

Autopropulsion des bâtiments de surface - Intégration de la CFD dans le processus de conception

Romain HURET, Florent SAINCLAIR

Naval Group – Hydrodynamics team – Lorient (France)

Vincent TISSOT, Camille YVIN

Sirehna – Modelling and Simulation in Hydrodynamics – Bouguenais (France)

SOMMAIRE

L'optimisation du rendement propulsif est un objectif majeur parmi l'ensemble des performances des navires, car il a un impact direct sur la vitesse maximale et la consommation. Ce sujet se situe à l'interface entre les métiers de la propulsion, l'architecture navale et l'hydrodynamique. Le responsable de la propulsion est en charge de la chaîne cinématique, du moteur à l'hélice. L'architecte intègre le système propulsif dans les grands bilans du navire : masse, stabilité et emménagement. Le responsable hydrodynamique prend en compte les contraintes de propulsion, architecturales et opérationnelles pour définir les formes de carène et le propulseur permettant d'optimiser la résistance et le rendement du propulseur.

L'intégration des méthodes de calculs d'écoulements CFD (Computational Fluid Dynamics) dans le processus d'études des performances propulsives est un effort continu depuis des décennies. Les résultats des méthodes numériques ont été affinés en déroulant un processus de validation basé sur la confrontation à des essais expérimentaux et des essais à la mer. Cette démarche permet d'aboutir à un outil robuste qui permet une bonne évaluation des performances propulsives avant la construction et la mise à flot des navires.

Cet article décrit les étapes de conception et de vérification des performances propulsives. L'accent est mis sur l'utilisation des méthodes CFD, afin de présenter leur niveau d'avancement et comment elles peuvent être intégrées dans le processus afin de permettre une meilleure intégration du système et de meilleures performances propulsives des navires.

SUMMARY

SHIP PROPULSION: INTEGRATION OF CFD IN THE DESIGN PROCESS

Efficient propulsion is a major objective among the ship's overall performance, for it has a direct impact on maximum speed and fuel consumption. This field of ship design resides at the intersection of propulsion system design, naval architecture, and hydrodynamics. Propulsion specialists deal with the engine and its components all the way to the propeller. Naval architects integrate the propulsion systems into the propulsion and stability balances, and general arrangement. The hydrodynamics specialist designs the hull and propeller, aiming at minimizing resistance and enhancing efficiency with respect to architectural constraints.

The integration of Computational Fluid Dynamics (CFD) into the workflow of propulsive studies began more than 10 years ago. The numerical results have been updated through extensive research and development by validating simulations against empirical data obtained from model test and sea trials. This methodology provides a reliable tool with sufficient level of accuracy to estimate the propulsive performance before building and sea trials of the ship.

This article describes the steps involved in the design and verification of propulsion performance. Emphasis is placed on the use of CFD methods, to present their level of advancement and how they can be integrated into the process to enable better system integration and improved propulsive performance of ships.

1. INTÉGRATION DE LA CFD DANS LE PROCESSUS DE CONCEPTION

1.1. Les performances propulsives

Les performances propulsives des bâtiments de surface sont estimées dès la phase d'avant-projet et suivies tout du long de la conception jusqu'aux essais à la mer. Les implications des études de propulsions sur le projet sont :

- Vitesse maximale,
- Distance d'autonomie,
- Distance d'arrêt lors d'un crash stop,
- Capacité d'accélération,
- Capacité à se maintenir à un point géographique.

Dans ce contexte, les performances hydrodynamiques associées doivent être convenablement maîtrisées, et toute dérive au cours du projet doit être contenue.

Durant le processus de conception, les premières études hydrodynamiques sont réalisées pour contribuer directement au choix et au dimensionnement de la chaîne propulsive. Elles servent également à orienter le dessin des formes de carènes et du propulseur. En cours de projet, les études sont tenues à jour de l'évolution du navire pour attester en continu de l'atteignabilité des exigences. Enfin, lors de la livraison, les études hydrodynamiques servent à extrapoler les conditions d'essais vers les conditions contractuelles d'acceptation du navire.

1.2. Processus d'études des performances propulsives

1.2.1. Présentation générale

Le processus usuel régissant les études hydrodynamiques de performances propulsives commence par l'analyse des exigences exprimées au niveau du navire pour en extraire des objectifs de performances (V_{max} , autonomie ...) et des contraintes architecturales (volumes utiles, déplacement de la forme...). Les études se déroulent de la phase d'avant-projet jusqu'à l'acceptation du navire. Elle se décompose principalement en deux lots (voir Figure 1) :

- Etudes de dessins (coque et propulseur),
- Évaluations des performances propulsives du navire.

Les études de dessin des formes sont réalisées tout au long de la phase de conception pour prendre en compte les contraintes architecturales qui peuvent évoluer et les contraintes d'industrialisation et de productions spécifiques qui arrivent au fur et à mesure de la conception.

Les études de dessin du propulseur sont réalisées un nombre limité de fois dans le processus. Ce nombre varie en fonction du rang du navire et de son niveau d'exigence.

Les études d'évaluations des performances sont réalisées à deux niveaux différents. Lors de la phase de conception, elles sont mises à jour dès que nécessaire pour prendre en compte des évolutions de forme dont l'influence est jugée non négligeable, ou pourrait compromettre l'atteinte des performances (modification de la ligne d'arbre, réaménagement de la position des safrans...). Et en tâche de fond, des études plus complexes sont réalisées de façon incrémentale pour prendre de plus en plus de détails physiques (de la vitesse établie par mer calme au freinage sur houle...).

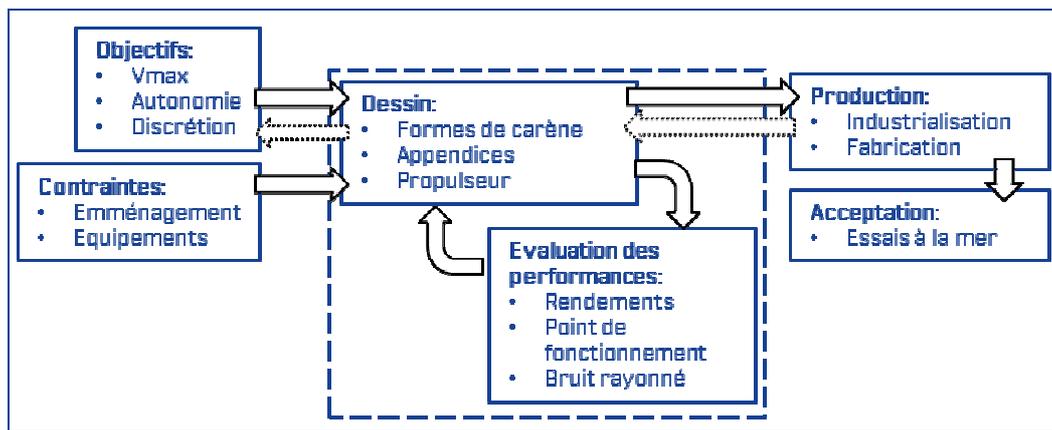


Figure 1 : Processus d'études hydrodynamiques de performances propulsives

Pour que ce processus d'études hydrodynamiques se déroule dans de bonnes conditions, les activités doivent être correctement intégrées dans le planning du projet et assurer ainsi la disponibilité des données d'entrée, des outils et des ressources humaines.

1.2.2. Intégration des outils dans le processus

Les outils sont sélectionnés et mis en œuvre en fonction de l'avancement du projet (avant-projet, phase de définition, phase de détails...) et donc du besoin en précision et réactivité.

