



HAL
open science

Étude hydrodynamique des courses de natation en eau libre

Baptiste Bolon

► **To cite this version:**

Baptiste Bolon. Étude hydrodynamique des courses de natation en eau libre. Mécanique des fluides [physics.class-ph]. École des Ponts ParisTech, 2024. Français. ⟨NNT : 2024ENPC0023⟩. ⟨tel-04971784⟩

HAL Id: tel-04971784

<https://pastel.hal.science/tel-04971784v1>

Submitted on 28 Feb 2025

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.



HAL Authorization

Étude hydrodynamique des courses de natation en eau libre

École doctorale Sciences Ingénierie et Environnement (SIE)

Mécanique des fluides

Thèse préparée au Laboratoire d'Hydraulique Saint-Venant (LHSV,
École Nationale des Ponts et Chaussées)

Thèse soutenue le 17 Octobre 2024, par
Baptiste BOLON

Composition du jury:

Jerry, WESTERWEEL
Professeur, TU Delft

Président

Christophe, BAILLY
Professeur, École Centrale de Lyon

Rapporteur

Philippe, ODIER
Maître de conférence, École Normale Supérieure Lyon

Rapporteur

Céline, LEVERRIER
CTS, Fédération Française de Natation

Examinatrice

Laëtitia, PERNOD
Chercheuse, École Centrale de Nantes

Examinatrice

Frédérique, LARRARTE
Directrice de recherche, Université Gustave Eiffel

Directrice de thèse

Christophe, CLANET
Directeur de recherche, École Polytechnique

Co-directeur de thèse

Rémi, CARMIGNIANI
Chercheur HDR, École Nationale des Ponts et
Chaussées

Co-directeur de thèse

Remerciements

Je souhaite en premier lieu remercier Jerry Westerweel, pour avoir accepté de présider mon jury de thèse et dont les travaux ont été une source d'inspiration pour notre étude du drafting en natation. Un grand merci également à Christophe Bailly et Philippe Odier d'avoir accepté le rôle de rapporteur. Merci aussi à Céline Leverrier de représenter la Fédération Française de Natation. Je remercie aussi vivement Laetitia Pernod pour sa présence au sein de ce jury.

Merci à l'ANR NePTUNE et à l'École des Ponts pour le financement de ce projet. Un grand merci à Dalida Chartrel pour son aide dans les démarches d'obtention de cette thèse par Validation des Acquis d'Expérience. Merci à Albertine Fouala-Kimpa pour son aide logistique à la fois pour les commandes de matériel mais aussi l'organisation des déplacements en conférences, école d'été et compétitions de natation.

Je veux remercier aussi l'ensemble des membres de la Fédération Française de Natation et de la Fédération Française de Triathlon avec qui j'ai pu collaborer : Robin Pla, Stéphane Leca, Benjamin Tranchard, Céline Leverrier et Sébastien Libicz. Merci pour les discussions constructives et la confiance accordée.

Merci à tous ceux que j'ai pu croiser lors de ces 4 années de travail au sein du Laboratoire d'Hydraulique Saint-Venant. En particulier, merci à Nicole Goutal pour son accueil lors de mon arrivée au laboratoire en Septembre 2020. Merci à Sébastien Boyaval et Sébastien Bourban pour la gestion des questions administratives durant ma période au sein du laboratoire.

Un grand merci à l'ensemble de l'équipe du POMPHY du site EDF Lab de Chatou, en particulier Kévin Botten, Nicolas Guéguen, Clément Leroux, Franck Lebert et Clément Buvat. Merci pour le temps passé à m'apprendre le fonctionnement des canaux et pour votre aide technique pour résoudre les problèmes techniques rencontrés.

Je souhaite ensuite remercier Charlie, pour m'avoir permis de collaborer avec toi et partagé tes résultats de mesures de traînée passives de nageur qui m'ont permis de concevoir mes modèles réduits. Merci à Thomas, pour les discussions et les déplacements partagés en école d'été et en conférences. J'espère que la fin de ta thèse se passera pour le mieux, mais je ne suis pas inquiet. Merci à Jeanne, pour ton efficacité lors de ton stage sur la dépense énergétique optimale des nageurs.

Un grand merci à Frédérique, pour avoir accepté d'être ma directrice de thèse mais aussi pour tes remarques bienveillantes, lors des réunions hebdomadaires, qui m'ont permis d'apprendre à mieux présenter et expliquer mes résultats.

Je remercie également fortement Christophe. Tu as été le premier à essayer de me convaincre de faire une thèse. Merci pour les conseils scientifiques avisés et les idées suggérées pour faire avancer mon travail.

Un gigantesque merci à Rémi. Merci de m'avoir permis de travailler au sein de ce projet, de m'avoir accordé ta confiance. Merci pour ta disponibilité et ton aide de tous les instants. Merci de m'avoir fait connaître l'existence de la thèse par VAE et pour ton soutien dans les démarches.

Je souhaite vivement remercier tous mes amis de la bande du lycée. Merci d'être à mes côtés depuis tant d'années. Je ne serais pas la personne que je suis aujourd'hui sans vous.

Merci à mes parents, qui ont été les grands artisans du parcours qui m'a amené ici aujourd'hui. Merci de m'avoir mis dans les meilleures conditions pour que je puisse réussir. Merci à mes deux soeurs, pour tous les moments partagés et votre soutien sans faille. Merci à mes grands-parents pour l'amour que vous me portez. Une grande pensée pour Papizoune, qui j'en suis sûr, aurait été fier de moi. Je vous aime tous.

Merci à Camille. Merci de partager ma vie et de me soutenir au quotidien. Tu fais de moi une meilleure personne. Je t'aime. J'ai hâte de voir ce que la vie nous réserve.

Résumé

Ce travail présente une étude physique des courses de natation en eau libre. Deux grands sujets sont abordés. D'abord, nous étudions les interactions entre nageurs (drafting), dans des configurations de nage à 2 athlètes et en peloton. Grâce à des mesures expérimentales et des calculs numériques, nous sommes capable d'évaluer l'impact de la position relative des nageurs sur la force de traînée qu'ils subissent. Ces résultats nous permettent de proposer une trajectoire optimale de dépassement. Ensuite, nous nous intéressons à l'impact des courants de la Seine sur la stratégie à mener lors de la course des Jeux Olympiques de Paris. Nos travaux montrent qu'il existe une trajectoire optimale le long du parcours, qui permet, en profitant des courants favorables et en évitant les courants les plus défavorables, de minimiser le temps de course d'un nageur. De même, il existe aussi une stratégie optimale de dépense énergétique qui permet à un nageur de minimiser son temps de course.

Mots-clés : Natation, Drafting, Gestion de course, Optimisation, Stratégie

Abstract

This works present an hydrodynamic study of open-water swimming races. It is divided in 2 parts. Firstly, we study the interactions between swimmers (called drafting) in groups of 2 or more athletes. Thanks to experimental measurements and Computational Fluid Dynamics calculations, we are able to determine the impact of the relative position of swimmers on the drag they face. Those results allow us to compute an optimal trajectory to overtake an opponent. Secondly, we determine the impact of the currents, in the Seine river, on the strategy to use during the Paris Olympic Games. Our work proves the existence of an optimal trajectory along the path of the race. By making the most of advantageous currents and by avoiding adverse ones, it minimizes the race duration for an isolated swimmer. We also show the existence of an optimal way to spend energy during the race.

Keywords : Swimming, Drafting, Race management, Optimization, Strategy

Table des matières

Introduction	6
1 Chapitre 1 : Dispositif expérimental et numérique pour l'étude des interactions entre nageurs	13
1.1 Moyens expérimentaux	13
1.2 Mesures de la vitesse de l'écoulement	18
1.3 Mesures de force de traînée	22
1.4 Modèles réduits de nageurs	25
1.5 Modèle numérique	27
2 Chapitre 2 : Étude des interactions entre 2 nageurs	31
2.1 Mesure de traînée pour un nageur et influence de la profondeur d'immersion	31
2.2 Nage en ligne	33
2.3 Nage côte à côte	38
2.4 Forces transversales	44
3 Chapitre 3 : Étude des interactions entre nageurs formant un peloton	47
3.1 Peloton en « flèche »	47
3.2 Pelotons à deux nageurs de front	52
3.3 Peloton en file indienne	59
3.4 Peloton de 3 nageurs nageant de front	64
3.5 Discussion : est-il possible d'obtenir les résultats mesurés dans des pelotons à partir des résultats obtenus pour 2 nageurs dans le chapitre 2?	66
3.5.1 Méthode	67
3.5.2 Comparaison aux résultats expérimentaux	67
4 Chapitre 4 : Optimisation du dépassement dans une situation à 2 nageurs	73
4.1 Modèle physique et hypothèses	73
4.2 Méthode d'optimisation : algorithme génétique	75
4.3 Influence des paramètres du modèle	76
4.4 Trajectoire optimale de dépassement	81
4.4.1 Modèle de propulsion à force constante	81
4.4.2 Modèle de propulsion à puissance mécanique constante	83
4.5 Etude du « burst » de puissance	88
4.6 Discussion autour d'un modèle simplifié d'optimisation	90
5 Chapitre 5 : Optimisation spécifique à la course des Jeux Olympiques de Paris dans la Seine	96
5.1 Optimisation de la trajectoire de course	97
5.1.1 Modélisation de la situation étudiée : courants dans la Seine, modèle physique et méthodes.	97
5.1.2 Résultats pour le parcours de natation	99
5.1.3 Résultats pour le parcours de triathlon	105
5.2 Optimisation de la dépense énergétique durant la course	107
5.2.1 Modèle physique et énergétique	107
5.2.2 Résultats	110
5.3 Conclusion du chapitre 5	113
Conclusions	114
Perspectives	116
Annexes	117

A	Répétabilité des résultats entre les 2 canaux utilisés	117
B	Influence du nombre de Reynolds sur le coefficient de traînée	119
C	Analyse d'erreur sur la mesure expérimentale du coefficient de traînée	120

Introduction

Contexte de la thèse

La natation en eau libre consiste, par opposition à la nage en bassin, en une course de nage en milieu naturel. L'épreuve peut avoir lieu en lac, en mer ou en rivière. Aux premiers Jeux Olympiques modernes à Athènes en 1896, les épreuves de natation sont uniquement des courses en eau libre, principalement pour des raisons budgétaires. Il en est de même pour les Jeux de Paris en 1900 (le départ d'une des épreuves est visible sur la figure 1) et ceux de Saint-Louis (États-Unis) en 1904. Lors de ces olympiades, l'épreuve la plus longue se dispute sur une distance de 4000 mètres. Les premières épreuves en bassin apparaissent en 1908 à Londres (Angleterre). La natation en eau libre disparaît alors du programme olympique pour ne réapparaître qu'en 2008 aux Jeux de Pékin (Chine), sur une distance de 10 kilomètres.



FIGURE 1 – Départ du 4000 mètres nage libre des Jeux Olympiques de Paris en 1900. [1]

Lors d'une course de natation en eau libre, les nageurs partent côte à côte depuis un ponton (soit en plongeant, soit en étant déjà dans l'eau), puis suivent un parcours délimité par des bouées autour desquelles ils doivent tourner. Généralement, une course est constituée de plusieurs répétitions d'une même boucle, permettant ainsi aux nageurs de pouvoir se ravitailler dans une zone dédiée à cet effet : ils peuvent attraper des gourdes tendues via des perches par leur entraîneur, comme le montre la figure 2c. A l'arrivée, les nageurs doivent poser leur main sur une plaque chronométrique (mise en valeur par le cadre rouge sur la figure 2d) afin de déterminer leur temps exact de course. Ces moments clés de la course sont regroupés sur la figure 2.

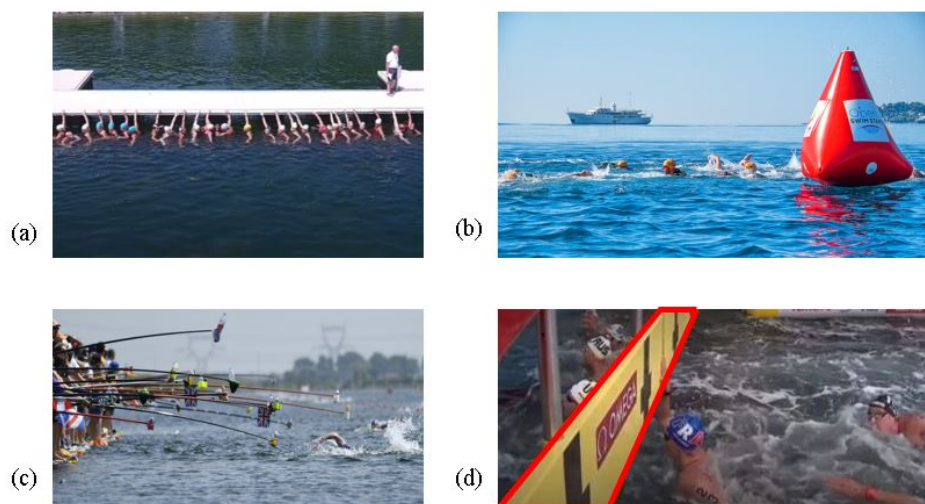


FIGURE 2 – Moments clés d'une course de natation en eau libre. (a) Départ groupé depuis le ponton. [2] (b) Passage autour d'une bouée délimitant le parcours à suivre. [3] (c) Ravitaillement. [4] (d) Arrivée. [5]

La natation en eau libre est une course d'endurance. En effet, les épreuves aux championnats d'Europe et du monde se font sur des distances de 5, 10 et 25 kilomètres, ce qui représente respectivement environ 1, 2 et 5 heures d'effort pour des athlètes de très haut niveau. Seule l'épreuve du 10 kilomètres, appelée « natation marathon », est au programme des Jeux Olympiques.

Édition	Temps du vainqueur	Écart or-argent	Écart or-bronze	Écart bronze-4ème
Pékin 2008	1 h 51 min 51,6 s	+1,5 s	+2,0 s	+13,9s
Londres 2012	1 h 49 min 55,1 s	+3,4 s	+5,2 s	+5,0 s
Rio 2016	1 h 52 min 59,08 s	+0,00 s	+2,92 s	+0,00 s
Tokyo 2021	1 h 48 min 33,7 s	+25,3 s	+26,4 s	+23,8 s

TABLE 1 – Temps du vainqueur et écarts lors de l'épreuve olympique du 10 kilomètres en eau libre hommes depuis le retour de l'épreuve au programme olympique en 2008. [6, 7, 8, 9]

Édition	Temps de la gagnante	Écart or-argent	Écart or-bronze	Écart bronze-4ème
Pékin 2008	1h 59min 27,7s	+2,0s	+3,3s	+0,9s
Londres 2012	1h 57min 38,2s	+0,4s	+3,6s	+0,4s
Rio 2016	1h 56min 32,10s	+17,4s	+19,3s	+23,0s
Tokyo 2021	1h 59min 30,8s	+0,9s	+1,7s	+2,3s

TABLE 2 – Temps du vainqueur et écarts au premier de l'épreuve olympique du 10 kilomètres en eau libre femmes depuis le retour de l'épreuve au programme olympique en 2008. [6, 7, 8, 9]

D'après les tableaux 1 et 2, nous observons qu'en dépit de la longueur de l'épreuve olympique, la victoire et le podium se jouent souvent à la seconde près, les nageurs se départageant au sprint en fin de course. Face à ces écarts infimes, chaque détail compte et doit être optimisé afin d'augmenter les chances de médaille des athlètes. Suite à l'attribution des Jeux Olympiques et Paralympiques 2024 à Paris, l'ambition affichée est alors que la France rentre dans le top 5 des meilleurs pays dans le tableau des médailles. Cela revient à doubler le nombre de médailles d'or obtenues par rapport aux précédentes olympiades. Un autre objectif ambitieux est celui de doubler le nombre total de médailles obtenues par les athlètes français, passant ainsi d'environ 40 médailles à 80. Pour relever un tel défi, et au vu des faibles écarts de performances entre une médaille et une quatrième place, l'idée a été de mettre la science au service de la performance des athlètes français. C'est ainsi qu'est né, en Septembre 2018, le projet Sciences 2024 [10]. Ce projet de recherche, regroupant des grandes écoles et des universités françaises vise à répondre de manière scientifique à des questions de terrain posées par les sportifs et les entraîneurs de nombreuses disciplines olympiques. Au sein de Sciences 2024, le projet Natation et Paranatation : Tous Unis pour Nos Élites (NePTUNE) s'intéresse à l'optimisation de la performance des nageurs français, à la fois en bassin et en eau libre. C'est au sein de ce projet que s'inscrit cette thèse.

Objectifs de la thèse

Les objectifs de la thèse correspondent aux questions définies en amont par les entraîneurs et les référents scientifiques des équipes de France de natation et de triathlon. Ces questions se découpent en deux thèmes principaux : l'étude des interactions entre les nageurs et l'optimisation stratégique de la course des Jeux Olympiques dans la Seine. Les grandes questions auxquelles nous chercheront à répondre dans ce manuscrit sont les suivantes : Comment quantifier les interactions entre les nageurs ? Comment profiter du sillage des autres nageurs afin de s'économiser pendant la course ? Quelle stratégie adopter (gestion de l'énergie, trajectoire) lors de la course des Jeux Olympiques en fonction des courants dans la Seine ?

Plan de la thèse

Afin de répondre aux questions précédemment posées, nous nous consacrerons dans un premier temps à l'étude des interactions entre nageurs. Cette étude est composée de 3 chapitres : dans le premier, nous

décrivons les moyens expérimentaux et numériques qui nous ont permis d'étudier les interactions entre nageurs. Dans un second chapitre, nous présenterons les résultats de cette étude pour des configurations de 2 nageurs. Le chapitre 3 se consacrera à l'étude des interactions au sein d'un peloton de nageurs. Dans un second temps, nous nous attacherons à l'optimisation de différentes phases et paramètres de la course : dans le quatrième chapitre, nous nous intéresserons à l'optimisation de la trajectoire de dépassement en se basant sur les résultats du chapitre 2. Enfin, le dernier chapitre sera consacré à l'optimisation stratégique de la course des Jeux Olympiques de Paris. Les résultats du chapitre 2 ont fait l'objet d'une publication scientifique dans le journal *Physical Review Fluids* [11].

État de l'art

Dans la nature, les animaux ont appris à se déplacer, nager ou voler dans des configurations particulières qui leur permettent de réduire la consommation d'énergie du groupe au sein duquel ils évoluent [12, 13, 14]. Ainsi, Weihs [12] montre que les jeunes dauphins peuvent suivre leur mère en nageant à leur côté, alors qu'ils possèdent une force de propulsion bien moindre du fait de leur jeune âge. Dans cette configuration de nage, il calcule que le petit dauphin aura besoin d'une force de propulsion 90% inférieure à celle de sa mère pour avancer à la même vitesse. Il explique cette différence par deux effets : l'effet Bernoulli, qui va avoir tendance à attirer le bébé vers sa mère et le fait que la mère « pousse » l'eau présente devant son petit, diminuant la résistance à l'avancement rencontrée par ce dernier. Par ailleurs, certains oiseaux, tels que les oies, volent en formation « en V ». Cette configuration leur permet d'augmenter leur distance maximale de vol de 70% en comparaison avec un oiseau seul d'après [13]. Cette augmentation est expliquée par une diminution de la force de traînée subie par les individus du groupe comparée à la traînée subie par un oiseau seul. Un résultat similaire a été trouvé pour les bancs de poissons [14] : nager en groupe leur permet d'avoir une endurance entre 2 et 6 fois plus grande. Dans la suite, nous désignerons des situations similaires par le terme « drafting ». Ce terme possède la même origine étymologique que le verbe anglais « drag » qui signifie « tirer ». Il joue donc sur l'image que l'athlète bénéficiant du drafting se ferait « tirer », « tracter » par son concurrent.

Dans le sport, des phénomènes de drafting sont observés à la fois dans des sports d'équipe, comme le cyclisme sur piste, ou dans des situations de confrontation directe : course à pied, course automobile, natation ou encore cyclisme sur route. Ces situations sont présentées sur la figure 3.

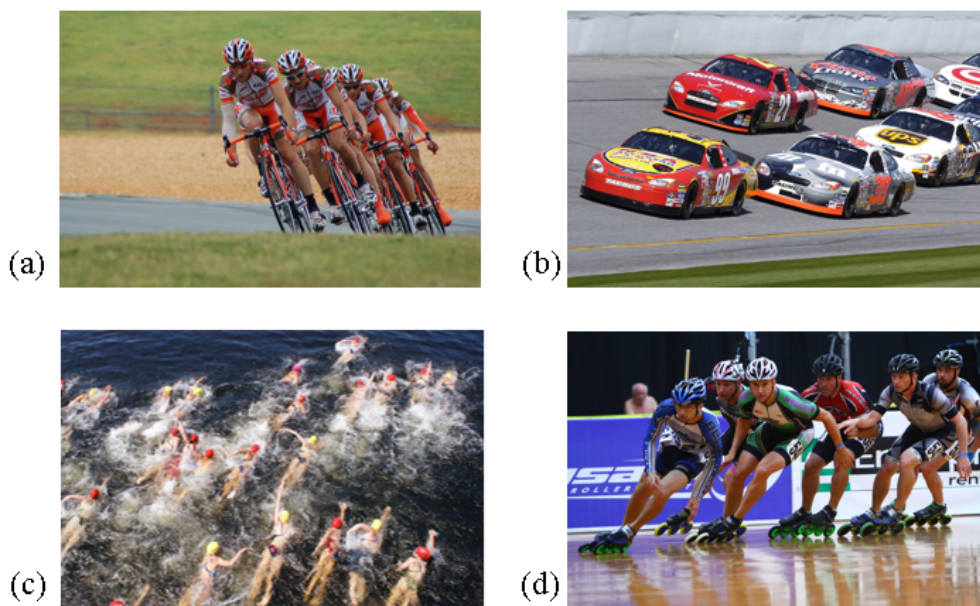


FIGURE 3 – Situations de drafting dans différents sports. (a) Cyclisme [15]. (b) Course automobile [16]. (c) Natation en eau libre [17]. (d) Course de roller [18].

L'idée est la même que pour les situations animales présentées précédemment : un athlète peut bénéficier du sillage d'un concurrent afin de voir la force de traînée qu'il subit réduite. Dans cette situation, il fournit moins d'énergie pour se déplacer à la même vitesse. Cette économie d'énergie peut avoir un énorme impact sur le résultat d'une course. Un exemple célèbre d'un tel impact est la finale du relais 4x100 mètres nage libre des Jeux Olympiques de Londres en 2012. Yannick Agnel, dernier relayeur français prend le départ en 2ème position, avec 0,55 s de retard sur les Etats-Unis. Durant son relais, il vient se coller à la ligne d'eau le séparant de Ryan Lochte, quatrième relayeur américain et va ainsi profiter de son sillage pour le dépasser et remporter la médaille d'or avec 0,45 s d'avance. C'est pourquoi le phénomène de drafting a été étudié dans différents sports.

Tout d'abord, en cyclisme, Blocken *et al.* [19] ont étudié cet effet numériquement en s'intéressant à des situations à 2 cyclistes. Dans leur étude, ils mesurent des réductions de traînée de l'ordre de 13 à 27% pour le cycliste qui suit un concurrent. Les variations de mesures s'expliquent par les différentes positions adoptées par le leader : relevé, mains sur le guidon et position contre-la-montre. Les réductions de traînée pour le suiveur diminuent au fur et à mesure que la distance entre les 2 cyclistes augmente. Enfin, une légère réduction de traînée est calculée pour le cycliste leader : entre 1 et 3% de moins que pour un cycliste seul. Dans une autre étude [20], Blocken *et al.* ont mesuré en soufflerie la traînée de modèles réduits de cyclistes en formation de peloton. Pour un peloton de 120 coureurs, ils mesurent une réduction de traînée de l'ordre de 90% pour les athlètes en dernière ligne du peloton. Ils mesurent également une réduction de traînée de 15% pour le cycliste de tête. Ces réductions sont relatives à la traînée d'un cycliste seul.

Le drafting est aussi bien connu en course automobile mais plutôt sous le terme d'« aspiration ». Les pilotes se servent de ce phénomène pour dépasser leurs concurrents. Par exemple, une étude numérique a été menée pour des voitures de NASCAR (National Association for Stock Car Auto Racing) [21]. Elle montre des réductions de traînée, pour la voiture suiveuse, à la fois lorsqu'elle est derrière une autre voiture mais aussi lorsqu'elle est à coté d'une voiture concurrente (capot au niveau de la portière de l'autre voiture). Par ailleurs, une étude en soufflerie [22] confirme ces effets de réduction de traînée mais met aussi en avant la perte d'appui aérodynamique pouvant apparaître lorsqu'une voiture suit de trop près une autre, entraînant une perte de performance en virage : on parle alors de « dirty air ».

Le drafting a également été étudié en course à pied et notamment dans le but de réaliser des performances jugées jusqu'alors irréalisables, comme courir un marathon en moins de 2 heures. C'était le but des projets Nike Breaking2 [23] et Ineos 1.59 [24] avec le marathonien Eliud Kipchoge. Lors de ces défis, ce coureur était protégé par des lièvres, lui permettant ainsi de voir sa force de traînée réduite. Marro *et al.* [25] ont étudié en soufflerie les configurations de course utilisées lors des ces 2 défis, mettant en avant qu'elles auraient permis un gain de temps respectivement de 169 et 213 secondes par rapport à une course où Kipchoge aurait été seul. Ils ont par ailleurs découvert une nouvelle disposition de lièvres autour du coureur star, lui permettant de potentiellement gagner 49 secondes par rapport à sa performance réalisée au challenge Ineos 1.59.

Tous les sports mentionnés jusqu'à présent se déroulent dans l'air. En revanche, en natation, les athlètes se trouvent à l'interface entre l'eau et l'air. Cela rend le phénomène de drafting en natation particulier, de part les vagues et le sillage créés à cette interface. Plusieurs études ont mesuré l'évolution de certains paramètres physiologiques dans des situations de drafting en natation [26, 27, 28]. D'abord, Chatard *et al.* [26] réalisent des mesures sur des nageurs réalisant un effort de 4 minutes à une allure proche de leur meilleure performance sur 1500 mètres dans un canal à courant, dans différentes positions de drafting. Les résultats de la figure 4 correspondent à des configurations où un nageur se trouve derrière un autre à des distances de 0, 50, 100 et 150 cm (la distance égale à 0 cm correspond à une situation où les têtes des nageurs sont au même niveau).

$N = 11$	Nondrafting	Drafting Distance	
		0 cm	Drafting
Oxygen cost ($L \cdot \text{min}^{-1}$)	3.57 (0.44)	0 cm	3.18 (0.30)
		50 cm	3.16 (0.36)
		100 cm	3.26 (0.36)
		150 cm	3.27 (0.33)
Heart rate (bpm)	157 (16)	0 cm	149 (15)
		50 cm	147 (16)
		100 cm	148 (15)
		150 cm	152 (15)
Lactate ($\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$)	8.7 (4.0)	0 cm	5.4 (2.1)
		50 cm	5.7 (3.3)
		100 cm	5.5 (2.2)
		150 cm	6.0 (2.6)
RPE	14.8 (1.8)	0 cm	11.9 (1.9)
		50 cm	12.7 (1.9)
		100 cm	12.6 (1.6)
		150 cm	12.7 (1.3)
Stroke rate ($\text{c} \cdot \text{min}^{-1}$)	35.4 (2.5)	0 cm	33.4 (2.5)
		50 cm	33.5 (2.2)
		100 cm	34.2 (2.4)
		150 cm	34.5 (2.6)
Stroke length ($\text{m} \cdot \text{c}^{-1}$)	2.10 (0.19)	0 cm	2.23 (0.24)
		50 cm	2.24 (0.23)
		100 cm	2.18 (0.23)
		150 cm	2.19 (0.24)
Drag (N)	38.2 (7.2)	0 cm	30.3 (4.6)
		50 cm	30.2 (4.6)
		100 cm	34.9 (4.0)
		150 cm	36.3 (5.0)

FIGURE 4 – Résultats obtenus par Chatard *et al.* [26] pour différentes configuration de drafting.

Cette étude montre ainsi que le nageur suiveur voit sa consommation d'oxygène réduite, sa fréquence cardiaque diminuée, une concentration de lactate plus faible, un RPE (Rate of Perceived Exertion) moins important et une force de traînée plus faible, par rapport à une situation de nage seul. L'effort à fournir est donc plus faible dans une situation de drafting par rapport à une situation de nage isolée. De plus, ces résultats montrent que les effets du drafting sur les paramètres physiologiques étudiés et sur la force de traînée diminuent lorsque la distance entre les nageurs augmente. Ensuite, Coast *et al.* [27] demandent à des groupes de 4 nageurs de réaliser des 400 mètres, en se suivant en file indienne. Ils font varier l'écart entre les nageurs à chaque essai. Ils constatent que le nageur de tête possède la plus grande fréquence cardiaque et la plus grande concentration en lactate. Les 3 nageurs suivants ont quant à eux des fréquences cardiaques et concentration en lactate dans le sang qui ne sont pas significativement différentes. Enfin, ils montrent le même résultat que Chatard *et al.* : plus l'écart entre les nageurs est grand, moins les effets du drafting sont importants. Par ailleurs, Janssen *et al.* [28] réalisent des mesures de force de traînée passive et active ainsi que de consommation d'oxygène sur des nageurs dans un canal à courant. Les résultats des mesures de traînée sont donnés sur la figure 5.

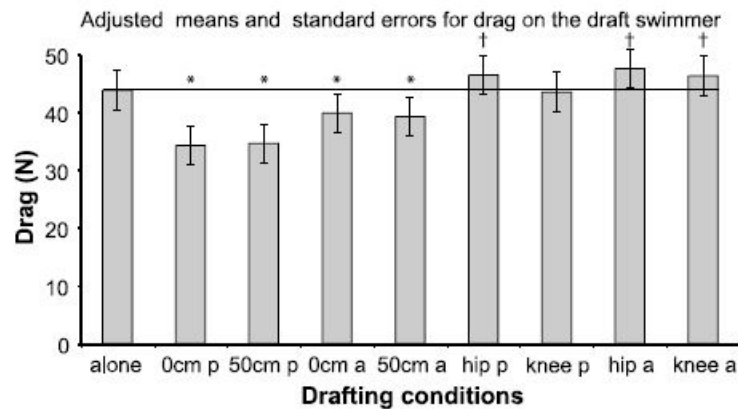


FIGURE 5 – Résultats obtenus par Janssen *et al.* [28] pour différentes configuration de drafting. La lettre a signifie que la nageur est active, p qu'il est passif.

