

DÉVELOPPEMENT D'UN CANAL DE TRACTION NUMÉRIQUE ET COMPARAISON AVEC DES RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX : ÉTUDE DE L'ÉCOULEMENT AUTOUR D'UN NAVIRE DANS UNE VOIE NAVIGABLE

P. NIEUTIN--REDON⁽¹⁾, M. BA⁽¹⁾, D. CALLUAUD⁽¹⁾, G. PINEAU⁽¹⁾

pablo.nieutin.redon@univ-poitiers.fr ; malick.ba@ensma.fr ; damien.calluaud@univ-poitiers.fr ;
gerard.pineau@univ-poitiers.fr

⁽¹⁾ Institut Pprime, Département Fluides Thermique Combustion, équipe HYDÉE, Poitiers

Abstract : La navigation intérieure a un impact important sur les berges des rivières. Afin de pouvoir estimer la participation de la navigation à l'érosion de ces berges, il peut être utile de développer un modèle numérique reproduisant un bassin de halage. Ce travail fait suite aux essais expérimentaux dans un bassin de traction réalisés précédemment à l'Institut Pprime à Poitiers. Plus précisément, cet article étudie les différents moyens et modèles disponibles dans le logiciel STAR-CCM+, dans le but de les comparer. Cette étude utilise une coque de Wigley avec un coefficient de bloc de 0,889, afin d'être proche d'un navire fluvial. Une géométrie de référence et un nombre de Froude sont étudiés, ainsi que l'influence de paramètres tels que les modèles de turbulence. La comparaison est faite sur la base de valeurs physiques mesurables, comme la déformée de la surface libre dans le sillage du navire ou la résistance du navire. Cet article compare également deux façons de simuler le même écoulement, à savoir en déplaçant le navire dans le fluide fixe, ou en gardant le navire immobile devant le fluide en mouvement. La raison pour laquelle la première de ces méthodes ne peut pas encore être appliquée à l'heure actuelle à ce type d'écoulement est également expliquée.

Introduction

Le récent intérêt pour la protection des espaces naturels et de la biodiversité s'est appliqué au domaine de la navigation fluviale. En effet, le passage d'un navire dans une voie d'eau confinée génère des mouvements hydrodynamiques, comme de la houle, des courants, ou encore un abaissement local du niveau d'eau. Ces phénomènes multiples vont contribuer chacun à leur échelle à impacter les rives des cours d'eau et ainsi provoquer leur dégradation sur le long terme. En parallèle, de nouvelles méthodes de recherche ont pu émerger grâce à l'essor des codes de calculs numériques couplé à l'augmentation des moyens de calcul. Un des enjeux actuels dans le domaine de la navigation fluviale est de savoir si les codes de calculs peuvent s'avérer être un moyen de modélisation fiable, donnant des résultats similaires à des cas expérimentaux. Cette question a pour l'instant plus été étudiée dans des cas de navigations non confinées, comme en pleine mer par exemple. En revanche, moins d'études se sont penchées sur une comparaison entre des résultats expérimentaux et numériques.

En 2015, lors d'une thèse de doctorat, Caplier [1] a réalisé des expériences dans le bassin de traction de l'Institut Pprime. Ces expériences ont été réalisées dans le but d'étudier l'effet de la profondeur de l'eau sur des valeurs physiques, telles que la résistance du navire ou la forme du sillage du navire. Ces données expérimentales vont servir de base de comparaison avec le modèle numérique. Différentes valeurs vont ainsi être mises en perspective, comme les hauteurs de vagues de sillage, l'aspect général de la perturbation induite par le navire, la résistance à l'avancement, etc. Le logiciel utilisé pour la simulation numérique est StarCCM+ dans sa version 15.06.007.

1. Géométrie du navire et du canal

Cette section traite des paramètres géométriques, tels que la géométrie du canal, la vitesse du navire ou la géométrie de la coque. La présente étude a été menée sur une seule géométrie de référence, dans l'objectif de pouvoir être comparée aux données expérimentales existantes.

1.1. Géométrie du navire

Lors de ses expériences, Caplier [1] a utilisé deux coques de Wigley [2]. La première, appelée CWn2 a un coefficient de bloc C_b de 0,667 et la seconde, CWn8, un C_b de 0,889. Les coques de Wigley ont l'avantage d'avoir été largement étudiées et documentées dans la littérature, ce qui en fait un bon cas pour la recherche. La présente étude est orientée vers la navigation intérieure, la plupart des navires ayant un coefficient de blocage supérieur à 0,8. Pour cette raison, la coque CWn8 a été sélectionnée pour la simulation. La géométrie du navire est représentée sur la figure 1, et ses principaux paramètres géométriques sont indiqués dans le tableau 1.