En phase d'avant-projet, ce sont historiquement les méthodes analytiques et basées sur le REX qui sont privilégiées. Aujourd'hui, la CFD tend à être introduite de plus en plus dès le début, d'une part pour réduire les marges de conception le plus tôt possible et d'autre part car les phases de conception se raccourcissent de plus en plus du fait de la digitalisation de l'ensemble des activités.

En phases de définition et d'industrialisation, le budget disponible est plus élevé de même que le niveau de précision requis. Il est donc possible de recourir à des moyens plus avancés tel que la CFD mais aussi des essais sur maquettes.

En phase de production, l'ensemble des études a déjà été mené une fois, et seules des évolutions mineures sont à analyser. Les résultats sont mis à jour en utilisant des calculs CFD.

Enfin, lors de la livraison, des essais à la mer sont réalisés pour valider les performances du navire construit. Cependant, ces essais sont réalisés dans l'état courant du navire (avec un certain niveau de finition non connu à l'avance) et dans des conditions de mer dépendant du jour de l'essai. Cette configuration est rarement celle spécifiée dans le contrat, et des corrections établies à partir du corpus d'études générées sur le programme doivent être appliquées.

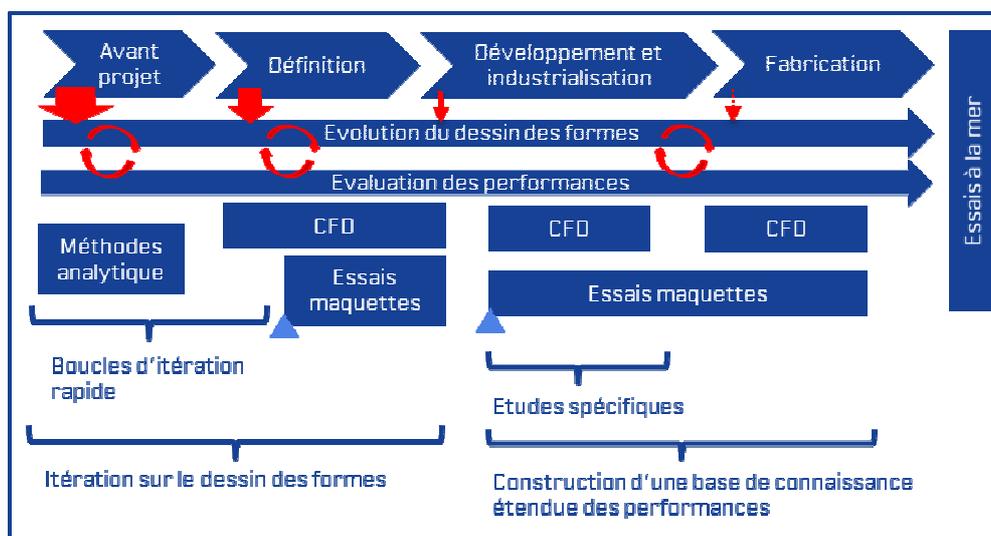


Figure 4 : Etapes de mise en œuvre de la CFD dans le processus standard de développement

1.3. Outils de références pour l'évaluation des performances propulsives

Le processus d'études hydrodynamiques des performances propulsives fait appel à différents outils dont la complexité évolue en fonction de l'avancement projet et du niveau de précision recherché.

1.3.1. Outils préliminaires

En phase d'avant-projet, les outils sont utilisés pour définir la classe des performances atteignables par le navire. Ces outils doivent pouvoir être mis en œuvre de façon simple avec des données parfois parcellaires. En contrepartie, ces outils sont relativement peu précis. Les deux grandes classes d'outils sont les suivantes :

- Formules analytiques (comme par exemple [5] et [6]) correspondant à des régressions de modèles basées sur des données plus ou moins étoffées jusqu'à des séries systématiques (comme par exemple [7] et [8]) ;
- Retour d'expérience de projets précédemment réalisés par Naval Group.

1.3.2. Essais sur des maquettes

Les outils historiques de l'hydrodynamique navale sont les essais sur des maquettes des navires de l'ordre de 8 à 10 m de long. Ces maquettes sont opérées dans des bassins d'essais et/ou tunnels hydrodynamiques spécialisés permettant de réaliser diverses mesures dans différentes conditions d'environnement :

- Caractérisation du propulseur en eau libre,
- Résistance et autopropulsion par mer calme (Figure 2),
- Résistance ajoutée dans la houle,
- Ventilation et thrust-breakdown,
- Cavitation et bruit rayonné du propulseur,
- Pression fluctuante sur la route.

A l'échelle d'une maquette, l'ensemble des grandeurs principales du problème ne peuvent pas être simultanément en similitude du réel. Les essais ne peuvent donc pas être entièrement représentatifs de l'échelle réelle. Ils nécessitent donc une attention particulière dans leur réalisation mais aussi des connaissances avancées dans la compréhension des phénomènes physiques de sorte à pouvoir identifier les limitations liées aux effets d'échelle et à extrapoler les résultats à l'échelle réelle [9], [10].

Ces essais sont généralement longs et coûteux, car ils nécessitent de concevoir et fabriquer des maquettes de hautes précisions. De plus, ils nécessitent des moyens matériels (capteurs et bassins) et humains spécialisés. Par contre, une fois construites, l'utilisation des maquettes permet d'accéder à des valeurs précises et encore difficilement accessibles par calculs (performances sur houle, signatures...).

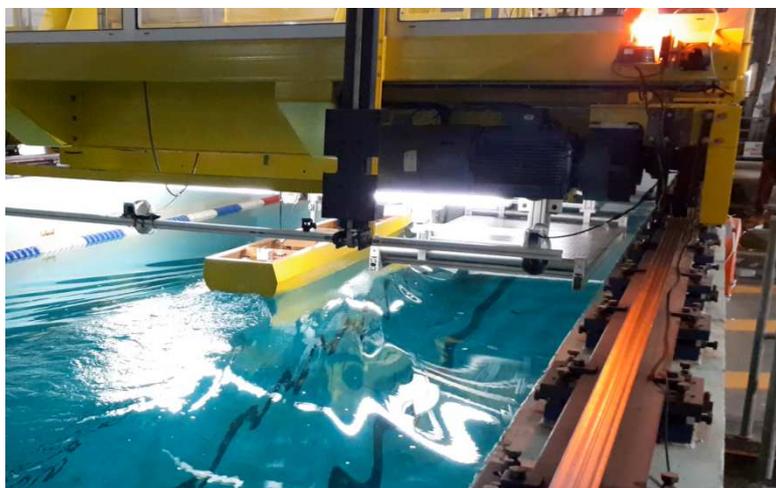


Figure 2 : Essais d'autopropulsion dans le bassin de l'ECN

1.3.3. Méthodes de calcul numérique

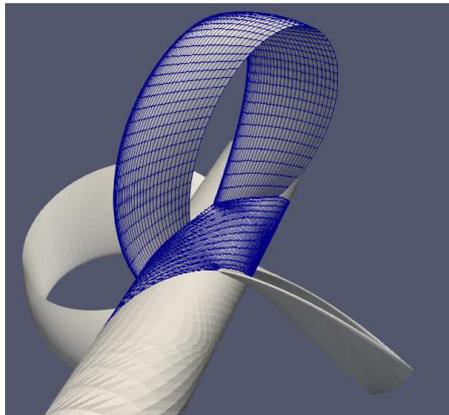
Depuis quelques décennies, les outils numériques sont en plein essor et en perpétuelle évolution du fait de l'évolution en parallèle des moyens et des capacités de calculs. Naval Group, via sa filiale Sirehna, s'est doté d'un « bassin numérique » permettant de reproduire par calculs les résultats obtenus lors d'essais physiques. Les simulations ont d'abord été réalisées au modèle pour être confrontées aux essais sur maquette. Puis dans un second temps, les calculs ont été réalisés à l'échelle réelle et comparés aux essais à la mer. La mise en œuvre de ces méthodes est significativement moins coûteuse et plus rapide à réaliser que des essais. Ces méthodes nécessitent cependant des moyens importants au niveau matériel (cluster de calculs) mais aussi des ressources humaines spécialisées en calculs numériques et en hydrodynamique.

