



**HAL**  
open science

# Vers l'optimisation de la performance en kayak par la simulation numérique

Alban Leroyer, P. Queutey, R. Duvigneau

► **To cite this version:**

Alban Leroyer, P. Queutey, R. Duvigneau. Vers l'optimisation de la performance en kayak par la simulation numérique. 15èmes Journées de l'Hydrodynamique, Nov 2016, Brest, France. hal-02566738

**HAL Id: hal-02566738**

**<https://hal.science/hal-02566738v1>**

Submitted on 7 May 2020

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



## 15<sup>ÈMES</sup> JOURNÉES DE L'HYDRODYNAMIQUE

22 - 24 novembre 2016 - Brest

### VERS L'OPTIMISATION DE LA PERFORMANCE EN KAYAK PAR LA SIMULATION NUMERIQUE

### *TOWARDS PERFORMANCE OPTIMISATION IN KAYAK USING CFD*

Alban LEROYER<sup>(1)</sup>, Patrick QUEUTEY<sup>(1)</sup>, Régis DUVIGNEAU<sup>(2)</sup>

<sup>(1)</sup> Ecole Centrale Nantes, LHEEA, UMR CNRS 6598, équipe METHRIC.

<sup>(2)</sup> Université Côte d'Azur, Inria, CNRS, LJAD.

#### Résumé

Cet article synthétise la majeure partie du travail de recherche menée lors du projet SOKA "Simulation et Optimisation de canoës-KAyaks" en collaboration avec l'INRIA Sophia-Antipolis et la Fédération de Canoë-Kayak, financé par l'INSEP et le Ministère de la Ville de la Jeunesse et des Sports.

L'objectif principal de ce projet a été de développer une procédure qui inclut des mesures expérimentales et des simulations numériques avancées de l'écoulement autour de la coque pour en déduire un modèle analytique d'action globale du kayakiste sur sa coque. Ce modèle d'effort a ensuite été utilisé pour aborder et évaluer un travail d'optimisation sur des simulations instationnaires en mouvement résolu, et ainsi analyser l'influence de paramètres sur la vitesse d'avance de la coque.

#### Summary

This article summarizes the major part of the research project SOKA "Simulation et Optimisation de canoës-KAyaks", in collaboration with INRIA Sophia-Antipolis and the French Canoe Federation, founded by INSEP (the French National Institute of Sport and Physical Education) and the French ministry "Ministère de la Ville de la Jeunesse et des Sports".

The main goal was to develop a procedure which includes experimental measurements and advanced numerical simulation of the flow around the hull to deduce an analytical model of the global loads of the kayaker on his hull. This model was thus used to address and test an optimisation procedure based on unsteady CFD simulations with solved motions and analyse the influence of some parameters on the forward velocity of the hull.

# 1 Introduction

La mécanique des fluides joue un rôle primordial dans les sports nautiques, et souvent dans des configurations très complexes. Au même titre que l'aviron ([1]), on rencontre dans le kayak deux types d'écoulements, l'un autour du bateau et l'autre autour des palettes. Ils se distinguent dans le domaine de l'hydrodynamique navale par des caractéristiques très particulières (vitesse d'avance fluctuante et mouvements secondaires importants de la coque, écoulement très instationnaire et surface libre très complexe au niveau de la palette), et par des interactions fortes avec l'athlète.

Ainsi, modéliser le système global avec une précision suffisante reste à l'heure actuelle un défi scientifique mais un prérequis à la simulation de la performance (voire son optimisation), afin de pouvoir dégager une analyse pertinente des paramètres influents : la précision des simulations doit être en adéquation avec les gains recherchés (qui même s'ils restent limités, sont d'une importance fondamentale pour les sportifs).

Cet article synthétise la majeure partie d'un travail de recherche menée en ce sens, au cours du projet SOKA "Simulation et Optimisation de canoës-KAYaks" en collaboration avec l'INRIA Sophia-Antipolis et la Fédération de Canoë-Kayak, financé par l'INSEP et le Ministère de la Ville de la Jeunesse et des Sports. L'objectif scientifique principal de ce projet était de développer une procédure qui inclut des mesures expérimentales et des simulations numériques avancées de l'écoulement afin d'étudier l'influence de paramètres sur la vitesse de coque par la simulation numérique et d'aborder un travail d'optimisation.

Les différentes étapes effectuées avant d'entreprendre le travail d'optimisation seront détaillées, à savoir :

- l'utilisation de la base de données expérimentales de la cinématique de la coque pour générer un modèle simplifié périodique de cette cinématique pour une allure à pleine vitesse d'un K1 sur 200m,
- le calcul de l'écoulement autour de cette coque à cinématique imposée,
- l'évaluation a posteriori du torseur d'efforts de l'athlète sur sa coque.

La vérification de cette chaîne de calculs sera présentée en résolvant l'écoulement autour de cette même coque en mouvement résolu et soumise au chargement de l'athlète précédemment obtenu. Enfin, la procédure d'optimisation basée sur des simulations instationnaires en mouvement résolu sera décrite et des résultats seront présentés, en gardant à l'esprit que l'action du kayakiste sur la coque reste inchangée en dépit des modifications engendrées par les paramètres optimisés (position longitudinale de l'athlète, modification de forme,...). Cette non-prise en compte de l'adaptabilité de l'athlète aux modifications de son environnement est le point le plus critique quant à la validité des tendances observées.

## 2 Modélisation de la cinématique du K1

Après une première campagne expérimentale dans des conditions météorologiques mauvaises et avec une coque dont la description géométrique était très difficilement exploitable (triangulation de type STL issue d'une numérisation d'une coque existante), il a été décidé après discussion de refaire des mesures avec un athlète utilisant une coque dont la surface paramétrique (fichier de type IGES) a pu être fournie par le constructeur (voir figure 1a). Ce fichier a aussi nécessité un travail conséquent, mais maîtrisé, de correction et de simplification pour obtenir une surface paramétrique "propre" et exploitable par le logiciel de maillage (voir figure 1b).