Figure 1 : Carène de Wigley à l'ordre $n=8$, cotes en [mm]

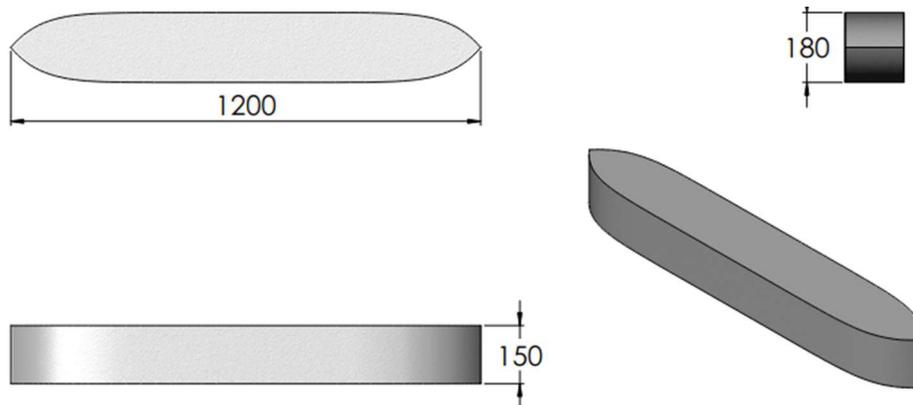


Tableau 1 : Paramètres géométriques du navire utilisé

Paramètre	Valeur	Unité
Longueur L	1.2	m
Maître-beau B	0.18	m
Hauteur totale H	0.15	m
Tirant d'eau T	0.075	m
Surface mouillée S_w	0.372	m ²
Coefficient de bloc C_b	0.889	-

1.2. Géométrie de la voie d'eau

Compte tenu du fait que les simulations numériques de cet article sont destinées à être comparées à des données expérimentales, la géométrie du canal de traction a été reproduite numériquement sur la base des expériences de Caplier [1]. Le but de son travail était d'étudier les effets du confinement vertical de la voie navigable sur le sillage et la résistance à l'avancement. Il a donc remorqué une maquette de la coque de Wigley dans le bassin de traction de l'Institut Pprime à une vitesse constante après une courte phase d'accélération et le seul degré de liberté dont il disposait était la translation dans la direction longitudinale. Un schéma de la

géométrie du canal peut être vu sur la figure 2, et les principaux paramètres géométriques sont compilés dans le tableau 2.

L'origine du repère utilisé tout au long de ce papier se trouve au niveau du centre de gravité du navire, l'axe \vec{X} est l'axe longitudinal du navire, l'axe \vec{Y} est l'axe transversal et l'axe \vec{Z} correspond à l'axe vertical ascendant.

La valeur de la vitesse a été choisie afin de reproduire le modèle expérimental. Toujours appliquée dans la direction \vec{X} , elle correspond à un nombre de Froude en longueur de 0,23 et à un nombre de Froude en hauteur de 0,80 dans la voie navigable actuelle.

Pompée [3] donne une classification des voies d'eau restreintes, visible dans le tableau 3. La géométrie du canal actuel est fortement confinée verticalement et correspond à un confinement latéral important. Les aires transversales A_B et A_C se calculent de la manière suivante : $A_B = T \cdot B$ et $A_C = W \cdot h - A_B$.

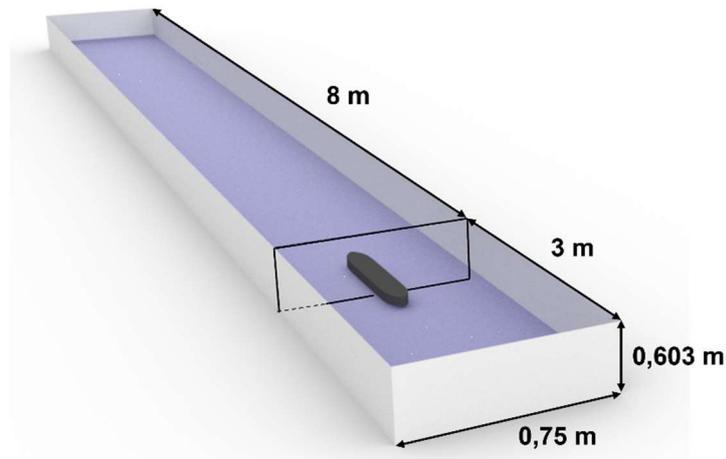
Tableau 2 : Dimensions de la voie d'eau et du navire

Paramètre	Valeur	Unité
Largeur de canal W	1.5	m
Profondeur d'eau h	0.103	m
Aire transversale du canal A_C	0.141	m ²
Aire transversale du navire A_B	0.0135	m ²
Vitesse du navire V	0.8	m.s ⁻¹
T/h	0.73	-
B/W	0.12	-
Coefficient de blocage $m = A_B/A_C$	0.096	-

Tableau 3 : Critères de confinement de la voie d'eau - [3]

Coefficient	Début des effets de confinement	Confinement important	Confinement très important
T/h	[0.067;0.25]	[0.25;0.67]	[0.67;1]
B/W	[0.005;0.067]	[0.067;0.25]	[0.25;1]
m	[0.02;0.125]	[0.125;0.25]	[0.25;1]

Figure 2 : Visualisation 3D du canal de traction numérique



2. Simulation numérique et influence de différents paramètres

Une fois les paramètres géométriques et le logiciel sélectionnés, des décisions relatives à la simulation numérique doivent être prises. Cette partie décrit l'influence de plusieurs paramètres sur la solution calculée.