Il existe différentes formulations mathématiques implémentées dans les codes de calculs et utilisables suivant les phases du projet.

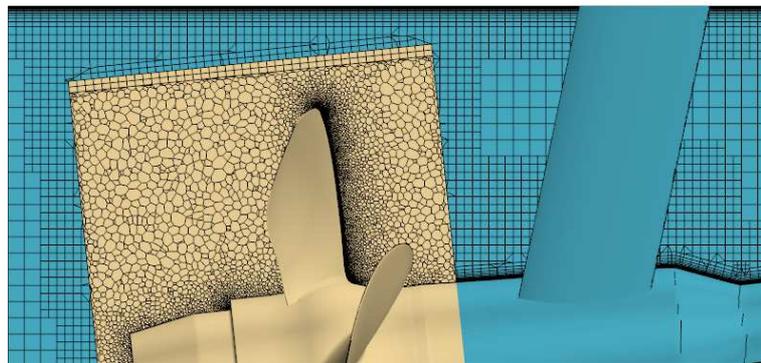
1.3.3.1. Formulation potentiel (code BEM)

La formulation potentiel fait l'hypothèse que le fluide entourant le navire et/ou le propulseur est incompressible et non visqueux.

L'avantage de cette formulation est qu'elle permet de calculer l'écoulement en se limitant à la connaissance de ce qui se passe sur les surfaces solides et si besoin la surface libre ou les nappes de sillage derrière les bords de fuite. Elles sont donc relativement simples à mettre en œuvre et tournent en quelques minutes sur des machines standard. En prenant soin de respecter les diverses limitations de ces formulations, les outils qui les implémentent sont parfaitement adaptés pour réaliser des premières analyses d'optimisation des formes de carène et de propulseur.



Maillage surfacique d'un propulseur utilisé dans un code BEM



Maillage fluide autour d'un propulseur et bras de chaise pour résolution RANS

Figure 3 : Vues des maillages utilisés pour les formulations BEM (gauche) et RANS (droite)

1.3.3.2. Formulation RANS (code CFD)

La formulation Reynolds Averaged Navier-Stokes (RANS) permet de prendre en compte le caractère visqueux et turbulent de l'écoulement. A la différence de la formulation potentiel, l'écoulement est calculé en une multitude de points de contrôle entourant la carène et le propulseur. Par contre, cette formulation permet de lever énormément de limitations et de restrictions de la formulation potentiel. La contrepartie est le temps et les moyens de calculs qui augmentent significativement (de l'ordre de l'heure sur un cluster de calcul). Cette solution est aujourd'hui la solution de référence utilisée par Naval Group et la plupart des industriels du domaine. L'ensemble des études de performances propulsives actuellement réalisées en essais a été reproduit dans le bassin numérique de Naval Group à l'aide d'outils numériques basés sur la formulation RANS.

1.3.3.3. Formulations DES/LES (code CFD)

Pour certaines activités, la formulation RANS atteint ses limites et doit être remplacée par des formulations plus avancées, permettant de calculer plus en détail les phénomènes turbulents. Naval Group mène différentes études de R&D pour évaluer la pertinence des formulations Detached Eddy Simulation (DES) et Large Eddy Simulation (LES) dans ses activités, en particulier sur ce qui touche à la discrétion des navires. Cependant, les calculs DES et LES sont beaucoup plus complexes à mettre en œuvre que les solutions RANS et conduisent à des coûts de calcul nettement supérieurs. Leur usage est donc limité à des besoins spécifiques.

2. LES MÉTHODES CFD POUR LE CALCUL DES PERFORMANCES PROPULSIVES

2.1. Généralités

L'objectif du « bassin numérique » est de mettre en place et d'automatiser des procédés de calculs de performances propulsives afin d'avoir un processus reproductible, simple et qualifié à mettre en œuvre. Ces procédés sont bâtis sur des logiciels généralistes, dans lesquels est implémenté un ensemble d'algorithmes et d'équations permettant de traiter une très large gamme de problèmes multi-physiques. Le travail de Naval Group consiste en premier lieu à choisir les modèles adéquats, et à ajouter les étapes de mise en donnée (avec un maillage adapté...), de pilotage du calcul (avec résolution du principe fondamental de la dynamique...), d'analyse et de post-traitement des résultats pour construire des procédés de calculs permettant d'évaluer les diverses performances des navires. Puis dans un second temps, le travail consiste à valider chacun des procédés mis en place en confrontant leurs résultats avec ceux d'études de référence. In fine, cela permet de disposer d'un panel d'outils fiables dédiés chacun à des activités bien définies.

La première étape du développement des procédés consiste à déterminer les paramètres numériques des calculs (schémas d'intégration, pas de temps, bonnes pratiques de maillages, stratégie de gestion des mouvements...) et à mettre en place les post-traitements nécessaires aux études.

La seconde étape du développement consiste à évaluer le procédé sur différents cas-tests afin de s'assurer de la robustesse de la mise en donnée et d'affiner l'automatisation du procédé. En parallèle, les résultats sont confrontés à des données de référence afin de statuer sur la validité du processus et de maîtriser les incertitudes associées.

La première étape du développement est détaillée ci-dessous. Puis les procédés mis en place pour les études de performances propulsives sont listés. Enfin, un exemple de cas de validation est présenté au chapitre suivant.

2.2. Mise en données des calculs

La mise en donnée des calculs CFD consiste en deux étapes distinctes mais interdépendantes. Elles sont présentées dans les paragraphes suivants.

2.2.1. Domaine de calculs et maillages

Afin d'utiliser les formes de carène et de propulseur dans les calculs, il faut d'abord définir les domaines de calculs, c'est à dire la dimension des zones dans lesquelles va être évalué l'écoulement.

Il faut ensuite réaliser un maillage de l'ensemble des domaine fluide (air et eau) entourant le navire et/ou son propulseur. La taille des mailles et leur disposition sont choisies en fonction de la physique des écoulements à modéliser. La connaissance de l'écoulement final étant un prérequis à la génération d'un bon maillage, il est nécessaire d'itérer afin d'obtenir le meilleur compromis entre le nombre de cellules et la précision des résultats. L'effet du maillage est illustré sur la Figure 5.