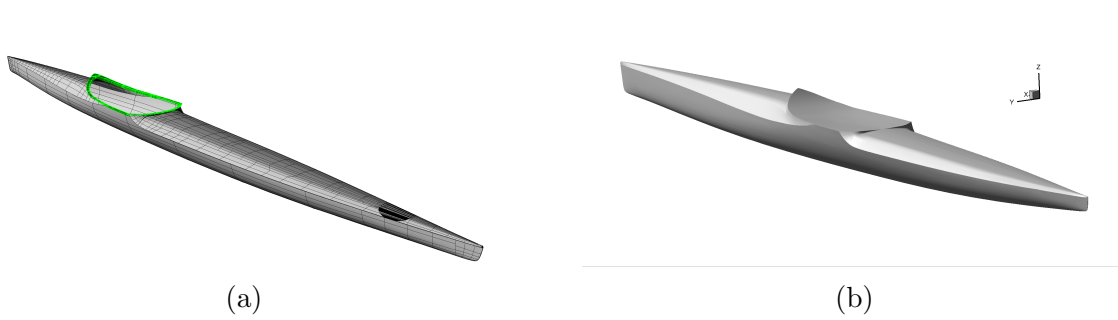


FIGURE 1 – (a) modèle CAO fourni par la fabricant , (b) modèle CAO retravaillé .



FIGURE 2 – (a) Acquisition vidéo lors de la campagne de mesure utilisée ,(b) Vitesse moyenne en fonction du temps — localisation de la zone d'étude.

Les données cinématiques ont été recueillies sur un entraînement cadence course de 200 m d'un kayakiste de niveau international entraîné par J.P. Crochet. Cette campagne de mesure, contrairement au premier essai préliminaire, s'est faite dans des conditions météorologiques très favorables (absence de vent et de vague, voir figure 2a). Trois centrales inertielles de type "Minimax" avaient été préalablement positionnées sur le bateau à 20 cm des pointes avant et arrière pour les deux premières ( $C_{av}$  et  $C_{ar}$ ) et au milieu à 2,1 m de la pointe arrière pour la dernière ( $C_m$ ), voir Fig. 3.

Des mesures redondantes ont pu ainsi être comparées, ce qui a donné un ordre de grandeur de la précision des mesures, non pas par rapport au réel mais entre les différents appareils de mesure. Cela a aussi permis de réévaluer de manière indirecte des signaux mesurés (par exemple, l'évaluation du tangage à partir des mesures d'accélération verticale des deux centrales inertielles positionnées aux extrémités).

Des mesures de masse à l'aide de deux balances de précision ont permis de mesurer la masse du bateau et la position longitudinale du centre de gravité ( $X_G = 0.07 m$ ). L'utilisation d'un outil dédié sur la CAO en faisant l'hypothèse d'une répartition uniforme de la masse sur toute la coque a permis de confirmer cette valeur et a permis d'évaluer la position verticale du centre de gravité de la coque seule ( $Z_G = -0.06m$ ) ainsi qu'une évaluation de sa matrice d'inertie en ce point.

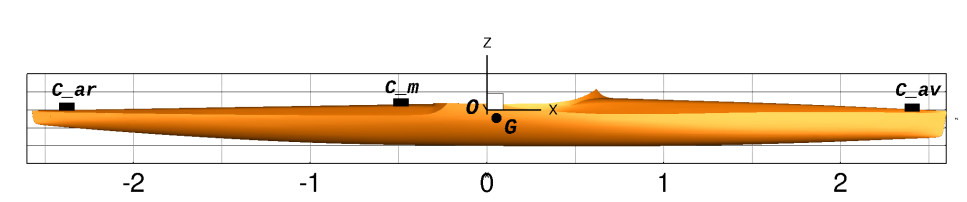


FIGURE 3 – Positionnement des capteurs  $C1, C2, C3$ , de l'origine des axes  $O$  et du centre de gravité  $G$ .

Dans un premier temps, les fichiers d’acquisition bruts issus des enregistrements des trois capteurs ont dû être synchronisés en se basant sur une variation brusque correspondant au départ de la course.

Ensuite, le traitement a consisté à obtenir une cinématique analytique périodique simplifiée (basée sur un ou deux modes) qui se cale au mieux sur les données expérimentales et qui soit représentative d’une cinématique d’un mouvement de corps rigide. La première contrainte a donc été de travailler dans une plage où la vitesse moyenne est la plus constante possible, puisque cette dernière devra nécessairement être constante dans la cinématique modélisée. On a donc concentré notre étude dans la zone autour de  $t = 15$  s, zone où les signaux semblent les plus ”périodiques”, exploitables et où la vitesse est sensiblement constante. La vitesse moyenne retenue est de  $6$  m/s (voir figure 2b).

Après un travail d’analyse pour examiner quels signaux étaient exploitables et quelles manipulations étaient nécessaires pour respecter les contraintes sur la cinématique idéalisée, (suppression des déviations basses fréquences de certains signaux, etc), une transformée de Fourier a été utilisée sur chaque signal pour extraire les amplitudes du premier et/ou du deuxième mode. Pour les signaux basés sur l’accélération, des intégrations successives ont été nécessaires (dans certains cas, le signal intégré a été retravaillé pour supprimer certains modes basses fréquences). L’exploitation de chaque transformée de Fourier a alors permis d’extraire une première série d’expressions sur chaque composante. Ces signaux analytiques ont ensuite été légèrement adaptés pour prendre en compte les contraintes de périodicité et de cohérence à respecter, à savoir :

- Roulis, lacet et déplacement latéral doivent être en phase et à moyenne nulle.
- Tous les degrés de liberté doivent être multiples d’une même fréquence nominale.
- Les signaux reconstruits ”Déplacement verticaux ( $A_v, A_r$ ) et tangage” et ”Déplacement latéral ( $A_v, A_r$ ) et lacet” doivent respecter la contrainte cinématique induite par l’hypothèse que la coque reste rigide.

## 2.1 Analyse et modélisation des degrés de liberté de rotation

Pour le roulis, la contrainte d’un mouvement modélisé parfaitement symétrique et périodique a nécessité d’imposer une moyenne nulle sur le signal analytique. La figure 4 montre que les signaux entre les trois dispositifs de mesure sont cohérents. Il n’y a donc pas eu de difficulté particulière pour ”idéaler” ce degré de liberté. Le modèle obtenu reproduit assez fidèlement une moyenne de l’ensemble des signaux, aux asymétries du pagayeur près (d’autant que ce mouvement de roulis est un degré de liberté ”instable” contrôlé par l’athlète).