En premier lieu, le type de simulation a fait l'objet d'une investigation. Deux modèles de turbulence ont ensuite été étudiés et comparés à des données expérimentales. Pour finir, le modèle de raffinement automatique de maillage a lui aussi fait l'objet d'une étude.

Les simulations présentées dans cette partie utilisent la méthode VOF car il s'agit d'un problème multiphasique qui demande une grande précision au niveau de l'interface entre l'air et l'eau. Les pas de temps sont adaptatifs afin de s'assurer que les nombres de courant ne sont pas trop élevés. Enfin, le solveur utilisé est de type *URANS* (*Unsteady Reynolds Averaged Navier Stokes*) avec un schéma implicite, similairement à des publications comme [4–6]. Un solveur de type *LES* (*Large Eddy Simulation*) aurait également pu être retenu, mais [7, 8] ont pu conclure que pour des écoulements proches de celui étudié ici, la différence entre les deux est négligeable.

2.1. Influence du type de simulation

Le premier choix à faire est celui de la modélisation de l'écoulement. Il y a deux manières possibles de reproduire numériquement l'expérience :

- Reproduire l'expérience à l'identique, c'est-à-dire recréer un canal de traction virtuel, où le fluide est fixe, et dans lequel le modèle 3D reproduit numériquement du navire se déplace à la même vitesse que la maquette physique dans le canal. Cette méthode est appelée *Overset* (OV) car elle nécessite de créer deux maillages différents, un maillage du domaine d'étude, appelé *Background*, et un maillage *Overset*, se déplaçant dans le précédent. Cette méthode est la plus récente, et a donc été moins largement étudiée. Des simulations de type OV figurent par exemple dans les articles [5, 9].

- La deuxième option consiste à changer de référentiel par rapport au premier, c'est-à-dire à fixer le modèle de navire et à mettre en mouvement le fluide qui l'entoure, toujours à la vitesse souhaitée. Cela nécessite également d'attribuer ce mouvement aux parois du canal, qui doivent bouger par rapport au bateau, afin de ne pas créer de couches limites dans ces zones, en raison de la différence de vitesse entre le fluide en mouvement et les parois fixes. Cette méthode est appelée *Quasi-Statique* (QS). Cette méthode est utilisée depuis bien plus longtemps que la précédente, ce qui permet de la trouver dans bon nombre de références bibliographiques, comme par exemple dans les articles [10–14]. Cette méthode de calcul est reconnue comme étant fiable et donne en général des résultats proches des essais expérimentaux.

Une comparaison numérique des deux manières de simuler l'écoulement étudié a été réalisée. La simulation la plus facile à faire converger est la QS. Les dimensions du maillage QS ont été copiées dans la simulation OV, afin d'étudier les résultats avec des ressources et des données initiales identiques. Les seules différences entre OV et QS sont la longueur du canal et la position longitudinale initiale du navire dans celui-ci. En effet, le maillage *Overset* de OV est en mouvement pendant le calcul, il a donc besoin de plus d'espace que QS afin de pouvoir visualiser son sillage dans son intégralité. Le tableau 4 donne les dimensions des plus petites cellules de la simulation, sans tenir compte du raffinement automatique du maillage, qui sera discuté plus tard. Le maillage est construit de la même manière pour les deux simulations dont l'étude de convergence fait l'objet. Les mailles sont progressivement raffinées au fur et à mesure qu'elles se rapprochent de la surface libre et de la coque. Cela se fait par le biais de boîtes de contrôle, dans lesquelles il est possible de contrôler la taille du maillage dans toutes les directions de l'espace. La figure 3 montre le maillage de la simulation, projeté sur trois plans orthogonaux. Par ailleurs, le tableau 5 compile les différentes conditions aux limites pour les deux types de simulation numérique.

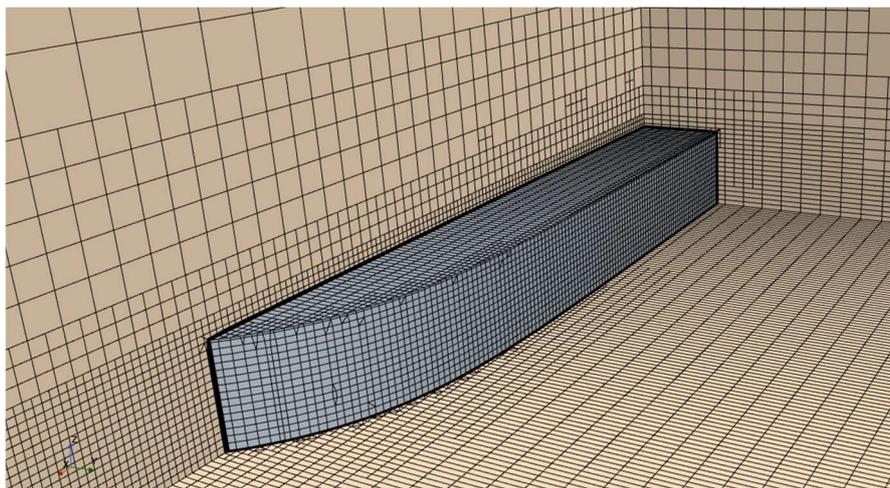
Tableau 4 : Dimensions des plus petites cellules du maillage