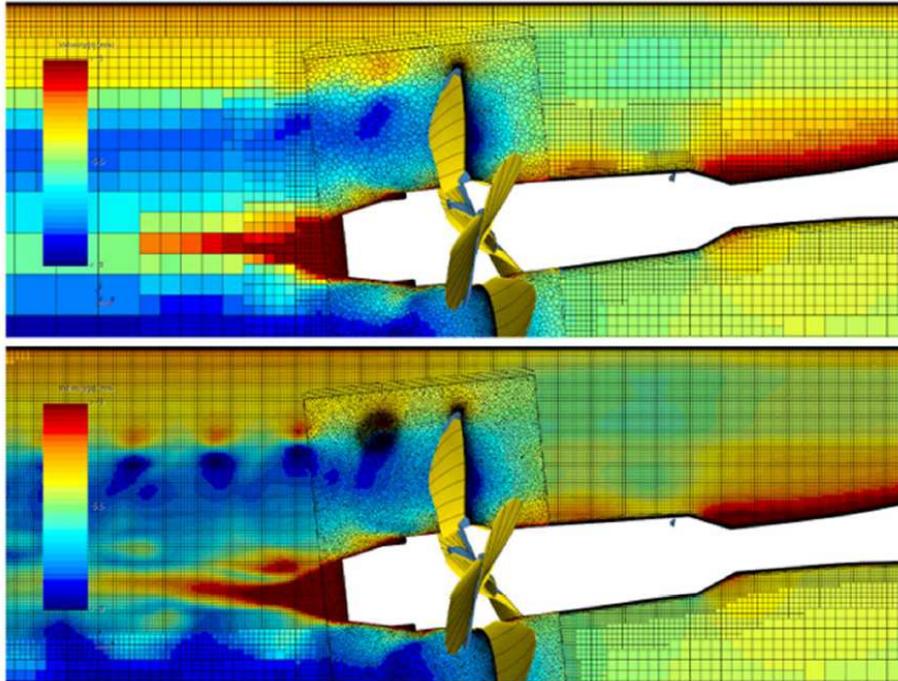


Figure 5 : Mise en évidence de l'influence du maillage sur l'écoulement

Certains solveurs et écoulements physiques ont des spécificités qui impliquent d'utiliser des types de maillage spécifiques et de privilégier certaines stratégies de maillage. On peut citer entre autres :

- Tailles et formes des mailles dans la couche limite,
- Raffinement anisotrope autour de la surface libre pour maximiser l'effet de discontinuité au passage du dioptré,
- Expansion des mailles vers l'extérieur du domaine pour favoriser la dissipation numérique et éviter les réflexions sur les parois du domaine,
- Positionnement des zones de raffinements/dé-raffinement pour éviter des sauts de pressions dans des zones d'intérêts.

2.2.2. Solveur fluide et dynamique

Comme mentionné précédemment, la majorité des procédés de calculs de performances propulsives mis en place à ce jour sont basés sur une approche RANS. C'est-à-dire que l'écoulement turbulent n'est pas calculé mais modélisé par les grandeurs physiques globales du modèle utilisé. En l'occurrence, le modèle de turbulence le plus utilisé dans le monde de l'hydrodynamique navale est le k-omega SST, où k représente l'énergie cinétique turbulente et omega représente le taux de dissipation spécifique. Cette grandeur est interchangeable avec la grandeur epsilon représentant le taux de dissipation de l'énergie cinétique turbulente. Parmi les limitations de ce modèle, on peut citer d'une part que le comportement turbulent, c'est-à-dire la modélisation des petites structures tourbillonnaires, est gérée de manière globale et que seul le comportement moyen transparait dans le résultat des calculs, et d'autre part que la turbulence est traitée de manière isotrope c'est-à-dire que la turbulence telle que modélisée n'a pas de direction privilégiée et que les variations de turbulence sont les mêmes selon toutes les directions de l'espace.

Les autres spécificités du solveur utilisé dans les procédés sont listées ci-dessous.

Les équations sont résolues par la méthode des volumes finis. La pression et la vitesse sont évaluées par l'application d'un algorithme de type SIMPLE. Cet algorithme permet de calculer successivement la vitesse et la pression puis les autres grandeurs (fraction de volume, grandeur turbulentes, ...).

La surface libre est modélisée par une approche dite de fraction de volume VoF (Volume of Fluid), c'est-à-dire qu'en chaque cellule on attribue un taux de présence d'air et d'eau (et éventuellement d'un autre fluide) pouvant prendre des valeurs entre 0 (absence) et 1 (présence exclusive du fluide). Localement, le fluide modélisé a donc des caractéristiques (densité, viscosité) correspondant à un dosage spécifique des différents fluides présents dans le calcul. A l'interface air/eau en particulier, les taux de présence ne peuvent pas être strictement à 0 ou 1. L'interface est donc diffuse. Pour limiter cette diffusion, un choix de maillage et de schéma spécifique est réalisé afin de limiter cette zone de diffusion à 1 ou 2 mailles et rendre l'interface la plus discontinue possible.

Pour les configurations par mer calme, les mouvements d'ensemble du navire (enfoncement et assiette) sont gérés par une approche quasi-statique de recherche d'équilibre, et une méthode de déformation du maillage.

La méthode quasi-statique permet de limiter à quelques itérations le nombre de mises en position du navire et permet donc un gain de temps significatif par rapport à une approche où les déplacements seraient résolus à chaque pas de temps. En pratique, cette stratégie est valide lorsque l'attitude dynamique finale du navire est stationnaire.

L'approche par déformation de maillage consiste à appliquer un déplacement solide aux points sur la surface du navire et du propulseur et à propager ces mouvements dans le maillage jusqu'aux frontières du domaine où les points du maillage restent fixes. Cette méthode est la plus ancienne employée dans les codes CFD, elle est de plus en plus remplacée par une approche par maillages superposés (Chimère) qui a l'avantage de permettre des mouvements très amples (cas d'un navire dans la houle) sans risquer de détériorer la qualité du maillage lors de la déformation des mailles. En contrepartie, des interpolations sont réalisées aux interfaces entre les domaines, ce qui peut conduire à des ralentissements ou des erreurs numériques plus ou moins importantes notamment quand plusieurs domaines sont imbriqués.

Lorsque le propulseur est incorporé au calcul CFD, il est isolé dans un domaine cylindrique en mouvement relatif par rapport au navire. Des interfaces glissantes sont utilisées sur les frontières du domaine cylindrique. Avec cette stratégie, le choix des pas de temps est contraint par la taille des mailles en périphérie du cylindre et par la vitesse de rotation du propulseur. Différentes techniques sont utilisées pour accélérer la convergence en début de calcul, notamment en l'utilisation du MRF (Moving Reference Frame).

2.3. Procédés de calculs des performances propulsives

Les procédés de calculs mis en place pour les calculs des performances propulsives sont présentés ci-dessous. Ils sont mis à jour et suivis en configuration de manière continue, avec l'objectif de communaliser le maximum de bonnes pratiques entre les différents procédés.

2.3.1. Résistance à l'avancement par mer calme

La première grandeur d'intérêt pour les performances propulsives est la résistance à l'avancement du navire [1], carène nue et avec appendices.

Le calcul réalisé ici est connu et bien maîtrisé par l'ensemble des acteurs du secteur naval. Ce procédé sert de base pour la mise en place de procédés plus complexes. L'objectif est d'évaluer les efforts sur le navire lorsque celui-ci avance à vitesse constante par rapport à la surface. Les seuls mouvements du navire qui peuvent être pris en compte sont l'enfoncement et l'assiette ; ils sont résolus itérativement jusqu'à atteindre un état stationnaire à la fin du calcul (figure 6).