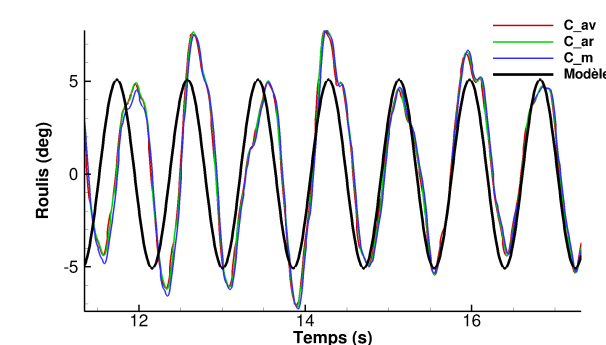


FIGURE 4 – Modélisation du roulis.

A contrario, le tangage est le degré de liberté de rotation qui a posé le plus de problème vis-à-vis de l'exploitation. En effet, on remarque que les différents dispositifs donnent des valeurs dont la moyenne dévie de manière incohérente alors que l'ensemble des signaux devrait rester cohérent, éventuellement à une constante près, due à l'orientation potentiellement différente sur la coque (cf. Fig. 5a). Les fluctuations semblent quant à elles cohérentes, au moins pour les capteurs avant et arrière. Le signal analytique a alors été basé sur une moyenne des signaux avant et arrière, auquel on a enlevé le signal moyen (cf. Fig. 5). L'angle moyen analytique  $\theta_m$  a été fixé par la suite (voir section 3.3.2).

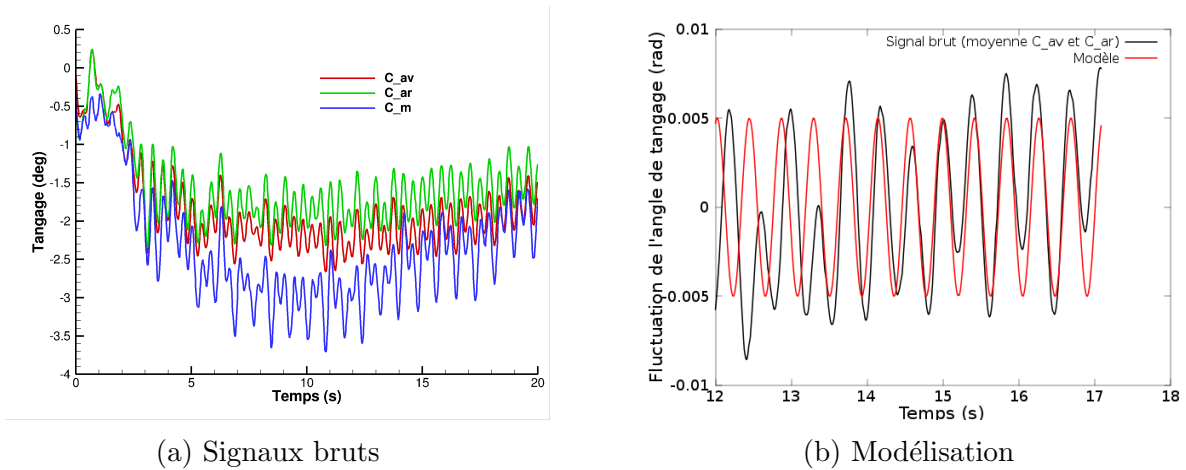


FIGURE 5 – Modélisation de l'angle de tangage.

Pour le lacet, on constate une déviation moyenne parasite des signaux au cours du temps, mais qui reste cohérente entre eux (mis à part le signal de la centrale du milieu qui est visiblement déficient), voir Fig. 6a. De toute façon, la contrainte d'une reconstruction périodique a nécessité de travailler avec un signal à moyenne nulle. L'évolution moyenne du cap a donc été enlevée pour traiter ce degré de liberté. La modélisation a été réalisée sur la base d'une moyenne des signaux avant et arrière. Celle-ci reproduit bien les fluctuations angulaires dans la plage temporelle considérée (cf. Fig. 6).

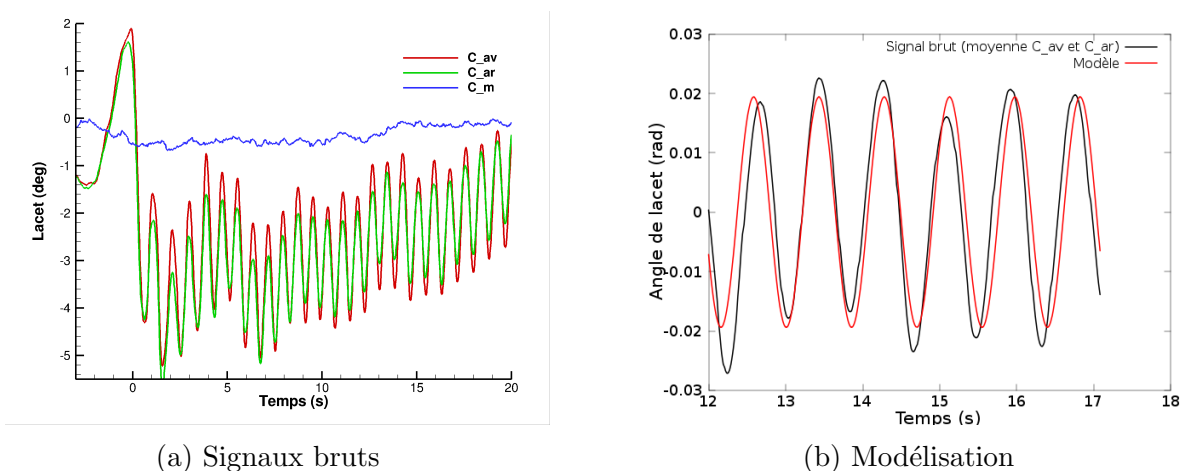


FIGURE 6 – Modélisation de l'angle de lacet.

