

## Simulation numérique de l'écoulement autour de l'ensemble Stator-Hélice marine

Fadhila SADEG<sup>1</sup>, Djahida BOUCETTA<sup>2\*</sup>, Omar IMINE<sup>3</sup>

Département de Génie maritime, Faculté de Génie mécanique. Université des Sciences et de la Technologie d'Oran –Mohamed BOUDIAF, Oran, Algérie

\*auteur correspondant : djahida.boucetta@yahoo.fr

### Résumé

Afin d'améliorer les performances des bateaux de faible vitesse et nécessitant une forte poussée, une simulation numérique de l'écoulement autour d'un ensemble Stator-Hélice est effectuée à l'aide du code FLUENT 6.3. Il s'agit d'une étude visant à montrer l'avantage d'utiliser un stator couplé à une hélice marine à travers l'évaluation du rendement de propulsion. L'écoulement étant de nature turbulent, plusieurs modèles de turbulences RANS ont été testés d'abord dans le cas de l'écoulement autour de l'hélice isolée. Le deuxième test a consisté à étudier l'écoulement turbulent autour de l'ensemble Stator-Hélice en utilisant le modèle de turbulence K-  $\epsilon$  RNG . Il est à signaler que plusieurs variantes de l'ensemble Stator-Hélice ont été testées et les résultats obtenus confirment une légère augmentation de la poussée et du rendement pour cette configuration par rapport à l'hélice isolée.

**Mots Clés :** hélice marine, stator, turbulence, fluide incompressible, volume finis.

### Nomenclature

D	Diamètre de l'hélice	J	Coefficient d'avance
R	Rayon de l'hélice	n	Vitesse de rotation de l'hélice
Z	Nombre de pales	V <sub>a</sub>	Vitesse d'avance
KT	Coefficient de poussée	$\rho$	Masse volumique de l'eau
KQ	Coefficient de couple	R <sub>e</sub>	Nombre de Reynolds
$\eta$	Rendement de l'hélice	C <sub>p</sub>	Coefficient de pression

### 1. Introduction

La recherche des formes optimisées d'hélices marines fonctionnant dans des conditions sévères a donné naissance à des configurations permettant une amélioration des performances parmi lesquelles l'ensemble Stator-Hélice qui est une association de deux hélices ; l'une est immobile (stator placé en amont) et l'autre tourne en rotation (hélice). Le stator a un diamètre proche à celui de l'hélice et est monté solidairement avec la coque du navire.

Les méthodes de calculs permettant une bonne prédiction des performances des hélices font l'objet de plusieurs travaux scientifiques. C'est ainsi que Rhee shin Hyung [1] a effectué une simulation numérique autour d'une hélice marine en utilisant le code fluent version 6.1. Le

modèle de turbulence  $k-w$  a été choisi pour l'étude de l'écoulement turbulent en régime stationnaire. Une bonne concordance avec l'expérimental a été mis en évidence. H. Sheng et al. [2] ont procédé à une analyse numérique pour calculer les performances hydrodynamiques d'une hélice avec un gouvernail doté des ailes hydrodynamiques, ces dernières absorbent l'énergie de l'hélice et donnent une force de poussée en utilisant le code commercial Fluent. Dans le cadre du projet « OPTIPROPULSEUR » de chalutier économique [3], une simulation numérique en hydrodynamique a été effectuée pour la conception de propulseurs innovants, basés sur le concept de pompe-hélice (stator + rotor + tuyère), L'étude menée a montré que le gisement de gains possibles sur le rendement d'une hélice sous tuyère par ajout d'un simple stator pré-déviateur en amont de l'hélice. M.C.KIM, H.H. CHUN et Y.D.KANG [4] ont conçu un nouveau design d'une hélice menée d'un stator pour démontrer l'efficacité de ce système une étude expérimentale a été effectuée Les essais sur modèle avec la nouvelle géométrie montrent une augmentation de rendement.

Dans le présent travail, une étude des performances de l'ensemble stator-rotor est montrée. Cette investigation est purement numérique, elle est effectuée à l'aide des codes Gambit, pour le maillage, et Fluent pour le calcul de l'écoulement.