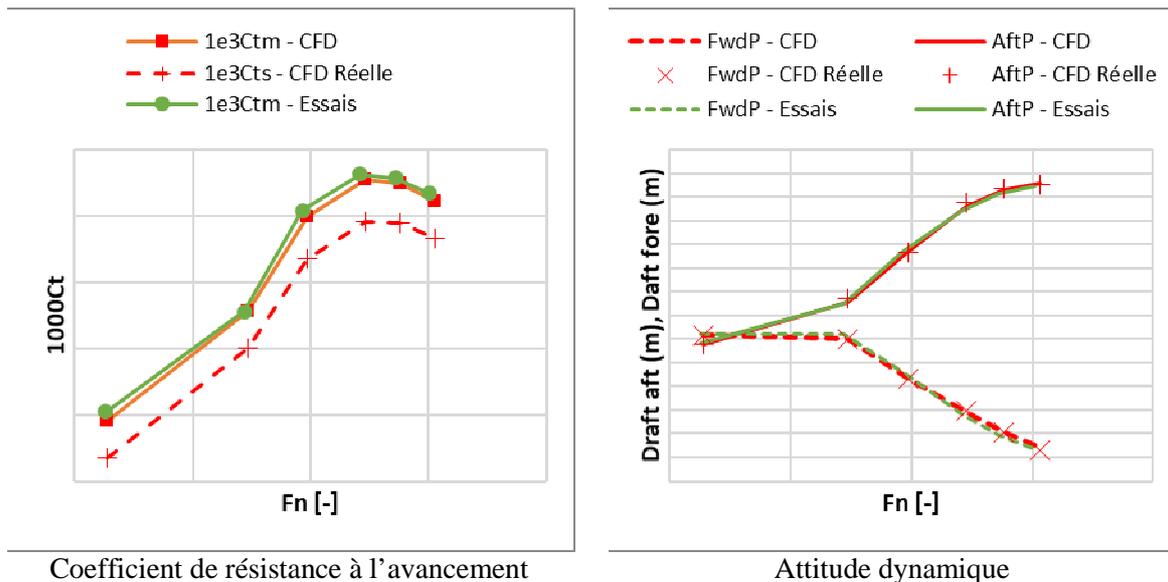


Figure 6 : Résultats principaux du procédé de calcul de résistance à l'avancement

Le navire est considéré comme une surface solide non glissante, sur laquelle on peut choisir d'appliquer de la rugosité pour rendre compte de l'aspect réel de la coque. En fonction de l'échelle du navire, on choisit de résoudre l'écoulement en proche paroi ou de le modéliser via l'utilisation de lois de parois qui permettent de réduire significativement le nombre de mailles.

L'écoulement (air et eau) est évalué dans un parallélépipède rectangle englobant le navire. Des conditions aux limites sont imposées sur chaque face de ce domaine. Ces frontières sont situées suffisamment loin du navire pour que les perturbations de l'écoulement, dus à la présence du navire, ne soient pas propagées jusqu'à elles. En particulier un traitement particulier du champ de vague doit être réalisé pour éviter qu'il ne se réfléchisse sur les bords du domaine de calcul et perturbe le résultat.

En complément de l'extraction des efforts et de la mise en position du navire, le calcul permet de visualiser différentes grandeurs dans l'écoulement (élévation de surface libre, tourbillon...) et sur la coque (champs de pression, frottement) (figure 7). L'analyse de ces grandeurs permet d'obtenir des indications pour définir au mieux la géométrie de la coque et l'orientation des appendices.

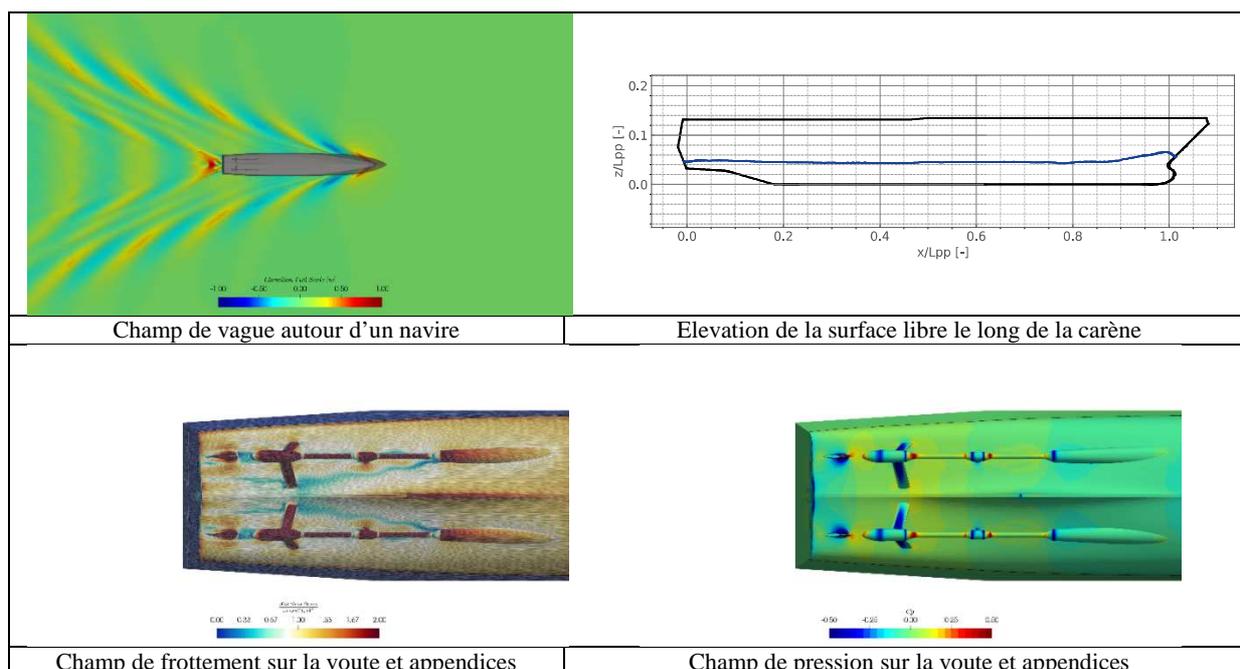


Figure 7 : Exemple de post-traitement permettant d'analyser l'écoulement

2.3.2. Autopropulsion par mer calme

Les grandeurs principales d'intérêt sont la vitesse de rotation du propulseur et sa puissance consommée pour différentes vitesses d'avance. Pour obtenir ces grandeurs, il faut trouver la vitesse de rotation permettant d'équilibrer la poussée du propulseur et la trainée du navire. La puissance est alors une résultante du calcul. L'approche utilisée à Naval Group est similaire à la procédure d'essais en bassin sur maquette, et consiste à réaliser des calculs successifs à différentes vitesses de rotation afin de tracer les courbes propulsives de l'hélice derrière la carène pour une vitesse d'avance donnée, puis de déterminer la vitesse de rotation, par interpolation des courbes propulsives avec celles de la résistance du navire.

Un exemple de résultat et comparaison entre la CFD et essais est présenté sur la Figure 8. La résistance est représentée par le coefficient K_r , et les caractéristiques propulsives sont représentées par les coefficients (K_t , K_q et K_v). Le point de fonctionnement est obtenu à l'intersection entre les courbes K_r et K_v .

Il existe d'autres méthodes pour trouver le point d'autopropulsion mais celle-ci à l'avantage de pouvoir être utilisée avec les deux stratégies de modélisation mises en place par Naval Group et présentées ci-après :

1. Modélisation du propulseur en dehors du calcul CFD, couplage RANS/BEM [3], présentée au paragraphe 2.3.2.1 ;
2. Modélisation directe du propulseur dans le calcul CFD, présentée au paragraphe 2.3.2.2.