## 2.2 Analyse et modélisation des degrés de liberté de translation

La mesure d'accélération suivant l'axe X nous a permis d'évaluer une fluctuation de vitesse d'avance simplifiée basée sur le premier harmonique que l'on a pu ajouter à la vitesse moyenne déduite précédemment (voir Fig. 7). Le contenu spectral des signaux expérimentaux d'accélération est plus riche que celui retenu. Cependant, la variation du mode principal est correctement capturée.

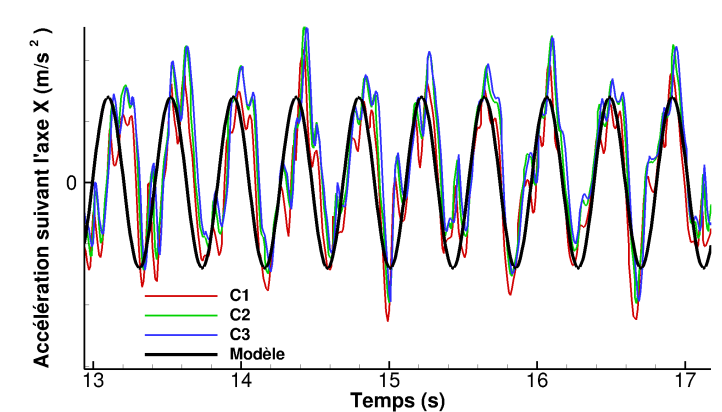


FIGURE 7 – Fluctuation de la vitesse d'avance — signaux capteurs et modèle analytique.

Pour le mouvement de translation latéral, une contrainte pour le signal analytique est qu'il soit à moyenne nulle : l'évolution moyenne du déplacement latéral donnée par les capteurs, qu'elle soit réelle ou bien due à une déficience du moyen de mesure, a donc dû être supprimée. En pratique, on est reparti du signal d'accélération que l'on a intégré en éliminant certaines basses fréquences et en imposant la contrainte de moyenne nulle. D'autre part, pour ce degré de liberté, le signal est différent suivant la position du dispositif de mesure, à cause du mouvement de lacet. Les signaux avant et arrière ont donc été exploités en ne s'intéressant qu'aux fluctuations (voir Fig. 8a et Fig. 8c). Après intégration, les déplacements issus des mesures brutes et du modèle sont au final en assez bon accord (voir Fig. 8b et Fig. 8d). Notons ici que les signaux analytiques sont ajustés de sorte que la cinématique de translation latérale avant et arrière soit cohérente avec la modélisation du lacet (voir Fig. 6).

La modélisation du degré de translation vertical a posé des problèmes d'une part car le signal de déplacement vertical transmis par les centrales possède une déviation irréaliste et d'autre part car la position verticale absolue par rapport à l'eau n'est pas connue. Nous avons donc utilisé le signal d'accélération brut des deux centrales positionnées aux deux extrémités ainsi que le signal de tangage pour obtenir une modélisation périodique de la variation du déplacement vertical (voir Fig. 9a et Fig. 9b), et cohérente vis-à-vis du mouvement de tangage afin de respecter la cinématique d'un mouvement de corps rigide pour la coque (cf. Fig. 9c). Le deuxième problème (position verticale moyenne du bateau par rapport à l'eau inconnue) sera abordé à la section 3.3.1.

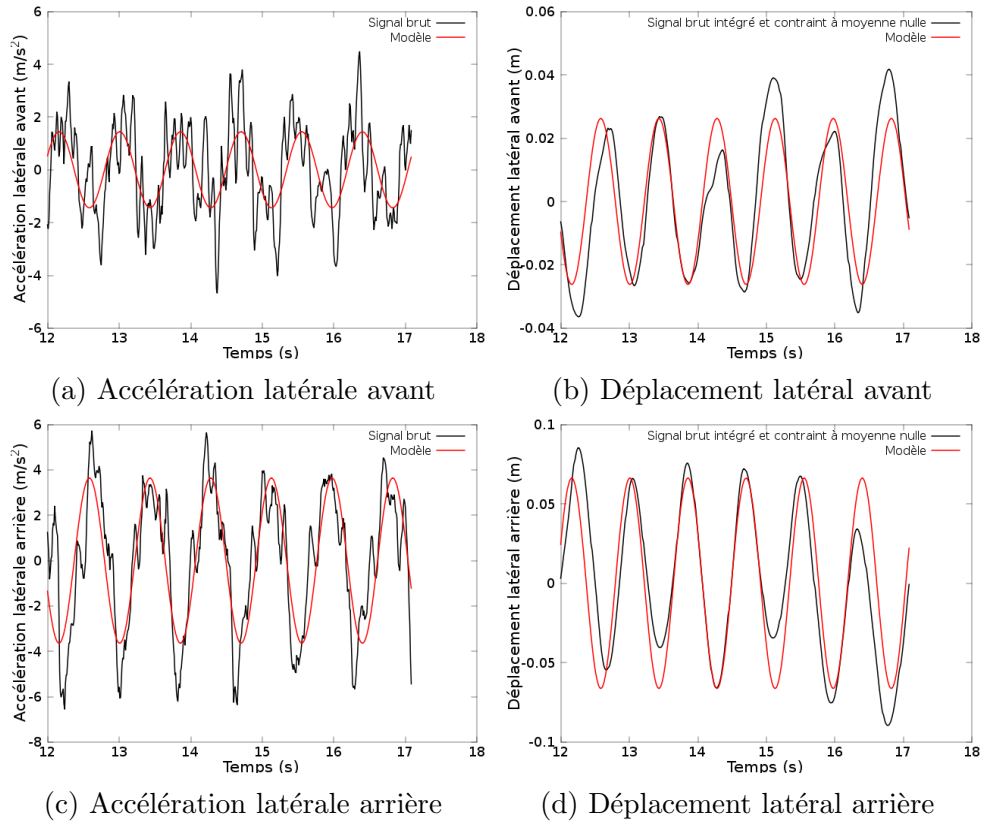


FIGURE 8 – Modélisation des signaux du mouvement latéral avant et arrière.