## 2. Formulation mathématique

Les équations régissant l'écoulement de l'eau autour de l'hélice sont obtenues à partir de :

la loi de conservation de la masse (continuité) ;

la loi de conservation de la quantité de mouvement ;

Ces lois sont exprimées sous forme d'équations a dérivées partielles

Équation de continuité :

$$\frac{\partial U_i}{\partial x_i} = 0 \tag{1}$$

Equation de quantité de mouvement :

$$\underbrace{\frac{\partial}{\partial x_j} (\rho U_j U_i)}_1 = - \underbrace{\frac{\partial P}{\partial x_i}}_2 + \underbrace{\frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j}}_3 + \underbrace{\rho g_i}_4 \tag{2}$$

Où

1- terme convectif; 2- effet de la pression (terme de source); 3- terme diffusif; 4- effet de la pesanteur (terme de source).

L'écoulement autour de l'hélice est réputé être turbulent. Dans ce cas les équations de NAVIER-STOKES sont moyennées dans le temps. Cette transformation leurs confèrent le nom d'équations de Reynolds. Cependant cette opération génère un nombre d'inconnus supérieur au nombre d'équations disponibles et les inconnues en plus sont les contraintes du tenseur de Reynolds à savoir  $-\overline{U_i U_j}$ . Le système est dans ce cas dit ouvert. Pour fermer ce système il existe beaucoup de modèles permettant d'exprimer les éléments de tenseur de Reynolds, parmi ces modèles: le modèle (k- $\omega$ ), modèle (k- $\epsilon$ ), le modèle des contraintes de Reynolds (appelé aussi RSM) et le modèle Spalart –Allmaras [5].

## 3. Procédures de résolution

Le premier but de ce travail, c'est le traitement par simulation numérique de l'écoulement tridimensionnel turbulent d'un fluide newtonien incompressible autour d'une hélice marine isolée. Ceci, en utilisant l'approche RANS et en testant plusieurs modèles de turbulence pour la bonne prédiction des caractéristiques hydrodynamiques de cette hélice. Le deuxième but, c'est d'ajouter un stator à cette hélice, placé en amont. Pour cela la même méthode de calcul sera adoptée et les résultats de cette simulation seront comparés à ceux de l'hélice isolée.

### 3.1 Géométrie de l'hélice et du stator

#### 3.1.1 L'hélice isolée

L'hélice testée est composée de cinq pales dont le diamètre est de 3.6 m. Il s'agit d'une hélice fabriquée au Japon qui porte le nom de son navire Seiun-maru. Les caractéristiques géométriques du modèle testé sont résumées dans le tableau ci-dessous.



Figure 1 : L'hélice Seiun-maru

Tableau 1 : Caractéristiques géométriques de l'hélice Seiun-maru

Nom de model	Seiun-maru
Nombre de pale	5
Diamètre [m]	0.400
Pas (constant)	0.950
Fraction surfacique	0.650
Skew [m]	0.183
Rake [deg.]	6.0

Le domaine de calcul a été créé pour seulement une seule pale en tenant compte de la condition de la périodicité. L'entrée est placée à une distance de 1.5D par rapport à la pale, la sortie à 3.5D et l'enveloppe cylindrique dans la direction radiale est fixée à 1.4D.

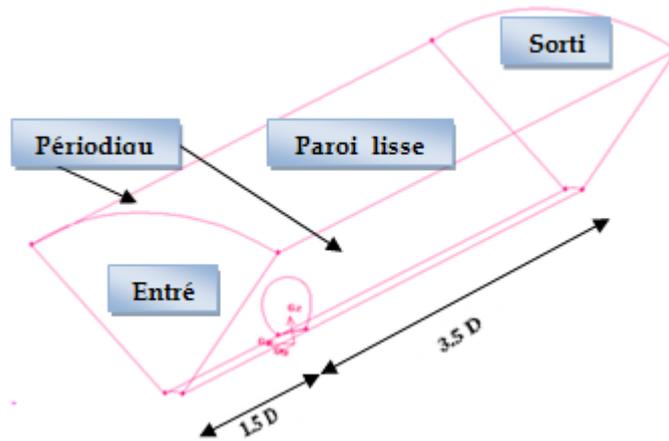


Figure 2 : Domaine de calcul pour l'hélice isolée

Le code Gambit a été utilisé pour le maillage du volume du domaine de calcul. Ainsi, le maillage de la pale a été créé avec des éléments triangulaires (figure 2) en utilisant la technique de 'Size Function'. Les régions proches de la racine du moyeu et du sommet de la pale sont maillées par de petits triangles de taille de 0.0028D, alors que la région du milieu est maillée par des triangles de taille 0.028D. Le maillage des faces et du domaine ont été obtenus en imposant un certain nombre de nœuds sur les lignes formant chaque surface. Après cela, le maillage du volume s'obtient aisément.