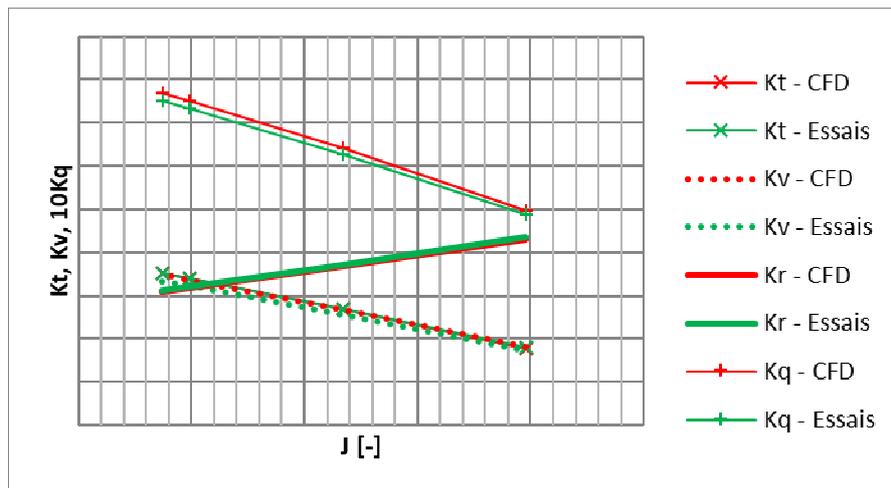


Figure 8 : Courbes propulsives derrière la carène

2.3.2.1. Résolution du propulseur externalisé – RANS/BEM

La première méthode implémentée par Naval Group pour le calcul de l'autopropulsion [3] est un couplage entre un code CFD, permettant de modéliser l'écoulement autour de la carène, et un code BEM permettant de déterminer la poussée et le couple de l'hélice. Le couplage se fait en utilisant le sillage issu de la CFD en entrée du code BEM et en retour en injectant un champ de force définie à partir du champ de pression calculé sur les pales par le code BEM ce qui a pour effet de modifier localement l'écoulement dans la zone du propulseur.

Cette méthode a pour avantage de ne pas nécessiter de mailler l'hélice en CFD (ce qui peut rapidement représenter 1/3 de la quantité de mailles). Le deuxième avantage est que le pas de temps utilisé en CFD est seulement contraint par l'écoulement autour de la carène, ce qui est moins contraignant qu'un pas de temps basé sur la rotation du propulseur. Le coût du calcul de cette méthode est donc relativement faible, mais entraîne une augmentation significative du temps opérateur pour vérifier la bonne mise en données des éléments du couplage.

Cette méthode est donc avantageuse en cas de moyens de calcul limités mais perd de son intérêt en termes de temps opérateur.

2.3.2.2. Résolution du propulseur intégré dans la CFD

La méthode utilisée actuellement est d'intégrer le propulseur dans le modèle CFD. Pour cela, le domaine fluide est divisé en deux zones imbriquées l'une dans l'autre. Une zone cylindrique locale est placée autour du propulseur et est elle-même incluse dans un volume plus grand incluant le navire et la surface libre. Ce domaine extérieur est le même que celui mis en place pour les calculs de résistance à l'avancement. Une interface glissante permet de traiter le transfert de données entre la zone tournante du propulseur et la zone fixe englobante.

Les deux procédés de calcul d'autopropulsion (RANS/BEM et tout CFD) permettent, in fine, pour des coûts et des précisions différentes, d'accéder aux mêmes données : les efforts sur la carène et l'attitude du navire d'une part, les efforts sur le propulseur d'autre part. Ces deux procédés permettent également d'obtenir le champ de pression sur le propulseur. Or, sur une hélice marine, au-delà d'une certaine vitesse la pression peut devenir tellement faible que l'eau se vaporise : il s'agit du phénomène de cavitation.

Dans un premier temps, l'analyse du champ de pression sur les pales permet d'identifier s'il y a un risque de cavitation sans avoir à la modéliser dans le calcul. Dans un second temps, si le risque est avéré, alors il faut réaliser des calculs avec un nouveau procédé permettant de modéliser le phénomène de cavitation.

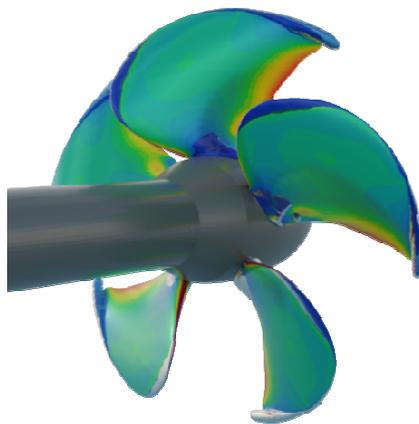


Figure 9 : Champ de pression et iso-contour de pression de vapeur saturante

2.3.3. Prise en compte du thrust-breakdown

Pour certains navires, il peut arriver qu'à vitesse maximale l'hélice perde en performance du fait d'un développement significatif de la cavitation sur les pales. Dans ce cas, il devient nécessaire de modéliser la cavitation dans le calcul. Pour cela, on réutilise le procédé de calcul d'autopropulsion avec le propulseur résolu en CFD, et on ajoute un modèle de cavitation qui fonctionne avec une approche de fraction de volume identique à celle déjà utilisée pour modéliser l'air et l'eau. Le modèle de cavitation introduit de nouvelles équations permettant de convertir une partie de la fraction d'eau liquide en une fraction d'eau gazeuse. Cela permet de prendre en compte numériquement le fait que la dépression à l'origine de la poussée est limitée par la pression de vapeur saturante, par conséquent, l'hélice ne pousse plus autant qu'en conditions nominales. Les courbes propulsives utilisées avec le procédé « normal » d'autopropulsion peuvent donc être mises à jour en prenant en compte davantage la physique des phénomènes concernés.

Sur la figure ci-dessous, on trace les courbes propulsives sans cavitation et avec cavitation. On constate qu'avec cavitation les courbes de poussée (traits pointillés) s'infléchissent. Ce qui est représentatif d'un déficit de poussée à une vitesse donnée. Et que le point de fonctionnement (intersection entre le trait plein et les autres courbes) se décale vers la gauche quand la cavitation est présente. Ce qui représente une augmentation de la vitesse de rotation à une vitesse navire donnée.

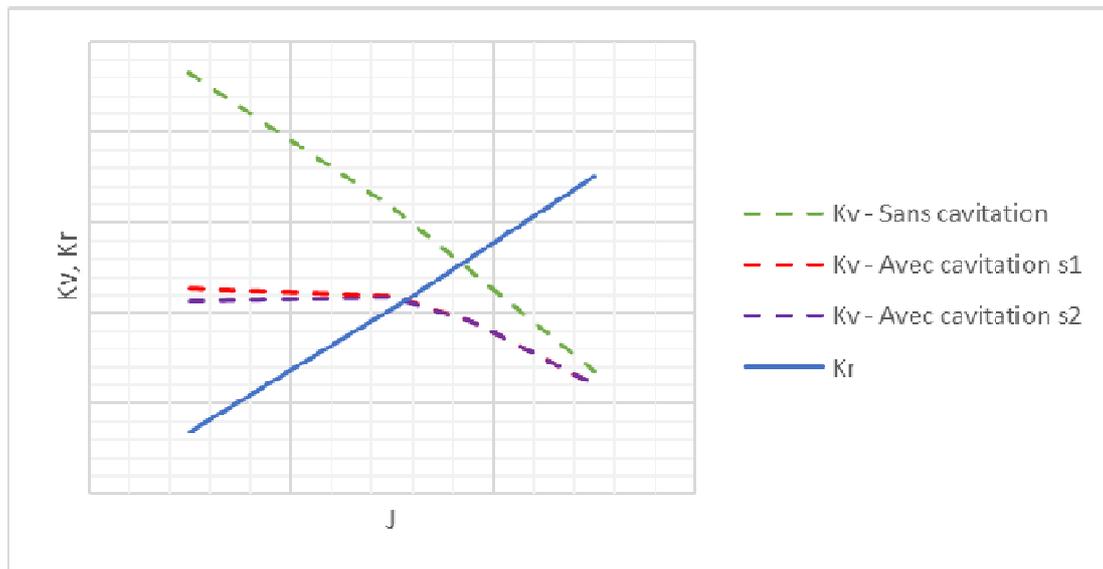


Figure 10 : Courbes propulsives derrière carène sans cavitation et en présence de thrust-breakdown