Janssen [28] *et al.* observent ainsi que les effets du drafting sont moindres dans les situations où les nageurs

sont actifs (cas « 0cm a » et « 50cm a » sur la figure 5) plutôt que passifs (cas « 0cm p » et « 50cm p » sur la figure 5) (ne faisant pas de mouvement de nage). Par ailleurs, ils montrent une corrélation entre des réductions de traînées mesurées sur des nageurs passifs dans certaines configurations et un bénéfice sur les paramètres physiologiques cités plus haut dans ces mêmes configurations, pour des nageurs actifs. Enfin, ils mesurent qu'il n'y a pas de réduction de traînée lorsqu'un nageur se trouve à coté d'un autres (cas « hip » et « knee » sur la figure 5). D'autres travaux ont étudié numériquement le drafting en natation [29, 30]. D'abord, Silva *et al.* réalisent des calculs avec 2 nageurs l'un derrière l'autre, complètement immergés (pas de surface libre), en faisant varier la distance qui les sépare. Les résultats qu'ils obtiennent, présentés sur la figure 6, pour 3 vitesses de nage différentes, représentent l'évolution du coefficient de traînée du nageur suiveur divisé par celui du leader en fonction de la distance qui les sépare.

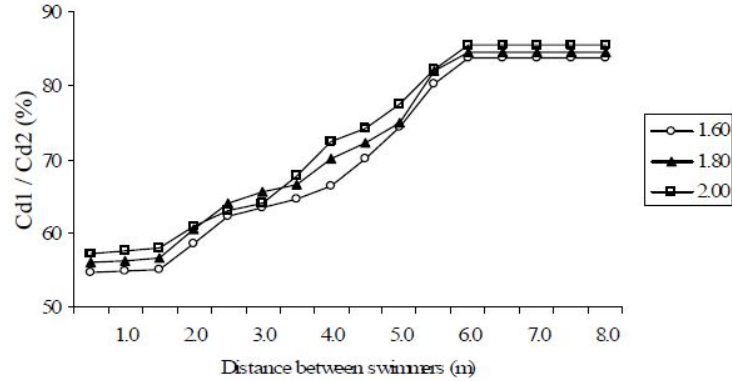


FIGURE 6 – Résultats obtenus par Silva *et al.* [29] pour 3 vitesses de nage (en m/s).

Ces résultats montrent que le suiveur peut voir son coefficient de traînée réduit d'au plus 45% lorsqu'il suit un autre nageur. Cette réduction explique le bénéfice mesuré en termes de paramètres physiologiques dans les études précédemment mentionnées. De plus, les effets du drafting existent pour des distances de plusieurs mètres entre les 2 nageurs. Par ailleurs, Yuan *et al.* [30] ont étudié numériquement le champ de vagues créé par un nageur isolé, en utilisant une théorie potentielle. Ce champ de vague est donné par la figure 7.

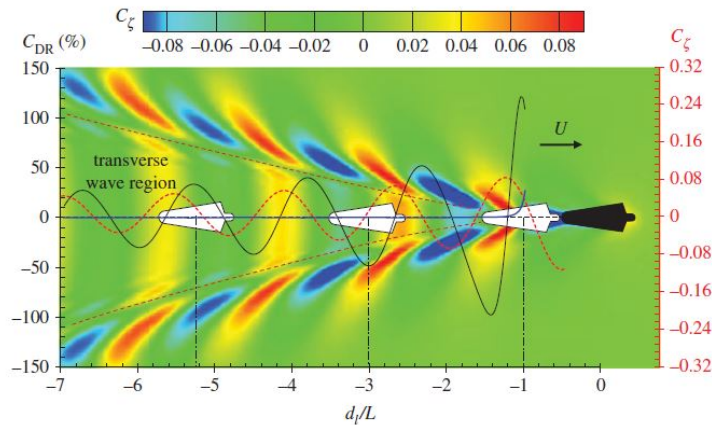


FIGURE 7 – Résultats obtenus par Yuan *et al.* [30], champ de vague créé par un nageur seul et traînée d'un nageur suivant un autre (courbe noire).

Ils observent qu'un nageur suivant un autre peut rencontrer une augmentation ou une réduction de traînée de vague en fonction de la distance qui sépare les 2 nageurs, comme le montre la figure 7 (courbe noire). Cette conclusion vient probablement du fait qu'ils ont négligé le sillage turbulent du nageur en utilisant une théorie potentielle. Enfin, certains travaux cherchent à mesurer les forces de traînées de manière expérimentale, dans

des situations de drafting. Par exemple, Westerweel *et al.* [31] ont procédé à des mesures de traînée sur des modèles réduits de nageurs. Ils observent jusqu'à 50% de réduction dans certaines configuration en comparaison d'un modèle réduit isolé.

1 Chapitre 1 : Dispositif expérimental et numérique pour l'étude des interactions entre nageurs

Afin d'étudier les interactions entre nageurs, nous avons décidé de travailler avec des modèles réduits de nageurs. Cela nous permet en effet d'étudier de multiples configurations de nage, sans avoir besoin de mobiliser des athlètes pendant de nombreux jours de mesures. De plus, il est plus facile de maîtriser le positionnement des modèles réduits les uns par rapport aux autres que celui de nageurs humains entraînés de se déplacer. Le choix des modèles réduits permet donc un meilleur contrôle et répétabilité des configurations étudiées. Expérimentalement, nous plaçons nos modèles réduits dans un canal à courant, puis mesurons la force de traînée qu'ils subissent dans la configuration étudiée. Numériquement, nous recréons notre expérience afin de pouvoir utiliser des données auxquelles nous n'avons pas accès expérimentalement (champs de vitesses, forme du sillage, élévation de la surface libre) mais aussi de comparer les résultats des calculs numériques à nos mesures expérimentales. L'ensemble des moyens ayant permis la réalisation des mesures expérimentales et des calculs numériques est décrit dans ce chapitre.

1.1 Moyens expérimentaux

Premier canal utilisé : Canal 5

Les canaux utilisés pour toutes les mesures expérimentales ont été mis à disposition par EDF sur le site EDF Lab de Chatou, France. Le premier canal utilisé, appelé canal 5, a servi pour l'étude des configurations à 2 nageurs. Il mesure 80 mètres de long, 1,5 mètre de large et 1,2 mètre de haut. Le schéma 1.1 présente le fonctionnement et les différents éléments du dispositif. Le fonctionnement du canal est le suivant : une pompe permet dans un premier temps de remplir le canal jusqu'au niveau d'eau désiré, puis une seconde pompe permet de mettre l'eau en mouvement au débit souhaité. Cette pompe a un débit maximal de 1000 L/s.

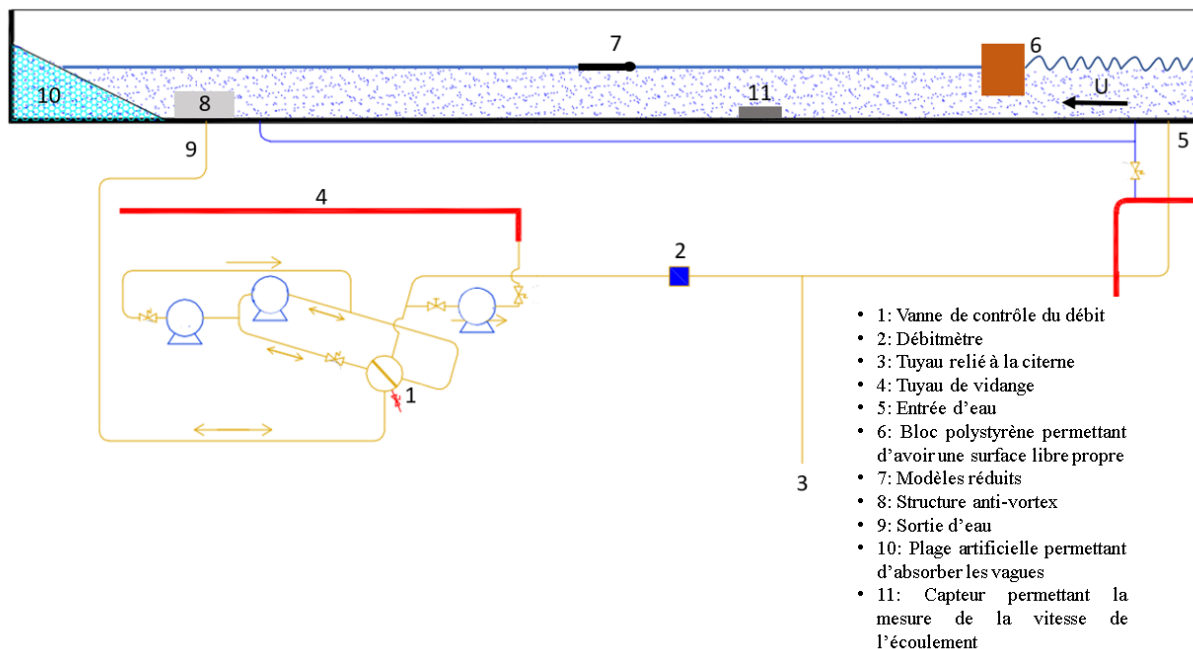


FIGURE 1.1 – Schéma de fonctionnement du canal 5, utilisé pour l'étude des interactions entre 2 nageurs.

Lors des premières mises en route du canal, nous avons constaté la formation d'un tourbillon au niveau de la sortie d'eau. Celui-ci aspire de l'air dans les canalisations et la pompe, risquant de l'endommager. Nous avons

donc fait fabriquer une structure permettant d'empêcher la formation de ce vortex. Elle est présentée sur la figure 1.2. Le principe de cette structure est simple : la présence de panneaux métalliques croisés verticaux empêche la mise en rotation du fluide et permet donc de réduire fortement l'apparition de vortex au niveau de la sortie d'eau.

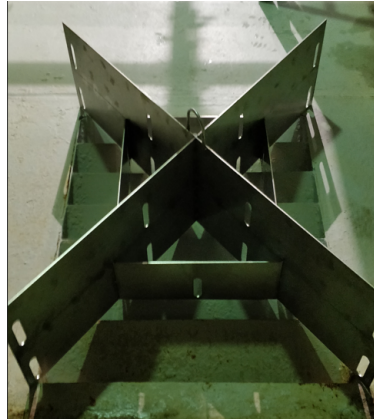


FIGURE 1.2 – Structure anti-vortex empêchant l'entrée d'air dans les canalisations et la pompe.

Cette structure reprend l'idée de structure en grille, testée expérimentalement par Roshan *et al.* [32] qui ont montré que l'utilisation d'une telle structure permettait de réduire la présence de vortex. Par ailleurs, l'entrée d'eau dans le canal étant assez violente, la surface libre de l'écoulement est très agitée comme le montre la figure 1.3a. Nous avons donc placé un bloc polystyrène (déjà existant avant notre travail), fixé aux murs du canal, quelques mètres en aval de l'entrée d'eau. Le but de ce bloc est de forcer l'eau à passer sous lui, sans présence de surface libre, afin de casser les remous créés par l'entrée d'eau. Une comparaison qualitative de l'état de surface libre entre l'écoulement sans bloc et avec bloc est présentée sur la figure 1.3.

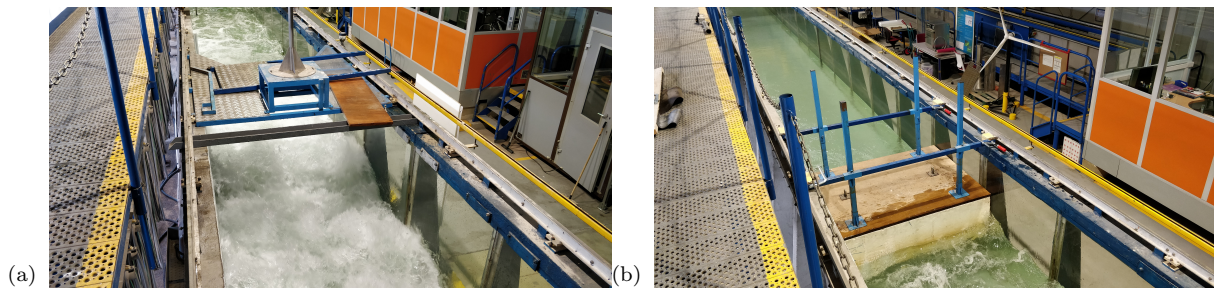


FIGURE 1.3 – Comparaison qualitative de l'état de surface libre de l'écoulement dans le canal 5 avec et sans bloc anti-remous. (a) Surface libre sans bloc anti-remous. (b) Surface libre avec bloc anti-remous.

Le canal 5 est équipé d'un chariot disposant d'un bras motorisé ayant une précision millimétrique. Ce bras va nous servir de point de fixation de nos modèles réduits durant nos expériences. Une photo de ce bras est donnée sur la figure 1.4



FIGURE 1.4 – Chariot et bras motorisé du canal 5 permettant de positionner les nageurs.

Second canal utilisé : Canal 1

Pour des questions de logistique et de cohabitation avec d'autres projets, nous utilisons un second canal pour étudier les interactions dans un peloton de nageurs. Nous l'appelons canal 1 dans la suite. Il est long de 20m, large de 2m. La plus grande largeur de ce canal par rapport au premier utilisé nous permet de nous affranchir de potentiels effets de bord pour les configurations de pelotons étudiées dans le chapitre 3. Le schéma 1.5 présente son fonctionnement ainsi que les différents éléments du dispositif.

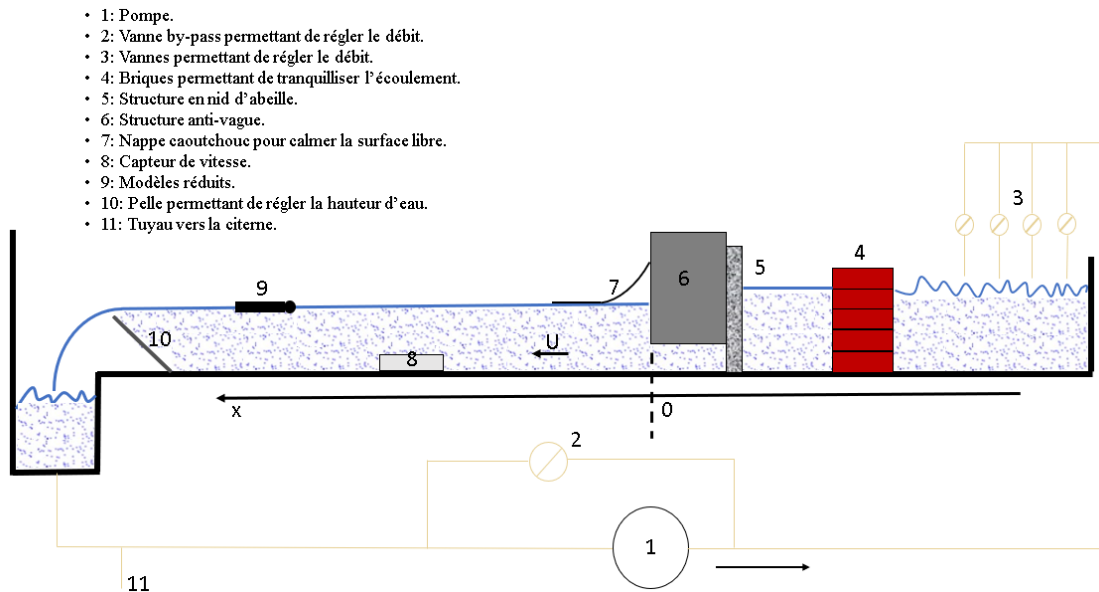


FIGURE 1.5 – Schéma de fonctionnement du canal 1.

Le principe de fonctionnement est légèrement différent de celui du canal 5 : ici, pas de remplissage lors de la mise en route, la pompe injecte et met en mouvement l'eau directement. Cette pompe a un débit maximal

de 500 L/s. La hauteur d'eau est réglable à l'aide d'une pelle inclinable au bout du canal. Ce dispositif est présenté sur la figure 1.6.



FIGURE 1.6 – Pelle permettant de régler la hauteur d'eau dans le canal 1. La flèche rouge désigne la rotation possible de la pelle.

De la même manière que sur le canal 5, nous cherchons à avoir une surface libre avec le moins de remous possible. Nous avons donc construit un système équivalent à celui présenté plus haut : un bloc composé de plaques de PVC et de barres d'aluminium. Comme sur le canal 5, il oblige l'écoulement à passer en dessous de lui, avec une absence de surface libre, ce qui permet de calmer les remous de surface créés par l'injection d'eau dans le canal (élément 3 sur le schéma). En amont de ce bloc, nous plaçons une structure en nids d'abeille, dont la taille des mailles est d'environ 2 cm de diamètre. Juste après l'injection d'eau, des rangées de briques permettent de tranquilliser l'écoulement. De plus, en aval de ce bloc, nous disposons une nappe en caoutchouc dont la fonction est d'absorber les éventuelles vagues encore présentes après le bloc. L'ensemble de cette structure anti-vague est présenté sur la figure 1.7.

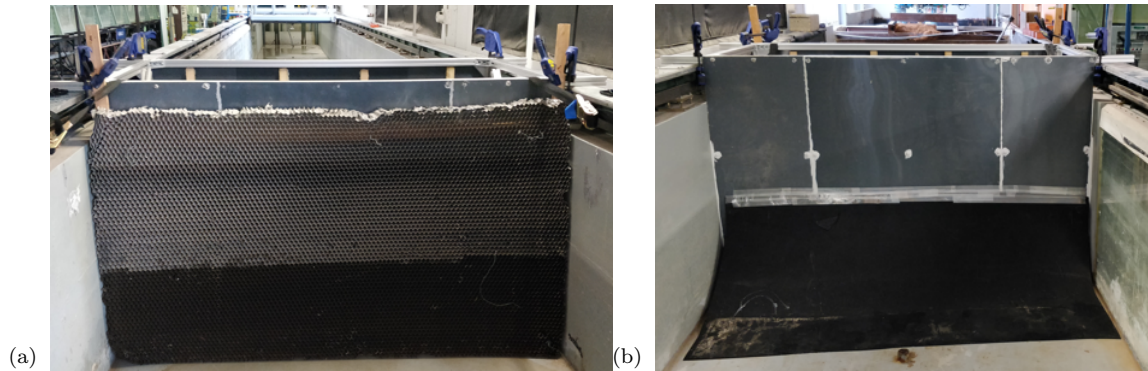


FIGURE 1.7 – Dispositif anti-vague mis en place sur le canal 1. (a) Vue depuis l'amont du dispositif, structure en nids d'abeille. (b) Vue depuis l'aval du dispositif, nappe caoutchouc.

A l'image du canal 5, le canal 1 est également équipé d'un chariot disposant d'un bras motorisé avec une précision millimétrique, visible sur la figure 1.8. Ce bras va nous servir là aussi de point de fixation de nos modèles réduits durant nos expériences.



FIGURE 1.8 – Chariot et bras motorisé du canal 1 permettant de positionner les nageurs.

Réglages expérimentaux

Nous cherchons à déterminer ici les vitesses de l'écoulement à atteindre dans les canaux, ainsi que la hauteur d'eau et la taille des modèles réduits. Nous choisissons d'étudier 3 vitesses différentes afin de représenter différentes phases de la course. Ces vitesses sont 1,25, 1,5 et 1,7 m/s pour des nageurs humains. Elles représentent respectivement une vitesse lente correspondant au début de course et à l'approche des ravitaillements, une vitesse intermédiaire proche de la vitesse moyenne de course lors des Jeux olympiques et championnats du monde et une vitesse élevée correspondant au sprint final. Afin de déterminer les vitesses correspondantes dans nos canaux, nous utilisons une similitude de Froude. En effet, cela nous permettra de conserver les effets de vagues entre les nageurs à taille humaine et nos modèles réduits. Le nombre de Froude s'écrit comme :

$$Fr = \frac{V}{\sqrt{gL}}, \quad (1.1)$$

où V est la vitesse de l'écoulement, g la constante de pesanteur et L la longueur du nageur ou du modèle réduit. En prenant $L \approx 2$ m pour un nageur humain (taille de la tête aux pieds), nous obtenons respectivement $Fr = 0,28, 0,34$ et $0,38$ pour les 3 vitesses étudiées.

De plus, afin de représenter correctement les conditions dans lesquelles les nageurs humains évoluent pendant la plupart de la course, nous souhaitons nous placer en régime d'eau profonde. Nous notons k le nombre d'onde des vagues transverses créées par le modèle réduit. Nous avons la relation $k = 2\pi/\lambda$ où λ est la longueur d'onde des vagues. D'après [33], le régime d'eau profonde est atteint si $kh \gg 1$ où h est la hauteur d'eau. De plus, l'ordre de grandeur de λ sera celui de la taille du modèle réduit. En prenant en compte le débit maximum fourni par la pompe du canal 5, nous avons déterminé la hauteur d'eau de travail dans ce canal à 0,7 m et la longueur de nos modèles réduits à 0,4 m. Cependant, cette étude ayant été réalisée avant de savoir qu'un second canal serait utilisé, la puissance plus faible de la pompe du canal 1 n'a pas été prise en compte. Par conséquent, ces mêmes réglages ne sont pas possibles sur le canal 1. Nous avons choisi de conserver les mêmes vitesses et de réduire la hauteur d'eau. Elle sera de l'ordre de 0,35 m dans le canal 1. Une étude comparative des résultats entre les 2 canaux a été effectuée afin de mesurer l'impact de ce choix. Les résultats sont disponibles en annexe A. Finalement, la similitude de Froude nous permet de calculer les vitesses de l'écoulement à atteindre pendant nos expériences : elles sont de 0,56, 0,68 et 0,75 m/s respectivement. Il nous reste alors à vérifier que l'écoulement autour des nageurs humains et autour

des modèles réduits sont tous deux turbulents. Pour cela nous calculons le nombre de Reynolds de chaque écoulement. Il se définit comme :

$$Re = \frac{VL}{\nu}, \quad (1.2)$$

où V est la vitesse de l'écoulement, L la longueur du nageur ou du modèle et ν est la viscosité cinématique de l'eau. Ainsi, pour un nageur de taille humaine nous avons $L \approx 2$ m et $V \approx 1.5$ m/s. Nous obtenons alors $Re = 3 \times 10^7$. De même, pour nos modèles réduits, en prenant la plus petite vitesse étudiée, nous calculons $Re = 2,24 \times 10^5$. Dans les 2 cas, le nombre de Reynolds est assez grand pour s'assurer que l'écoulement est en régime turbulent. Il n'est cependant pas du même ordre de grandeur. En effet, ayant choisit de travailler avec une similitude de Froude, nous ne pouvons avoir simultanément une similitude de Reynolds. L'influence de la variation du nombre de Reynolds entre les nageurs humains et les modèles réduits est étudiée en annexe B.

1.2 Mesures de la vitesse de l'écoulement

Afin de s'assurer de travailler avec les vitesses d'écoulement désirées, nous devons mesurer la vitesse de l'écoulement dans nos canaux. Pour cela, nous utilisons un capteur à ultrasons UB-Flow, fabriqué par Ubertone. Ce capteur fonctionne par effet Doppler : il émet des ondes ultra-sonores qui vont se réfléchir sur des particules matérielles ou gazeuses contenues dans l'eau. En se réfléchissant, les ondes vont voir leur fréquence modifiée, ce qui va permettre de remonter à la vitesse de déplacement de ces particules et donc la vitesse de l'écoulement, en faisant l'hypothèse que les particules se déplacent à la même vitesse que l'eau. La fiche technique du capteur est disponible sur le site du fabricant [34]. Dans nos canaux, nous plaçons le capteur dans un support fixé sur le fond du canal, visible sur la figure 1.9. Ce support a été conçu par nos soins et fabriqué à l'aide d'une imprimante 3D. Le capteur est incliné à 65° comme recommandé par le fabricant.

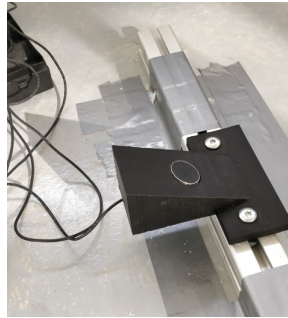


FIGURE 1.9 – Capteur de vitesse à ultrason UB-Flow dans son support, fixé sur le fond du canal.

Pour chaque mesure de vitesse, une acquisition de 2 minutes est réalisée. Cette durée a été choisie afin de minimiser l'incertitude sur la mesure de la vitesse. En effet, nous réalisons, pour une vitesse donnée, 10 mesures de vitesses en surface pour différentes durées d'acquisition. Les résultats de cette étude sont présentés sur la figure 1.10. L'erreur moyenne de mesure désigne la moyenne de l'écart type calculé sur chacune des 10 mesures effectuées par point. Ils montrent que la durée d'acquisition de 2 minutes permet de minimiser l'erreur de mesure. Nous décidons de ne pas aller au delà de 2 minutes d'acquisition, car cela augmenterait trop le temps nécessaire aux mesures expérimentales, déjà chrono-phages.

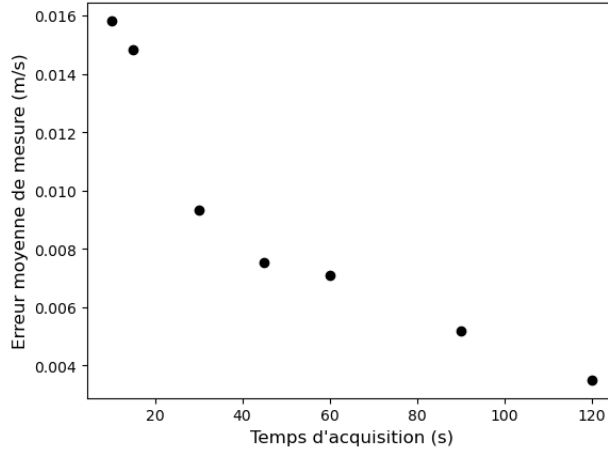


FIGURE 1.10 – Évolution de l’erreur de mesure de vitesse en fonction de la durée d’acquisition.

Caractérisation du canal 5

Dans le but d’identifier une zone de travail dans laquelle les effets de bord sont négligeables, des profils de vitesses avaient été préalablement réalisés par l’équipe du Pomphy (EDF). Un exemple de ces profils est disponible sur la figure 1.11.

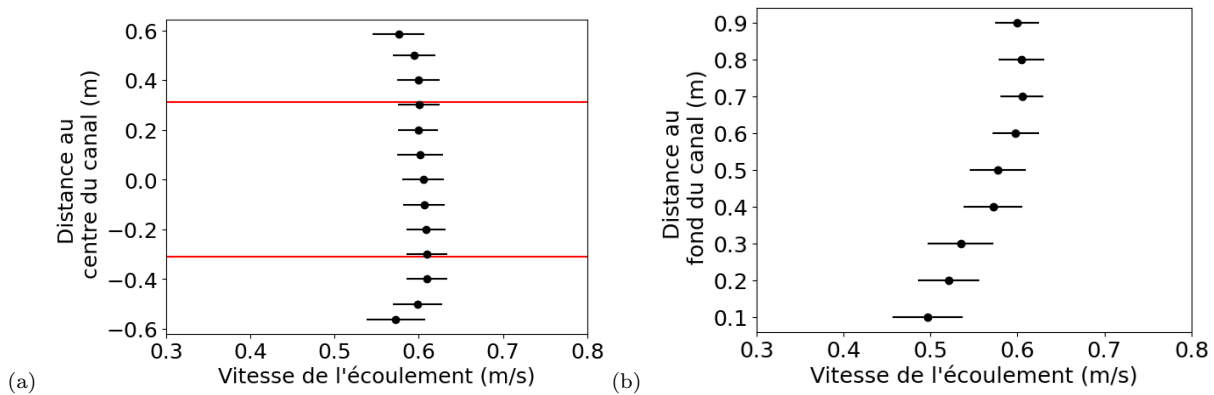


FIGURE 1.11 – Profils de vitesse de l’écoulement, obtenus par EDF, dans le canal 5. (a) Profil transverse. (b) Profil vertical.

La réalisation du profil transverse permet d’identifier une zone dans laquelle la vitesse en surface de l’écoulement est constante, à l’erreur de mesure près. Elle est délimitée par les 2 traits rouges horizontaux sur la figure 1.11a. C’est donc uniquement dans cette zone que nous placerons nos modèles réduits lors des campagnes de mesures. Ce profil n’est pas symétrique par rapport à l’axe central du canal. Cela peut s’expliquer par le fait que l’un des murs du canal est en béton tandis que l’autre est en verre. Les frottements sur les parois ne sont donc pas les mêmes, et par conséquent les vitesses proches des parois seront elles aussi différentes. Le profil vertical de la figure 1.11b montre lui que la vitesse maximale de l’écoulement se situe sous la surface libre. Nous sommes en présence d’un régime de canal dit « étroit ». Cela était attendu, d’après [35], le rapport largeur du canal sur hauteur d’eau étant égal à $2/0,7 = 2,86 < 5$. Afin de déterminer les réglages permettant d’atteindre les vitesses définies plus haut, pour plusieurs débits fixés, nous faisons varier l’angle d’ouverture de la vanne du by-pass et nous mesurons la vitesse obtenue en surface. Un exemple de ce type de mesure est donné sur la figure 1.12.

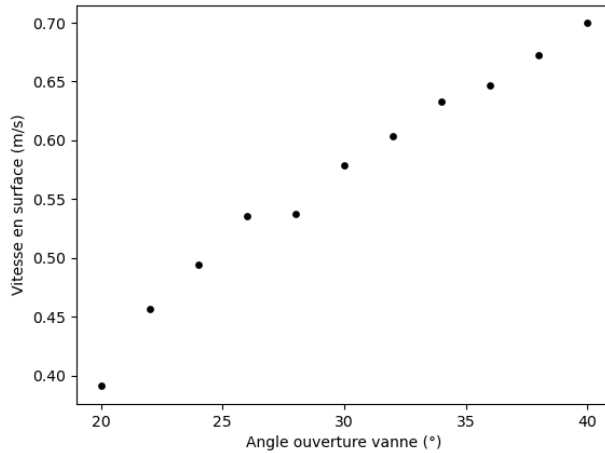


FIGURE 1.12 – Évolution de la vitesse en surface en fonction de l’ouverture de la vanne du by-pass, à débit constant.

Une fois les réglages déterminés, nous réalisons un profil vertical pour chacune des vitesses visées afin de vérifier que les réglages sont corrects. Seule la vitesse de l’écoulement en surface nous intéresse, les profils de vitesses réalisés pendant les campagnes de mesures ne comprennent pas le bas de la colonne d’eau. Pour les 3 vitesses d’étude définies plus haut, nous obtenons les profils de la figure 1.13 :

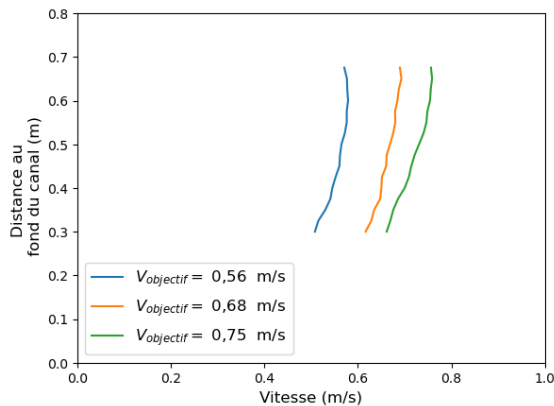


FIGURE 1.13 – Profils de vitesse obtenus dans le canal 5, à l’aide du capteur UB-Flow, pour des vitesses en surface voulues égales à 0,56, 0,68 et 0,75 m/s respectivement.