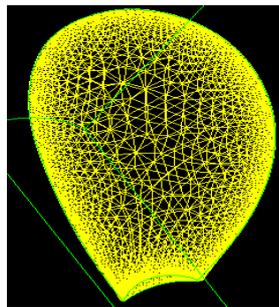


Figure 3 : Maillage de la pale d'hélice

Tableau 2 : Conditions aux limites

Entrée	vitesse uniforme calculée à partir du paramètre d'avancement $J$ qui varie dans un intervalle de $0.3 < J < 0.9$ .
Sortie	Une pression imposée par défaut 0 pascal. Elle est interprétée comme étant la pression statique de l'environnement extérieur.
Paroi	la pale de l'hélice et son moyeu. La vitesse tangentielle du fluide est égale à la vitesse de la paroi et la composante normale de vitesse = 0.
Paroi lisse	la face supérieure du domaine ou la contrainte tangentielle est nulle. Cela entraîne un gradient de vitesse normale nul.
Périodique	la condition périodique rotationnelle est appliquée autour l'axe $y$ .
Domaine de fluide	la condition "MRF" (Moving Reference Frame) est adoptée pour rotation par rapport à l'axe $y$ . La vitesse de rotation $n$ a été fixée à 3.63 tr/s qui correspond à un nombre de Reynolds de $3.65 \cdot 10^6$ .

### 3.1.2 L'hélice avec stator

La même hélice (Seiun-maru) est utilisée pour ce calcul. Cependant, le stator est maintenant placé en amont de cette hélice ce qui modifie la nature de l'entrée de l'hélice qui devient dans ce cas une interface avec la sortie du stator. Cet organe est composé de cinq pales droites conçues à partir du profil NACA0012 qui a une corde constante de 0.11m. Les domaines respectifs de l'hélice et du stator sont conçus séparément et rassemblés à partir du code fluent. Quatre variantes de géométrie de stator ont été considérées dans cette simulation. Il s'agit des configurations suivantes :

- Trois variantes à diamètre constant de 0.34 m mais à calage variable ;  $0^\circ$ ,  $10^\circ$ ,  $-10^\circ$ .
- Une variante à calage égale  $-10^\circ$  et dont le diamètre est de 0.44 m.

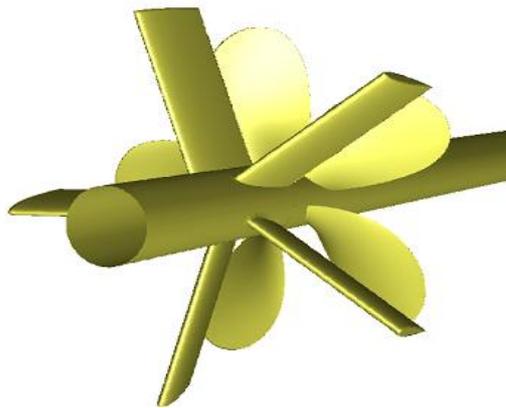


Figure 4 : Hélice-Stator avec un calage de  $-10^\circ$  et un diamètre de 0.44 m

## 3.2 Résultats et discussion

### 3.2.1 Simulation de l'hélice isolée

Il s'agit d'une simulation de l'écoulement autour de l'hélice en régime stationnaire incompressible. La procédure qui a été utilisée est la procédure SIMPLE. Les schémas adoptés pour les équations de: continuité, quantité de mouvements, modèle de turbulence sont du seconde ordre en gardant les valeurs des coefficients de relaxation par défaut. Une étude comparative a été effectuée entre les modèles de turbulence en l'occurrence :  $K-\epsilon$  RNG,  $K-\omega$ ,  $K-\omega$  SST, RSM et Spalart-Allmaras. Pour valider le modèle numérique, les résultats sont comparés avec ceux issus de l'expérimental.