Direction	Dimension
\vec{X}	2.5 mm
\vec{Y}	5 mm
\vec{Z}	2.5 mm

Tableau 5 : Nature des conditions limites pour les cas *OV* et *QS*

Limite	<i>OV</i>	<i>QS</i>
Symétrie	Symmetry Plane	Symmetry Plane
Paroi du navire	No-slip Wall	No-slip Wall
Face amont	Pressure Outlet	Velocity Inlet
Face aval	Pressure Outlet	Pressure Outlet
Paroi latérale	No-slip Wall	Velocity Inlet
Fond du canal	No-slip Wall	Velocity Inlet
Face du dessus	Velocity Inlet	Velocity Inlet

Figure 3 : maillage projeté sur trois plans orthogonaux



Une étude de convergence de maillage a été menée sur ces deux façons de calculer. Le maillage de la simulation a donc été modifié plusieurs fois dans chaque direction. La simulation X_{Grossier} correspond au maillage de base, mais grossi d'un facteur 2 dans la direction X . À l'inverse, X_{Fin} contient un maillage deux fois plus fin dans la direction X par rapport à la simulation de base. Tous les calculs présentés ont été réalisés sur le cluster de l'Université de Poitiers, avec 128 cœurs de processeurs et 500 Go de RAM. La notation R_{TOT} correspond à la résistance à l'avancement totale du navire, $\Delta F_{\text{latéral}}$ est la différence entre la force initiale appliquée par le fluide sur la paroi latérale du canal et cette même force à la fin de la simulation. ΔF_{fond} mesure la même chose pour la paroi du fond du canal. Ces deux dernières différences de forces sont en quelque sorte l'impact de la navigation en milieu confiné sur ses frontières. Elles sont par conséquent fortement dépendantes de l'allure du sillage, et donc liées directement à la convergence de la simulation.

Tableau 6 : Etude de convergence de maillage de la simulation OV

Simulation	Résidus	y+ max	CFL max	Temps de calcul (heures)	Nombre de cellules (Millions)	R _{TOT} (N)	ΔF _{latéral} (N)	ΔF _{fond} (N)
Base	<10 ¹	<0.21	< 4.5	54	24	[2.95; 3.08]	-16	-125
X _{Grossier}	<10 ¹	<0.24	< 3.4	14	12	[2.28; 3.04]	+40	-328
X _{Fin}	<10 ¹	<0.23	< 5	218	54	[2.81; 2.83]	+10	+64
Y _{Grossier}	<10 ²	<0.26	< 3.9	12	17	[3.05; 3.00]	-7	-50
Y _{Fin}	<10 ¹	<0.26	< 3.6	208	61	[2.79; 2.81]	+23	+95
Z _{Grossier}	>10 ⁷	-	-	-	-	-	-	-
Z _{Fin}	<10 ¹	<0.29	< 5	216	36	[2.94; 3.16]	-20	-110

Tableau 7 : Etude de convergence de maillage de la simulation QS

Simulation	Résidus	y+ max	CFL max	Temps de calcul (heures)	Nombre de cellules (Millions)	R _{TOT} (N)	ΔF _{latéral} (N)	ΔF _{fond} (N)
Base	<10 ⁻¹	<0.16	< 3.8	12	6	3.02	+26	+123
X _{Grossier}	<10 ⁻¹	<0.15	< 3.7	5	3.3	3.00	+22	+124
X _{Fin}	<10 ⁻¹	<0.18	< 5	40	12	2.95	+21	+123
Y _{Grossier}	<10 ⁻¹	<0.17	< 3.1	4	3.6	3.00	+23	+125
Y _{Fin}	<10 ⁻¹	<0.17	< 3.7	41	21	3.00	+22	+127
Z _{Grossier}	>10 ⁻¹	<0.17	< 3.7	5	4.6	3.04	+20	+119
Z _{Fin}	<10 ⁻¹	<0.18	< 5	32	10	2.96	+23	+115

Plusieurs conclusions peuvent être tirées de l'étude de sensibilité du maillage de la simulation OV (tableau 6). Le nombre de courants et les y+ sont stables, sauf pour la simulation Z_{Grossier} qui a divergé dès les premières itérations. En revanche, il est clairement visible ici que la simulation OV qui a servi de base n'est pas convergée. En effet, les différentes forces mesurées varient énormément d'une simulation à l'autre. De plus, les temps de calcul sur ce type de simulation commencent à être importants, tous les calculs avec une direction raffinée prenant plus de 200 heures de calcul. Par ailleurs, il est difficile d'extraire une valeur précise pour la résistance à l'avancement car elle varie très fortement avec le temps, d'où les intervalles que l'on peut lire dans le tableau 6.

En ce qui concerne l'étude de sensibilité du maillage de la simulation QS (tableau 7), on peut noter que les différentes valeurs mesurées varient très peu avec le maillage, ce qui est une bonne indication de la convergence du maillage. Les temps de calcul sont 60 à 80% plus rapides que ceux des simulations OV. Ceci peut être attribué au remaillage permanent que la simulation OV doit effectuer. Le maillage s'adapte au mouvement du navire, ce qui ajoute de nombreuses opérations mathématiques. Cela a pour conséquence directe de multiplier le temps de calcul, même en partant du même maillage.