Caractérisation du canal 1

De la même manière que pour le canal 5, le but est d’identifier une zone de travail permettant de s’affranchir des effets de bord. N’ayant pas de données pré-existantes comme sur le canal 5, nous réalisons des profils transverses et verticaux à différents points du canal. Pour les 3 vitesses d’étude, nous obtenons en différentes abscisses x du canal les profils de vitesse verticaux de la figure 1.14. La convention pour l’abscisse x est définie sur la figure 1.5 : l’origine se situe au niveau du bloc anti-remous et plus elle est grande, plus on se situe proche de la sortie d’eau.

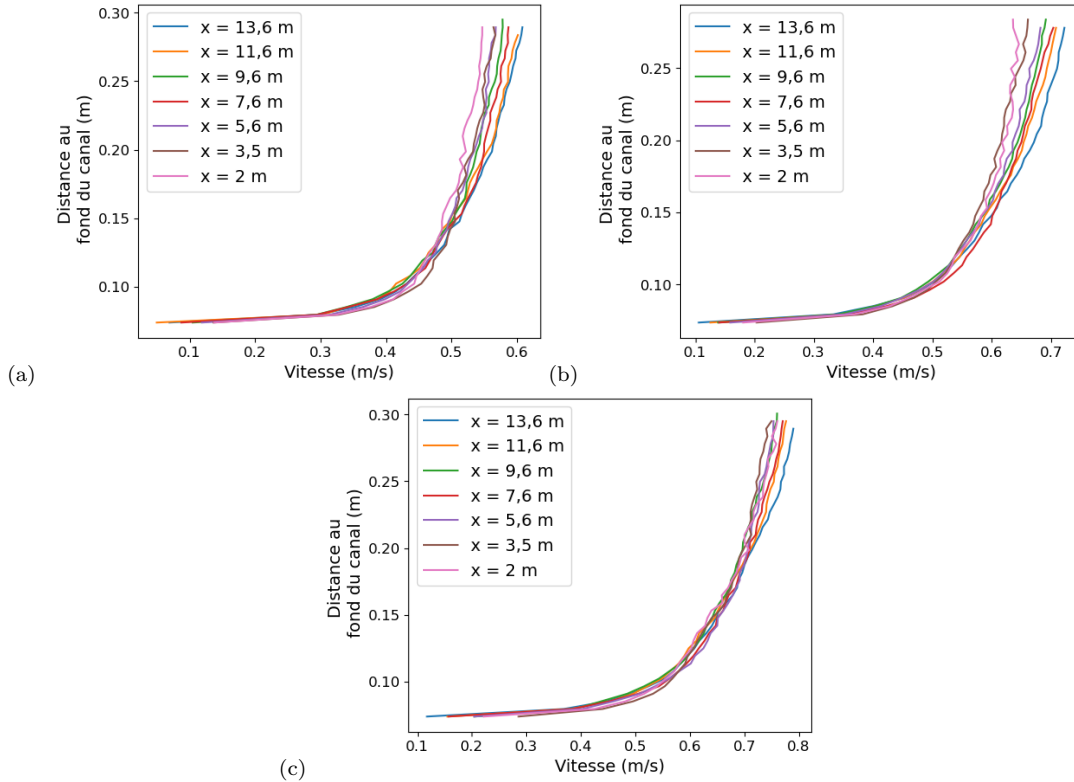


FIGURE 1.14 – Profils verticaux de vitesse de l’écoulement, obtenus avec le capteur UB-Flow, dans le canal 1. (a) $V_{objectif} = 0,56$ m/s. (b) $V_{objectif} = 0,68$ m/s. (c) $V_{objectif} = 0,75$ m/s.

Ces profils nous montrent que la vitesse de l’écoulement en surface varie le long du canal : plus on se trouve proche de la sortie du canal, plus la vitesse est grande. Cette observation est confirmée par les résultats de la figure 1.15 qui représente la vitesse en surface de l’écoulement en fonction de la position dans le canal, pour les 3 vitesses étudiées.

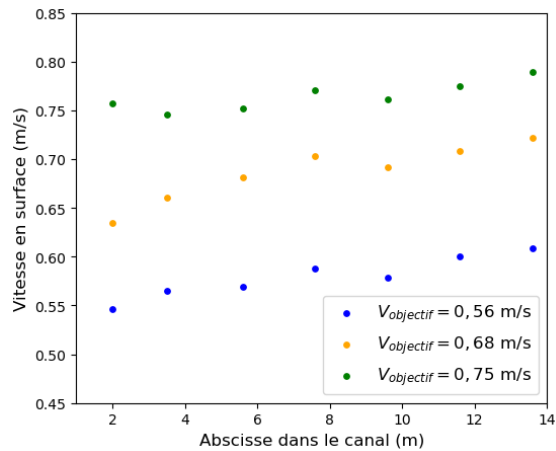


FIGURE 1.15 – Évolution de la vitesse en surface à différentes abscisses du canal, pour des vitesses en surface voulues égales à 0,56, 0,68 et 0,75 m/s respectivement.

Cet effet peut s’expliquer par la présence d’un déversoir en bout de canal. En effet, celui-ci rétrécit la section utile (dans le sens de la hauteur) à l’écoulement. Par conservation du débit, l’écoulement s’accélère en surface.

Pour nos mesures expérimentales, nous choisissons de nous placer dans la zone où la vitesse en surface varie le moins, c'est à dire pour une abscisse x comprise entre 6 et 12 mètres. Dans cette zone, nous réalisons des profils transverses de vitesse. Les profils pour une vitesse objectif de 0,56 m/s sont données sur la figure 1.16.

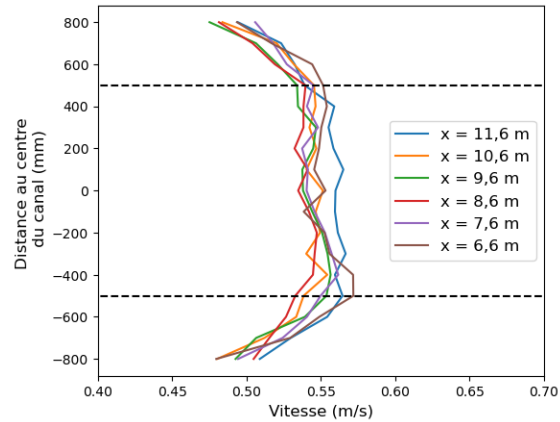


FIGURE 1.16 – Profils transverses de vitesse obtenus dans le canal 5, à l'aide du capteur UB-Flow, pour une vitesse en surface voulue égale à 0,56 m/s en différentes abscisses x du canal.

Nous identifions alors une zone de travail (définie par les traits pointillés) large de 1 mètre, au centre du canal, dans laquelle la vitesse en surface reste relativement constante, à l'erreur de mesure près. De plus, nous constatons qu'il ne faut pas travailler à une abscisse x trop grande. En effet, particulièrement pour les profils mesurés à $x = 6,6$ m et $x = 5,6$ m, la taille de cette zone de travail se voit réduite, l'écoulement ne semble pas totalement bien développé, ce qui peut se comprendre étant donné la proximité de ces positions avec l'entrée du canal. Ainsi, pour nos mesures expérimentales, nous nous placerons finalement dans une zone d'abscisse x comprise entre 7 et 9 mètres.

1.3 Mesures de force de traînée

Afin de caractériser les interactions entre nageurs, nous décidons de nous intéresser à la force de traînée qu'ils subissent. Pour des nageurs mobiles, elle se définit comme la force qui s'oppose au mouvement des athlètes et agit comme un frottement. Nos modèles réduits étant fixes, nous définirons la traînée comme la force appliquée par le fluide en mouvement sur les maquettes, selon l'axe principal de l'écoulement (axe du canal). L'étude de la force de traînée nous permettra de déterminer des configurations favorables ou défavorables aux nageurs : une faible force de traînée permettra au nageur de s'économiser, au contraire, une grande force de traînée lui demandera une grande dépense énergétique. Elle est notée $F_{traînee}$. Pour mesurer ces forces, nous utilisons des capteurs fabriqués par la société *Phyling* [36]. Ils sont alimentés par une tension continue de 12V. Ils peuvent mesurer des forces allant de 0 à 1N et renvoient une tension comprise entre 0 et 10V. Lors de nos mesures, l'acquisition se fait à une fréquence de 100 Hz (fréquence choisie de telle sorte qu'elle soit bien plus grande que celle des remous observés en surface), pendant 20 secondes. Afin de déterminer cette durée d'acquisition, nous mesurons, pour différentes valeurs de cette dernière, l'écart type moyen (moyenne des écarts types calculés pour chacun des différents essais) obtenu sur la tension renvoyée par le capteur lors de 10 répétitions d'une même mesure pour cette durée. Les résultats sont présentés sur la figure 1.17.

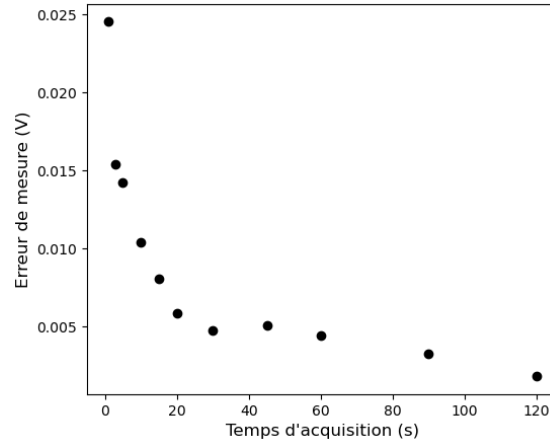


FIGURE 1.17 – Évolution de l’erreur de mesure sur la tension renvoyée par le capteur en fonction du temps d’acquisition.

Ainsi, une durée d’acquisition de 20 secondes semble être un bon compromis, permettant à la fois une erreur de mesure faible et un temps d’acquisition pas trop long. En effet, au delà de 20 secondes, augmenter le temps d’acquisition ne permet plus de réduire de manière significative l’erreur de mesure. Pour chaque configuration étudiée, la mesure est répétée 6 fois afin de minimiser l’incertitude. Ces capteurs mesurent un cisaillement. Leur fonctionnement est détaillé sur la figure 1.18.

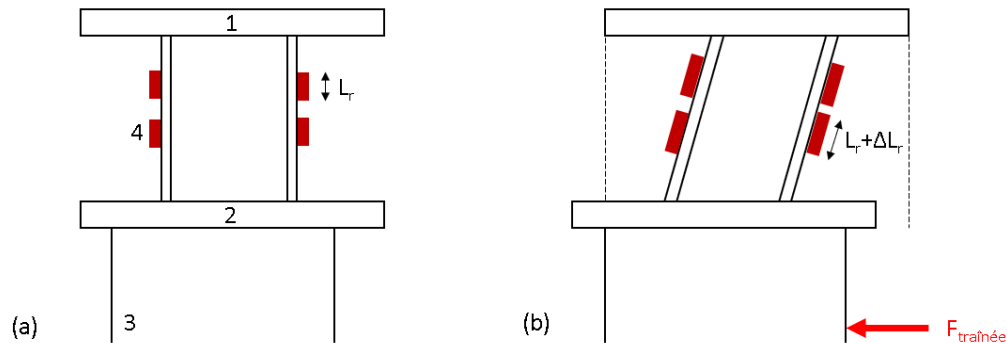


FIGURE 1.18 – Schéma de principe du capteur de force en cisaillement. (a) Capteur au repos avec 1 : support du capteur solidaire du bâti. 2 : base du capteur, solidaire du support du nageur. 3 : Support du nageur. 4 : Résistances électriques. (b) Capteur lorsque le nageur est soumis à une force.

Des résistances électriques (jauges de déformations), en bordeaux sur la figure 1.18, sont disposées sur des tiges verticales qui vont s’allonger sous l’action de la force de traînée subie par le modèle. Par conséquent la tension électrique à leurs bornes va être modifiée. C’est cette tension qui est renvoyée par le capteur à la carte d’acquisition puis à l’ordinateur. Nous avons alors besoin de convertir cette tension en force. Cette conversion se fait à partir d’une calibration du capteur. Le principe de la calibration est le suivant et est montré sur la figure 1.19a. Un schéma de principe d’une calibration est donné sur la figure 1.19b.

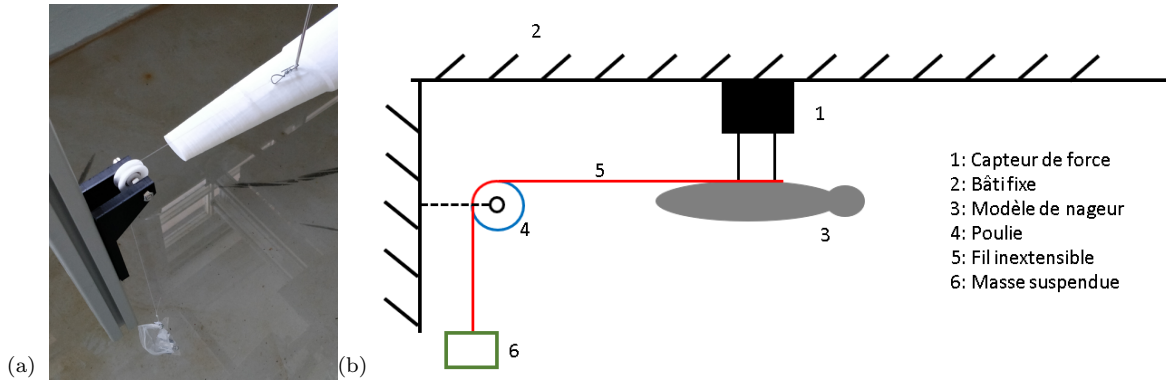


FIGURE 1.19 – Principe de calibration des capteurs de force. (a) Photo du dispositif. (b) Schéma de principe.

Nous fixons un fil supposé inextensible au support qui relie le capteur de force et le nageur. Nous faisons passer ce fil par une poulie. A la deuxième extrémité du fil, nous attachons un sachet où nous plaçons différentes masses connues. Pour chaque masse, nous relevons la tension renvoyée par le capteur. En négligeant les frottements du fil sur la poulie et de la poulie sur son axe de rotation, la force correspondante à cette tension sera égale à la force de pesanteur de la masse suspendue à l'extrémité du fil. En faisant varier la masse suspendue nous obtenons une courbe d'évolution de la tension renvoyée par le capteur en fonction de la masse suspendue. Un exemple d'une telle courbe est donné sur la figure 1.20.

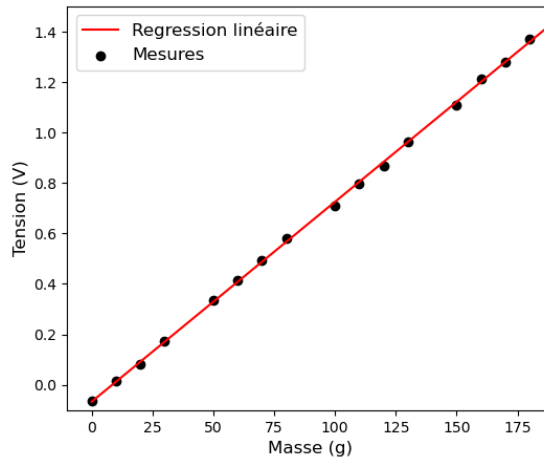


FIGURE 1.20 – Exemple d'une courbe de tension en fonction de la masse suspendue lors d'une calibration.

Cette évolution est approchée par une droite dont nous relevons le coefficient directeur, noté k_{capteur} . La force de pesanteur \vec{F}_P d'une masse m étant donné par $\vec{F}_P = m\vec{g}$ où g est la pesanteur, le coefficient de conversion d'une tension en force sera donné par :

$$k_{\text{conversion}} = \frac{g}{1000 \times k_{\text{capteur}}}, \quad (1.3)$$

où le facteur 1000 correspond à la conversion des grammes en kilogrammes. La valeur de tension renvoyée pour une force nulle étant variable en fonction des conditions extérieures (température, serrage..), nous la relèverons à chaque campagne de mesure. Nous la notons U_0 . Ainsi, la force de traînée subie par le modèle s'obtiendra par la formule suivante :

$$F_{\text{traînée,essai}} = k_{\text{conversion}}(U_{\text{essai}} - U_0), \quad (1.4)$$

Une calibration est réalisée pour l'ensemble des capteurs que nous utilisons. Nous répétons ces calibrations à intervalles de temps régulier afin de s'assurer que les facteurs de conversion ne dérivent pas entre les différentes campagnes de mesures.

1.4 Modèles réduits de nageurs

Dans le but d'étudier les interactions entre nageurs, nous avons fait le choix de travailler avec des modèles réduits. Nous concevons nos maquettes par CAO (Conception Assistée par Ordinateur) à l'aide du logiciel Freecad [37]. Ils sont ensuite fabriqués à l'aide d'une imprimante 3D. Ils sont constitués d'acide polylactique (PLA) injecté à l'aide d'un embout de 0,4 mm de diamètre. Nous avons déjà déterminé dans la section 1.1 que nos modèles mesureraient 40 cm de long. Nous souhaitons de plus que leur forme soit assez simple, tout en représentant bien des nageurs humains. Pour cela, nous définissons le coefficient de traînée comme :

$$C_{d,0} = \frac{F_{trainee}}{\frac{1}{2}\rho SV^2} \quad (1.5)$$

où $F_{trainee}$ est la force de traînée subie par le nageur ou le modèle réduit, ρ est la masse volumique de l'eau, S est la surface frontale du nageur ou du modèle et V est la vitesse de l'écoulement. Notre but est donc de concevoir des modèles réduits qui ont un coefficient de traînée égal à celui de nageurs humains.

Mesure des coefficient de traînée de nageurs humains

Afin de déterminer le coefficient de traînée de nageurs humains, nous avons besoin de connaître la force de traînée qu'ils subissent. Pour cela, nous utilisons le même dispositif que Prétot [38] : un moteur permet de tirer à vitesse constante des nageurs passifs (qui ne nagent pas) le long d'un bassin de natation. Un système de poulies et un capteur de force permettent de mesurer l'effort nécessaire pour tracter les nageurs. Comme les nageurs sont tirés à vitesse constante, la force de traction sera égale à la force de traînée subie par le nageur d'après le principe fondamental de la dynamique. Nous obtenons ainsi la force de traînée du nageur à une vitesse donnée, que nous convertissons en coefficient de traînée à l'aide de l'équation 1.5. Nous répétons l'expérience pour différentes vitesses de déplacement du nageur. L'ensemble du système de mesure est présenté sur la figure 1.21. Les détails de conception du dispositif ainsi qu'une analyse d'erreur sont disponibles dans la thèse de Prétot [38].

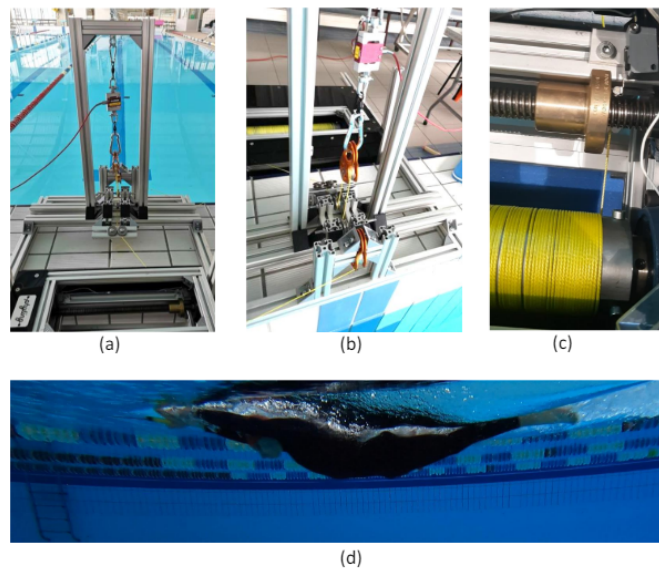


FIGURE 1.21 – Dispositif permettant la mesure de la force de traînée subie par un nageur humain. (a) Vue hors du bassin. (b) Vue depuis le bassin. (c) Enroulement du fil tractant le nageur sur l'axe du moteur. (d) Nageur tracté.

Comparaison humains-modèles réduits

La première version de notre modèle réduit est inspirée du travail de Westerweel [31] *et al.* Ils s'étaient appuyés sur une base de données anthropométriques afin de créer des modèles réduits de nageurs. Cette première version est visible sur les figures 1.22a et 1.22b.

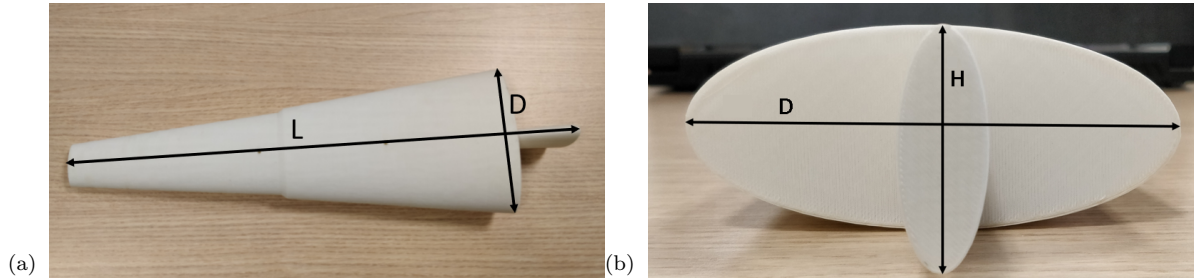


FIGURE 1.22 – Comparaison des différentes versions du modèle de nageur. (a) Vue de dessus, définition de la longueur L et la largeur maximale D . (b) Vue de face, rappel de la largeur maximale D et définition de l'épaisseur maximale H .

Ce modèle possède une longueur L de 40 cm, une largeur maximale D de 12 cm et une épaisseur maximale H de 5 cm. Afin de mesurer le coefficient de traînée de ce modèle, nous le plaçons dans notre canal et mesurons, à l'aide du capteur de force, la traînée qu'il subit à différentes vitesses d'écoulement. Cela nous permet ensuite de remonter au coefficient de traînée à l'aide de l'équation 1.5. La figure 1.23 présente l'évolution du coefficient de traînée pour un nageur humain et pour la 1ère version de notre modèle.

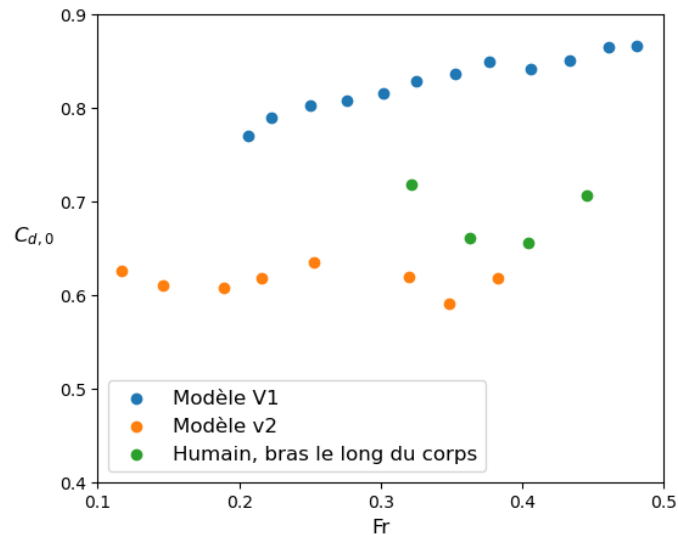


FIGURE 1.23 – Comparaison des coefficients de traînée de nos 2 versions de modèles réduits et d'un nageur de niveau élite.

Ces résultats nous montrent que la première version de notre modèle réduit possède un coefficient de traînée trop important par rapport aux nageurs humains. Nous décidons donc de concevoir une seconde version de notre modèle réduit. Nous conservons la même longueur, la même épaisseur maximale et la même largeur maximale. En revanche, nous arrondissons les épaules et la tête afin de rendre le corps légèrement plus profilé. Cette deuxième version du modèle est visible sur la figure 1.24.

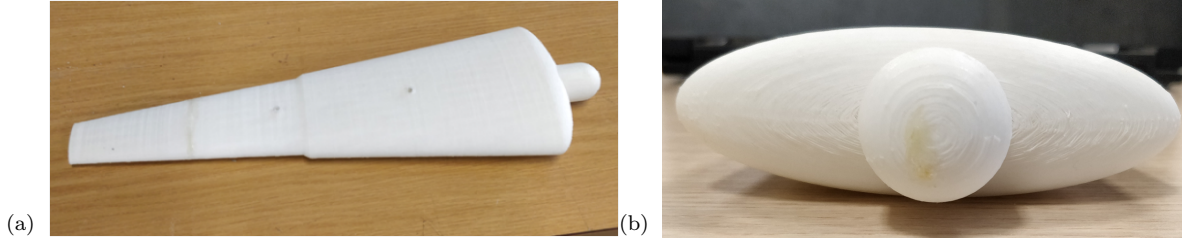


FIGURE 1.24 – Seconde version du modèle réduit de nageur. (a) Vue de dessus. (b) Vue de face.

Les résultats des mesures de coefficient de traînée pour différents nombres de Froude, pour cette seconde version du modèle, sont présentés sur la figure 1.23. Nous observons que les valeurs des coefficients de traînée des nageurs humains et du modèle sont plus proche que pour la première version. C’est donc cette seconde version du modèle que nous utiliserons dans toutes nos mesures expérimentales.

1.5 Modèle numérique

Afin de comparer nos mesures de traînée à des calculs numériques de mécanique des fluides, mais aussi d’accéder à des valeurs telles que la déformée de la surface libre, la forme du sillage, le champ des vitesses dans l’écoulement, qui sont très difficiles à mesurer expérimentalement, nous créons un modèle numérique de notre problème. Pour cela, nous utilisons le logiciel open-source OpenFoam [39].

Construction du modèle : maillage, conditions aux limites et paramètres utilisés.

La première étape du modèle est la création du domaine d’étude et d’un maillage grossier, qui servira de base à un maillage plus fin dans les zones d’intérêt. Une étude de sensibilité sur la taille du maillage est présentée dans la sous-section suivante. Notre domaine d’étude reprend la largeur du canal 5 mais pas sa longueur car il est inutile de représenter tout le canal dans le modèle numérique. Cette étape s’effectue avec la commande *BlockMesh* d’OpenFoam. Un exemple de maillage obtenu avec cette commande est donné sur la figure 1.25a.

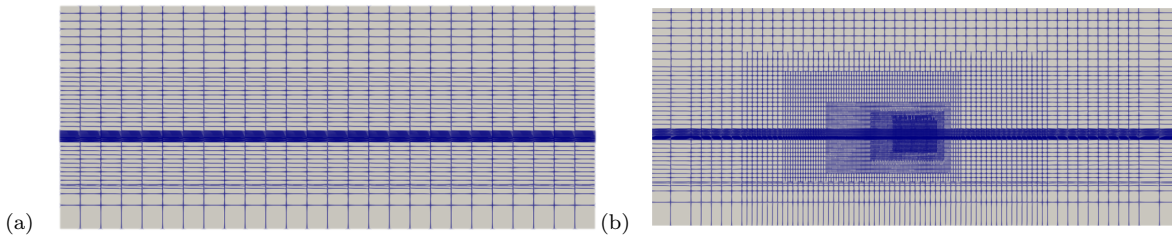


FIGURE 1.25 – Maillage de la veine numérique. (a) Après usage de la commande *BlockMesh*. (b) Après usage de la commande *RefineMesh*.

Ensuite, l’utilisation des commandes *TopoSet* et *RefineMesh* permet de raffiner le premier maillage créé, dans des zones définies par l’utilisateur, en coupant chaque cellule précédemment créée dans les 3 directions de l’espace. Dans notre cas, les zones d’intérêt sont les zones où se trouveront les modèles réduits de nageurs. Nous utilisons 6 fois de suite les commandes de raffinement précédemment présentées afin d’avoir un maillage progressivement plus fin au fur et à mesure que l’on se rapproche du nageur. Cette démarche est nécessaire pour assurer la convergence des calculs, comme montrés dans la section suivante. Une visualisation du maillage après cette étape est disponible sur la figure 1.25b. L’étape suivante est d’insérer le modèle du nageur dans notre veine numérique. Nous utilisons le modèle que nous avons conçu précédemment. Nous utilisons la commande *SnappyHexMesh* qui permet d’insérer une géométrie et de raffiner le maillage autour de celle-ci. Une visualisation du maillage à la surface du modèle réduit est proposée sur la figure 1.26.

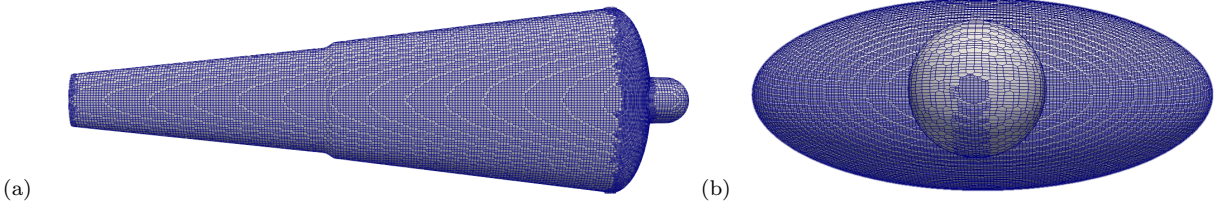


FIGURE 1.26 – Maillage en surface du modèle réduit numérique. (a) Vue de dessus. (b) Vue de face.

L'étape suivante est de définir les conditions aux limites de notre modèle. Les parois ainsi que la surface des modèles réduits sont du type *wall* : la vitesse de l'écoulement y est nulle. Nous avons une face définie comme l'entrée de l'écoulement. Sur celle-ci, nous appliquons une condition de vitesse uniforme de l'écoulement égale à l'une des 3 vitesses d'étude définies dans les sections précédentes. Une face est définie comme la sortie de l'écoulement. Sur celle-ci est appliquée une condition de zéro-gradient de pression. Ensuite, pour réaliser le calcul numérique, nous utilisons le solveur *interFoam* d'OpenFoam. En effet, il permet d'étudier les écoulements diphasiques, ce qui correspond à notre étude puisque les nageurs se trouvent à l'interface entre l'eau et l'air. Il utilise la méthode dite « Volume Of Fluid » (VOF) . Cette méthode consiste à considérer, dans chaque cellule du maillage précédemment construit, la fraction volumique des 2 phases mises en jeu (dans notre cas, l'air et l'eau). Elles sont alors considérées comme un seul et unique fluide dont les propriétés physiques sont calculées à partir de la fraction volumique de chacune d'elles. Ce solveur utilise également la méthode dite « RANS » (Reynolds-averaged Navier–Stokes), c'est à dire qu'il résout les équations de Navier-Stokes auxquelles on a appliqué la décomposition de Reynolds, qui permet de s'affranchir des fluctuations de périodes courtes et de faibles amplitudes. Concernant la modélisation de la turbulence, nous utilisons un modèle $k-\omega$ SST. Le choix de ce modèle a été fait car il contient une fonction qui permet de résoudre le modèle de Wilcox près des murs et le modèle $k-\epsilon$ loin des parois, permettant ainsi d'avoir un calcul bien résolu près du modèle de nageur pour le calcul de la force de traînée mais aussi loin du nageur pour accéder au champ de vagues créé par le modèle. Les paramètres utilisés pour ce modèles sont ceux du manuel utilisateur d'OpenFoam [40]. Pour tous nos calculs, nous considérons les fluides comme étant incompressibles. Cette hypothèse d'incompressibilité est valable pour l'eau puisqu'elle est sous forme liquide, mais aussi pour l'air puisque celui-ci se déplace au plus à la vitesse de l'eau au niveau de l'interface, ce qui donne un nombre de Mach égal à $M = 0,002$ pour une température égale à 20° et une vitesse d'écoulement égale à $0,75$ m/s, ce qui est bien inférieur au nombre de Mach de $0,3$ qui est le critère permettant de justifier l'hypothèse d'incompressibilité pour un gaz. Pour l'eau, nous utilisons comme masse volumique : $\rho = 998,8$ kg/m³ et comme viscosité cinématique $\nu = 1 \times 10^{-6}$ m²/s. Pour l'air, nous avons $\rho = 1,2$ kg/m³ and $\nu = 1,5 \times 10^{-5}$ m²/s.