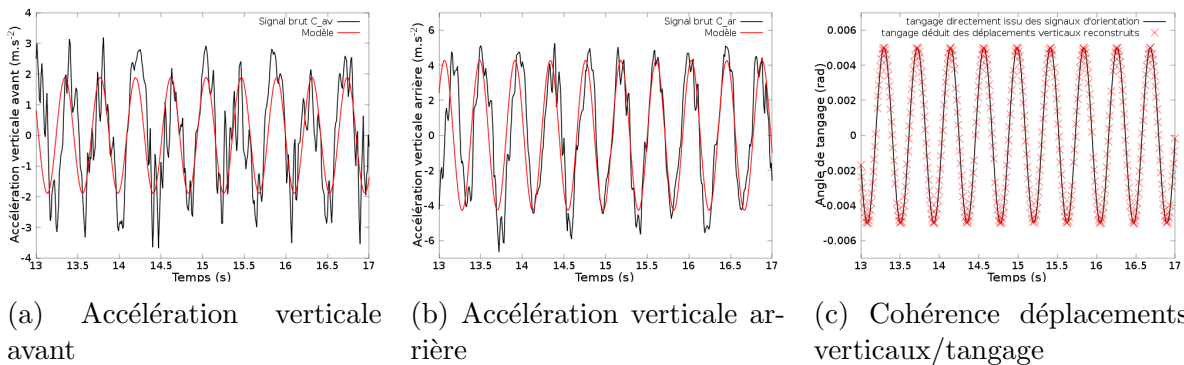


FIGURE 9 – Modélisation des déplacements verticaux avant et arrière et cohérence avec la modélisation du tangage.

### 3 Simulations numériques

#### 3.1 Description du solveur ISIS-CFD

La résolution fluide est assurée par le code de calcul ISIS-CFD, développé par l'équipe METHRIC du laboratoire LHEEA de l'ECN. Ce code est distribué par NUMECA International au sein de la suite FINE<sup>TM</sup>/Marine et développé principalement pour des applications navales. ISIS-CFD est basé sur une méthode volumes-finis sur maillages non-structurés et résout les équations de Navier-Stokes instationnaires en moyenne de Reynolds. Les configurations avec surface libre sont gérées par une méthode de capture d'interface. Une formulation ALE ("Arbitrary Lagrangian Eulerian") est utilisée pour prendre en compte les modifications du domaine spatial fluide, engendrées par les mouvement de corps [16].



Cette dernière est associée à une méthode de déformation de maillage rapide et robuste ([2]). Le schéma de discrétisation temporel est le schéma décentré BDF2 ("Backward Difference Formula of order 2"). À chaque pas de temps, une boucle interne est utilisée pour résoudre les non-linéarités du système et les différents couplages (couplages entre la vitesse, la pression, les quantités turbulentes, la fonction de présence,...). Le code est entièrement parallélisé par le biais du protocole MPI ("Message Passing Interface").

Dans le cas de mouvements résolus, le couplage entre la résolution de l'écoulement et celle des degrés de liberté de la structure se fait au sein de la boucle non-linéaire. Ce couplage est stabilisé en relaxant les équations du principe fondamental de la dynamique par un terme lié à la masse ajoutée ([2]) servant à rendre compte du comportement du fluide au cours de la résolution structure, en utilisant l'évaluation de la masse ajoutée décrite dans [3, 4].

### 3.2 Maillage et configuration

Après un travail conséquent de nettoyage de la surface paramétrique fournie par le constructeur, des maillages ont pu être générés par Hexpress<sup>TM</sup>. Un espace a été laissé entre la dérive et la coque pour faciliter les comparaisons d'efforts avec une configuration sans dérive (pas de problème lié à des calculs d'efforts sur des corps non-fermés) et pour faciliter le changement de forme de dérive (voir Fig. 10). La longueur de la coque  $L$  est d'environ 5 mètres, ce qui mène à un nombre de Reynolds nominal de  $2,6e7$  et un nombre de Froude de 0,85. La taille du domaine a une longueur de  $5L$ , une largeur de  $2,5L$ , et une hauteur de  $1,6L$ . Le milieu de la coque est située à  $1,6L$  de l'entrée du domaine et à  $1,2L$  du fond. Une condition de vitesse imposée est utilisée sur les côtés du domaine, tandis d'une condition de pression hydrostatique est imposée sur les faces hautes et basses. Dans la configuration avec dérive, le maillage contient 1,85 million de cellules (Fig. 10). Une loi de paroi est utilisée sur la coque avec  $y+ \approx 30$  pour la première couche. Le modèle  $k - \omega$ -SST de Menter ([5]) est utilisé pour toutes les simulations. Le temps physique de simulation requis pour calculer l'écoulement de la coque correspondant à une période (un coup de pagaie complet) est d'environ une heure et quart en utilisant 24 coeurs. Une douzaine de périodes ont été nécessaires pour atteindre une solution périodique.

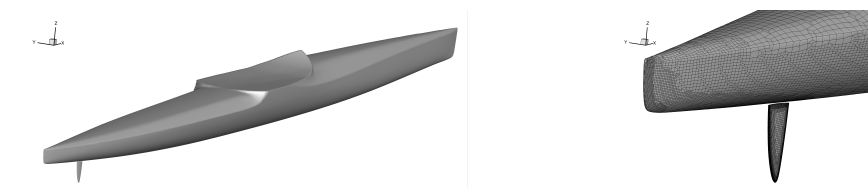


FIGURE 10 – (a) Vue générale de la configuration avec dérive; (b) zoom autour de la dérive avec le maillage de surface.

### 3.3 Simulations à cinématique imposée

Le travail précédemment décrit à la section 3 a permis d'obtenir un modèle cinématique analytique et périodique au point origine  $O$  du bateau. Pour faciliter la poursuite du travail et notamment les simulations à mouvement résolu (section 3.4), la cinématique a été évaluée et imposée au centre de gravité  $G$  (défini à la section 3) mais où deux paramètres restent indéterminés : la position verticale moyenne du bateau par rapport à l'eau ( $z_m$ ) et du tangage moyen ( $\theta_m$ ).