Les résultats en termes de coefficients de poussée et de moment sont calculés en fonction du coefficient d'avance  $J$  dans l'intervalle ( $0.3 \geq J \geq 0.9$ ). Le changement de ce coefficient est assuré par la variation de la vitesse d'avance  $V_a$ .

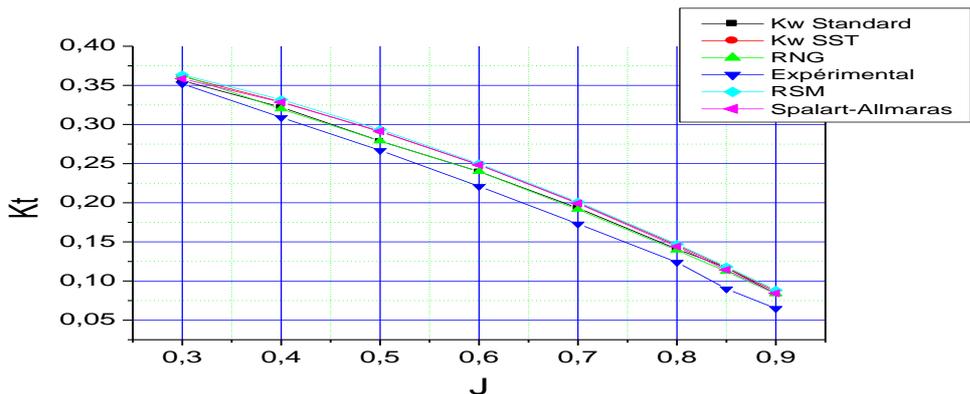


Figure 5 : Variation du coefficient de poussée  $K_T$  en fonction de  $J$

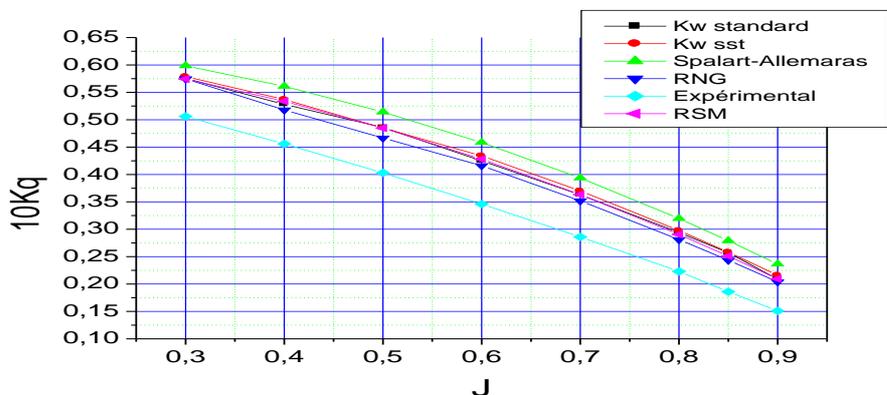


Figure 6 : Variation du coefficient de couple  $K_Q$  en fonction de  $J$

Les figures (5) et (6) montrent les courbes de  $K_T$  et  $K_Q$  en fonction du coefficient d'avance  $J$ . Les résultats obtenus numériquement concordent bien pour ce qui concerne  $K_T$  et assez bien pour  $K_Q$  avec les valeurs issues des essais en eau libre.