Convergence

L'un des paramètres ayant une forte influence sur la convergence du calcul est la qualité du maillage. Afin d'étudier cette influence, nous réalisons le calcul de l'écoulement autour d'un modèle seul, pour une vitesse d'entrée de $0,56$ m/s et nous faisons varier le nombre de fois où nous affinons le maillage (avec la commande *RefineMesh*) entre 0 et 7. La figure 1.27 montre l'évolution de la force de traînée du modèle en fonction du nombre d'itérations.

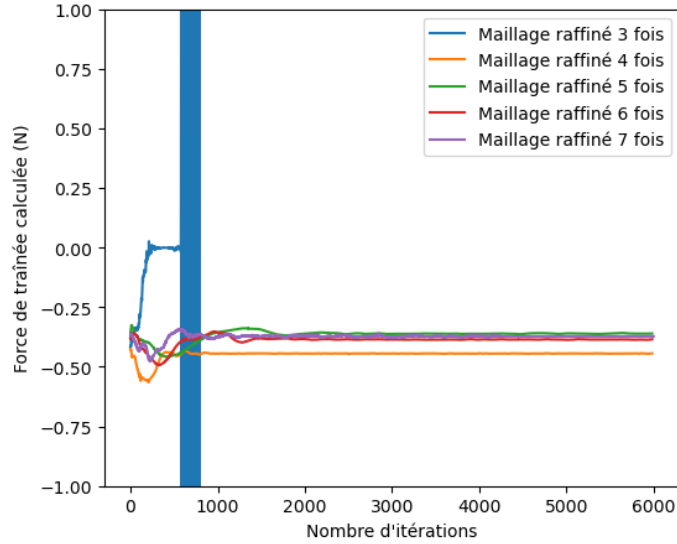


FIGURE 1.27 – Évolution de la force de traînée calculée sous OpenFoam en fonction du nombre d’itérations du calcul, pour différents raffinements de maillage.

Cette étude nous montre qu’en dessous de 3 raffinements de maillage, le calcul diverge (pour des raisons de clarté de la figure 1.27, seul le cas avec un maillage raffiné 3 fois est présenté). A partir de 4 raffinements, le calcul aboutit à un résultat. Cependant, la valeur obtenue en fin de calcul pour 4 raffinements diffère largement par rapport aux résultats obtenus pour 5,6 et 7 raffinements qui présentent des valeurs très proches. Nous choisissons le maillage avec 6 raffinements. Cela nous semble être un bon compromis car le temps de calcul n’est pas trop long et cela nous permettra d’avoir plus d’informations lors de l’étude de l’élévation de la surface libre ou du champ des vitesses autour du nageur. Le tableau 1.1 présente les résultats de cette étude.

Nombre de raffinements	Force de traînée calculée (N)	Temps de calcul d’une itération (s)
3	∞	∞
4	-0,44	6
5	-0,36	18
6	-0,38	32
7	-0,37	68

TABLE 1.1 – Résultats de l’étude de sensibilité du maillage autour du modèle de nageur.

Un autre paramètre pouvant impacter la convergence du calcul est le pas de temps Δt utilisé pour une itération de calcul. Son influence est visible essentiellement pour les simulations comprenant plusieurs modèles réduits dans notre veine numérique. La valeur de base de ce paramètre est de 0,1 s et en cas de non-convergence, elle est réduite afin que le calcul converge. Les calculs étant menés jusqu’à atteindre un état stationnaire, la réduction de Δt entraîne un allongement du temps de calcul. Avec les paramètres de maillage et de pas de temps choisis, nos calculs numériques sont composés d’environ 4 millions de cellules pour un temps de calcul d’environ 36 heures par CPU.

Conclusion du chapitre 1

Dans ce chapitre, nous avons pu présenter les moyens mis en place et utilisés dans notre travail. Dans un premier temps, nous avons pris en main les canaux à courant mis à notre disposition par EDF. Nous avons conçu et installé des structures anti-vagues et anti-vortex nous garantissant un écoulement sans remous. Ensuite, nous avons caractérisé l’écoulement au sein des 2 canaux à l’aide d’un capteur de vitesse Ubertone, afin d’identifier une zone de travail dans chacun des canaux. Par ailleurs, nous avons également conçu des modèles réduits de nageurs en se basant sur des mesures de force de traînée sur des nageurs humains. Nous

avons ensuite mis en place un système permettant de mesurer les efforts subis par nos modèles réduits, à l'aide de capteur de force. Ces derniers ont fait l'objet d'une calibration. Enfin, nous avons modélisé le problème étudié numériquement sous OpenFoam et déterminé les équations à résoudre, le modèle de turbulence à utiliser ainsi que les conditions aux limites et les paramètres de maillage qui nous permettent de mener à bien les calculs numériques.

2 Chapitre 2 : Étude des interactions entre 2 nageurs

2.1 Mesure de traînée pour un nageur et influence de la profondeur d'immersion

Nous définissons le référentiel de travail sur la figure 2.1. Ainsi, la force de traînée subie par les modèles réduits sera portée par l'axe \vec{X} .

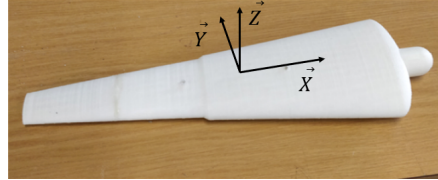


FIGURE 2.1 – Référentiel de travail.

Influence de la profondeur d'immersion des modèles

Dans un premier temps, nous étudions l'influence de la profondeur d'immersion sur les mesures de force de traînée d'un modèle réduit seul dans le canal. Cela va nous permettre de vérifier que la profondeur d'immersion choisie pour les modèles réduits est la bonne. Pour les 3 vitesses d'étude, nous faisons varier la hauteur à laquelle nous plaçons nos modèles réduits, par rapport à l'eau. La référence que nous choisissons pour l'axe vertical est la hauteur à laquelle le modèle commence à effleurer l'eau. Cette configuration est illustrée par le schéma 2.2a. Nous posons dans cette situation l'abscisse verticale $z = 0$. Avec cette convention, le nageur sera totalement immergé pour les valeurs de z inférieures à -5 cm, puisque l'épaisseur maximale des modèles est de 5 cm. Cette situation est présentée sur le schéma 2.2b. Sur ces schémas, la ligne bleue représente le niveau de l'eau au repos dans le canal, dans la situation présentée.

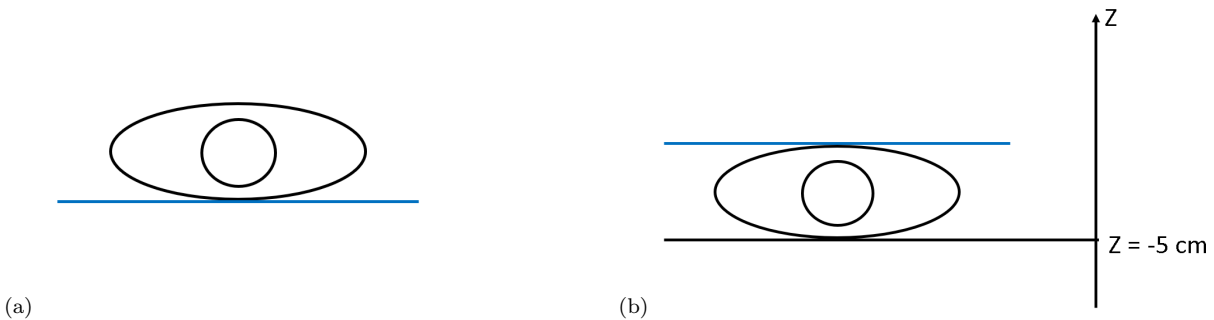


FIGURE 2.2 – Schémas explicatifs de la convention choisie pour le positionnement des modèles selon l'axe vertical, vue de face. (a) $z = 0$ cm. (b) $z = -5$ cm.

Les résultats de cette étude, pour les 3 vitesses, sont présentés sur la figure 2.3.

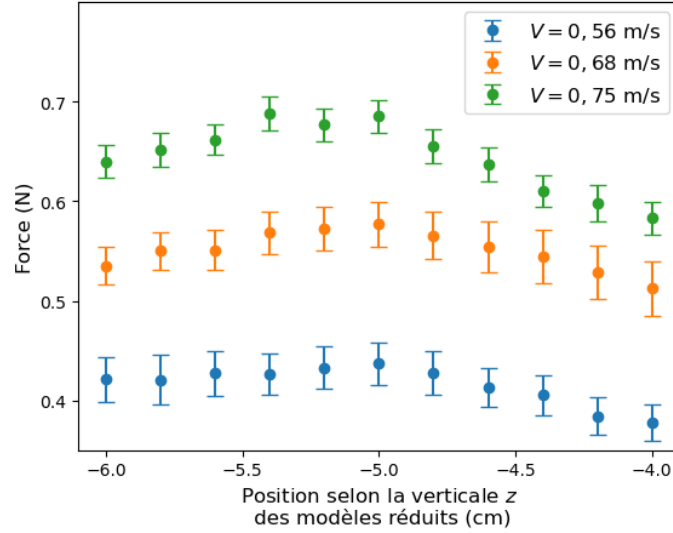


FIGURE 2.3 – Évolution de la force de traînée mesurée aux 3 vitesses d’étude en fonction de la position des modèles selon l’axe vertical.

Nous observons pour les 3 vitesses, pour des positions avec $z > -5$ cm, c’est à dire lorsque le modèle n’est pas totalement immergé, que la force de traînée décroît depuis un maximum situé aux alentours des positions pour lesquelles $z = -5$ cm, lorsque le nageur est totalement immergé. Cela s’explique par le fait que les modèles sont peu à peu émergés : une partie de la maquette est à l’air libre et ne subit donc plus d’efforts. Pour les 3 vitesses, pour des hauteurs z comprises entre -6 et -5 cm, la force de traînée croît jusqu’à atteindre un maximum à $z = -5$ cm. Cela est dû au fait que les modèles se rapprochent peu à peu de la surface libre et voient donc leur traînée de vague augmenter. A l’aide des ces mesures, nous validons le fait que la hauteur de travail pour les 3 vitesses sera la hauteur telle que $z = -5$ cm, où la traînée des modèles est maximale.

Caractérisation d’un modèle seul dans le canal

Une fois la profondeur d’immersion déterminée, nous réalisons des mesures de force de traînée pour un modèle réduit seul dans le canal, pour différentes vitesses. Les résultats sont disponibles sur la figure 2.4. Ce sont ces mesures qui serviront de référence dans la suite afin de déterminer si un nageur est dans une situation plus ou moins favorable que s’il nageait seul. A l’aide d’un ajustement des données avec l’équation 1.5, nous obtenons la valeur du coefficient de traînée de notre modèle réduit seul dans le canal. Il vaut en moyenne 0,58. L’évolution de la force de traînée proportionnellement au carré de la vitesse est un résultat similaire à celui obtenu lors de mesures de traînée passive de nageurs humains par Prétot [38]. En effet, nous nous trouvons à des nombres de Froude plus petits que 0,5 et il a montré qu’une crise de traînée de vague intervient seulement pour des nombres de Froude plus grand que cette valeur. La proportionnalité de la traînée avec le carré de la vitesse et la constance du coefficient de traînée ne sont alors plus vérifiées. Nous considérerons donc dans notre étude le coefficient de traînée comme indépendant du nombre de Froude et donc de la vitesse de l’écoulement. Enfin, ces mesures sont comparées à des calculs réalisés sous OpenFoam via le modèle numérique présenté dans le premier chapitre.

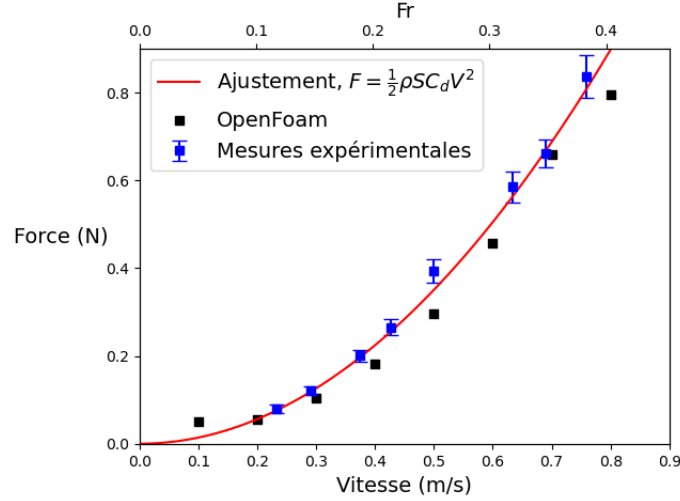


FIGURE 2.4 – Évolution de la force de traînée mesurée pour un modèle réduit seul dans le canal en fonction de la vitesse de l'écoulement.

2.2 Nage en ligne

Nous définissons comme « nage en ligne » les configurations où les 2 nageurs sont l'un derrière l'autre, sur le même axe. Un exemple d'une telle configuration est donné sur la figure 2.5.

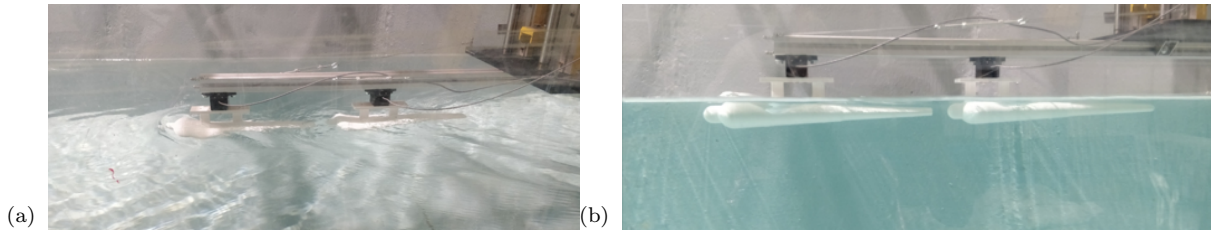


FIGURE 2.5 – Exemple d'une configuration de nage en ligne. (a) Vue aérienne. (b) Vue sous-marine.

Nous notons L_x la distance entre les têtes des nageurs, dans le sens de l'écoulement, comme défini sur la figure 2.6a. En considérant le référentiel défini sur la figure 2.1, la distance L_x sera négative dans cette section et même inférieure à $-0,4$ m (taille des modèles) afin d'éviter une collision ou un chevauchement des modèles réduits. A partir de la définition du coefficient de traînée d'un modèle isolé, donnée par l'équation 1.5, nous définissons le coefficient de traînée normalisé :

$$\overline{C_d} = \frac{C_d}{C_{d,0}}, \quad (2.1)$$

où C_d désigne le coefficient de traînée du modèle réduit dans la configuration étudiée et $C_{d,0}$ le coefficient de traînée d'un nageur seul dans le canal. Étudier ce coefficient adimensionné permet d'identifier rapidement les configurations avantageuses ou désavantageuses pour les nageurs : si $\overline{C_d}$ est inférieur à 1, alors le nageur subit moins de traînée que s'il était seul et donc la position dans laquelle il se trouve lui permet d'économiser son énergie. Au contraire, si $\overline{C_d}$ est supérieur à 1, alors le nageur subit une plus grande traînée que s'il était seul et cette position augmente sa dépense énergétique.

Notre première campagne de mesures consiste, pour les 3 vitesses d'étude et pour différentes valeurs de L_x , à mesurer la force de traînée subie par nos 2 modèles réduits, puis calculer les coefficients de traînée correspondants. Les résultats sont présentés sur la figure 2.6.

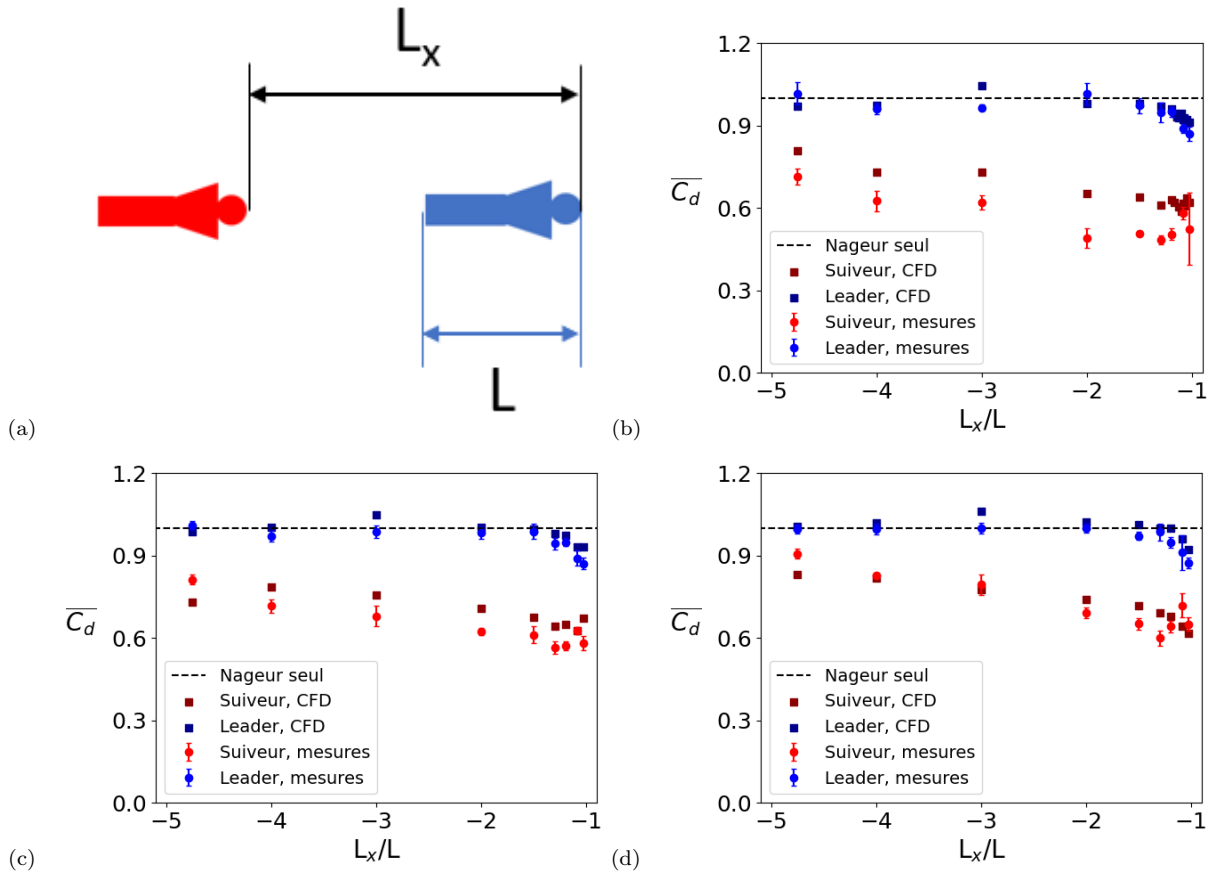


FIGURE 2.6 – Etude du drafting dans des configurations de nage en ligne. (a) Schéma représentatif de la nage en ligne. (b) Résultats pour $V = 0,56$ m/s. (c) Résultats pour $V = 0,68$ m/s. (d) Résultats pour $V = 0,75$ m/s.

Les ronds représentent les mesures expérimentales tandis que les carrés sont des résultats de calcul sous OpenFoam. Pour le nageur leader, nous observons que lorsqu'il est suivi de près par un autre nageur (à moins d'une demie longueur de corps), il voit sa traînée être réduite d'au plus 15% par rapport à la nage seul. Il n'est donc pas totalement désavantageux de mener une course. Lorsque le modèle n'est plus suivi de près, alors il subit une traînée égale à celle qu'il subirait s'il était seul. Il n'y a donc, pour le leader, aucun avantage, autre que mener la course, à tirer de ce type de configuration. Pour le nageur suiveur, sa traînée peut être réduite jusqu'à près de 45% lorsqu'il se trouve juste derrière le leader. Plus la distance entre les 2 modèles augmente, plus cette réduction de traînée est faible. Cependant, elle n'est pas négligeable même pour des grandes distances entre les nageurs : ainsi, pour un écart de 4 tailles de corps entre les modèles (soit environ 8m pour des humains), le suiveur a une traînée 20% plus faible que s'il était seul. Ce résultat est important à la fois pour les compétitions, puisqu'il montre que cette position est favorable à l'économie d'énergie, mais aussi pour l'entraînement : en effet, lorsque plusieurs nageurs se suivent au sein d'une même ligne d'eau, afin de s'assurer que les nageurs produisent l'effort visé, il faut donc qu'ils ne soient pas trop proche les uns des autres. Par ailleurs, nous observons une bonne corrélation entre nos mesures expérimentales et les résultats de calcul sous OpenFoam : les tendances sont les mêmes et les valeurs obtenues sont proches, bien qu'OpenFoam ait tendance à donner des valeurs un peu supérieures aux résultats expérimentaux.

Afin d'expliquer la réduction de traînée observée pour le nageur suiveur, nous nous intéressons au champ des vitesses dans le sillage du leader. Ce champ de vitesse est calculé à l'aide d'OpenFoam. La figure 2.7 présente l'évolution de la vitesse en surface de l'écoulement, selon l'axe de symétrie du canal et du modèle,

pour une vitesse en entrée de 0,56 m/s.

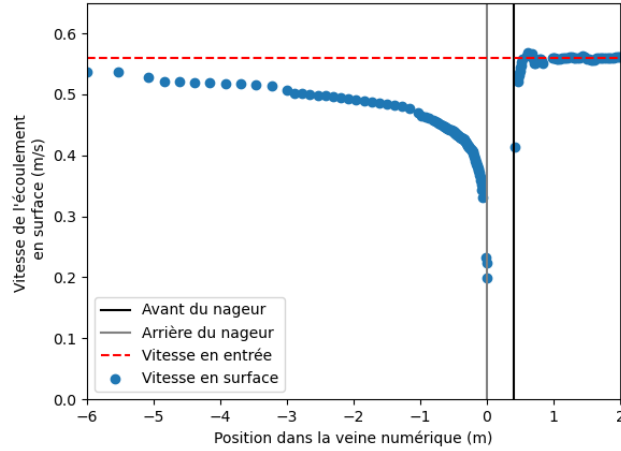


FIGURE 2.7 – Évolution de la vitesse en surface le long de l’axe de symétrie du canal, dans le sillage d’un modèle réduit, pour une vitesse en entrée de 0,56 m/s, obtenue sous OpenFoam.

Nous observons ainsi que dans le sillage du leader, la vitesse de l’écoulement est bien plus faible que la vitesse en entrée du canal. Ainsi, nous supposons que la réduction de traînée rencontrée par le nageur suiveur s’explique par cette différence de vitesse. Pour vérifier cela, nous calculons, pour chaque couple position/vitesse de l’écoulement de la figure 2.7, le coefficient de traînée normalisé correspondant à l’aide des équations 1.5 et 2.1. Nous avons :

$$F_{trainee} = \frac{1}{2} \rho S C_d V^2 \quad (2.2)$$

Or, le modèle situé derrière le leader « voit » une vitesse $V_{sillage} < V$ d’après la figure 2.7. Nous obtenons alors, pour le modèle suiveur :

$$\overline{C_d} = \left(\frac{V_{sillage}}{V} \right)^2 \quad (2.3)$$

Nous comparons ensuite ces résultats avec ceux obtenus expérimentalement en canal et numériquement sous OpenFoam. Cette comparaison est visible sur la figure 2.8.

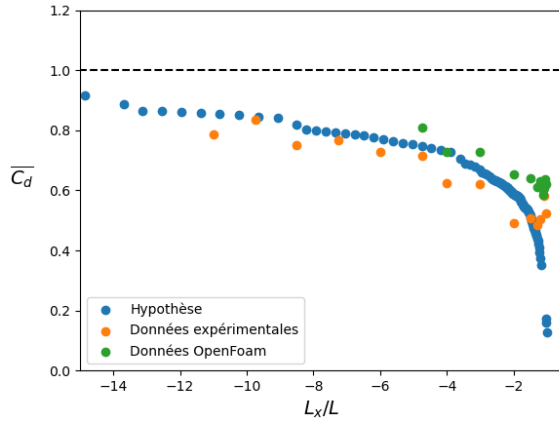


FIGURE 2.8 – Évolution du coefficient de traînée normalisé du nageur suiveur en fonction de la distance qui le sépare du leader, pour une vitesse en surface de 0,56 m/s.

Ainsi, les valeurs obtenues via notre hypothèse sont cohérentes avec les valeurs obtenues expérimentalement et numériquement. Notre hypothèse semble donc correcte : la réduction de traînée rencontrée par le nageur suiveur est due aux plus faibles vitesses de l'écoulement au sein du sillage du leader. De plus, il semble que l'effet du drafting soit visible pour des distances bien plus grandes que celles que nous avons étudiées expérimentalement : d'après notre hypothèse, le suiveur pourrait encore avoir une réduction de traînée de 10% par rapport à un nageur isolé en se trouvant à 14 longueurs de corps du leader, soit une distance de 28 mètres pour des nageurs humains. Par ailleurs, pour les 3 vitesses étudiées, les données expérimentales montrent que l'évolution de la traînée du suiveur en fonction de la distance au leader n'est pas monotone. En effet, il existe un maximum local de traînée pour le point se situant à $L_x/L = 1,09$. Ce maximum local n'étant jamais observé dans d'autres sports, nous supposons que cette augmentation locale de traînée est la conséquence d'effets de surface libre. De plus, cette observation semble similaire à l'effet de vague mis en avant dans les travaux de Yuan *et al.* [30]. Afin de prouver que cette observation est bien un effet de surface libre, nous calculons, à l'aide d'OpenFoam, la déformée de la surface libre noté ζ pour un modèle réduit seul. La figure 2.9 montre l'allure de cette déformée le long de l'axe de symétrie du canal. La ligne verticale rouge marque la position $L_x/L = 1,09$.

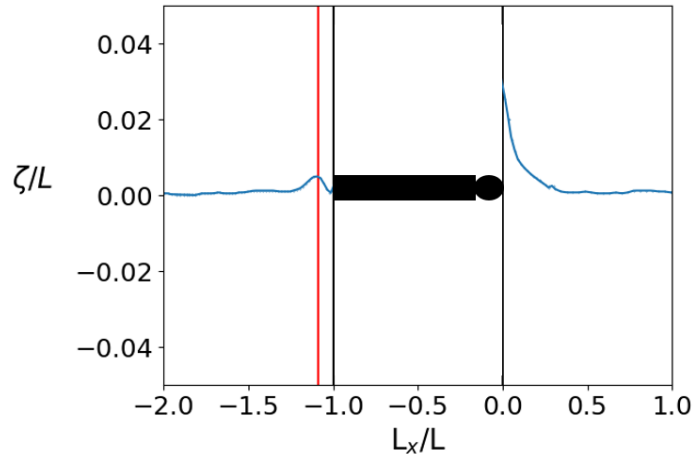


FIGURE 2.9 – Évolution de la déformée de la surface libre le long de l'axe de symétrie du canal, pour un modèle seul et une vitesse d'écoulement de 0,56 m/s, obtenue sous OpenFoam.

Ainsi, en accord avec les travaux de Yuan *et al.* [30], nous observons la formation d'une vague en amont du nageur. En aval du nageur, une vague de plus petite amplitude se forme, et sa crête se trouve proche de la position $L_x/L = 1,095$. Ainsi, l'augmentation de la traînée à cette position peut s'expliquer par le fait que le nageur rencontre une vague de gradient positif selon l'axe de l'écoulement. Par ailleurs, certains de nos résultats concernant la force de traînée mais aussi l'état de la surface libre sont en désaccord avec ceux de Yuan *et al.*. En effet, ils observent, dans des configurations de nage en ligne, une alternance de positions où la traînée de vague du suiveur est réduite avec des positions où elle augmente, selon la valeur de L_x . Au contraire, nous observons expérimentalement que toutes les positions du suiveur lui confèrent une réduction de traînée par rapport à la nage seul. Concernant l'état de la surface libre, Yuan *et al.* montrent la présence de nombreuses vagues transverses dans le sillage du leader. Quant à nous, nous observons l'existence d'une seule vague dans le sillage du leader d'après la figure 2.9. Cette différence peut s'expliquer par le fait que Yuan *et al.* ont choisi une approche potentielle dans leurs travaux, tandis que nous avons choisi une approche turbulente pour nos calculs CFD, ce qui nous semblait plus proche de la réalité au vu des nombres de Reynolds calculés dans la section 1.1 et nous permet ainsi de capturer tous les effets existant en conditions réelles de course.

Comparaison avec les travaux de Westerweel [31] *et al.*

Afin de s'assurer de la pertinence de nos résultats, nous les comparons avec des travaux similaires réalisés par Westerweel *et al.*. Son dispositif expérimental est assez similaire au notre : des modèles réduits sont placés dans un canal à courant de 3 mètres de long et de 1 mètre de large. Ce dispositif est présenté sur la figure 2.10.

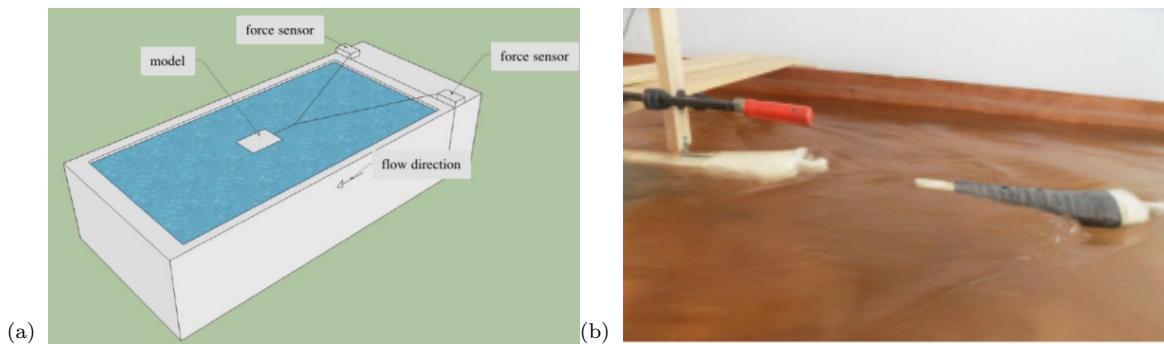


FIGURE 2.10 – Dispositif expérimental utilisé par Westerweel [31]. (a) Schéma du dispositif. (b) Modèles réduits placés dans l'écoulement.