### 3.3.1 Procédure d'obtention de la position verticale moyenne du bateau par rapport à l'eau ( $z_m$ )

Le tangage étant considéré fixé, la hauteur moyenne du bateau a pu être obtenue pour chaque simulation en étendant la procédure de mise en équilibre dynamique par une quasi-statique décrite dans [6] à des configurations périodiques. Pour cela, la modification d'enfoncement est calculée à partir d'une moyenne glissante des efforts fluides verticaux correspondant à la dernière demi-période effectuée, l'enfoncement ayant une fréquence double par rapport au mouvement global. La correction d'enfoncement est appliquée sur une rampe d'un quart de période et la fréquence d'évaluation correspond à la fréquence du mouvement global jusqu'à un état convergé, où en moyenne les efforts fluides verticaux sur la coque compensent exactement le poids de l'embarcation, ayant fait l'hypothèse d'une action verticale moyenne des pagaies négligeable.

### 3.3.2 Obtention du tangage moyen ( $\theta_m$ )

A défaut d'autres moyens de mesure fiables, le tangage moyen a été calibré en effectuant une série de calculs à différents  $\theta_m$ , puis en choisissant la configuration la plus proche du positionnement de la pointe avant observée visuellement en comparaison avec la vidéo disponible de la campagne de mesures et au retour des entraîneurs. Au final, le tangage moyen a été fixé à  $1,75^\circ$  (voir Fig. 11). La figure Fig. 12 donne une représentation de la surface issue de cette simulation.

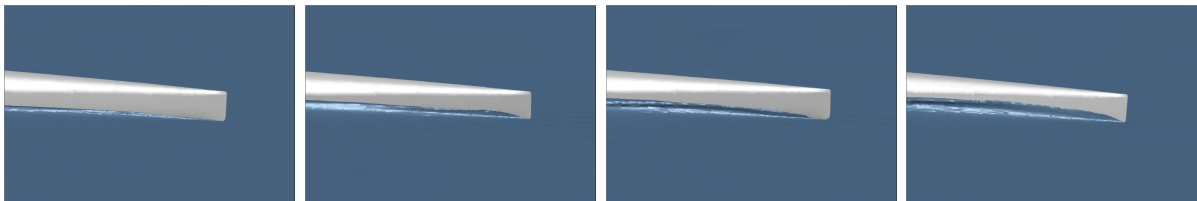


FIGURE 11 – Visualisation de l'extrémité avant à différents instants pour le tangage moyen de  $1,75^\circ$ .

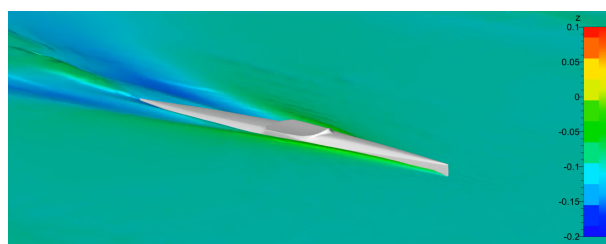


FIGURE 12 – Visualisation de la surface libre issue de la configuration à mouvement imposé (5ddl), l'enfoncement étant résolu dynamiquement par une procédure dédiée (section 3.3.1).

## 3.4 Simulations à efforts imposés

L'objectif ici est de réaliser des calculs en imposant non plus la cinématique du bateau mais uniquement un modèle d'efforts reproduisant l'action de l'athlète sur la coque. Celui-ci va être reconstruit à partir des efforts fluides sur la coque issus de la simulation à cinématique imposée et du principe fondamental de la dynamique appliqué à la coque.

### 3.4.1 Reconstruction du torseur d'efforts à imposer

La simulation décrite à la section 3.3 nous a donné accès au torseur d'effort fluide sur la bateau en  $G$  noté  $\{\mathcal{T}(f \rightarrow b)\}_G$ . En considérant le système mécanique bateau  $b$ , l'application du principe fondamental de la dynamique par rapport au repère terrestre  $\mathcal{R}_0$  considéré comme Galiléen permet d'écrire :

$$\{\mathcal{D}(b/\mathcal{R}_0)\}_G = \{\mathcal{T}(f \rightarrow b)\}_G + \{\mathcal{T}(k \rightarrow b)\}_G + \{\mathcal{T}(g \rightarrow b)\}_G \quad (1)$$

où  $\{\mathcal{D}(b/\mathcal{R}_0)\}_G$  désigne le torseur dynamique du bateau en  $G$ ,  $\{\mathcal{T}(g \rightarrow b)\}_G$  le torseur d'effort en  $G$  dû à la gravité et  $\{\mathcal{T}(k \rightarrow b)\}_G$  le torseur mécanique du kayakiste sur le bateau également en  $G$ . Ce dernier torseur est celui recherché afin d'effectuer des simulations à torseur d'effort imposé. La cinématique étant imposée, l'expression de  $\{\mathcal{D}(b/\mathcal{R}_0)\}_G$  peut être déterminée connaissant les caractéristiques inertielles du bateau. On cherche donc à reconstruire une expression analytique et périodique de  $\{\mathcal{T}(k \rightarrow b)\}_G$  en utilisant la relation :

$$\{\mathcal{T}(k \rightarrow b)\}_G = \{\mathcal{D}(b/\mathcal{R}_0)\}_G - \{\mathcal{T}(f \rightarrow b)\}_G - \{\mathcal{T}(g \rightarrow b)\}_G \quad (2)$$

Le torseur d'effort fluide sur le bateau est un résultat de simulation. Il est donc connu numériquement à chaque pas de temps fluide. On peut déterminer la valeur numérique de  $\{\mathcal{D}(b/\mathcal{R}_0)\}_G$  à ces mêmes pas de temps pour former dans un premier temps une expression numérique de  $\{\mathcal{T}(k \rightarrow b)\}_G$ . Une analyse de Fourier a ensuite été effectuée pour obtenir une synthétisation périodique et analytique de ce signal qui a servi de donnée d'entrée aux simulations à efforts imposés. Une illustration pour la résultante suivant l'axe Y et pour le moment selon l'axe Z est donnée Fig. 13 .