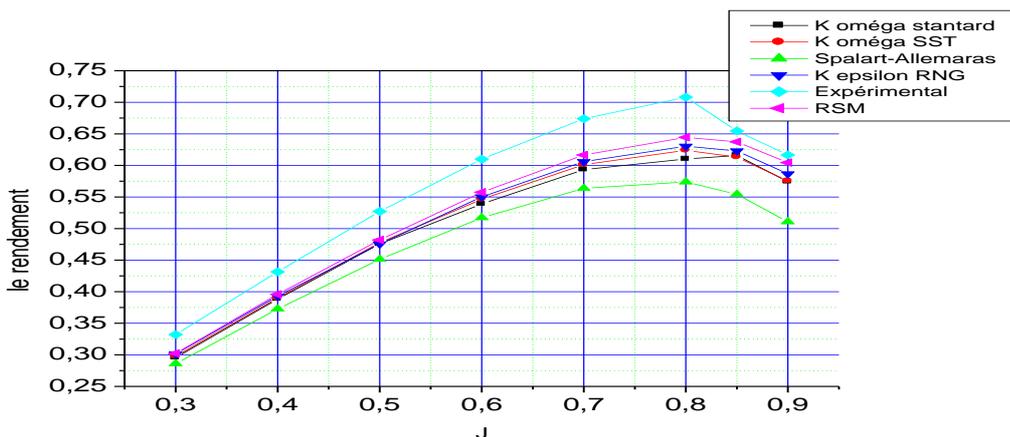


Figure 7 : Evaluation du rendement en fonction de  $J$

La comparaison entre ces cinq modèles de turbulence en termes de rendement (figure 7) a montré que le modèle RSM est le meilleur modèle car il donne des résultats plus proches des résultats expérimentaux malgré son temps de calcul plus élevé que les autres modèles. Cependant il a été judicieux d'opter pour le modèle  $K-\epsilon$  RNG non seulement pour ces meilleures

performances mais aussi pour le temps de calcul modéré qu'il engendre et enfin il est recommandé pour le calcul de l'écoulement autour des hélices.

La figure (8) montre la distribution de coefficient de pression  $C_p$  sur la pale au rayon de  $0.7 R_p$  pour le même coefficient d'avance  $J=0.7$ . L'examen de cette figure montre que le coefficient de pression minimale est de  $-0.75$  ce qui correspond à une dépression modérée ne causant pas de cavitation et confirmant ainsi les hypothèses adoptées pour le calcul de l'écoulement autour de l'hélice. Cette pression minimale est située pour  $x = 0.04$  m après laquelle le gradient de pression devient positif ce qui indique un risque de décollement à partir de cette position. Il est à signaler que tous les modèles de turbulence donnent la même répartition de pression avec un faible écart.

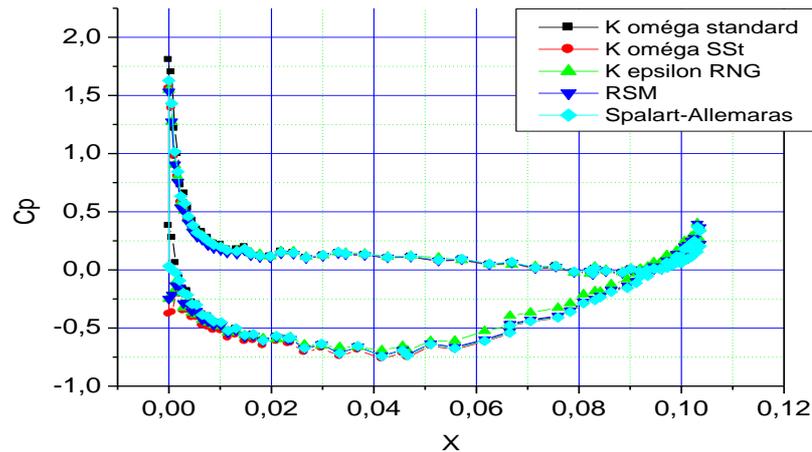


Figure 8 : Distribution des coefficients de pression  $C_p$  pour  $J= 0.7$  pour les cinq modèles de turbulence

### 3.2.2 Simulation de l'hélice avec stator

Après avoir validé le modèle de calcul, la simulation de l'écoulement autour de l'hélice en présence du stator est entamée. Dans ce cas, il s'agit d'une simulation en régime instationnaire incompressible en conservant la même procédure de calcul (SIMPLE). Cependant le pas de temps a été fixé à  $\Delta t= 0.003823857814$  s, ce qui correspond à une rotation de l'hélice par rapport au stator d'un degré ( $1^\circ$ ). Les schémas adoptés pour les équations : continuité, quantité de mouvements, modèle de turbulence sont du premier ordre tout en gardant les mêmes valeurs des coefficients de relaxation. L'effet instationnaire n'est pas ressenti dans ce type de calcul. Ceci est dû aux faibles vitesses d'avance où le paramètre d'avance varie entre 0.05 et 0.3.