Nous travaillons à un nombre de Froude identique et égal à 0,28. La géométrie des modèles réduits est légèrement différente de la notre : nous avons des modèles un peu plus profilés. En effet, nos modèles ont une tête et des épaules plus arrondies. En revanche, leur longueur est la même. La différence majeure entre nos expériences et celles de Westerweel est que dans les nôtres, les modèles sont fixes selon l'axe vertical, tandis que Westerweel a laissé libre ce degré de liberté pour le modèle réduit sur lequel sont effectuées les mesures, ce qui semble plus proche du comportement d'un nageur réel. La figure 2.11 présente la comparaison de nos résultats et de ceux de Westerweel.

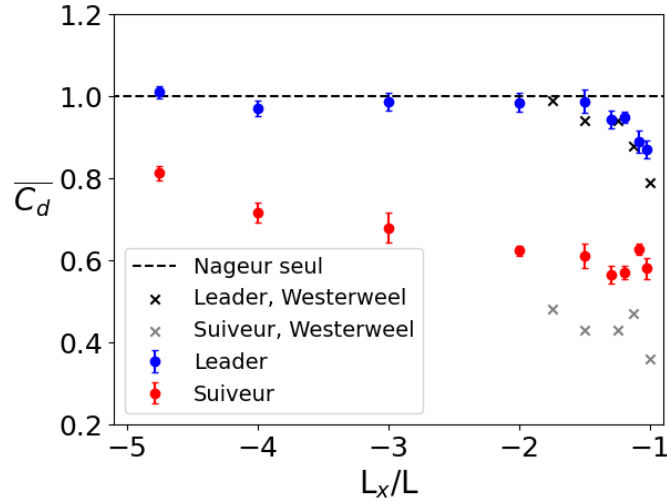


FIGURE 2.11 – Comparaison des coefficients de traînée adimensionné mesuré lors de nos expériences et dans celles de Westerweel *et al.*, pour une vitesse de 0,56 m/s

Concernant le nageur leader, nous observons les mêmes résultats que Westerweel : sa traînée est réduite par rapport à un nageur isolé seulement lorsqu'il est suivi de très près. Cette réduction peut aller jusqu'à 15%. En revanche, pour le suiveur, nous observons des réductions de traînée plus faibles que celles mesurées par Westerweel. Ainsi, la liberté de mouvement des modèles selon l'axe vertical semble avoir un impact sur la force de traînée rencontrée par le suiveur. Cependant, les tendances observées sont les mêmes dans les 2 expériences, ce qui nous conforte quant à la pertinence de nos résultats. De plus, notre dispositif nous a permis d'étudier un plus large éventail de configurations de nage.

2.3 Nage côte à côte

Lors des courses de natation en eau libre, les nageurs se retrouvent souvent à côté de l'un de leurs concurrents : au départ, lors d'un dépassement, dans la zone de ravitaillement ou encore lors d'un virage autour d'une bouée. C'est pourquoi il est important d'étudier des configurations où les modèles ne sont plus dans le même axe. Un exemple de ce type de configuration est donné sur la figure 2.12.

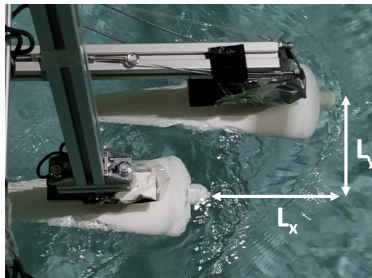


FIGURE 2.12 – Exemple d'une configuration de nage côte à côte.

Nous reprenons pour cette étude la définition de L_x et nous définissons L_y comme la distance entre les têtes des modèles réduits selon l'axe perpendiculaire à l'écoulement. Ces définitions sont illustrées sur la figure 2.13a. Dans cette seconde campagne de mesures, nous travaillons à L_y constant avec $L_y = 12,5$ cm (plus petite valeur de L_y possible telle que les nageurs ne se touchent pas), puis nous faisons varier la valeur de L_x de manière positive et négative. Pour chaque configuration obtenue et chaque vitesse étudiée, nous mesurons la force de traînée subie par le modèle réduit puis calculons le coefficient de traînée normalisé correspondant. Les résultats de ces mesures sont présentés sur la figure 2.13.

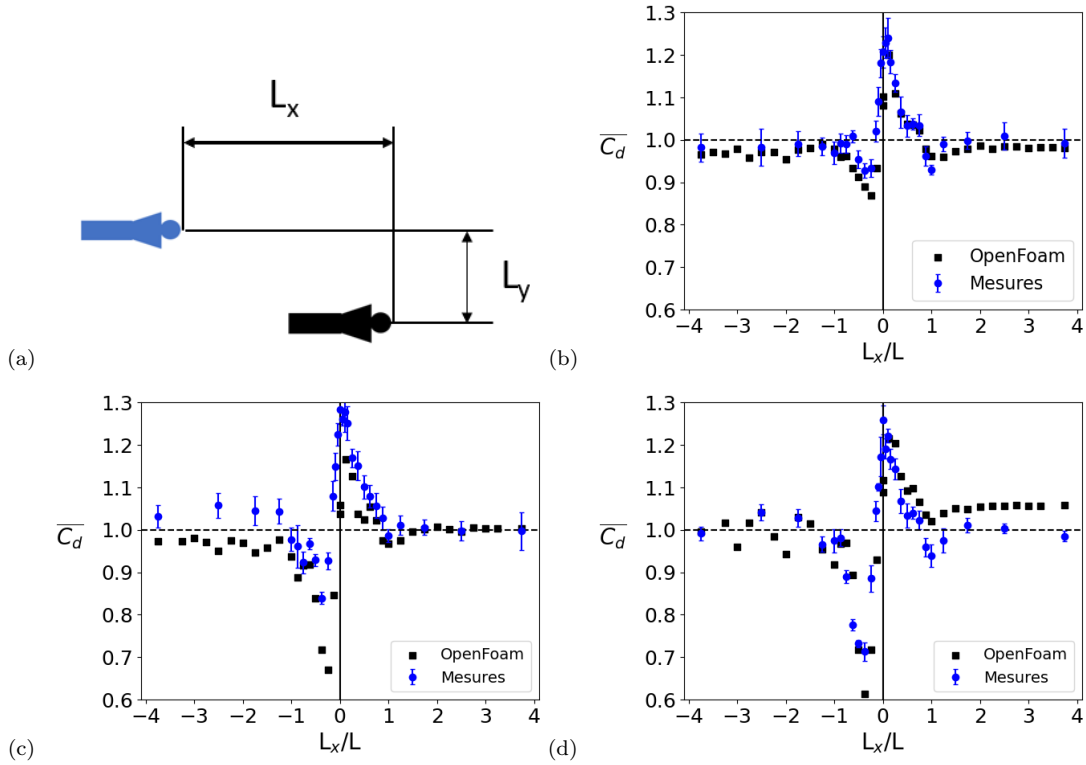


FIGURE 2.13 – Résultats des mesures en nage côte à côte, pour $L_y = 12,5$ cm. (a) Schéma représentatif de la nage côte à côte. (b) Résultats pour $V = 0,56$ m/s. (c) Résultats pour $V = 0,68$ m/s. (d) Résultats pour $V = 0,75$ m/s.

Nous observons que la traînée des modèles réduits est maximale pour $L_x/L = 0$, c'est à dire quand les têtes des modèles se trouvent au même niveau. Cette configuration est illustrée sur la figure 2.14a. Dans cette configuration, les nageurs subissent une force de traînée 25% plus élevée que celle d'un nageur seul. Elle est donc à double tranchant : elle peut engendrer un épuisement de l'athlète mais peut aussi être utilisée pour épuiser un concurrent supposé moins endurant. De plus, ce maximum de traînée semble être indépendant de la vitesse de nage. Par ailleurs, nous observons également un minimum de traînée pour $L_x/L = -0,5$, c'est à dire quand la tête du modèle se trouve au niveau de la hanche de son voisin. Cette configuration est illustrée sur la figure 2.14b.

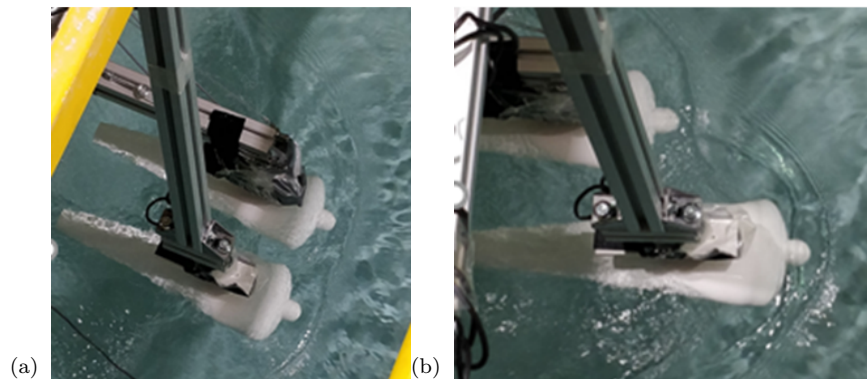


FIGURE 2.14 – (a) Configuration de nage dans laquelle la traînée subie par les modèles est maximale. (b) Configuration de nage dans laquelle la traînée subie par le modèle situé au niveau de la hanche de son voisin est minimale.

La valeur de la réduction de traînée dans cette configuration semble dépendre de la vitesse de nage, allant de 10% pour la vitesse la plus faible à 30% pour la vitesse la plus haute. Cette position est donc favorable à l'économie d'énergie. De plus, contrairement aux configurations de nage en ligne, elle permet au nageur d'observer son concurrent lors de ses respirations, sans avoir besoin de relever la tête. Cependant, la réduction de traînée est plus faible que pour la nage en ligne. En revanche, dans cette configuration, le modèle de tête (dont le voisin est au niveau de sa hanche) voit lui sa traînée être environ 10% plus élevée que s'il nageait seul (position correspondant à $L_x/L = 0,5$). Cette configuration lui est donc grandement défavorable et est donc à éviter lors d'une course. L'addition du bénéfice tiré par le nageur situé au niveau de la hanche de son concurrent et du désavantage créé pour le nageur de tête rend cette configuration aussi favorable pour le premier nommé que s'il se plaçait juste derrière son concurrent, dans une configuration de nage en ligne. Enfin, comme pour la nage en ligne, nous notons la bonne corrélation entre les mesures expérimentales et les calculs OpenFoam tant au niveau des tendances que des valeurs.

Dans un second temps, nous reproduisons le même type de mesures mais en faisant varier la valeur de L_y . Cela nous permet de créer une « carte des forces » pour un ensemble des configurations à 2 nageurs. De plus, nous utilisons l'outil numérique afin de multiplier les configurations étudiées et une interpolation afin d'avoir une continuité des données. Ces résultats sont présentés pour les 3 vitesses étudiées, sur la figure 2.15. Pour chacune des cartes, la partie haute (données discrètes) correspond aux mesures expérimentales. La partie basse quant à elle correspond aux données numériques obtenues avec OpenFoam et rendues continues à l'aide d'une interpolation. La carte se lit de la manière suivante : un point correspond à la position de la tête d'un nageur A, par rapport au nageur B schématisé en noir sur la figure. La couleur de ce point correspond à la valeur de la force de traînée subie par le nageur A. Enfin, la zone grise représente une zone interdite au nageur A : s'il s'y trouve, les 2 nageurs rentrent en collision et/ou se chevauchent. Ainsi, nous observons que la localisation des positions avantageuses ou désavantageuses en terme de traînée semble indépendante de la vitesse de nage. En revanche, l'intensité de la force de traînée dans ces zones varie avec la vitesse : les amplitudes sont plus grandes pour les plus hautes vitesses. Par ailleurs, nous notons que pour $|L_y/L| > 0.75$, il n'y a plus ni de réduction ni d'augmentation de traînée : le phénomène de drafting n'existe plus dans ces configurations. Enfin, ces cartes confirment les conclusions précédemment établies : la position préférentielle pour s'économiser pendant une course est de suivre de près un autre nageur. La configuration à éviter est celle où 2 concurrents nagent côte à côte, à la même hauteur.

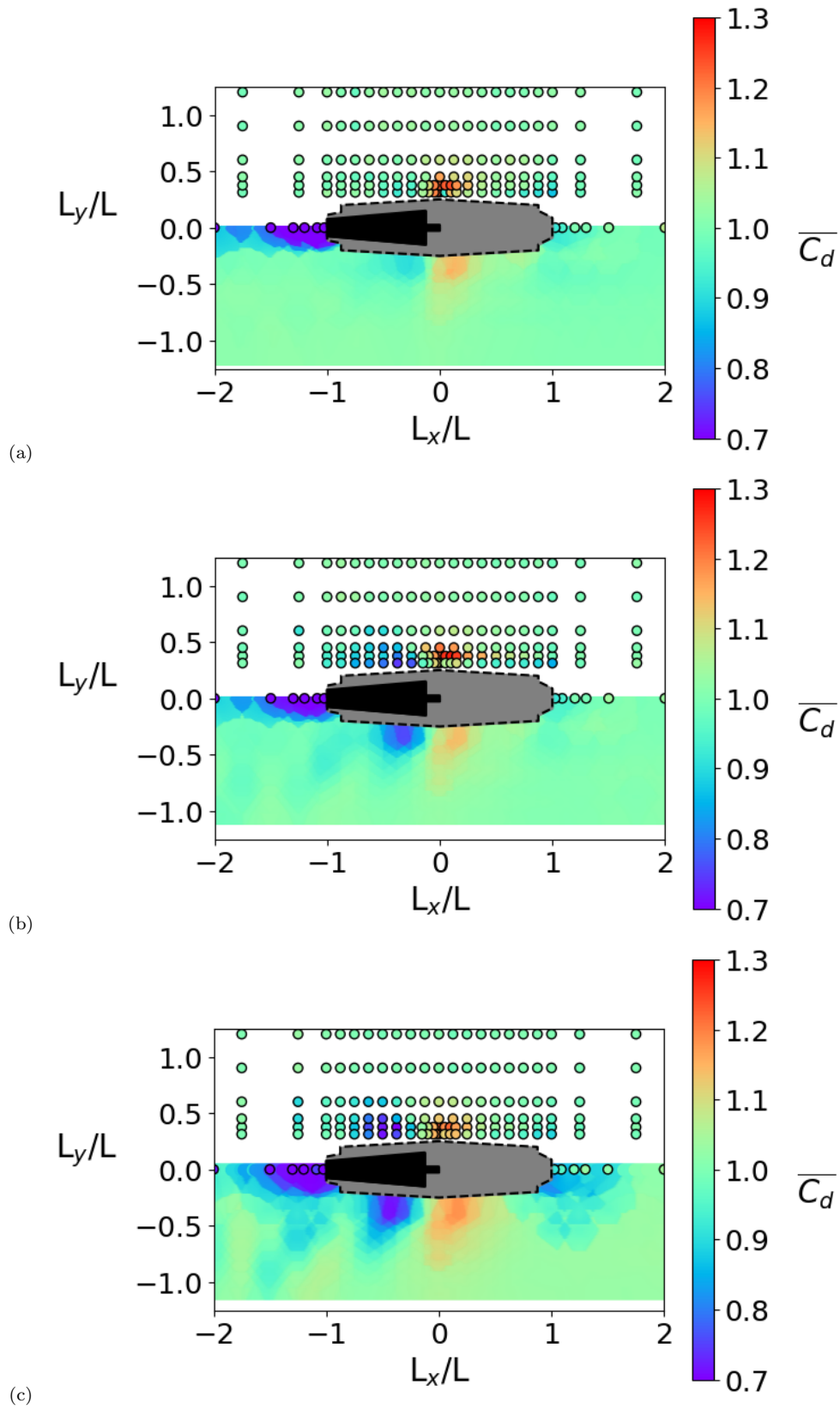


FIGURE 2.15 – Carte des forces de traînée, données expérimentales et numériques. (a) $V = 0,56$ m/s. (b) $V = 0,68$ m/s. (c) $V = 0,75$ m/s.

Discussion autour du phénomène physique expliquant l'existence du minimum et du maximum de traînée

Nous supposons que l'existence des configurations de course côte à côte présentant le maximum et le minimum de traînée est due à des effets de surface libre. A l'aide d'OpenFoam, nous calculons l'élévation de la surface libre ζ autour d'un modèle seul. Les résultats sont affichés sur la figure 2.16a et peuvent être comparés qualitativement à la figure 2.16b.

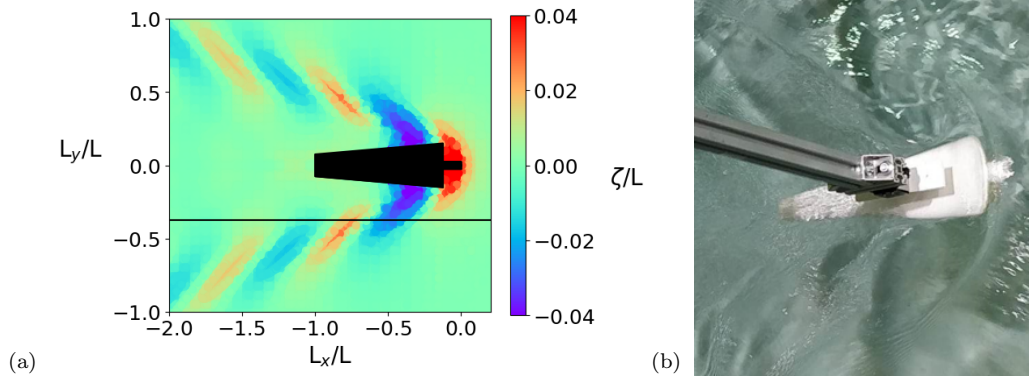


FIGURE 2.16 – . (a) Élévation de la surface libre obtenue avec OpenFoam pour $V = 0,68$ m/s. (b) Allure qualitative du champ de vague expérimental

En mettant en parallèle l'élévation de la surface libre avec la position favorable de nage mise en avant sur la figure 2.15 (au niveau de la hanche d'un concurrent), nous observons que cette réduction de traînée semble être due au fait de « surfer » sur une vague de gradient négatif selon l'axe de l'écoulement, créée par le nageur voisin. Cela peut être confirmé en regardant l'allure de la déformée de la surface libre pour une valeur de L_y constante. Un exemple d'un tel profil est donné sur la figure 2.17. Le trait noir sur la figure 2.16a donne la localisation de ce profil.

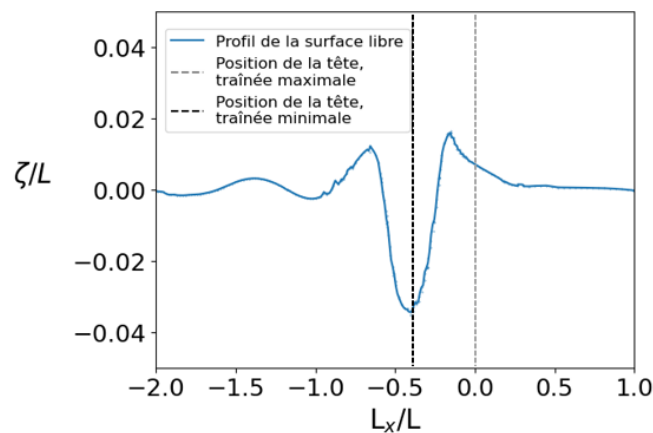


FIGURE 2.17 – Profil d'élévation de la surface libre obtenu avec OpenFoam pour $L_y = -0,15$ m et $V = 0,68$ m/s

Sur cette figure, la ligne verticale grise représente la position de la tête du nageur dans la configuration où la traînée maximale tandis que la ligne verticale noire représente la position de la tête du nageur dans la configuration où la traînée est minimale. Ainsi, pour la position de traînée minimale, nous observons qu'une grande partie du corps du nageur se trouve sur une vague de gradient négatif selon l'axe de l'écoulement,

confirmant notre supposition. Ceci explique la réduction de traînée observée dans cette configuration. En revanche, une explication similaire ne peut pas être donnée pour expliquer l'existence du maximum de traînée. En effet, dans cette configuration le corps du nageur se trouve à la fois sur une vague de gradient négatif et une vague de gradient positif selon l'axe de l'écoulement. Une autre hypothèse pour expliquer l'augmentation de traînée dans cette configuration est la suivante : la vague située en amont des 2 nageurs, visible sur la figure 2.16a au niveau de la tête du modèle, interagit avec celle du voisin, créant une vague de plus grosse amplitude. Nous supposons que cela a pour conséquence d'entraîner une augmentation de la traînée de vague des 2 modèles et donc une augmentation de la force de traînée totale qu'ils subissent.

Enfin, afin de confirmer que les variations de traînée sont bien la conséquence d'effets de surface libre, nous complétons notre étude par 3 calculs sous OpenFoam pour des modèles complètement immergés dans un écoulement uniquement composé d'eau (plus de surface libre). Le premier calcul est celui d'un modèle seul afin de calculer un coefficient de traînée de référence, le second correspond à la configuration où la traînée est maximale, c'est à dire avec $L_y/L = -0,31$ et $L_x/L = 0$. Le troisième correspond à la configuration où la traînée est minimale avec $L_y/L = -0,31$ et $L_x/L = 0,5$. Les résultats sont présentés dans le tableau 2.1.

Configuration étudiée	$\overline{C_d}$	$\overline{C_d}$
Modèle seul	$1,000 \pm 0,008$	
Configuration de traînée maximale	$1,015 \pm 0,006$	
Configuration de traînée minimale, modèle de tête	$1,033 \pm 0,004$	
Configuration de traînée minimale, modèle au niveau de la hanche	$1,023 \pm 0,009$	

TABLE 2.1 – Résultats des calculs pour les cas submergés, avec $V = 0,68$ m/s.

Nous observons que pour le cas de nageurs évoluant profondément immergés, la force de traînée qu'ils subissent est quasiment la même dans toutes les situations. Ainsi, nous concluons que l'existence des positions de maximum et minimum de traînée en nage côte à côte est bien la conséquence d'effets de la surface libre.

Application à la taille des couloirs de nage en bassin

Nous cherchons ici à déterminer si les nageurs en bassin peuvent ressentir les effets du drafting en nageant dans 2 lignes d'eau voisines. Pour cela, nous fixons $L_x/L = 0$ (configuration où la traînée est maximale) et nous faisons varier la valeur de L_y . Nous calculons sous OpenFoam la valeur du coefficient de traînée normalisé des 2 modèles. Les résultats sont présentées sur la figure 2.18.

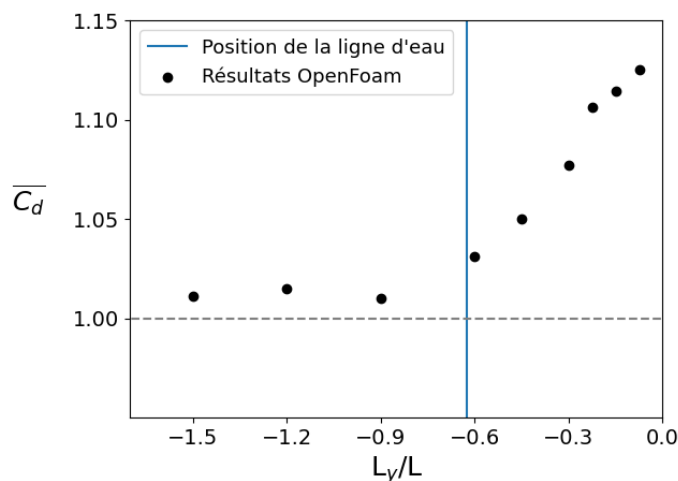


FIGURE 2.18 – Évolution du coefficient de traînée normalisé des modèles réduits en fonction de la distance L_y/L les séparant, pour $L_x/L = 0$, obtenue avec OpenFoam, pour $V = 0,68$ m/s.

En bassin, les couloirs de nage mesurent 2,5 mètres de large. Ainsi, si un nageur est au centre de son couloir ($L_y/L = 0$), la ligne d'eau se trouvera 1,25 mètres à sa gauche et à sa droite. En supposant qu'il mesure environ 2 mètres, la ligne d'eau est située à l'abscisse $L_y/L = -0,625$ sur la figure 2.18 et est matérialisée par la ligne verticale bleue. Ainsi, si l'un des 2 nageurs est au centre de son couloir, son voisin (même en étant très proche de la ligne d'eau) peu subir des effets de drafting d'amplitude assez faible. En revanche, si les 2 nageurs ne sont pas au centre de leur couloir et se rapprochent de la ligne d'eau qui les sépare, il semble possible que les effets de drafting soient bien plus importants. Pour s'en rendre compte, nous traçons pour $L_y/L = -0,625$, l'évolution de $\overline{C_d}$ en fonction de L_x/L sur la figure 2.19, à l'aide de l'interpolation qui a permis d'établir la carte des forces de la figure 2.15c.

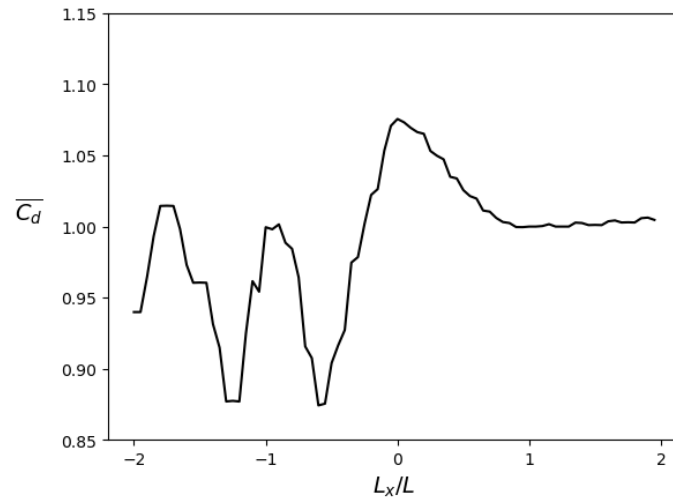


FIGURE 2.19 – Évolution du coefficient de traînée normalisé pour $L_y/L = -0,625$ en fonction de L_x/L .

Nous observons ici, qu'un nageur qui se collerait à la ligne d'eau de son voisin, pourrait bénéficier d'effets de drafting (jusqu'à 10% de réduction de traînée dans les configurations les plus favorables), si ce dernier reste au milieu de son couloir de nage. Ces effets peuvent être d'autant plus importants si le voisin se rapproche lui aussi de sa ligne d'eau. Cependant, l'impact de cette dernière sur l'atténuation des vagues et du sillage n'est ici pas pris en compte. Pour le quantifier, il faudrait procéder à des mesures de traînée sur des nageurs humains en bassin.

2.4 Forces transversales

Pour compléter notre étude des interactions entre nageurs, nous nous intéressons dans cette section aux forces subies par les nageurs selon l'axe perpendiculaire à l'écoulement \vec{Y} défini dans le référentiel de travail de la figure 2.1. Nous utilisons les mêmes capteurs de force que dans l'étude précédente. Nous notons F_y la force subie par un modèle et portée par \vec{Y} . Par définition du référentiel de travail, si $F_y > 0$ alors le modèle étudié repoussé par son voisin, et si $F_y < 0$ alors le modèle étudié est attiré par son voisin. Cette convention est illustrée sur la figure 2.20.

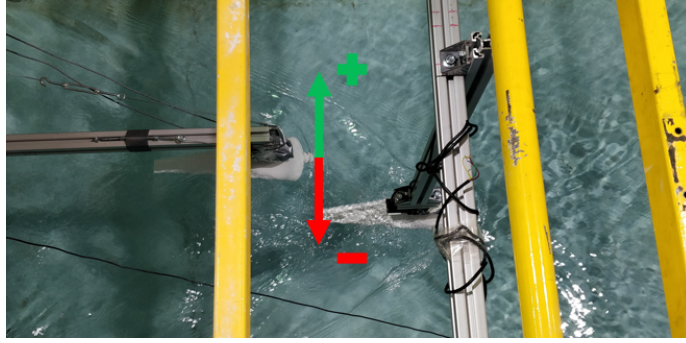


FIGURE 2.20 – Convention utilisée pour l'étude des forces portées par l'axe \vec{Y} .

Par analogie avec le coefficient de traînée, nous définissons un coefficient transverse :

$$C_s = \frac{F_y}{\frac{1}{2}\rho S V^2} \quad (2.4)$$

où ρ est la masse volumique de l'eau, S la surface apparente du modèle et V la vitesse de l'écoulement. Nous définissons également le coefficient transverse adimensionné :

$$\overline{C_s} = \frac{C_s}{C_{d,0}} \quad (2.5)$$

où $C_{d,0}$ est le coefficient de traînée du modèle défini par l'équation 1.5. Pour cette étude, nous travaillons à valeur de L_y/L fixe et égale à -0,31 et faisons varier la valeur de L_x/L . La figure 2.21 présente l'évolution du coefficient transverse adimensionné en fonction de L_x/L .

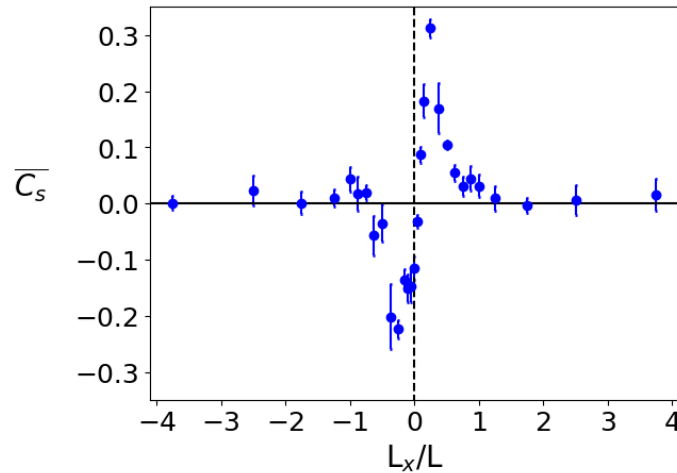


FIGURE 2.21 – Évolution du coefficient transverse adimensionné en fonction de L_x/L , pour $L_y/L = -0,31$ et $V = 0,75$ m/s .

Nous observons que lorsqu'un modèle se trouve légèrement devant son voisin, son coefficient transverse est positif, la force F_y qu'il subit l'est donc aussi. Il est alors repoussé par son voisin. De même, lorsqu'un modèle se trouve légèrement derrière son voisin, au niveau de sa hanche, son coefficient transverse est négatif, la force F_y qu'il subit l'est par conséquent aussi, et il est donc attiré par son voisin. Ainsi, si nous appliquons ces observations à la configuration de la figure 2.20, alors les 2 modèles subissent une force qui les tire vers leur droite. Par conséquent, les nageurs doivent les compenser afin de nager en ligne droite, ce qui est important dans le cadre d'une course en eau libre afin de parcourir le minimum de distance entre les bouées

délimitant le parcours. De plus, l'intensité de ces forces est bien moindre que celle des forces de traînée. En effet, dans la configuration la plus favorable pour le suiveur, c'est à dire pour $L_x/L = 0,5$, nous avons $|F_y/F_{traînee}| = |\overline{C}_s/\overline{C}_d| = 0,22/0,7 = 0,31$. Les effets de traînée sont donc 3 fois plus importants. Enfin, nous remarquons, qu'au delà d'une longueur de corps, c'est à dire pour $|L_x/L| > 1$, les modèles ne subissent plus de forces selon l'axe \vec{Y} . La zone d'influence de ces forces est donc bien plus petite que celle des forces de traînée.