2.3.4. Evaluation des performances propulsives en eau libre

En complément des procédés de calculs derrière carène présentés précédemment, un procédé de calcul sur l'hélice isolée a été mis en place. Ce procédé couvre plusieurs thématiques classiquement traitées en essais sur maquette.

Pour ce procédé, l'hélice est isolée du navire et fonctionne dans un écoulement monophasique uniforme. Seule l'hélice et une partie du moyeu sont prises en compte. Pour simplifier la modélisation, la forme du domaine extérieur est un cylindre. Ainsi, l'ensemble du domaine peut tourner avec l'hélice ce qui permet, à l'inverse des calculs derrière carène, de se passer d'interface glissante et des difficultés numériques associées. La base de la modélisation est donc significativement plus simple que pour les calculs précédents.

L'usage initial de ce procédé est de générer les courbes propulsives en eau libre des hélices dans la configuration de fonctionnement normal d'une hélice. Cela permet de comparer simplement les performances de plusieurs hélices entre elles. Et en combinaison avec un calcul d'autopropulsion, cela permet d'identifier les coefficients d'interaction entre l'hélice et la carène. Par la suite ce procédé a été étendu pour être capable de simuler toutes les configurations d'écoulement autour de l'hélice. Ces configurations correspondent physiquement aux 4 possibilités d'orientation de la direction d'avance et de la poussée/trainée de l'hélice. L'objectif de ce procédé est de fournir des données d'entrée permettant de calculer les performances propulsives transitoires telles que les distances de freinage ou les durées des phases d'accélération.

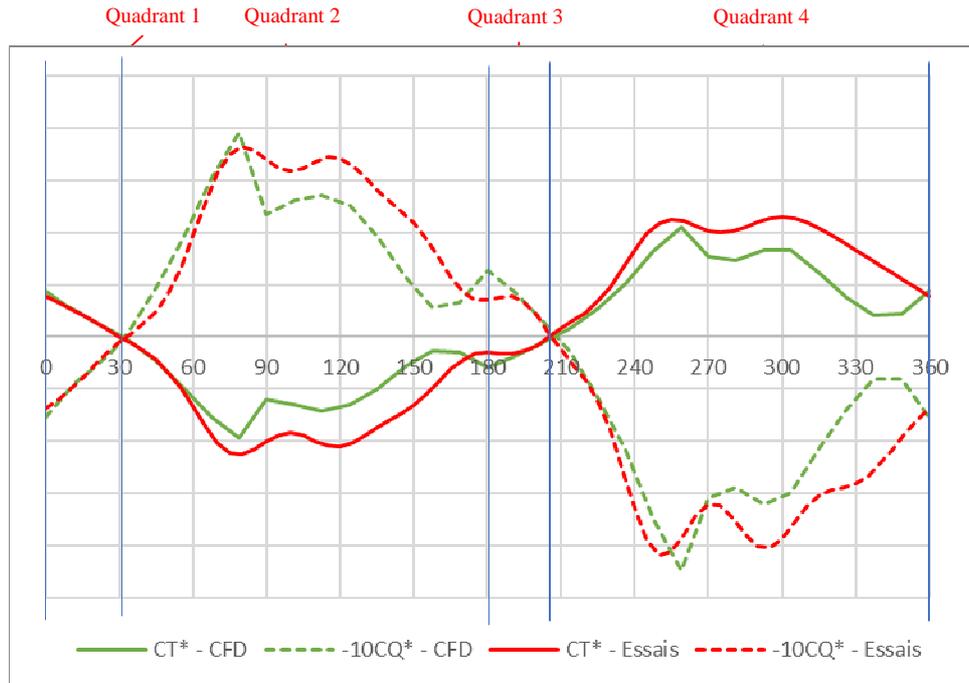


Figure 11 : Courbes propulsives en eau libre – 4 quadrants

On nomme 1^{er} quadrant la configuration dans laquelle la vitesse d'avance et la poussée sont toutes deux orientées vers l'avant. Le 2^{ème} quadrant correspond à la configuration où l'hélice freine alors que le navire va en marche avant. Le 3^{ème} correspond au cas où la vitesse et la poussée vont vers l'arrière. Et le 4^{ème} quadrant correspond à une configuration où l'hélice bat en avant tandis que le navire est en marche arrière. Au final, les configurations 1^{er} et 3^{ème} quadrant sont relativement simples à modéliser car la vitesse et la poussée travaillent dans le même sens. L'écoulement est plutôt stable et une situation stationnaire est rapidement obtenue. À l'inverse, les 2^{ème} et 4^{ème} quadrants correspondent à des configurations où la poussée de l'hélice va à l'encontre de l'écoulement. Ce qui conduit à modéliser des écoulements particulièrement complexes et fortement instationnaires avec de nombreuses recirculations.

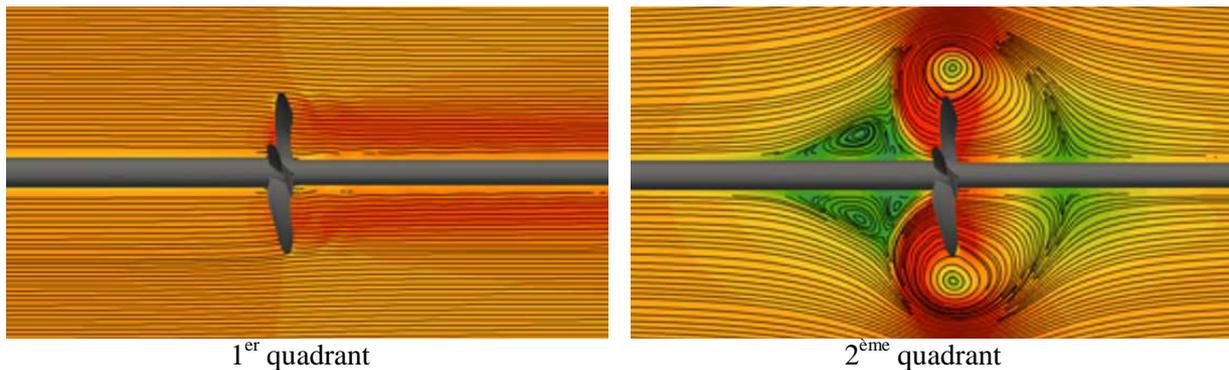


Figure 12 : Champ de pression et ligne de courant autour d'une hélice – 1^{er} et 2^{ème} quadrants

3. VALIDATION DE LA MÉTHODE DE CALCUL D'AUTOPROPULSION

3.1. Cas de validation

Les procédés de calculs des performances propulsives ont longtemps été utilisés par Naval Group pour réaliser des études comparatives de définition. Puis ils ont été utilisés dans le cadre de travaux internationaux de R&D (CRS, IRT Jules Vernes, Lloyd's Register Workshop...), et appliqués sur différents cas-tests partagés dans la communauté de l'hydrodynamique navale (DTMB, KCS, ONRT...). La comparaison des résultats des procédés avec les données de référence internationales et les données internes de Naval Group ont permis de maîtriser les incertitudes des outils sur une base de

données étendue. Cependant, la majorité de ces cas de référence correspondent à des données à l'échelle maquette, cela limite la portée de la validation des modèles numériques.