La simulation OV n'étant pas convergée, la comparaison entre les deux modèles n'a pas de sens. Pour ce faire, il faudrait disposer des deux types de simulations convergées. Le principal obstacle à la convergence de la simulation est le temps de calcul, et donc par extension les ressources de calcul. En effet, le calcul d'une simulation fine dans une direction prend environ 200 heures. Ainsi, une simulation affinée dans les trois directions par rapport à celle présentée dans le tableau 4 devrait être prise comme nouvelle simulation de base. Ce calcul, en supposant qu'il puisse être initialisé, prendrait donc environ 800 heures, c'est-à-dire presque un mois pour les mêmes conditions de calcul.

De plus, il n'y a aucune garantie que cette simulation soit convergée. Pour en être sûr, il faudrait créer trois autres simulations, chacune affinée dans une direction de l'espace, qui nécessiteraient donc chacune 1600

heures de calcul. Là encore, il n'y a aucun moyen de savoir à l'avance si le calcul serait convergé, ce qui pourrait conduire à des calculs d'un an. Vu sous cet angle, il devient clair que cette étude ne peut raisonnablement pas être réalisée avec les ressources de calcul actuelles. Le type de calcul Overset ne peut donc pas être écarté pour des raisons scientifiques, mais matérielles. Les calculs présentés par la suite sont de type Quasi-stationnaire.

2.2. Influence du modèle de turbulence

Deux modèles de turbulence ont été comparés : $k - \epsilon$ et $k - \omega$. Ces modèles sont les plus largement utilisés dans le domaine de la recherche et de l'industrie, selon [15].

Dans la littérature, parmi les publications portant sur des géométries similaires à celle étudiée dans le présent article, les deux modèles sont utilisés. Dans son article [16], Terziev justifie son choix du modèle $k - \epsilon$ par la similitude de sa géométrie avec celles simulées dans [8, 17], dans lesquelles le modèle $k - \epsilon$ est présenté comme un bon compromis entre la robustesse de la solution, le coût en temps de calcul et la précision de ses résultats. Lors de ses travaux de recherche suivants, [9, 18], Terziev a néanmoins basculé vers le modèle $k - \omega$. Kok [5], quant à lui, utilise le modèle $k - \epsilon$ pour son avantage économique en termes de temps de calcul, et car le surenfoncement du navire lorsqu'il est en mouvement n'est pas sensible au modèle de turbulence selon [19]. Le modèle $k - \epsilon$ est également utilisé dans l'article [20] et le rapport technique [11] utilisent également le modèle $k - \epsilon$, sans en préciser la raison, pour une étude sur le squat dynamique d'un navire dans une voie d'eau confinée.

Bien que ces références ne soient pas exhaustives, il est clair que les deux modèles sont utilisés, et qu'il est difficile d'extraire un consensus quant à leur utilisation. C'est pourquoi une comparaison a été réalisée, visant à confronter les sillages générés par ces deux modèles aux expériences de 2015 [1] réalisées à l'Institut Pprime. Les comparaisons peuvent être vues sur les figures 4 et 5.

La différence entre les deux simulations est très étroite, la longueur d'onde est sensiblement identique. Les hauteurs d'onde sont également très similaires, bien que la simulation avec le modèle $k - \epsilon$ « creuse » légèrement plus les vagues. En revanche, il est possible d'observer une vague supplémentaire dans le sillage du navire pour $k - \omega$. La diffusion numérique est donc légèrement moins importante avec ce dernier modèle. C'est la raison principale pour laquelle le modèle de turbulence $k - \omega$ a été utilisé pour les prochaines simulations présentées dans cet article.

Figure 4 : répartition spatiale des hauteurs de vagues adimensionnalisées par la hauteur d'eau.
Haut : simulation avec $k-\epsilon$; Bas : Expérimentations [1]