Conclusion du chapitre 2

Dans ce chapitre, nous avons étudié les interactions entre 2 modèles réduits de nageurs. Pour des configurations de nage en ligne, nous avons observé une réduction de traînée de l'ordre de 15% pour le leader comparé à la nage seul lorsqu'il est suivi de près par un autre nageur. Pour le suiveur, lorsqu'il est collé au leader, il bénéficie d'une réduction de traînée d'environ 40% par rapport au cas où il serait seul. Cette réduction de traînée diminue lorsque la distance entre les 2 modèles augmente. Tous ces résultats sont similaires à ceux observés dans d'autres sports tels que le cyclisme ou la course à pied. Concernant la nage côte à côte, nous avons mis en avant 2 configurations particulières. Lorsque les têtes des nageurs sont au même niveau, ils voient leur traînée être augmentées de 25% par rapport à un nageur isolé. De plus, lorsqu'un nageur se trouve au niveau de la hanche de son voisin, sa traînée est réduite d'environ 30% par rapport à la nage seul. Nous avons montré à l'aide d'une étude numérique que ces résultats sont dus à des effets de surface libre, ce qui explique qu'ils ne soient pas observés en cyclisme et en course à pied. Le tableau 2.2 présente un récapitulatif des résultats et une comparaison avec d'autres sports dans la littérature.

Auteur	Sport	Configuration étudiée	Effet sur la traînée
Bolon <i>et al.</i>	Natation	Nage en ligne, nageur suiveur	-40%
Bolon <i>et al.</i>	Natation	Nage en ligne, nageur leader (suivi de près)	-15%
Bolon <i>et al.</i>	Natation	Nage côte à côte, à la hanche	-30%
Bolon <i>et al.</i>	Natation	Nage côte à côte, têtes au même niveau	+25%
Westerweel <i>et al.</i>	Natation	Nage en ligne, nageur suiveur	-50%
Westerweel <i>et al.</i>	Natation	Nage en ligne, nageur leader (suivi de près)	-15%
Blocken <i>et al.</i>	Cyclisme	En ligne, cycliste suiveur	-27%
Blocken <i>et al.</i>	Cyclisme	En ligne, cycliste leader (suivi de près)	-1,6%
Moro <i>et al.</i>	Course à pied	En ligne, coureur suiveur	-40%
Moro <i>et al.</i>	Course à pied	En ligne, coureur leader (suivi de près)	-4%

TABLE 2.2 – Tableau récapitulatifs des effets du drafting dans différents sports.

3 Chapitre 3 : Étude des interactions entre nageurs formant un peloton

Lors des courses de natation en eau libre, les nageurs évoluent au sein de groupes de plusieurs athlètes. Cela est la conséquence du départ simultané pour tous les nageurs. Ils bénéficient alors des effets du drafting au sein de ces groupes. Ces derniers sont appelés pelotons. Durant l'épreuve, ils peuvent prendre diverses formes : file indienne, quinconce, « flèche » qui sont illustrées par la figure 3.1. Nous cherchons donc ici à quantifier les effets du drafting pour différentes formations de pelotons.

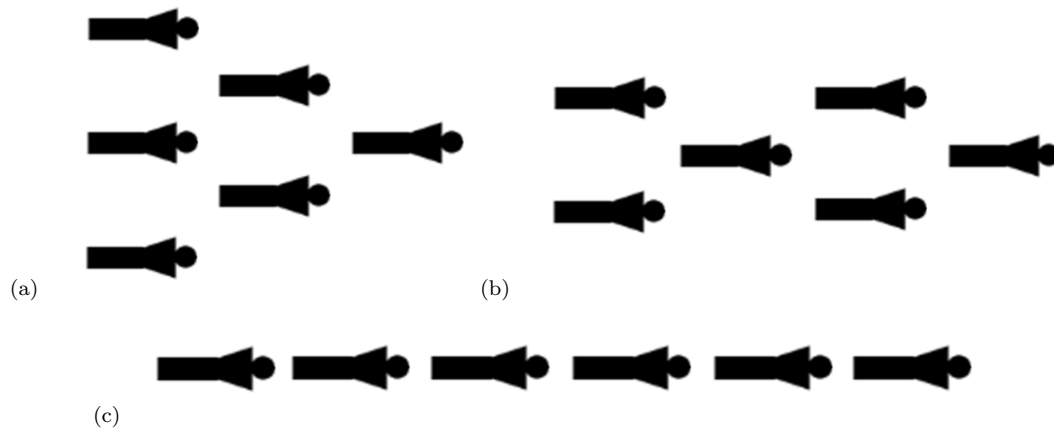


FIGURE 3.1 – Schéma de différentes configurations de peloton étudiées. (a) Peloton en « flèche ». (b) Peloton en quinconce. (c) Peloton en file indienne.

3.1 Peloton en « flèche »

Peu après le départ, les nageurs se trouvent généralement au sein d'une formation très compacte que nous nommons peloton en « flèche ». Un exemple d'un tel peloton observé lors d'une course est donné sur la figure 3.2a. Nous schématisons cette formation par la disposition de la figure 3.2b.

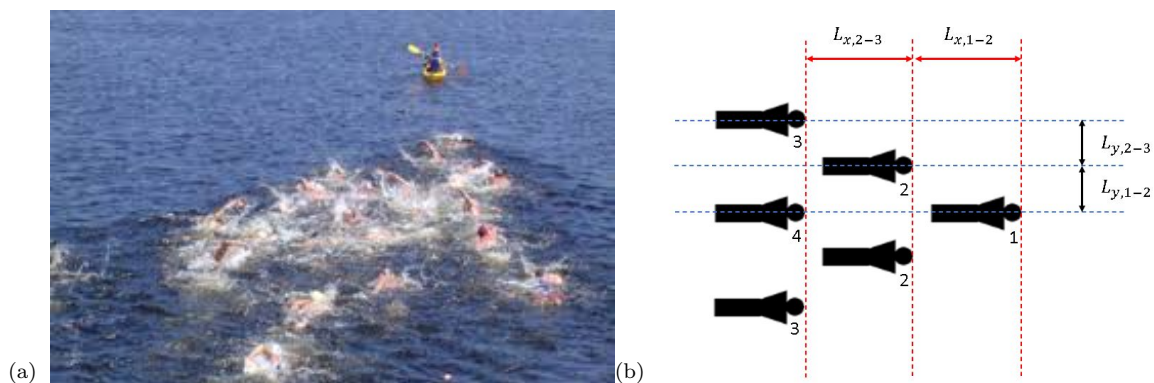


FIGURE 3.2 – Définition de la configuration de peloton en « flèche ». (a) Observation lors d'une course réelle. (b) Modélisation simplifiée en vue de l'étude expérimentale.

Sur ce schéma, les numéros correspondent à la position du nageur dans le peloton. Les positions désignées par le même numéro sont symétriques par rapport à l'axe de l'écoulement, les nageurs qui se trouvent à ces positions sont censés subir la même force de traînée. Ce schéma définit également les distances entre les différents nageurs du peloton. Les nageurs 1 et 4 sont alignés selon l'axe de l'écoulement. Les nageurs 1 et 2

sont séparés par une distance $L_{x,1-2}$ entre leurs têtes selon l'axe de l'écoulement et par une distance $L_{y,1-2}$ selon l'axe perpendiculaire à l'écoulement. Il en va de même pour les nageurs 2 et 3. En pratique, dans notre étude, nous nous limitons à $L_{x,1-2} = L_{x,2-3}$ et $L_{y,1-2} = L_{y,2-3}$. Nous ne mentionnons donc dans la suite que $L_{x,1-2}$ et $L_{y,1-2}$. Afin d'étudier cette configuration, nous plaçons 6 modèles réduits, tous identiques au modèle présenté dans le chapitre 1, dans notre canal à courant. L'installation des modèles est visible sur la figure 3.3.



FIGURE 3.3 – Peloton en « flèche » dans le canal à courant. (a) Vue en eau (le modèle de tête est caché par la plaque noire). (b) Vue hors de l'eau.

Nous étudions dans un premier temps une configuration très compacte. Nous utilisons $L_{x,1-2} = 40$ cm, c'est à dire $L_{x,1-2}/L = 1$ et $L_{y,1-2} = 18$ cm, c'est à dire $L_{y,1-2}/L = 0.45$. La figure 3.4 montre les résultats obtenus lors des mesures expérimentales dans cette configuration pour les 3 vitesses étudiées. Les points correspondants à la même position dans le peloton pour les 3 vitesses, sont tracés à des abscisses légèrement différentes pour des raisons de lisibilité de la figure.

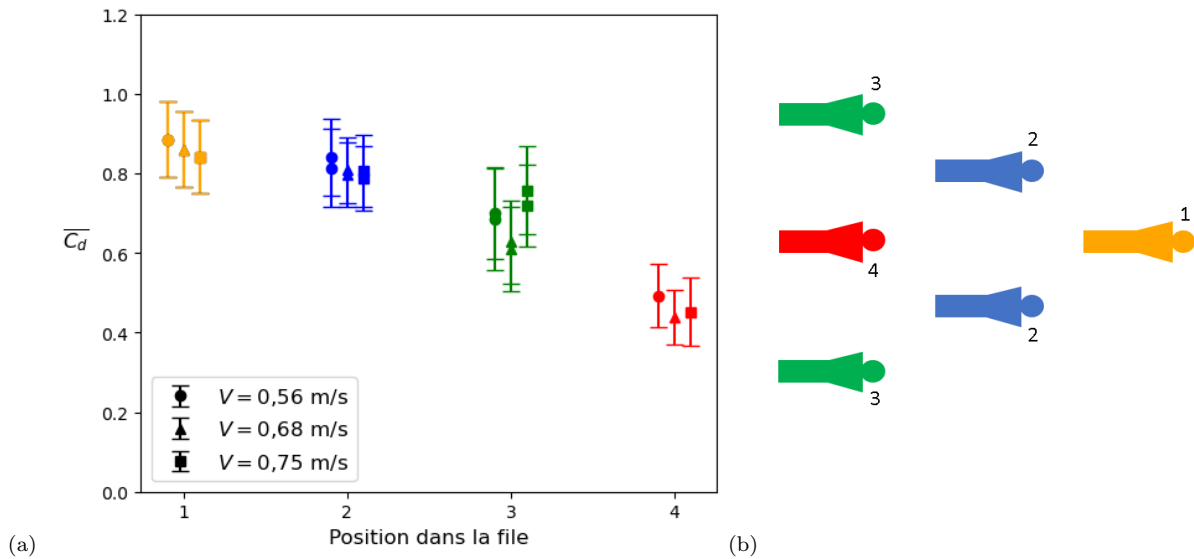


FIGURE 3.4 – Mesures expérimentales du coefficient de traînée normalisé pour une configuration de peloton en « flèche » avec $L_{x,1-2} = 40$ cm et $L_{y,1-2} = 18$ cm, pour les 3 vitesses étudiées.. (a) Résultats. (b) Schéma explicatif.

Nous observons que, comme attendu par symétrie de la configuration étudiée, les 2 nageurs en position 2 ont le même coefficient de traînée normalisé et subissent donc la même force de traînée. Il en va de même pour les 2 modèles en position 3. De plus, comme mesuré lors de l'étude des configurations à 2 nageurs, la valeur du coefficient de traînée normalisé ne semble pas dépendre de la vitesse de l'écoulement. Par ailleurs, nous mesurons que le modèle en position 1 voit sa traînée réduite d'environ 15% par rapport à la nage seul.

Il n'est donc pas totalement désavantageux de mener un tel peloton. En revanche, le modèle en position 1 reste celui qui subit la plus grande force de traînée parmi tous les membres du peloton. En effet, les modèles en position 2 voient leur traînée réduite de presque 20% par rapport à la nage seul, ceux en position de 3 d'environ 30% et celui en position 4 de plus de 50 %. La position la plus avantageuse est donc la position 4, située au milieu de la troisième ligne du peloton. La réduction de traînée y est même plus forte que dans les configurations à 2 nageurs en ligne : plus de 50% contre 40% pour la configuration à 2 nageurs avec la même valeur de L_x/L . Elle ne s'explique donc pas totalement par le fait que le nageur en position 4 se trouve dans le sillage du nageur 1 mais aussi par les champs de vagues créés par les nageurs en position 2. Cette position ressort donc comme la position à privilégier lors d'un début de course, si les athlètes souhaitent économiser leur énergie. Cependant, d'un point de vue stratégique, cette position peut être piègeuse. En effet, un nageur en position 4 est enfermé par ses concurrents en positions 2 et 3 : il ne peut pas choisir son cap, se placer comme il le souhaite pour un passage de bouée ou un ravitaillement ou encore difficilement répondre à une accélération d'un concurrent. Il faudra donc trouver en course un compromis entre économie d'énergie et stratégie. Ce compromis peut être la position 3.

Nous étudions ensuite une seconde configuration de peloton en « flèche » en conservant la même valeur de $L_{x,1-2}$ que précédemment mais en choisissant cette fois $L_{y,1-2} = 24$ cm, c'est à dire $L_{y,1-2}/L = 0,6$. Cette formation est donc un peu moins compacte que la précédente. Les résultats sont visibles sur la figure 3.5.

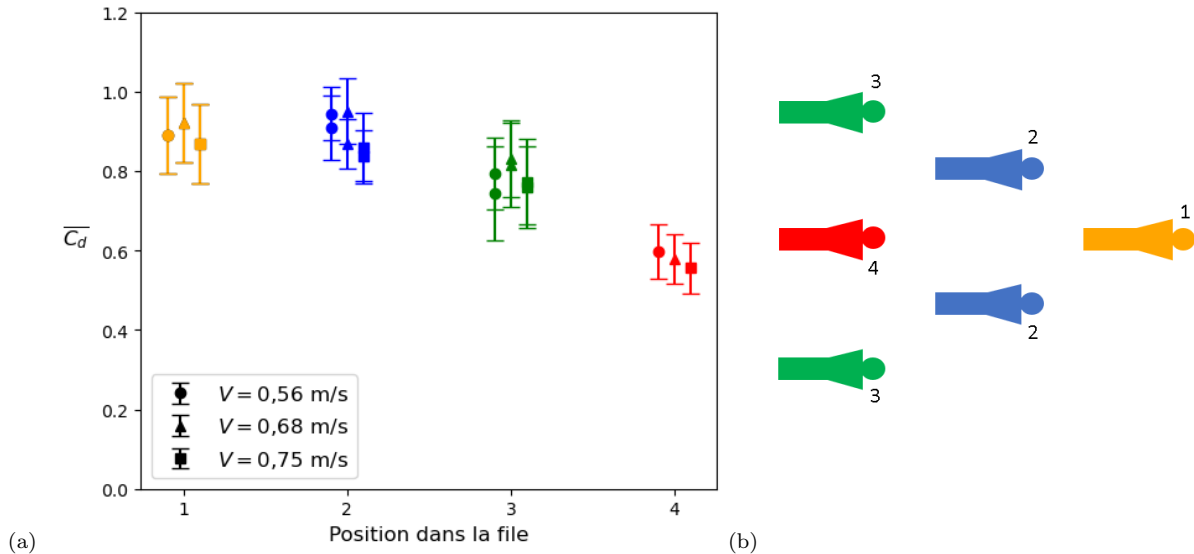


FIGURE 3.5 – Mesures expérimentales du coefficient de traînée normalisé pour une configuration de peloton en « flèche » avec $L_{x,1-2} = 40$ cm et $L_{y,1-2} = 24$ cm, pour les 3 vitesses étudiées.

A l'image des résultats de la première configuration étudiée, nous retrouvons les effets de la symétrie : les nageurs en position 2 subissent tous les 2 la même force de traînée, puisqu'ils ont le même coefficient de traînée normalisé. Il en va de même pour les nageurs en position 3. De plus, toujours comme pour les résultats de la configuration précédente, la valeur du coefficient de traînée normalisé ne semble pas dépendre de la vitesse de l'écoulement. Ensuite, nous observons que les modèles en position 1 et 2 ont une traînée réduite d'environ 10% par rapport à la nage seul. Il est donc préférable de mener ce type de peloton plutôt que de nager seul. Cependant, ces positions sont celles où les nageurs subissent le plus de traînée parmi tous les membres du peloton. Ensuite, nous observons une réduction de traînée de l'ordre de 20% pour les nageurs en position 3 et de 40% environ pour le modèle en position 4. La conclusion est donc la même que pour la configuration précédemment étudiée : la position 4 est la plus favorable pour l'économie d'énergie et la position 3 peut être un compromis entre économie d'énergie et placement stratégique. Cependant, bien que les tendances soient les mêmes entre les deux configurations étudiées, la valeur des coefficients de traînée adimensionnés ne l'est pas.

Enfin, nous étudions une dernière configuration de peloton en flèche. Nous conservons $L_{y,1-2} = 24$ cm, c'est à dire $L_{y,1-2}/L = 0,6$, comme pour la configuration précédente, mais nous choisissons cette fois $L_{x,1-2} = 50$ cm, c'est à dire $L_{x,1-2}/L = 1,25$. Les résultats obtenus pour cette troisième configuration sont disponibles sur la figure 3.6.

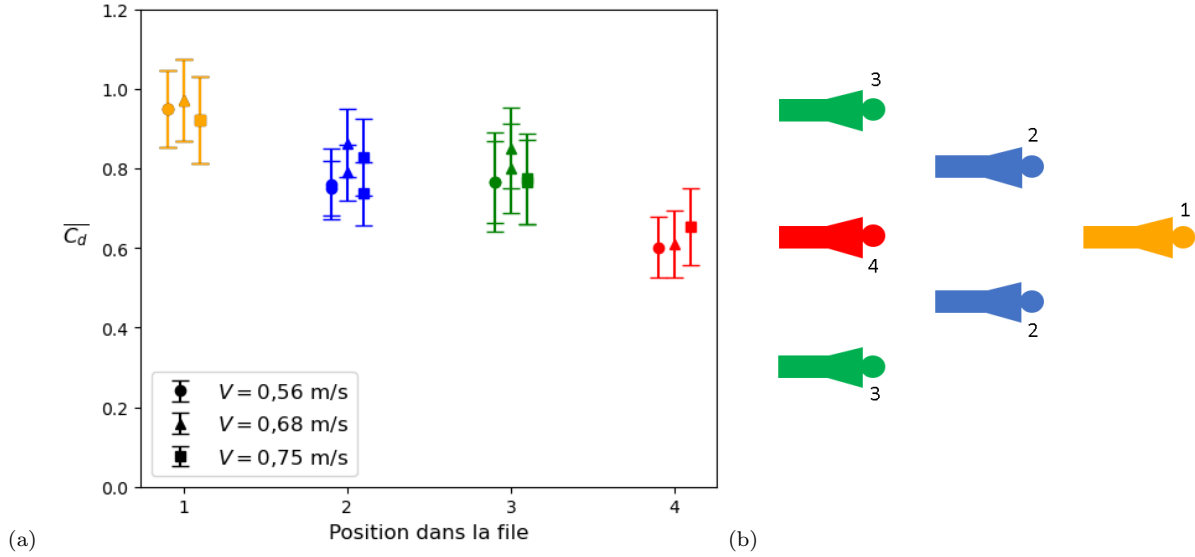


FIGURE 3.6 – Mesures expérimentales du coefficient de traînée normalisé pour une configuration de peloton en « flèche » avec $L_{x,1-2} = 50$ cm et $L_{y,1-2} = 24$ cm, pour les 3 vitesses étudiées.

Nous observons à nouveau les effets de symétrie attendus : les modèles en position 2 ont tous les deux le même coefficient de traînée normalisé. Il en va de même pour les modèles en position 3. De plus, la valeur du coefficient de traînée normalisé semble toujours indépendante de la vitesse de l'écoulement. Nous remarquons que la position 1 ne confère quasiment aucune réduction de traînée par rapport à la nage seul. Il faut donc éviter de se retrouver en position de meneur d'un tel peloton. Les positions 2 et 3 semblent quant à elles équivalentes : elles permettent au modèle de voir leur traînée réduite d'environ 20% par rapport à la nage seul. Cette similarité entre les positions 2 et 3 est nouvelle par rapport aux deux premières configurations étudiées. Enfin, la position 4 reste toujours la plus favorable avec une réduction de traînée d'un peu moins de 40% par rapport à la nage seul. Elle possède toujours les défauts stratégiques évoqués plus haut mais cette fois-ci, les positions 2 et 3 étant équivalentes en termes de réduction de traînée, la position permettant un meilleur compromis entre stratégie et économie d'énergie sera plutôt la position 2. Enfin, nous comparons les résultats obtenus pour les 3 configurations sur la figure 3.7.

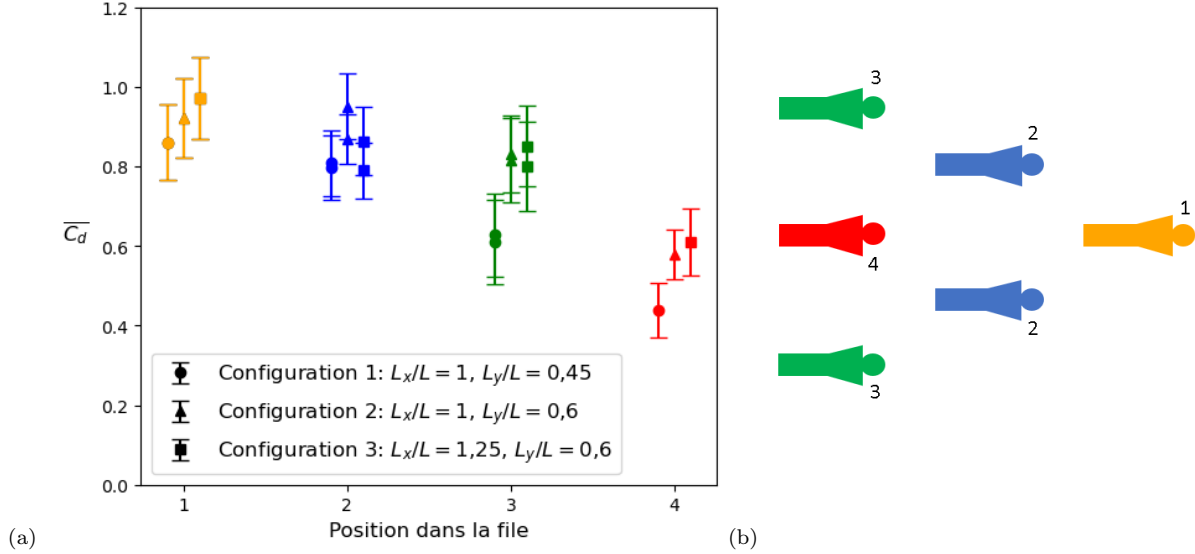


FIGURE 3.7 – Comparaison des mesures expérimentales du coefficient de traînée normalisé pour les 3 configurations de peloton en « flèche » étudiées, pour une vitesse de l’écoulement égale à 0,68 m/s.

Nous observons que l’allongement de la distance $L_{x,1-2}$ a réduit l’amplitude des réductions de traînée observées en positions 1 et 4 dans les configurations 2 et 3. Pour la position 4, cela peut s’expliquer par le fait que le modèle se situe plus loin dans le sillage du nageur en position 1 et bénéficie donc moins des effets de drafting « en ligne » mis en avant dans l’étude de la nage en ligne pour 2 nageurs. Cependant, quelle que soit la configuration étudiée, la position 4 reste toujours la plus favorable en terme de réduction de traînée. A notre connaissance, aucune étude du drafting pour un tel peloton n’a été effectuée en natation. En revanche, en cyclisme, Blocken *et al.* [20] ont étudié une configuration similaire à celle de notre étude : un peloton observable lors de courses de cyclisme sur route. Ce peloton contient beaucoup plus de membres que dans notre étude (121 contre 6) mais les premiers cyclistes du peloton se placent en flèche comme dans notre travail. Dans leur étude, Blocken *et al* mesurent pour la position de leader du peloton (position 1 dans notre étude) une réduction de traînée de 14% par rapport à un cycliste seul. Pour les cyclistes en position 2, la réduction de traînée est de 38%, pour les cyclistes en position 3 elle est de 40% et pour le cycliste en position 4 elle est de 65%. Ainsi, nous retrouvons le fait que la position 4 soit la plus favorable à l’économie d’énergie. Cependant, les réductions de traînées observées par Blocken *et al* sont plus importantes que dans notre étude. Cela peut s’expliquer par la présence de nombreux autres cyclistes derrière les 6 athlètes de tête, modifiant leur sillage et donc la traînée qu’ils subissent.

Par ailleurs, afin de se rapprocher encore plus d’une situation réelle de course, nous simulons, à l’aide du modèle numérique présenté au chapitre 1, un peloton en flèche à 10 nageurs. Le schéma 3.8a précise la configuration étudiée. Nous travaillons ici avec $L_{x,1-2} = 40$ cm et $L_{y,1-2} = 12$ cm. La figure 3.8b présente quant à elle les résultats des calculs pour les 3 vitesses étudiées. Nous observons que dans cette configuration, les positions 1, 2 et 3 procurent une faible réduction de traînée, de l’ordre de 10%. Elles sont donc peu avantageuses. La position 5 est la plus défavorable : le nageur s’y trouvant subit la même traînée que s’il nageait seul. Les positions 4 et 6 sont les plus favorables avec respectivement 30 et 25 % de traînée par rapport à la nage seul. Cependant, ces positions se trouvent loin de la tête de course et les nageurs s’y positionnant peuvent se retrouver bloqués par leurs voisins.

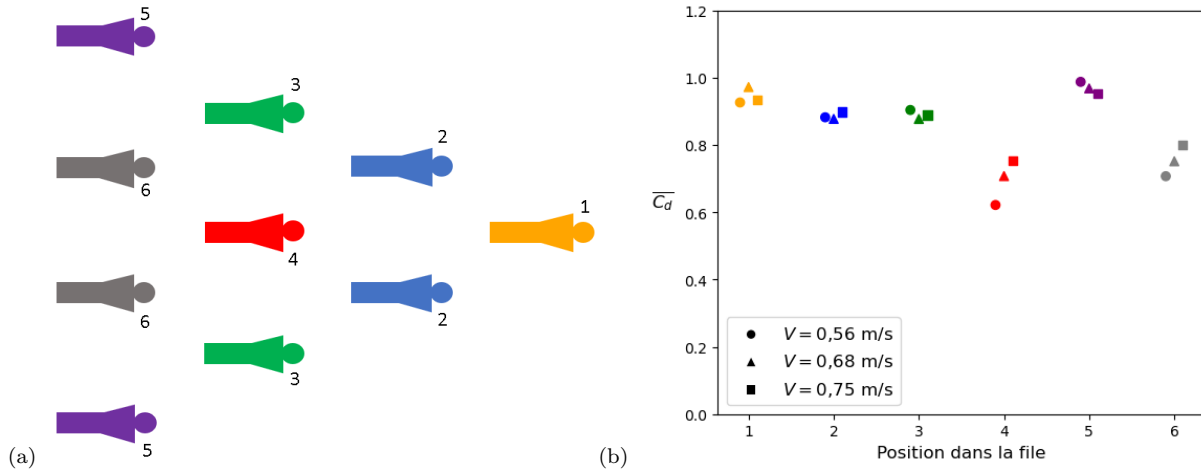


FIGURE 3.8 – Étude numérique d’une configuration de peloton en flèche à 10 nageurs. (a) Schéma de la configuration étudiée. (b) Résultats obtenus sous OpenFoam.

3.2 Pelotons à deux nageurs de front

Dans les phases de milieu de course, le rythme de nage a tendance à étirer le peloton. Celui-ci est alors moins compact et moins large qu’un peloton en flèche : les nageurs se retrouvent souvent au plus à deux de front. Un exemple réel d’un tel peloton est donné sur la figure 3.9. Il peut être modélisé par deux configurations assez similaires pouvant coexister : le peloton en quinconce et le peloton en double file.



FIGURE 3.9 – Exemple d’un peloton en milieu de course, où les nageurs se retrouvent au maximum à deux de front.

Peloton en quinconce

Dans un premier temps, nous modélisons le peloton de milieu de course par un peloton en quinconce. La modélisation de cette configuration est donnée sur la figure 3.10. Cette configuration est symétrique par rapport à l’axe de l’écoulement. Les nageurs 1 et 3 sont situés sur le même axe. Il en va de même pour les nageurs 2 et 4. La distance entre les têtes des nageurs 1 et 2 dans le sens perpendiculaire à l’écoulement est notée $L_{y,1-2}$. La distance entre les têtes des nageurs 1 et 2 dans le sens de l’écoulement est elle notée $L_{x,1-2}$. De la même manière, elle est notée $L_{x,2-3}$ pour les nageurs 2 et 3 et $L_{x,3-4}$ pour les nageurs 3 et 4. En pratique, dans notre étude, nous avons $L_{x,1-2} = L_{x,2-3} = L_{x,3-4}$. Nous ne mentionnerons donc que $L_{x,1-2}$ dans la suite.

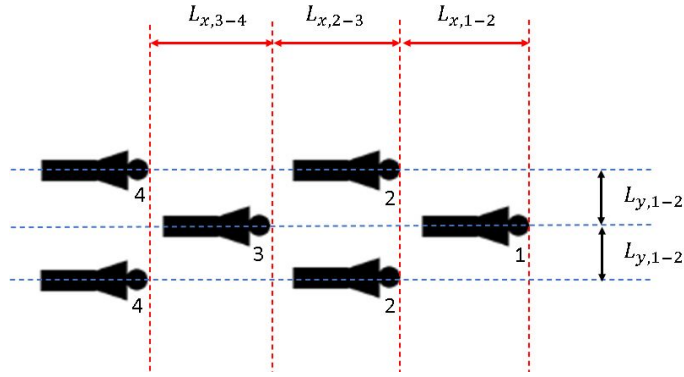


FIGURE 3.10 – Modélisation simplifiée d’un peloton en quinconce.

De la même façon que pour l’étude du peloton en flèche, nous plaçons nos modèles dans la configuration voulue dans notre canal à courant. La configuration expérimentale est visible sur la figure 3.11.

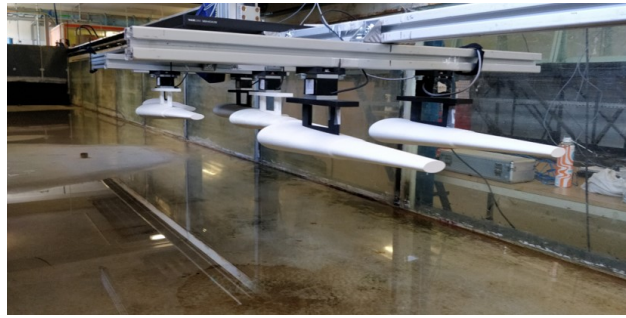


FIGURE 3.11 – Vue d’un peloton en quinconce dans le canal.

