 under straight-ahead, tripped and 10° yaw, and 0.16×10^6 for emergency surfacing lifting, considering low to high-mesh resolution (LMR-HMR) strategies with wall-resolved (WR) and wall-modelled (WM) approaches. Phase 1 established a baseline for resistance prediction using steady RANS simulations on WM-LMR meshes in OpenFOAM and WR-HMR meshes in Cadence Fidelity. Phase 2 extended the analysis through WR RANS to assess turbulence closures, boundary-layer fidelity, domain scaling, appendage effects, and seawater density. While Phase 3 advanced the methodology to transient scale-resolving simulations (SRS) using hybrid RANS-LES and WALE models on parameterized WM-HMR guided by the Taylor microscale. Mesh convergence and robustness were validated against DARPA SUBOFF and NATO AVT-301 benchmarks, yielding resistance errors below 5% on PCs and 0.3% on HPC systems. The results indicate that LMR-PC setups are suitable for preliminary hydrodynamic analyses, whereas HMR-HPC configurations are essential for achieving high accuracy in complex and industrial applications.

Subsequently, the parameterized HMR SRS able to capture wake dynamics, vortical structures, the decay of TKE following Kolmogorov's $-5/3$ power law, and near-field hydrodynamic noise. However, early decay observed in LMR tripped and DES $k-\omega$ SST. While HMR simulations resolved higher turbulence levels and stronger wake energy content. For the 10° yaw condition, key vortices were accurately reproduced with respect to experiments and WR HMR LES (prior study). Resolved unsteady pressure fields enabled local hydrodynamic noise analysis, revealing asymmetric dipole-dominated radiation during emergency surfacing and providing a validated basis for FW-H far-field noise prediction. IDDES SA provided the most balanced and physically consistent performance across conditions. These findings highlight, proper mesh refinement and turbulence modelling are essential for SRS to ensure accurate hydrodynamic, near-field flow, and local noise predictions, providing a reliable basis for FW-H far-field acoustic analysis. Overall, this work delivers a scalable CFD workflow bridging steady and scale-resolving simulations for submarine applications.