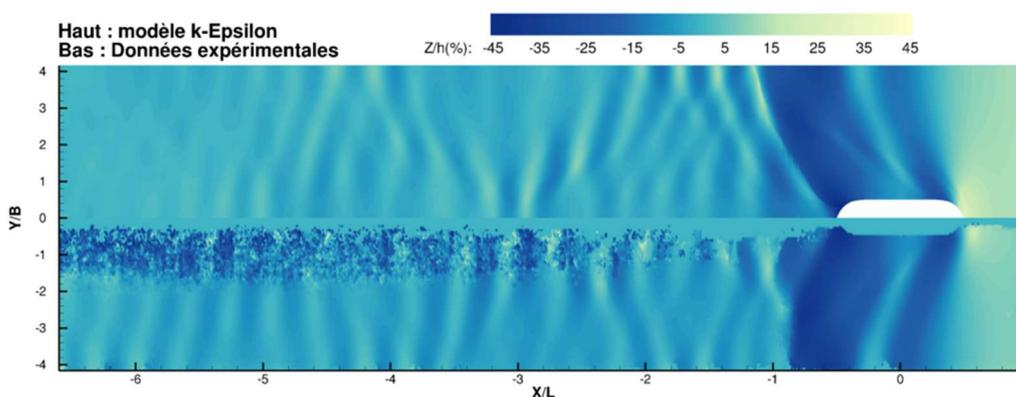
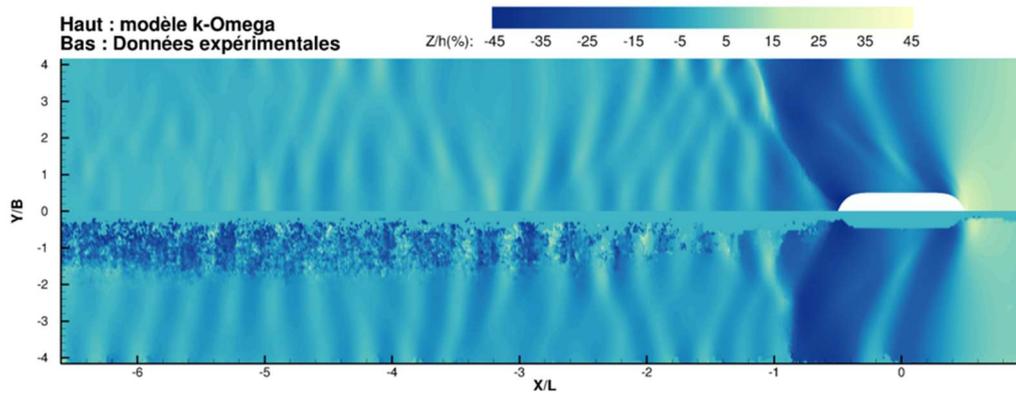


Figure 5 : répartition spatiale des hauteurs de vagues adimensionnalisées par la hauteur d'eau.
Haut : simulation avec $k-\omega$; Bas : Expérimentations[1]



2.3. Influence du raffinement automatique de maillage

En plus des modèles régissant la physique de l'écoulement, STAR-CCM+ fournit des modèles de maillage. Parmi ceux-ci, le raffinement automatique du maillage se distingue des autres par son aspect dynamique. Contrairement aux autres modèles de maillage, il agit pendant la simulation, et pas seulement avant le début du calcul. Le principe de ce modèle est de raffiner le maillage aux endroits souhaités dans l'espace, selon un critère défini par l'utilisateur, et ce à intervalles de temps réguliers. Wackers et son équipe sont à l'origine de plusieurs publications sur les différentes manières de raffiner automatiquement le maillage, et en particulier sur le raffinement autour de la surface libre. Par exemple, dans [21, 22], des techniques de raffinement sont proposées pour les maillages non structurés.

Dans STAR-CCM+, un critère de raffinement automatique de maillage isotrope à surface libre est disponible et prêt à être utilisé. Son fonctionnement est décrit dans [23].

Plusieurs simulations identiques ont été exécutées, en utilisant le raffinement automatique du maillage à différents degrés, toujours dans le but de pouvoir les comparer. La géométrie utilisée pour cette comparaison est la même que celle des expériences de Caplier [1], afin de pouvoir vérifier que la solution n'est pas trop éloignée de la réalité.

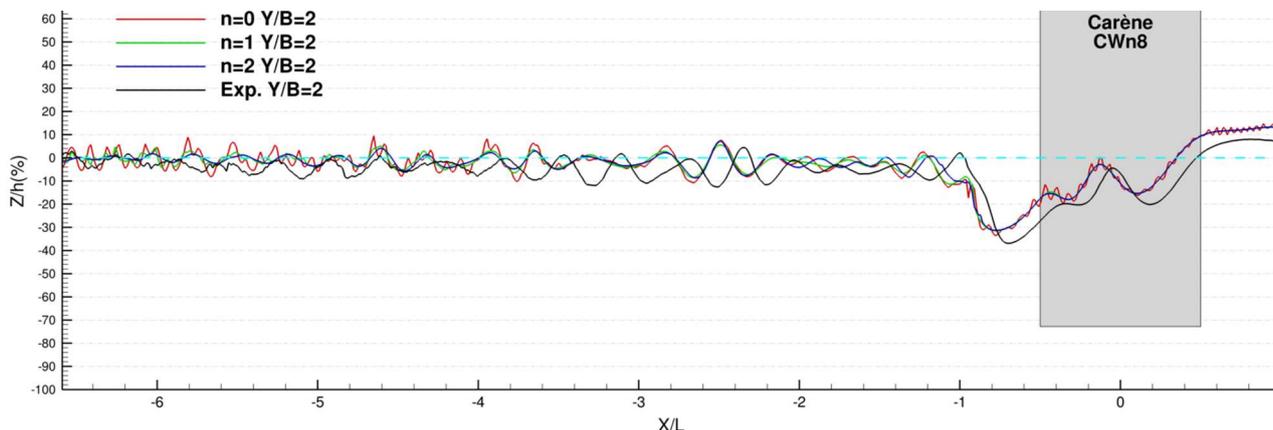
Le premier calcul n'utilise pas le raffinement automatique du maillage, le second empêche qu'une cellule soit raffinée plus d'une fois, et le dernier fixe cette limite à deux fois. Le tableau 8 compile plusieurs éléments de comparaison entre ces différents calculs numériques. Il est possible de remarquer que les seules valeurs qui varient ici sont le temps de calcul et le nombre de mailles. Le raffinement automatique du maillage ne semble pas avoir d'intérêt particulier ici.