Dans un premier temps, nous étudions un peloton en quinconce avec les paramètres suivants : $L_{x,1-2} = 40$ cm, c’est à dire $L_{x,1-2}/L = 1$ et $L_{y,1-2} = 24$ cm, c’est à dire $L_{y,1-2}/L = 0,6$. Les résultats sont donnés sur la figure 3.12.

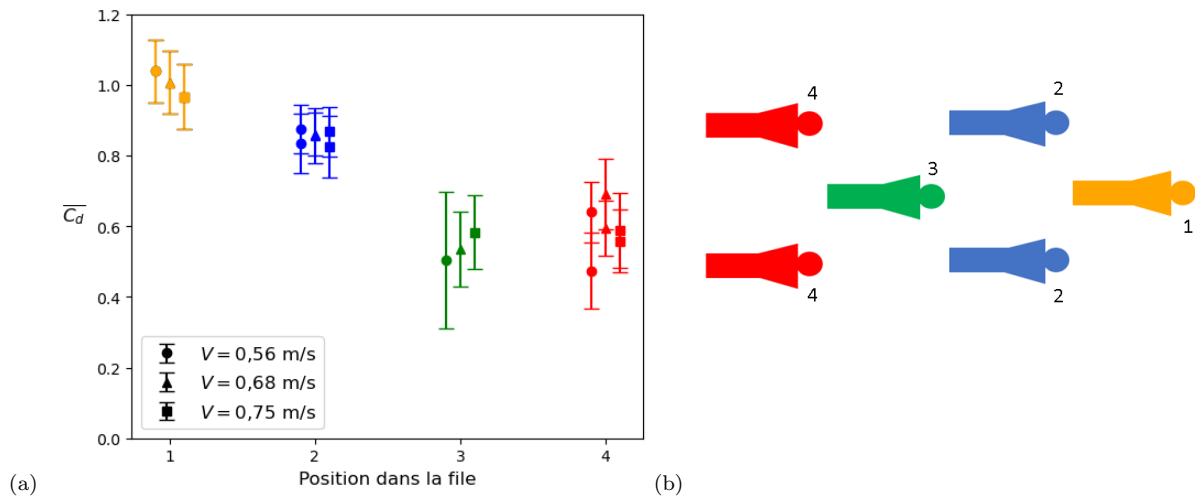


FIGURE 3.12 – Mesures expérimentales du coefficient de traînée normalisé pour une configuration de peloton en quinconce avec $L_{x,1-2} = 40$ cm et $L_{y,1-2} = 24$ cm, pour les 3 vitesses étudiées. (a) Résultats. (b) Schéma explicatif.

De la même manière que lors de l'étude du peloton en flèche, nous remarquons que la valeur du coefficient de traînée normalisé semble indépendante de la vitesse de l'écoulement. De plus, nous observons, pour le modèle en position 1, que sa traînée est égale à celle d'un nageur seul. Cette position n'est donc pas avantageuse, d'autant plus que le nageur dans cette position subit plus de traînée que tous les autres membres du peloton. Pour les nageurs en position 2, nous observons une traînée réduite d'un peu moins de 20% par rapport à la nage seule. La position 3 est la plus favorable avec quasiment 50% de réduction de traînée. Cependant, à l'image de la position la plus favorable dans le peloton en flèche, le nageur en position 3 se trouve enfermé par ses concurrents et n'est donc pas libre de choisir sa direction de nage ni de porter son effort comme il l'entend. Enfin, la position 4 est elle aussi très avantageuse avec une réduction de traînée de l'ordre de 40%. Le nageur y est moins enfermé qu'en position 3, il a donc un peu plus de liberté dans ses mouvements, mais se retrouve encore plus loin de la tête de course et devra donc faire plus d'efforts pour dépasser l'ensemble de ses concurrents. Dans cette configuration, il ne semble pas y avoir de compromis évident entre économie d'énergie et stratégie de course. Nous étudions ensuite une seconde configuration de peloton en quinconce. Nous conservons la valeur de $L_{y,1-2}$ égale à 24 cm mais nous choisissons cette fois $L_{x,1-2} = 50$ cm. Les résultats sont donnés sur la figure 3.13.

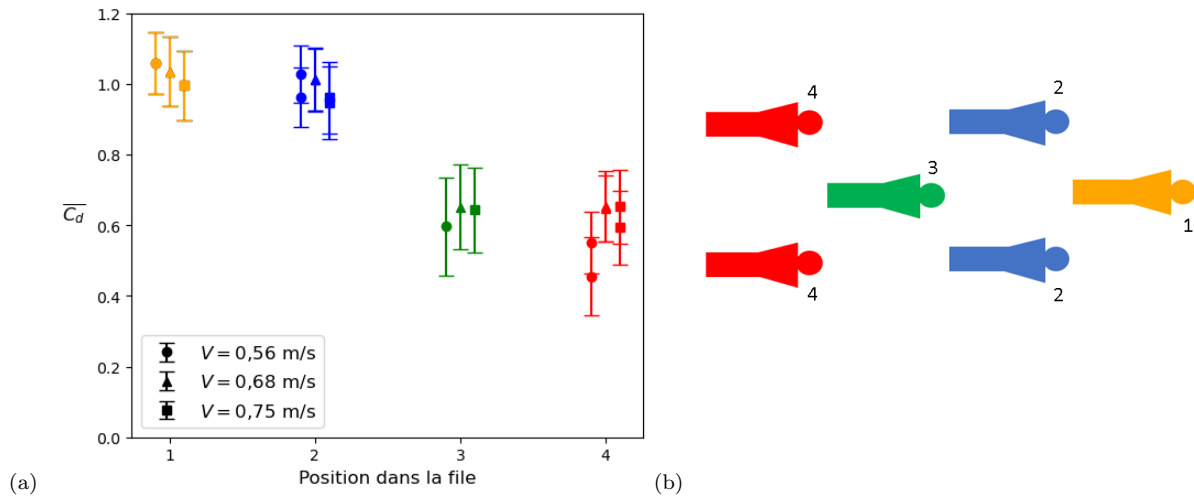


FIGURE 3.13 – Mesures expérimentales du coefficient de traînée normalisé pour une configuration de peloton en quinconce avec $L_{x,1-2} = 50$ cm et $L_{y,1-2} = 24$ cm, pour les 3 vitesses étudiées.

Concernant la position de leader du peloton, nous observons le même résultat que pour la première configuration étudiée : le modèle subit la même force de traînée que s'il était seul. Cette position n'est donc toujours pas avantageuse. Pour la position 2, le résultat n'est en revanche plus le même : dans cette configuration elle ne confère aucune réduction de traînée. C'est donc une position à éviter. Les positions 3 et 4 sont similaires : elles permettent aux nageurs de voir leur traînée réduite d'environ 40% par rapport à la nage seule. La figure 3.14 présente la comparaison des résultats des mesures pour les 2 configurations de peloton en quinconce étudiées, pour une vitesse d'écoulement égale à 0,68 m/s. Cette comparaison montre clairement la différence de résultats pour la position 2 entre les 2 configurations étudiées. Nous notons également que la réduction de traînée observée en position 3 est moins forte dans la configuration 2. Cela peut s'expliquer par le fait que la nageur en position 3 se situe plus loin dans le sillage du nageur 1 et profite donc moins du drafting de nage en ligne.

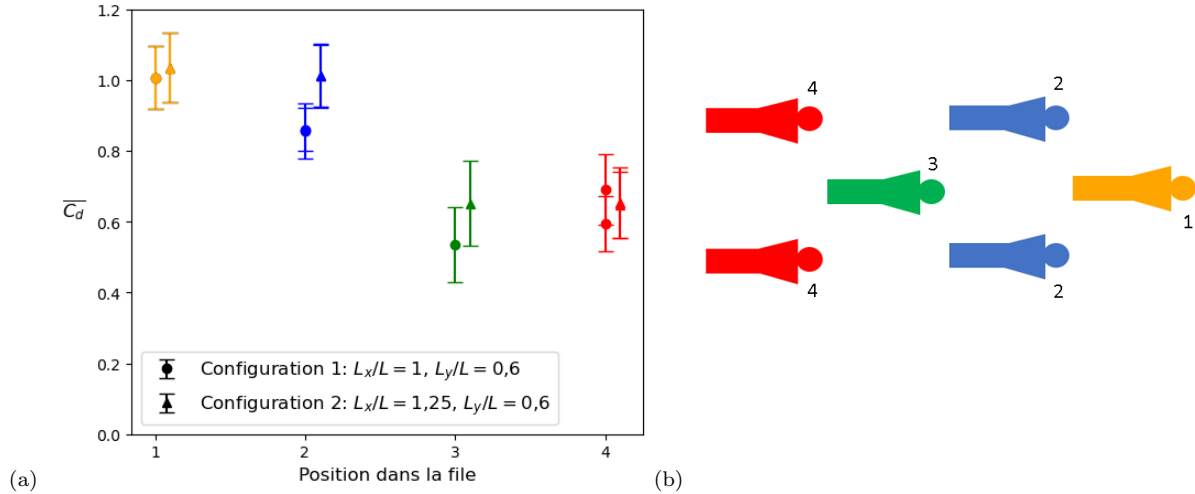


FIGURE 3.14 – Comparaison des mesures expérimentales du coefficient de traînée normalisé pour les 2 configurations de peloton en quinconce étudiées, pour une vitesse de l'écoulement égale à 0,68 m/s.

Nous réalisons ensuite une comparaison entre les mesures expérimentales et des calculs sous OpenFoam, pour la première configuration de peloton en quinconce étudiée. La figure 3.15 présente ces résultats.

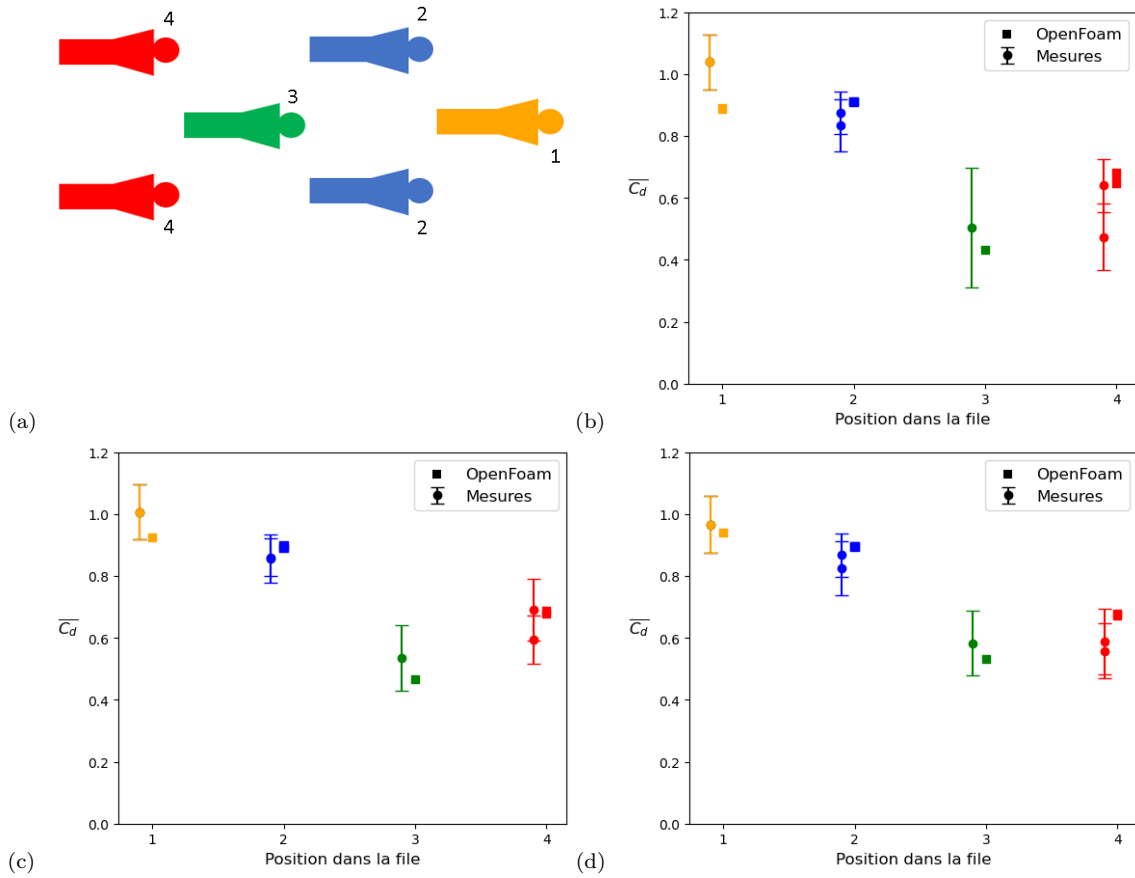


FIGURE 3.15 – Comparaison des mesures expérimentales avec des calculs OpenFoam, pour un peloton en quinconce avec $L_{x,1-2} = 40$ cm et $L_{y,1-2} = 24$ cm. (a) Schéma du peloton étudié. (b) $V = 0,56$ m/s. (c) $V = 0,68$ m/s. (d) $V = 0,75$ m/s.

Ces comparaisons montrent une très bonne corrélation entre les mesures expérimentales et les calculs sous OpenFoam : les tendances mais aussi les valeurs des réductions de traînées sont très similaires.

Peloton en double file

Afin de compléter l'étude des pelotons de milieu de course, nous définissons un peloton en double file sur le schéma 3.16. Cette configuration est symétrique par rapport à l'axe de l'écoulement. Les nageurs 1, 2 et 3 de chaque file sont dans le même axe. Les deux files sont séparées par une distance notée $L_{y,1-2}$ entre les têtes des nageurs, dans le sens perpendiculaire à l'écoulement. De plus, la distance entre la tête des nageurs 1 et 2 est notée $L_{x,1-2}$ et celle entre les nageurs 2 et 3 $L_{x,2-3}$. En pratique, nous étudions des configurations où $L_{x,1-2} = L_{x,2-3}$, nous ne mentionnerons donc que la distance $L_{x,1-2}$ dans la suite.

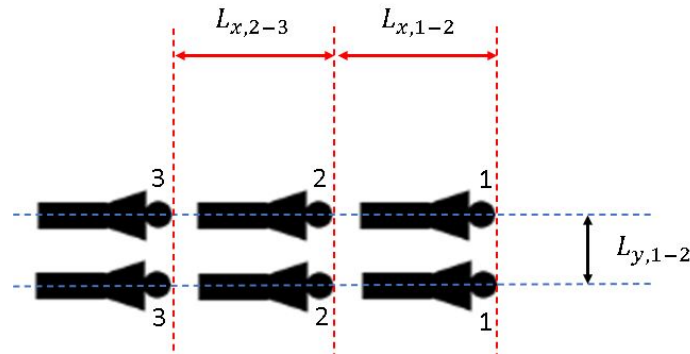


FIGURE 3.16 – Modélisation simplifiée d'un peloton en double file.

La mise en place de cette configuration dans le canal à courant est donnée sur la figure 3.17.

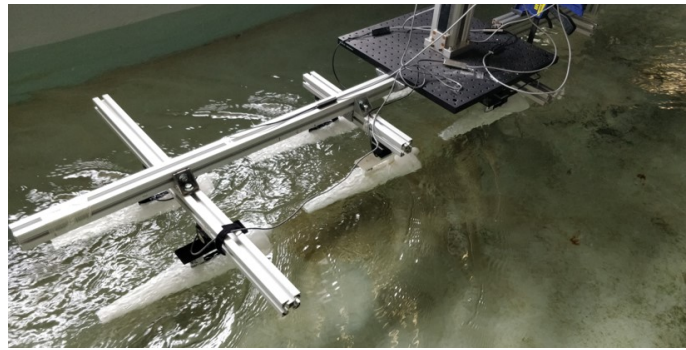


FIGURE 3.17 – Vue d'un peloton en quinconce dans le canal.

Dans un premier temps, nous étudions une configuration de peloton en double file avec les paramètres suivants : $L_{x,1-2} = 50$ cm, soit $L_{x,1-2}/L = 1,25$ et $L_{y,1-2} = 24$ cm, soit $L_{y,1-2}/L = 0,6$. Les résultats sont donnés sur la figure 3.18. Nous observons, comme pour les configurations de peloton en flèche et en quinconce, que la valeur du coefficient de traînée normalisé est indépendant de la vitesse de l'écoulement. De plus les effets de symétrie attendus sont bien présents : les 2 modèles en position 2 ont le même coefficient de traînée normalisé, et il en est de même pour les nageurs en position 3. De plus, nous notons que, comme pour les configurations précédemment étudiées, la position 1 n'est pas avantageuse. En effet, le nageur dans cette position subit la plus grande traînée parmi les membres du peloton, bien qu'elle soit légèrement inférieure à la traînée d'un nageur seul. Par ailleurs, les positions 2 et 3 sont très avantageuses et procurent toutes deux une réduction de traînée légèrement supérieure à 40% par rapport à un nageur isolé. Ces 2 positions étant quasiment équivalentes en termes d'économie d'énergie, il sera plus intéressant de se placer en position 2 afin de se situer au plus près de la tête de course et ne pas avoir à dépasser trop de concurrents en fin de course.

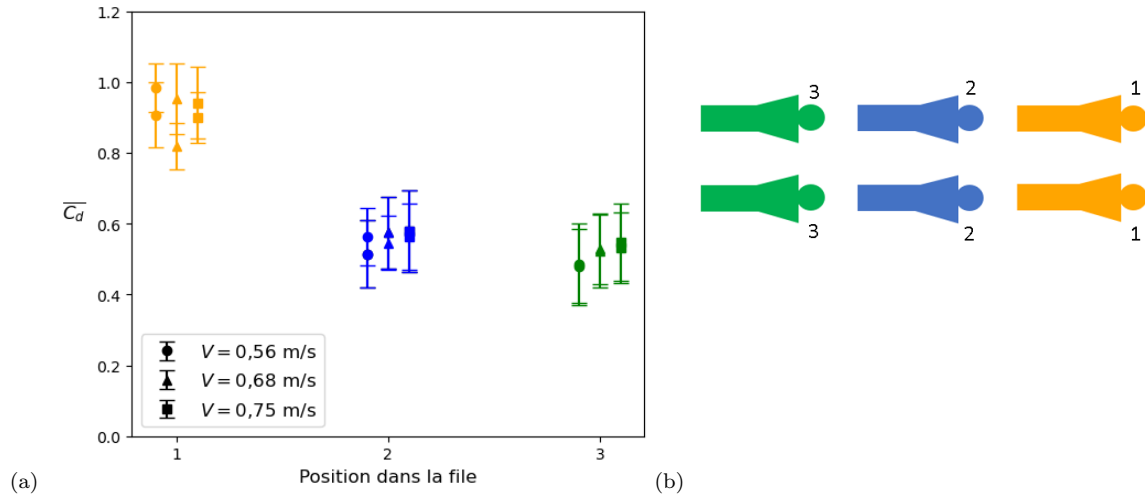


FIGURE 3.18 – Mesures expérimentales du coefficient de traînée normalisé pour une configuration de peloton en double file avec $L_{x,1-2} = 50$ cm et $L_{y,1-2} = 24$ cm, pour les 3 vitesses étudiées. (a) Résultats. (b) Schéma explicatif.

Ensuite, nous étudions une seconde configuration de peloton en double file, avec cette fois $L_{x,1-2} = 50$ cm, soit $L_{x,1-2}/L = 1,5$ et toujours $L_{y,1-2} = 24$ cm, soit $L_{y,1-2}/L = 0,6$. Les résultats sont présentés sur la figure 3.19.

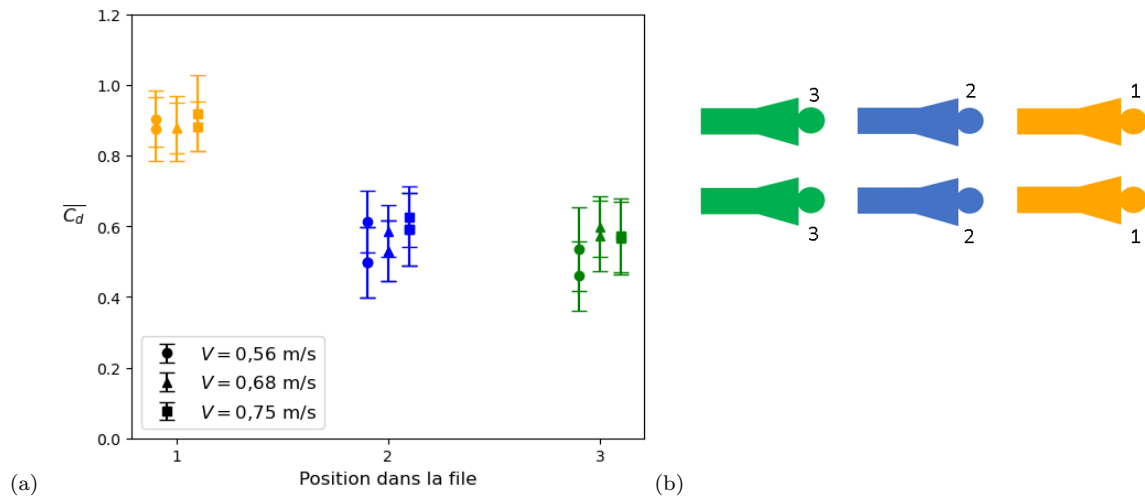


FIGURE 3.19 – Mesures expérimentales du coefficient de traînée normalisé pour une configuration de peloton en double file avec $L_{x,1-2} = 60$ cm et $L_{y,1-2} = 24$ cm, pour les 3 vitesses étudiées.

Les conclusions sont exactement les mêmes que pour la configuration étudiée précédemment : la position 1 n'est pas avantageuse tandis que les positions 2 et 3 sont similaires et confèrent aux nageurs s'y trouvant une réduction de traînée d'environ 40% par rapport à un nageur isolé. Ensuite nous comparons les résultats obtenus dans ces deux configurations, pour une vitesse de l'écoulement égale à 0,68 m/s. Cette comparaison est donnée sur la figure 3.20. Nous observons ici que l'augmentation de $L_{x,1-2}$ n'entraîne pas de changement dans les résultats observés. Cela peut s'expliquer par le fait que les réductions de traînées observées en position 2 et 3 sont, au vu de la configuration étudiée, essentiellement dues au fait que les nageurs 2 et 3 sont dans le sillage turbulent des nageurs qui se trouvent devant eux. Or, nous avons observé, pour des configurations de nage en ligne à 2 nageurs, dans le chapitre 2, sur la figure 2.6, qu'un changement faible de la valeur de L_x lorsque les 2 nageurs se suivent de près, modifie très peu la réduction de traînée pour le

nageur suiveur. Nous retrouvons donc cette observation ici.

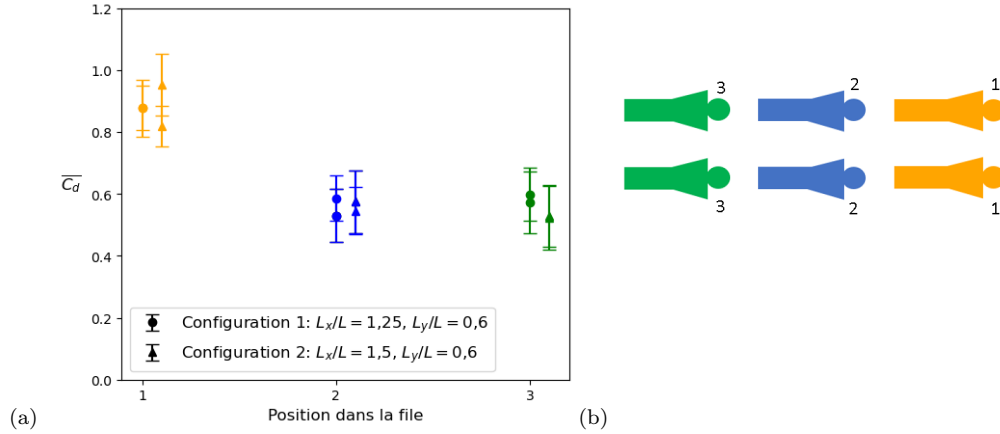


FIGURE 3.20 – Comparaison des mesures expérimentales du coefficient de traînée normalisé pour 2 configurations de peloton en double file étudiées, pour une vitesse de l'écoulement égale à 0,68 m/s.

Nous réalisons également une comparaison entre les données expérimentales et les calculs numériques. Elle est réalisée pour $L_{x,1-2} = 50$ cm et $L_{y,1-2} = 24$ cm. Les résultats sont présentés sur la figure 3.21.

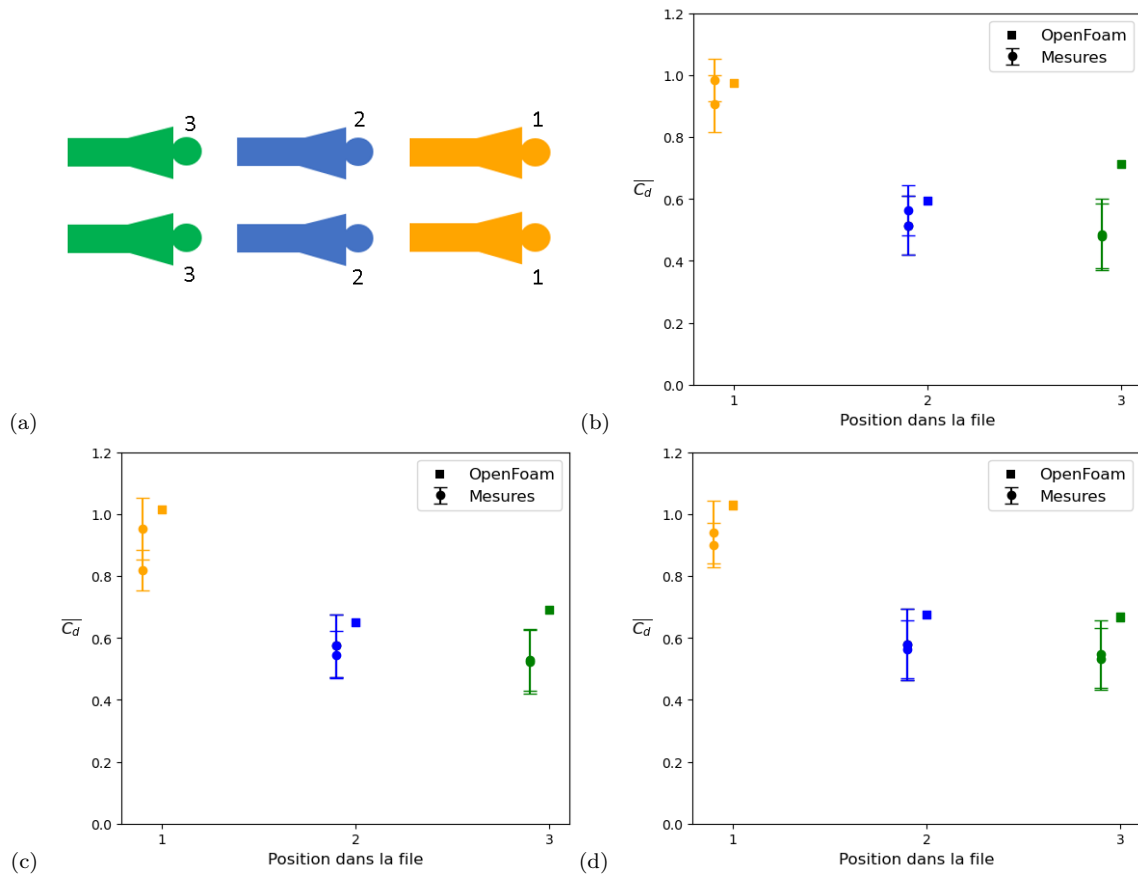


FIGURE 3.21 – Comparaison des mesures expérimentales avec des calculs OpenFoam, pour un peloton en double file avec $L_{x,1-2} = 50$ cm et $L_{y,1-2} = 24$ cm. (a) Schéma du peloton étudié. (b) $V = 0,56$ m/s. (c) $V = 0,68$ m/s. (d) $V = 0,75$ m/s.

Là encore, les résultats des calculs numériques sont en accord avec les mesures expérimentales : les tendances et les valeurs des réductions de traînée aux différentes positions du peloton sont similaires. Cependant, le calcul numérique semble légèrement surestimer la traînée subie par le nageur en position 3.

3.3 Peloton en file indienne

Dans les phases avancées de la course, du fait de l'accélération du rythme, le peloton s'étire et il arrive que les nageurs nagent les uns derrière les autres en formant une file indienne. Un exemple d'une telle configuration est visible sur la figure 3.22.

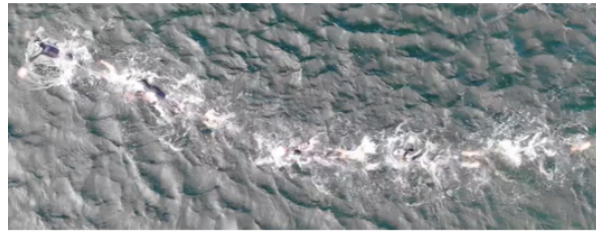


FIGURE 3.22 – Exemple d'un peloton en file indienne.

Nous modélisons ce type de peloton par la configuration du schéma 3.23. Les nageurs sont tous dans le même axe, parallèle à l'écoulement. La distance qui sépare les têtes de 2 nageurs consécutifs dans la file est la même pour tous et est notée $L_{x,1-2}$.

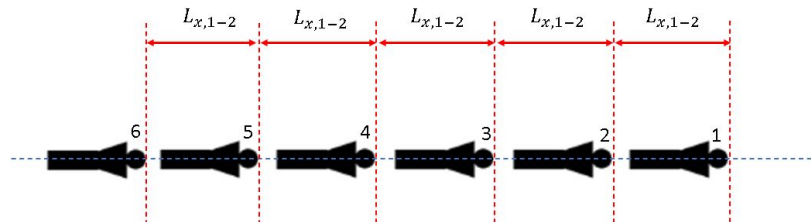


FIGURE 3.23 – Modélisation simplifiée d'un peloton en file indienne.

La configuration mise en place dans le canal est visible sur la figure 3.24.



FIGURE 3.24 – Vue d'un peloton en file indienne dans le canal.

Dans un premier temps, nous étudions une configuration de peloton en file indienne avec $L_{x,1-2} = 42$ cm soit $L_{x,1-2}/L = 1,05$. Les résultats sont présentés sur la figure 3.25.