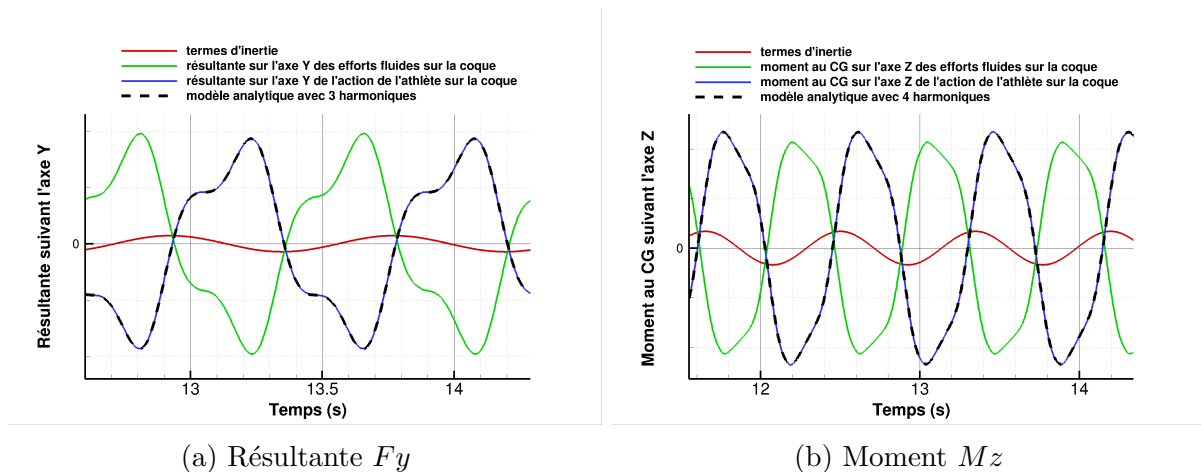


FIGURE 13 – Visualisation des termes d'inertie, des effort fluides sur la coque, de l'action globale de l'athlète sur la coque et de sa reconstruction analytique pour la résultante suivant l'axe Y et le moment au centre de gravité suivant l'axe Z.

### 3.4.2 Simulations et comparaison à la configuration à cinématique imposée

Des simulations ont pu alors être menées en imposant le torseur d'efforts. Seul le roulis a été imposé car il correspond à une degré de liberté instable et contrôlé par l'athlète. Un correcteur de cap a aussi été ajouté afin que la vitesse d'avance coque reste toujours en moyenne suivant l'axe X. La cinématique périodique obtenue avec cette approche à mouvement résolu se confond parfaitement avec la cinématique utilisée initialement, ce qui permet de vérifier l'absence de problèmes dans la démarche.

## 4 Optimisation

### 4.1 Approche proposée

Compte-tenu du temps de calcul de chaque estimation de la performance et de la complexité du processus de simulation, on adopte pour l'optimisation une méthode d'apprentissage statistique connue sous le nom d'EGO (Efficient Global Optimisation). L'algorithme s'organise selon deux étapes distinctes :

1. Construction d'un plan d'expérience regroupant un ensemble de simulations correspondant à différents jeux de paramètres. Une distribution classique de type hypercube latin est utilisée ici.
2. Enrichissement itératif de la base de données, basé sur un critère de maximisation de l'amélioration probable liée à une modélisation statistique de type Kriging.

Les détails algorithmiques sont fournis dans [7, 8].

### 4.2 Illustration : optimisation de la position du kayakiste

Pour optimiser la performance de l'athlète, on propose une première étude consistant à modifier la position de ce dernier dans le kayak. Compte-tenu du modèle adopté, cela revient à modifier le point d'application du torseur d'effort appliqué au kayak. On prend donc en compte un unique paramètre d'optimisation, qui est la position longitudinale du point d'application (mesurée relativement à une position de référence utilisée précédemment).

Le critère d'optimisation à maximiser est la vitesse moyenne au cours du temps, dans la direction moyenne de progression du kayak. Cette grandeur est calculée par intégration temporelle de la vitesse instantanée pendant quatre périodes de mouvement. Simultanément, une mesure de variance est réalisée par moyenne glissante, qui permet de quantifier le caractère bruité du critère d'optimisation et prendre en compte cette information lors de l'optimisation. Chaque nouvelle simulation est menée en effectuant une reprise à partir de la simulation de référence. Enfin, on considère des contraintes de bord, l'optimisation étant réalisée dans un intervalle autour de la position de référence.

Pour ce problème à un seul paramètre, cinq valeurs sont estimées initialement, réparties uniformément sur l'intervalle de recherche, constituant le plan d'expérience initial. L'évolution de la vitesse moyenne selon la position de l'athlète est donnée par la figure 14. Seules deux configurations ont été ajoutées suite au plan d'expérience, étant donné l'évolution très régulière de la performance.

On constate que le modèle statistique construit ne présente que peu d'incertitude dans la zone optimale et croît dans les zones extérieures, à cause de l'absence de simulations et à la variance des mesures de la vitesse moyenne. L'évolution temporelle de la vitesse est donnée à la figure 15. On souligne que la position optimisée permet d'obtenir une vitesse instantanée supérieure à tous les instants du mouvement, mais c'est la vitesse maximale qui est principalement augmentée. L'effet principal du changement de position est la modification de l'angle de tangage du kayak, comme montré à la figure 15. Une simulation additionnelle a été réalisée à cinématique imposée pour ce nouvel angle de tangage moyen, pour vérifier qu'on obtient bien une réduction de traînée lorsqu'on modifie l'angle de tangage, comme trouvé par l'optimisation.

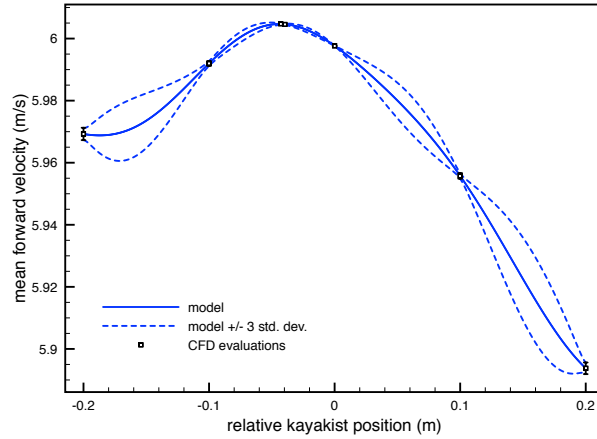


FIGURE 14 – Evolution de la vitesse moyenne selon la position de l’athlète.