La figure (9) montre l'évolution du rendement en fonction de  $J$  pour différents calages de la pale du stator. Les valeurs du paramètre d'avancement qui ont été choisi correspondent à des situations de fort chargement de pales d'hélice comme dans le cas du chalutier en phase de chalutage et le remorqueur en phase de remorquage y compris le point fixe. La même évolution du rendement en fonction de  $J$  est notée pour les cas de l'hélice isolée et de l'hélice avec stator. Cependant, un léger écart existe entre les deux configurations. En effet, une augmentation minimale du rendement est observée pour l'hélice avec stator ayant un diamètre de 0.17 m et dont les pales sont calées à :  $10^\circ$ ,  $0^\circ$ ,  $-10^\circ$ . Cette augmentation peut atteindre jusqu'à 2%, pour ce stator qui a cinq pales. Lorsque le diamètre du stator est augmenté, l'écart en rendement croit et atteint jusqu'à 4%.

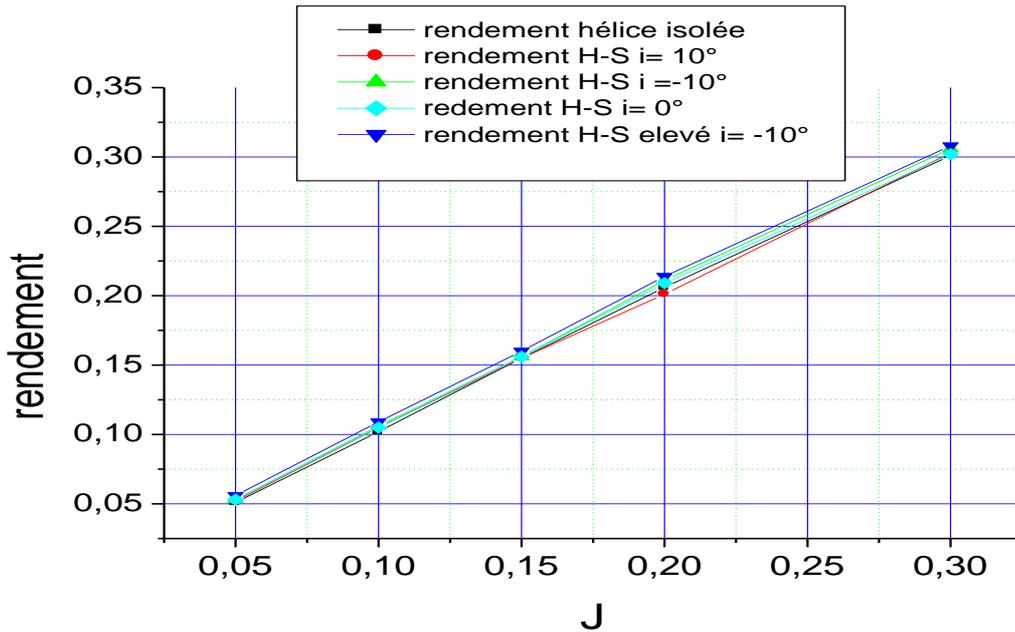


Figure 9 : Evolution du rendement de l'hélice en présence du stator en fonction du paramètre d'avancement et pour différentes incidences de la pale du stator

Une augmentation de poussée est clairement visible dans les contours de pression sur la pale de l'hélice. En effet les figures (10 et 11) qui montrent les contours de pression sur l'intrados et l'extrados pour les deux configurations hélice isolée et hélice avec stator le prouve. Ainsi, la distribution de pression sur l'intrados est à peu près la même pour les deux configurations alors que sur l'extrados les zones de dépression semblent être plus étendues dans le cas de l'hélice avec stator. Il en résulte logiquement une augmentation de poussée pour cette dernière configuration et également une augmentation de couple.

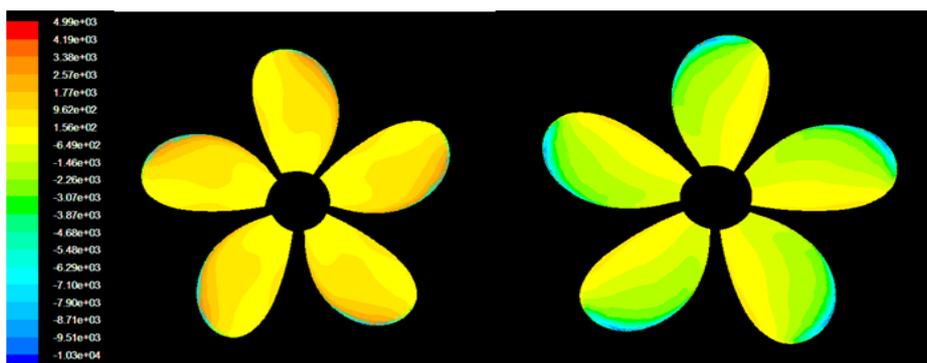


Figure 10 : Distribution de la pression à  $J=0.2$  pour le cas de l'hélice isolée sur les deux faces de la pale intrados à gauche et extrados à droite