Tableau 8 : valeurs obtenues dans les simulations faisant varier l'ordre du raffinement de maillage automatique

Simulation	Résidus	y+ max	CFL max	Temps de calcul (heures)	Nombre de cellules (Millions)	R_{TOT} (N)	$\Delta F_{latéral}$ (N)	ΔF_{fond} (N)
Raffinement n=0	<10-1	<0.18	< 5.0	20	7	2.97	+20	+123
Raffinement n=1	<10-1	<0.18	< 5.0	40	10	2.95	+21	+121
Raffinement n=2	<10-1	<0.18	< 5.0	100	25	2.99	+22	+122

En revanche, on peut voir qu'il a une nette influence sur les hauteurs de vagues dans le sillage du navire. Cela peut être vu sur la figure 6. Lorsque le raffinement automatique de maillage est désactivé, on peut voir des fluctuations locales de hauteur d'eau. À l'inverse, lorsque le modèle est actif, les ondes sont comme « lissées », et leur hauteur converge plus vers les valeurs expérimentales. De plus, il est possible de remarquer que la différence entre le modèle à l'ordre 1 et à l'ordre 2 est très faible. Le raffinement automatique de maillage a donc bien de l'intérêt, mais qu'il n'est pas nécessaire de l'utiliser à haut degré.

Figure 6 : profil longitudinal des hauteurs de surface libres adimensionnalisées, sur le plan $Y/B=2$



3. Résultats

Maintenant que les choix de simulation ont été faits, il est possible de visualiser le canal dans son ensemble afin d'en tirer des conclusions. La figure 5 montre la hauteur d'eau obtenue avec la simulation QS, en utilisant la turbulence $k-\omega$ et le raffinement automatique du maillage à l'ordre 1. En dessous, les données expérimentales de [1] sont exposées de la même manière, afin de faciliter la comparaison.

Plusieurs conclusions peuvent être tirées de cette figure. Premièrement, en amont de la carène, la hauteur d'eau moyenne se trouve au-dessus de son niveau initial. Ce phénomène fait penser aux observations expérimentales d'Ertekin et son équipe en 1984 [24]. En effet, la simulation numérique ici présentée est dans une configuration très proche de ces expériences, à savoir un nombre de Froude de hauteur proche de 0.8 ainsi qu'un coefficient de blocage similaire. Par ailleurs, la simulation numérique ayant tourné pendant 15 secondes, le sillage a pu se stabiliser et atteindre un stade proche du stationnaire. L'aspect général du sillage obtenu est encourageant. Les hauteurs d'eau observées proche du navire semblent coller aux valeurs expérimentales sur une bonne partie du sillage, mais la diffusion numérique atténue ces hauteurs loin du navire. La longueur d'onde simulée est proche de l'expérimentale, mais finit par « décaler » la réflexion des ondes lorsque l'on s'éloigne de la carène.

4. Conclusion

Le calcul numérique est une approche complémentaire aux expérimentations pour mener des études en navigation fluviale. L'objectif de ce papier est de valider des méthodes de CFD par comparaison avec des données expérimentales. La première étude menée a pu montrer qu'une simulation de type « Overset » demande des ressources de calcul très importantes pour réussir à faire converger le calcul. Cette option peut être intéressante car elle reproduit ce qu'il se passe réellement dans un canal de traction physique, et peut permettre de faire accélérer la maquette numérique progressivement. La seconde étude permet de voir que le choix du modèle de turbulence n'a que peu d'influence sur l'allure de la surface libre. Le modèle $k-\epsilon$ creuse légèrement plus les ondes du sillage et semble être plus touché par le phénomène de diffusion numérique que le modèle $k-\omega$. En somme : Le modèle $k-\epsilon$ donne des vagues plus hautes qui s'amortissent plus vite. Pour

autant, l'allure générale de la surface libre ne change pas d'un modèle à l'autre, les longueurs d'onde du sillage et les angles de réflexion contre les parois sont identiques. Enfin, un dernier paramètre a pu être étudié : le raffinement automatique de maillage présente un intérêt certain dans la simulation du présent type d'écoulement, sans allonger les temps de calcul outre mesure. En prenant tout cela en compte, la solution obtenue est proche des essais expérimentaux menés par Caplier en 2015 [1], ce qui est encourageant pour la suite. De plus, les temps de calculs restent raisonnables et vont permettre de faire varier facilement la géométrie du canal et certains paramètres géométriques.