Pour aller plus loin dans la validation des procédés de calcul, des comparaisons entre des résultats de calculs et des essais à la mer sont réalisés sur des navires conçus et construits par Naval Group. Les grandeurs issues de ces essais mer sont, après dépouillement, la puissance et la vitesse de rotation des hélices pour une certaine vitesse d'avance à un déplacement donné et selon le cas un certain pas d'hélice.

3.2. Résultats

Les résultats présentés ci-dessous sont obtenus pour quatre formes de navire différentes. Pour chaque forme, plusieurs navires de la série ont été construits et essayés à la mer. Pour chaque navire, il est donc possible de consolider la valeur moyenne des données à la mer par un nombre de répétitions allant de 4 à 10.

Sur la Figure 13 suivante, on présente les écarts en puissance et en vitesse de rotation, entre la CFD et les essais mer, par rapport à la valeur moyenne issue des essais à la mer. Une valeur sous le zéro indique que la méthode sous-estime le résultat à la mer. A l'inverse, une valeur supérieure indique une surestimation du résultat. En deçà des lignes horizontales vertes, il est considéré que le résultat est totalement satisfaisant. Au-delà des lignes horizontales vertes et en deçà des lignes orange, le résultat est considéré acceptable mais pourrait être amélioré par des études complémentaires.

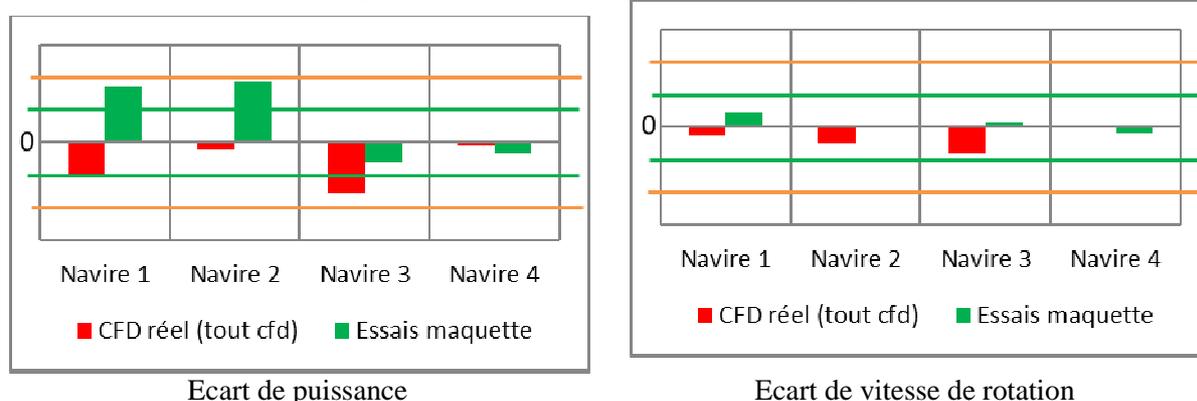


Figure 13 : Comparaison des calculs et des essais maquette avec les essais à la mer à Vmax

La comparaison des résultats de calculs et des résultats d'essais maquette avec les résultats d'essais à la mer permet de démontrer que les procédés de calculs donnent le même niveau d'incertitude que les essais maquette.

Actuellement, les travaux continuent avec pour objectif de compléter la base de connaissance avec des données d'autres navires et à d'autres vitesses d'avance, mais aussi d'étendre les procédés de calcul à d'autres activités telles que l'évaluation de l'apparition de cavitation ou l'évaluation des fluctuations de pressions sur la voute. Les résultats préliminaires, non encore présentés, permettent d'estimer que les investigations à venir vont devoir porter d'une part vers de nouvelles manières de modéliser la rugosité et d'autre part vers des modélisations plus fines de la turbulence.

4. CONCLUSION

Le processus d'étude hydrodynamique des performances propulsives est présenté. Les méthodes CFD prennent une part de plus en plus importante dans ce processus afin de gagner en réactivité et permettre d'approfondir les études de définition de la carène et de ses appendices.

Les différents sujets historiquement traités par des essais en bassin sont peu à peu intégrés dans un ensemble de procédés formant le « bassin numérique » de Naval Group. La plupart de ces procédés sont basés sur la résolution des équations RANS et font intervenir différents modèles pour traiter la surface libre, la turbulence ou encore la cavitation. Le développement de l'ensemble de ces procédés permet à Naval Group de dégager un certain nombre de bonnes pratiques sur la mise en place des maillages et l'utilisation des modèles numériques. Cela permet d'accélérer le processus de

développement de nouveaux procédés en profitant des briques existantes pour accéder à des résultats de plus en plus complexes.

Les procédés de calculs mis en place sont introduits au fur et à mesure de leur niveau de maturité dans le processus de conception des navires. Ils sont généralement d'abord utilisés pour réaliser des comparaisons entre différentes variantes d'un projet. Cela permet de gagner en maturité sur le procédé et d'affiner ses paramètres. Puis le procédé est validé autant que possible en confrontant les résultats de calculs avec des résultats d'essais des navires à la mer.

Aujourd'hui, la précision des calculs CFD d'autopropulsion réalisés par Naval Group rivalise avec celle des résultats d'essais sur maquette : ceci permet d'accroître la confiance que l'on peut avoir dans ces approches numériques et permet d'affiner la détermination des performances des navires au cours de différentes phases de conception.

5. RÉFÉRENCES

- [1] Y. Dautreleau, J.M. Laurens, L. Jodet – Résistance et propulsion du navire – Technosup – 2011
- [2] P.M. Guillouet, J. Raymond – Bassin numérique et modèle libre générique : DCNS fait évoluer son processus de conception hydrodynamique des sous-marins – ATMA – Paris – 2014
- [3] A. Sévère, R. Huret – Validation d'une méthode d'estimation rapide des performances propulsives des navires – ATMA – Paris – 2016
- [4] F. Pétillon, F. Dauce, A. Nédellec – Submarine maneuverability: integration of CFD in the design process – ATMA – Paris – 2018
- [5] J. Holtrop, G.G.J. Mennen – An approximate power prediction method – International Shipbuilding Progress, ISP, Volume 29, Nr 335 – 1982
- [6] S. C. Fung – Resistance and powering prediction for transom stern hull forms during early stage ship design – SNAME Transactions, Volume 99, pp. 29-84 – 1991
- [7] G. Kuiper, The Wageningen Propeller Series – MARIN Publication 92-001 – Wageningen, the Netherlands, 1992
- [8] J Huisman, E.J. Foeth, J Slot, A. Lampe, J. Moulijn, J. Dang – Design of the Wageningen F-series Propeller – SMP – 2022
- [9] 1978 ITTC Performance Prediction Method – ITTC Recommended procedures – 7.5-02-03-01.4 – 1999
- [10] Grigson, C.W.B. – A planar friction algorithm and its use in analysing hull resistance – Trans RINA, pp 76–115 – 1999