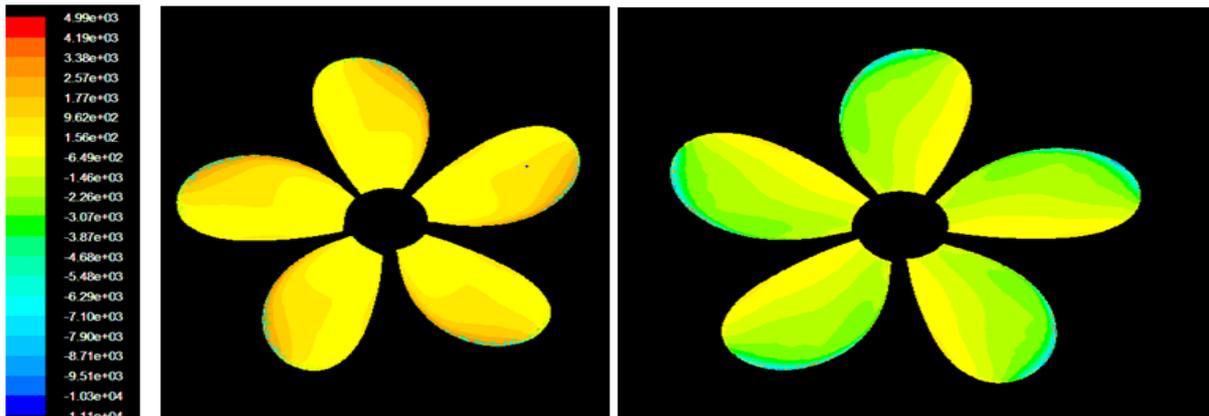


Figure 11 : Contour de pression à  $J=0.2$  pour le cas de l'hélice-stator sur les deux faces de la pale intrados à gauche et extrados à droite =  $-10^\circ$  diamètre augmenté

#### 4. Conclusion

Dans cette étude une simulation de l'écoulement turbulent à l'aide du code FLUENT 6.3 a été effectuée autour d'une hélice à cinq pales. Un premier test a consisté à étudier l'écoulement sur l'hélice isolée en mettant à l'épreuve plusieurs modèles de turbulence. Globalement, les résultats obtenus sont en bon accord avec les résultats expérimentaux pour tous les modèles de turbulence. Cependant, les modèles RSM et  $K-\epsilon$  RNG ont donné de meilleurs résultats.

Le deuxième test a consisté à étudier l'écoulement turbulent autour de l'ensemble Hélice-Stator placé en amont de l'hélice. Cet écoulement est a priori instationnaire du fait de la présence du sillage engendré par le stator. Plusieurs variantes de stator ont été testées en conservant un nombre de pales constant fixé à cinq. Les résultats obtenus pour les différentes variantes confirment que l'utilisation du stator améliore le rendement de l'hélice pour les paramètres d'avance entre 0 et 0.3 ; domaine où la pale d'hélice est le plus chargée.

#### Références

1. Shin Hyung Rhee, Takafumi Kawamura, Simulation of Steady and Unsteady Cavitation Using a RANS CFD code, Osaka, Japan November 2003.
2. Huang Sheng, Zhu Xiang-yuan, CFD Simulation of Propeller and Rudder Performance When Using Additional Thrust Fins, Harbin University, China december 2007.
3. David BELLEVRE, Thierry CHAMBENOIS, projet de chalutier économique "OPTIPROPULSEUR", DGA- Techniques hydrodynamiques, Val de Reuil France, ATMA 2014.
4. M.C.Kim, H.H.Chun, Y.D.Kang, Design and Experimental Study on a New Concept of Preswirl Stator as an Efficient Energy-Saving Device for Slow Speed Full Body Ship, Pusan National University, Korea, 2004.
5. A. Zeghib\* et K Talbi, Comparaison des différents modèles de turbulence d'un écoulement aérodynamique dans un cyclone, *Revue des Energies Renouvelables CISM'08 Oum El Bouaghi (2008) 311 - 324*