5. Bibliographie

1. Caplier, C.: Étude expérimentale des effets de hauteur d'eau finie, de confinement latéral et de courant sur les sillages et la résistance à l'avancement des navires., (2015)
2. Wigley, W.C.S.: Ship Wave Resistance. A comparison of mathematical theory with experimental results. *Spring Meetings of the 67th Session of the Institution of Naval Architects.* 14, 124-141 (1926)
3. Pompée, P.J.: Channel types with special respect to speed, power used and ease quality. In: - (2019)
4. Wong et al.: URANS prediction of hydrodynamic interaction between LHD and supply vessel during replenishment in calm water. *International Journal of Naval Architecture and Ocean engineering.* 11, 750-764 (2019)
5. Kok, Z., Duffy, J., Chai, S., Jin, Y.: Multiple Approaches to Numerical Modelling of Container Ship Squat in Confined Water. *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering.* 146, (2020)
6. Zentari, L., Moctar, O. el, Lassen, J., Hallmann, R., Schellin, T.E.: Experimental and numerical investigation of shallow water effects on resistance and propulsion of coupled pusher-barge convoys. *Applied Ocean Research.* 121, 103048 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.apor.2022.103048>
7. Shevchuk, I., Böttner, C.U., Kornev, N.: Numerical Analysis of the Flow in the Gap Between the Ship Hull and the Fairway Bottom in Extremely Shallow Water. In: *Flanders Hydraulics Research, Ghent University, Maritime Technology* (2016)
8. Tezdogan, T., Incecik, A., Turan, O.: A numerical investigation of the squat and resistance of ships advancing through a canal using CFD. *Journal of Marine Science and Technology.* 21, (2015). <https://doi.org/10.1007/s00773-015-0334-1>
9. Terziev, M., Zhao, G., Tezdogan, T., Yuan, Z.M.: Virtual Replica of a Towing Tank Experiment to Determine the Kelvin Half-Angle of a Ship in Restricted Water. *Journal of Marine Science and engineering.* (2020)
10. Prakash, S., Chandra, B.: Numerical Estimation of Shallow Water Resistance of a River-Sea Ship using CFD. 2013. 71, (2013)
11. Caplier, C., Linde, F., Bernard, A., Calluau, D., David, L., Ouahsine, A., Rousseaux, G., Sergent, P.: Comparaisons entre expérience et calcul des ondes générées par un bateau en eaux peu profondes. *Institut Pprime, Laboratoire Roberval, CEREMA* (2015)
12. Mucha, P., Deng, G., Gourlay, T., Moctar, O. el: Validation studies on numerical prediction of ship squat and resistance in shallow water. In: *Conference: International Conference on Ship Manoeuvring in Shallow and Confined Water with Special Focus on Ship Bottom Interaction* At: Hamburg (2016)
13. Elsherbiny, K., Terziev, M., Tezdogan, T., Incecik, A., Kotb, M.: Numerical and experimental study on hydrodynamic performance of ships advancing through different canals. *Ocean engineering.* 195, (2020). <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2019.106696>
14. Mucha, P., Moctar, O. el: Numerical Prediction of Resistance and Squat for a Containership in Shallow Water. In: *17th Numerical Towing Tank Symposium : Marstrand, Sweden* (2014)
15. Argyropoulos, C.D., Markatos, N.C.: Recent advances on the numerical modelling of turbulent flows. *Applied Mathematical Modelling.* 39, 693-732 (2014)
16. Terziev, M., Tezdogan, T., Oguz, E., Gourlay, T., Demirel, Y.K., Incecik, A.: Numerical investigation of the behaviour and performance of ships advancing through restricted shallow waters. *Journal of Fluids and Structures.* 76, (2018). <https://doi.org/10.1016/j.jfluidstructs.2017.10.003>
17. Quérard, A., Temarel, P., Turnock, S.R.: Influence of Viscous Effects on the Hydrodynamics of Ship-Like Sections Undergoing Symmetric and Anti-Symmetric Motions, Using RANS. *27th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering.* (2008). <https://doi.org/10.1115/OMAE2008-57330>

18. Terziev, M., Tezdogan, T., Incecik, A., Muscat-Fenech, C.D.M.: Investigating the Influence of Sheared Currents on Ship Hydrodynamics in Confined Water Using Computational Fluid Dynamics. Investigating the Influence of Sheared Currents on Ship Hydrodynamics in Confined Water Using Computational Fluid Dynamics (2021)
19. Deng, G.B., Guilmineau, E., Leroyer, A., Queutey, P., Visonneau, M., Wackers, J.: Simulation of Container Ship in Shallow Water at Model Scale and Full Scale. Ecole Centrale de Nantes (2014)
20. Jachowski, J.: Assessment of ship squat in shallow water using CFD. Gdansk University of Technology (2008)
21. Wackers, J., Deng, G., Leroyer, A., Queutey, P.: Adaptive Grid Refinement for Hydrodynamic Flow Simulation. *Computers & fluids*. 55, 85-100 (2012). <https://doi.org/10.1016/j.compfluid.2011.11.004>
22. Wackers, J., Deng, G., Guilmineau, E., Leroyer, A.: Combined refinement criteria for anisotropic grid refinement in free-surface flow simulation. *Computers & fluids*. 92, (2013). <https://doi.org/10.1016/j.compfluid.2013.12.019>
23. Software, S.D.I.: Starccm+ Users guide. (2020)
24. R. C. Ertekin, W. C. Webster, J. V. Wehausen: Ship-Generated Solitons. Présenté à Fifteenth Symposium NAVAL HYDRODYNAMICS Seakeeping Problems Hull-Propeller Interactions Nonlinear Free-Surface Problems Frontier Problems in Hydrodynamics , Hambourg (1984)