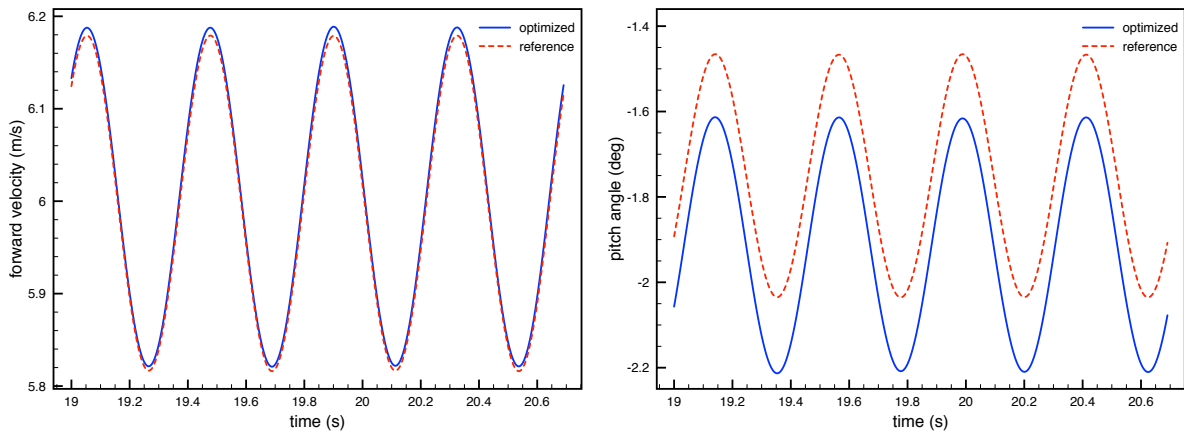


FIGURE 15 – Evolution de la vitesse et de l’angle de tangage au cours du temps pour la position de référence (tirets rouges) et optimisée (ligne bleue).

## 5 Bilan

Au cours de ce projet, on a pu apporter des réponses à différentes questions posées par l’encadrement technique, et notamment quantifier avec confiance la performance d’une autre forme de dérive envisagée pour les Jeux Olympiques de Rio, du fait que les deux dérives engendraient des comportements similaires de la coque. Croisés avec le ressenti des athlètes, ce travail a permis à l’encadrement technique d’étayer avec plus de confiance leur choix. Malgré le manque de précision dans les signaux expérimentaux, la démarche poursuivie a permis de reconstruire une cinématique réaliste et d’en déduire un torseur d’effort global de l’athlète sur sa coque, vérifié par une simulation à mouvement résolu. L’influence de quelques paramètres a pu être étudiée par une méthode d’optimisation qui limite le nombre de calculs CFD à réaliser.

Cependant, pour aller au-delà dans l’optimisation de la performance, l’approche développée dans ce projet semble au final insuffisante pour donner avec certitude des tendances pertinentes, dans un contexte où le système est déjà proche de l’optimum : de même que l’optimisation à cinématique imposée n’est pas sensible aux changements de l’environnement puisque la cinématique reste figée, l’optimisation à mouvement résolu utilise un modèle de torseur d’efforts de l’athlète invariant aux changements de son environnement. Or, l’interaction de l’athlète avec le système (coque, pagaie,...) et son adaptabilité aux

modifications de comportement du système est un point crucial à considérer, même si sa modélisation n'est en rien trivial. Un travail plus poussée de validation de l'écoulement sur cette configuration particulière serait aussi à mener, mais le manque de données fines et précises sur ce genre de dispositif met de fait cette tâche en suspens.

## Remerciements

Le travail présenté est issu du projet SOKA financé par l'INSEP et le Ministère de la Ville de la Jeunesse et des Sport. Ces travaux ont bénéficié d'un accès aux moyens de calcul du CINES au travers de l'allocation de ressource 2015-2a20129 de GENCI (Grand Equipement National de Calcul Intensif).

## Références

- [1] A. Leroyer, S. B. an J. Wackers, J.-M. Kobus, and P. Queutey, “Vers le calcul des efforts sur les palettes d'aviron en fonctionnement réel : les étapes de validation et de mise au point des outils numériques et expérimentaux,” in *12èmes Journées de l'Hydrodynamique*, (Nantes), Novembre 2010.
- [2] A. Leroyer, *Etude du couplage écoulement/mouvement pour des corps solides ou à déformation imposée par résolution des équations de Navier-Stokes. Contribution à la modélisation numérique de la cavitation*. PhD thesis, Ecole Centrale Nantes, December 2004.
- [3] C. Yvin, *Interaction fluide-structure pour des configurations multi-corps. Applications aux liaisons complexes, lois de commande d'actionneur et systèmes souples dans le domaine maritime*. PhD thesis, Ecole Centrale de Nantes, 2014.
- [4] A. Leroyer, C. Yvin, E. Guilmineau, M. Visonneau, and P. Queutey, “Efficient fsi codes coupling with possible large added mass effects : applications to rigid and elongated flexible bodies in the maritime field,” in *VI International Conference on Computational Methods for Coupled Problems in Science and Engineering COUPLED PROBLEMS 2015* (E. O. B. Schrefler and M. Papadrakakis, eds.), 2015.
- [5] F. Menter, “Zonal two-equation  $k-\omega$  turbulence models for aerodynamic flows, 1993,” *AIAA paper*, pp. 96–2906, 1993.
- [6] A. Leroyer, J. Wackers, P. Queutey, and E. Guilmineau, “Numerical strategies to speed up cfd computations with free surface—application to the dynamic equilibrium of hulls,” *Ocean Engineering*, vol. 38, no. 17-18, pp. 2070 – 2076, 2011.
- [7] R. Duvigneau and P. Chandrashekar, “Kriging-based optimization applied to flow control,” *Int. J. for Numerical Methods in Fluids*, vol. 69, no. 11, pp. 1701–1714, 2012.
- [8] R. Duvigneau, J. Labroquère, and E. Guilmineau, “Comparison of turbulence closures for optimized active control,” *Computers & Fluids*, pp. 67–77, January 2016.