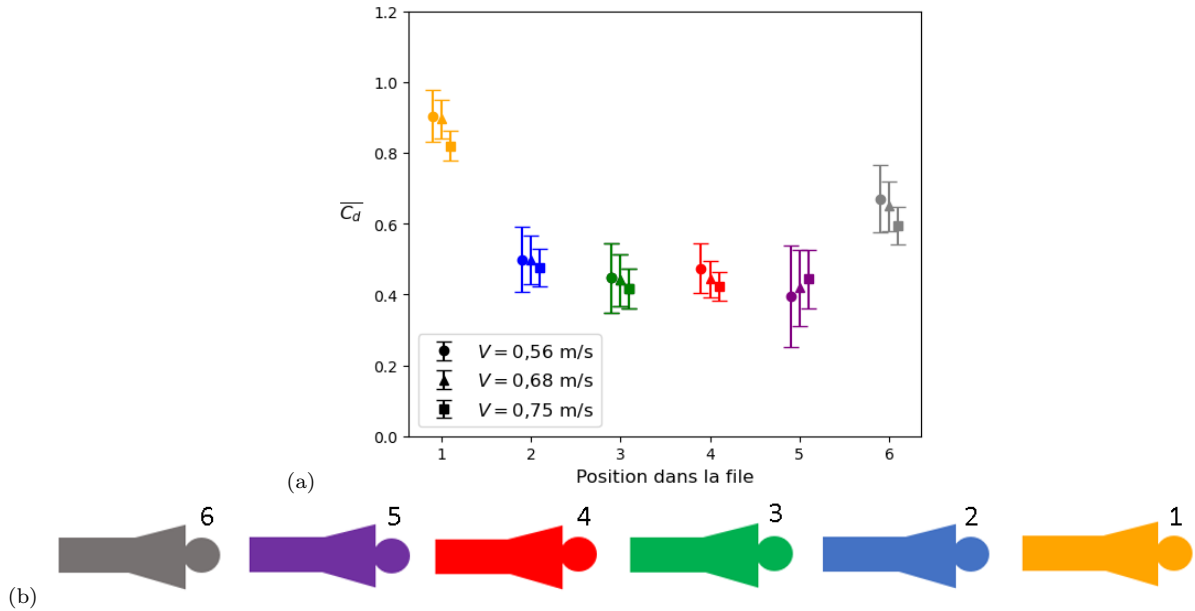


FIGURE 3.25 – Mesures expérimentales du coefficient de traînée normalisé pour une configuration de peloton en file indienne avec $L_{x,1-2} = 42$ cm, pour les 3 vitesses étudiées. (a) Résultats. (b) Schéma explicatif.

Nous observons que la position 1 est très peu avantageuse, comme dans toutes les autres configurations étudiées : la traînée subie par le modèle est environ 15% inférieure à celle d'un modèle isolé, mais c'est la force de traînée la plus importante parmi tous les membres de la file. En position 2, le nageur voit sa traînée être réduite d'environ 50% par rapport à la nage seul. C'est plus que les réductions de traînées observées dans les configurations à 2 nageurs pour une valeur de $L_{x,1-2}/L$ identique : ici, le nageur bénéficie également d'être suivi de près par un autre. Ensuite, les positions 3, 4 et 5 sont très similaires : elles procurent des réductions de traînée de l'ordre de 55% par rapport à un nageur seul. Enfin, la position 6, en queue de peloton, confère une réduction de traînée de l'ordre de 40% par rapport à la nage seul : la différence avec les positions 3, 4 et 5 s'explique par le fait que le nageur 6 n'est suivi par aucun autre et ne bénéficie donc pas de la réduction de traînée existante lorsqu'un nageur est suivi de près par un autre, mise en avant dans le chapitre 2, à la figure 2.6. Ensuite, nous procédons au même type de mesures pour différentes valeurs de $L_{x,1-2}$: 45, 50, 55 et 60 cm, afin de représenter différents écartements entre nageurs mais aussi des cas réalistes. En effet, il faut prendre en compte le mouvement des bras des nageurs et donc l'espace nécessaire à celui-ci. Les résultats, pour ces différentes valeurs de $L_{x,1-2}$ sont présentés sur la figure 3.26. Nous observons les mêmes tendances pour toutes les valeurs de $L_{x,1-2}$. En effet, la position 1 est toujours la plus défavorable. La position 2 permet une forte réduction de traînée mais reste moins avantageuse que les positions 3, 4 et 5 qui sont à préférer. La position 6 procure elle aussi moins de réduction de traînée que les positions 3, 4 et 5 sauf pour $L_{x,1-2} = 60$ cm. Cela pouvait être attendu. En effet, pour cette valeur de $L_{x,1-2}$, comme observé lors des mesures à 2 nageurs, il n'y a plus de bénéfice à être suivi en terme de réduction de traînée.

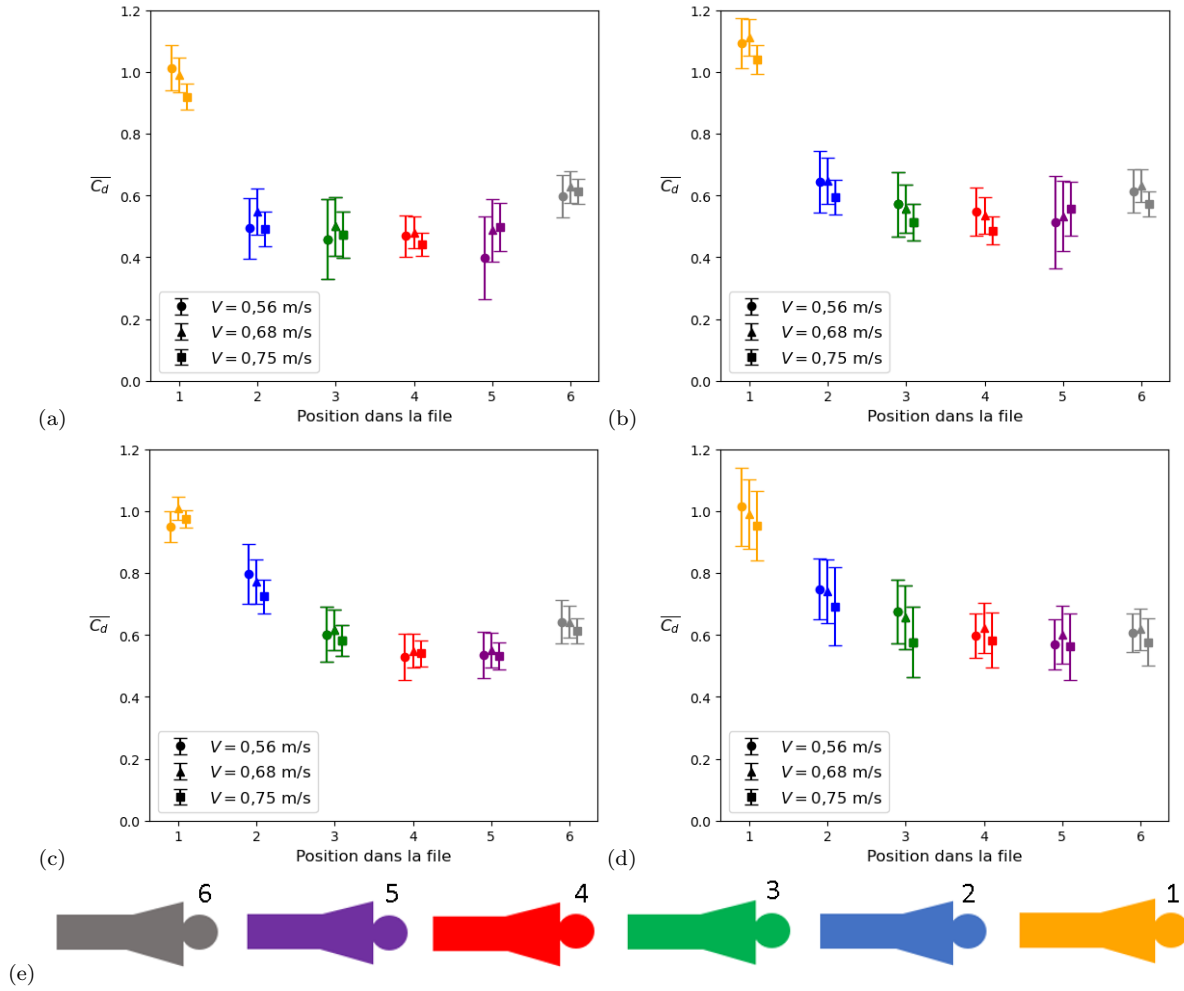


FIGURE 3.26 – Mesures expérimentales pour un peloton en file indienne. (a) $L_{x,1-2} = 45$ cm . (b) $L_{x,1-2} = 50$ cm. (c) $L_{x,1-2} = 55$ cm. (d) $L_{x,1-2} = 60$ cm. (e) Schéma du peloton en file indienne.

Enfin, nous comparons sur la figure 3.27, les résultats mesurés pour les différentes valeurs de $L_{x,1-2}$, pour une vitesse d'écoulement égale à 0,68 m/s.

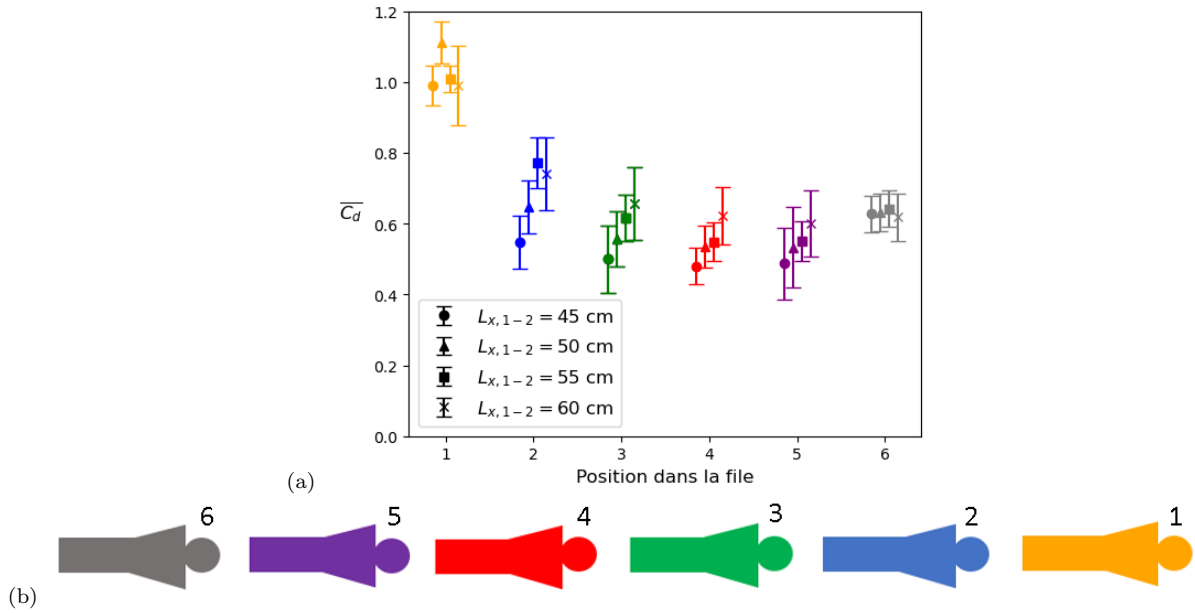


FIGURE 3.27 – Comparaison des mesures expérimentales du coefficient de traînée normalisé pour 4 configurations de peloton en file indienne, pour une vitesse de l'écoulement égale à 0,68 m/s.

Cette comparaison nous montre que plus $L_{x,1-2}$ est grande, plus les réductions de traînée observées sont faibles. Cela est en accord avec les résultats du chapitre 2. Ensuite, nous faisons varier le nombre de nageurs dans la file entre 3 et 6 afin de savoir si les effets observés dépendent du nombre d'athlètes dans le peloton. La figure 3.28 présente les mesures du coefficient de traînée normalisé pour des peloton en file indienne de 3, 4, 5 et 6 nageurs, pour une valeur de $L_{x,1-2} = 60$ cm, soit $L_{x,1-2}/L = 1,5$.

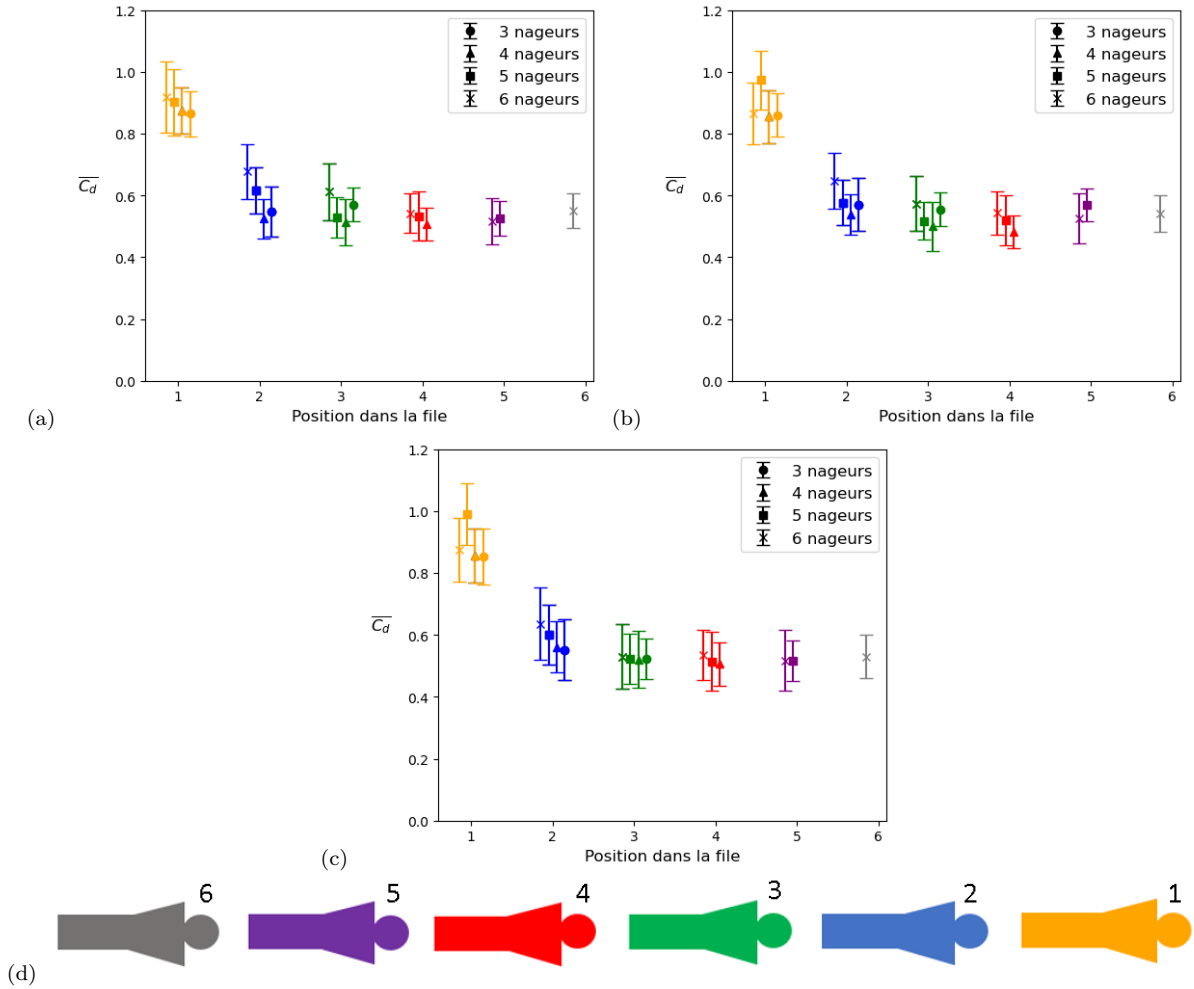


FIGURE 3.28 – Mesures expérimentales pour un peloton en file indienne, pour différents nombres de nageurs dans la file. (a) $V = 0,56$ m/s. (b) $V = 0,68$ m/s. (c) $V = 0,75$ m/s. (d) Schéma du peloton en file indienne.

Ces résultats nous montrent que le nombre de nageurs dans la file semble avoir peu d'impact sur les réductions de traînée dans le peloton. Les conclusions sont donc les mêmes quelle que soit la taille de la file : il faut éviter la première position. Les positions à privilégier sont celles du milieu de file : elles permettent à la fois une forte réduction de traînée, de l'ordre de 45%, mais aussi de ne pas être trop loin de la tête du peloton. Enfin, nous réalisons une comparaison entre nos mesures expérimentales et des calculs numériques sous OpenFoam. Cette comparaison est réalisée pour $L_{x,1-2} = 50$ cm. La figure 3.29 présente ces résultats. Cette comparaison nous montre que les tendances sont les mêmes entre les calculs numériques et les mesures expérimentales. Cependant, les valeurs des réductions de traînée ne sont pas toujours en accord, notamment pour $V = 0,75$ m/s, où les calculs numériques ont tendance à sous-estimer les réductions de traînée observées expérimentalement.

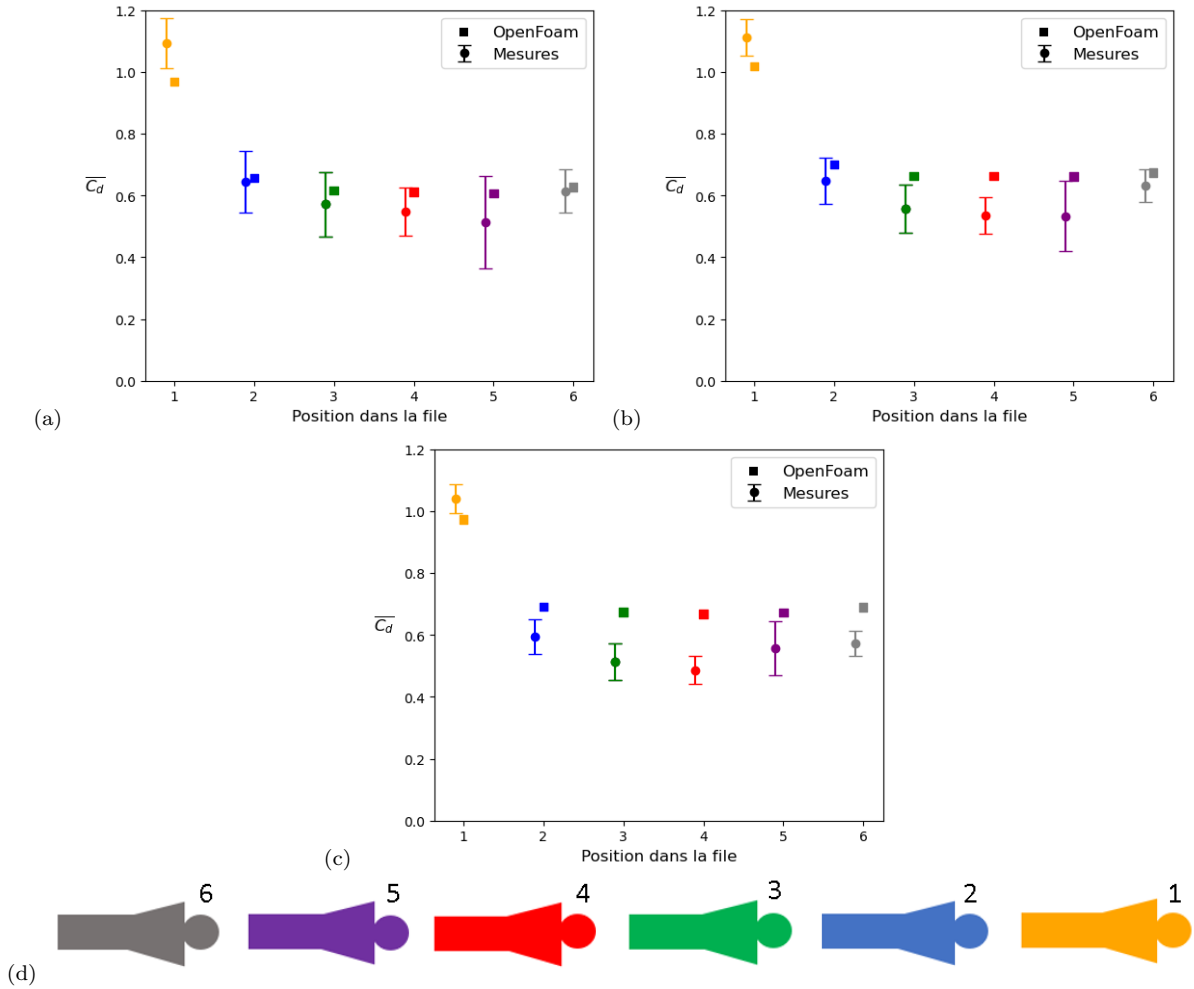


FIGURE 3.29 – Comparaison des mesures expérimentales avec des calculs sous OpenFoam, pour une peloton en file indienne de 6 nageurs avec $L_{x,1-2} = 50$ cm. (a) $V = 0,56$ m/s. (b) $V = 0,68$ m/s. (c) $V = 0,75$ m/s. (d) Schéma du peloton en file indienne.

3.4 Peloton de 3 nageurs nageant de front

Lors du sprint final, les nageurs portent leur effort pour passer la ligne d'arrivée en tête. Ils se retrouvent alors, en cas de course serrée, à plusieurs nageurs de front. Une exemple d'une telle situation est donné sur la figure 3.30.



FIGURE 3.30 – Photo de l'arrivée de la course de 5 km des championnats du monde de natation en eau libre 2023 à Doha, Qatar. [41]

Nous modélisons cette situation par le schéma 3.31a. La configuration installée dans le canal est elle visible sur la figure 3.31b.

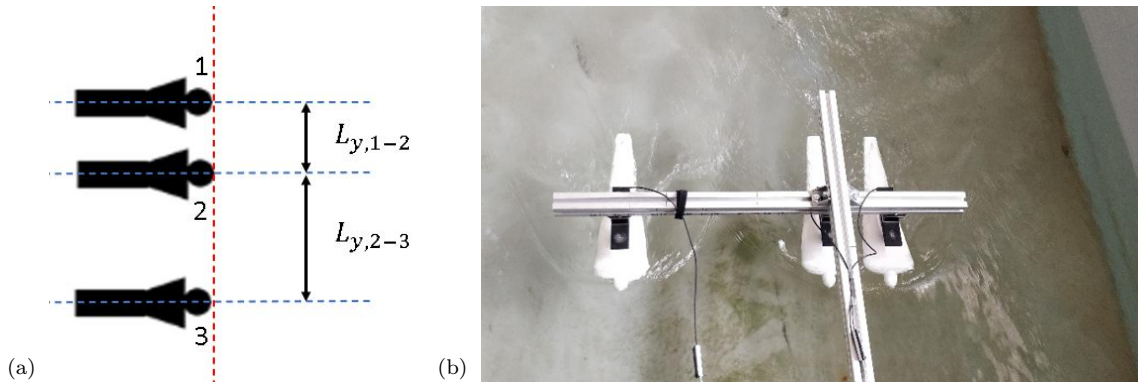


FIGURE 3.31 – Modélisation du peloton à 3 nageurs de front. (a) Schéma explicatif. (b) Vue de la configuration dans le canal.

Durant nos mesures expérimentales, la distance $L_{y,1-2}$ reste constante, égale à 15 cm, soit $L_{y,1-2}/L = 0,38$ et nous faisons varier la distance $L_{y,2-3}$. Les mesures du coefficient de traînée normalisé en fonction de $L_{y,2-3}/L$, pour les 3 vitesses d'étude, sont données sur la figure 3.32.

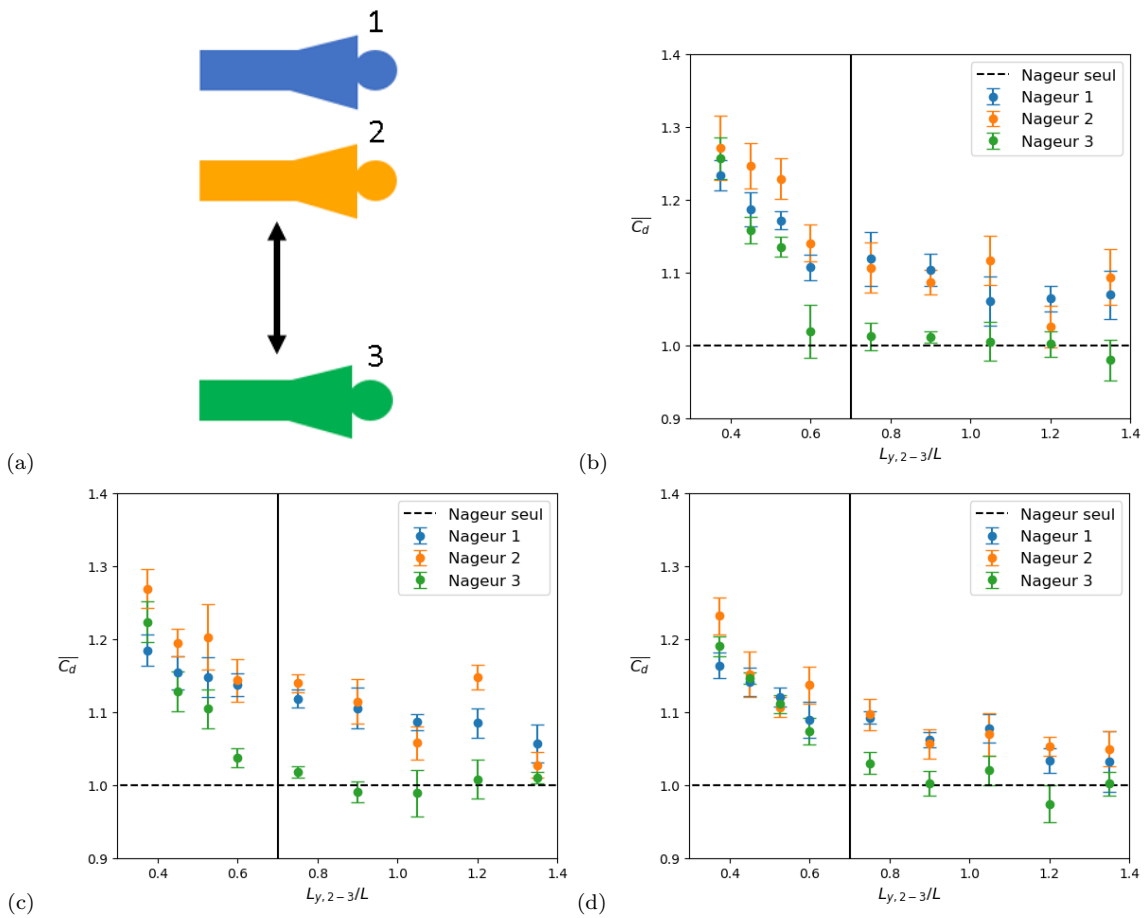


FIGURE 3.32 – Mesures expérimentales pour 3 nageurs de front. (a) Schéma des 3 nageurs de front. (b) $V = 0,56$ m/s. (c) $V = 0,68$ m/s (d) $V = 0,75$ m/s.

D'abord, nous observons qu'au delà de $L_{y,2-3}/L > 0.7$ (matérialisé par la ligne verticale noire sur la figure

3.32), le nageur 3 subit la même traînée qu'un nageur seul. Cela confirme les résultats présentés sur les cartes des forces 2.15 dans le chapitre 2. De plus, nous notons que lorsque les 3 nageurs sont proches, le nageur 2 est celui qui subit le plus de force de traînée. Ainsi, lors d'une arrivée serrée, il faudra privilégier de s'écarter des autres concurrents afin de subir le moins de traînée possible et absolument éviter de se retrouver en position 2, pris « en sandwich » par 2 concurrents. Nous complétons notre étude en comparons nos résultats expérimentaux avec des calculs numériques sous OpenFoam. Cette comparaison est donnée sur la figure 3.33.

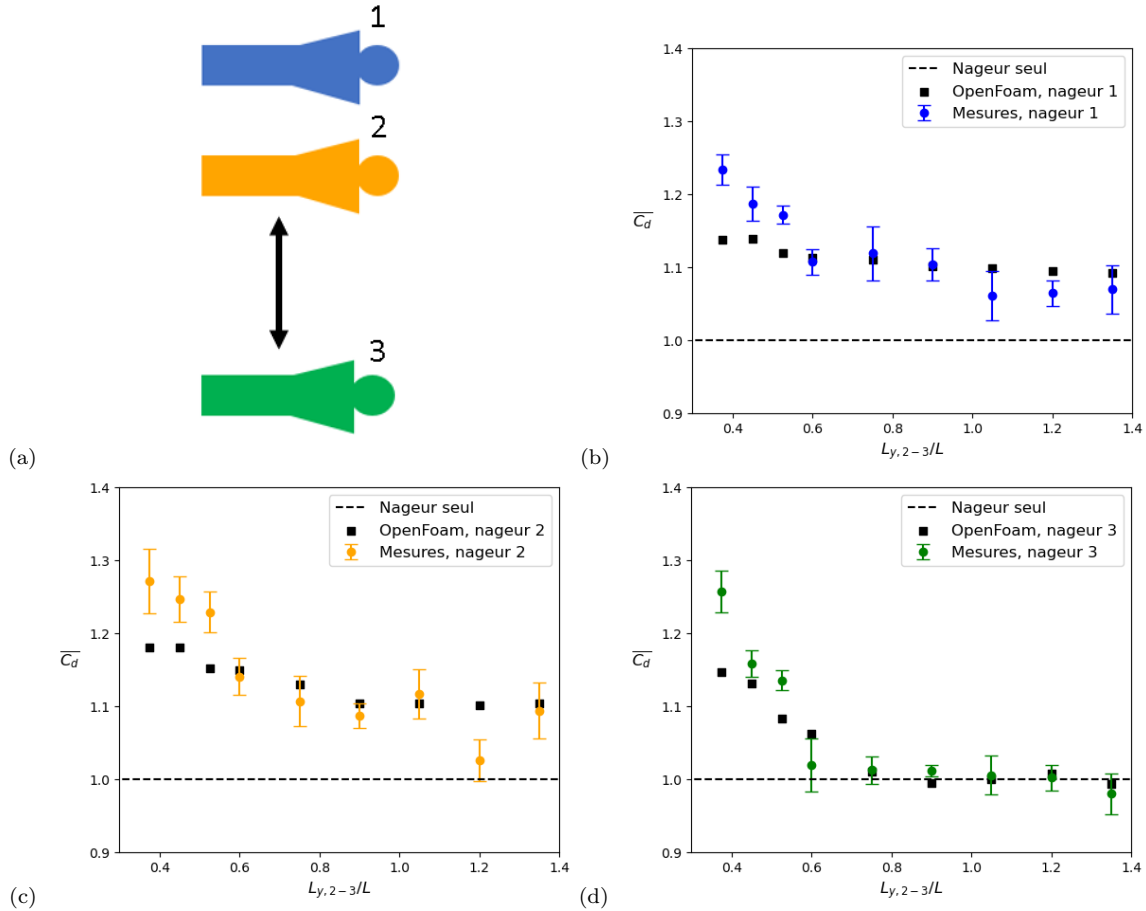


FIGURE 3.33 – Comparaison des mesures expérimentales avec des calculs OpenFoam, pour 3 nageurs de front, pour une vitesse $V = 0,56$ m/s. (a) Schéma des 3 nageurs de front. (b) Nageur 1. (c) Nageur 2 (d) Nageur 3.

Cette comparaison nous permet de confirmer les tendances observées expérimentalement. Cependant, pour des valeurs de $L_{y,2-3}/L < 0.5$, les résultats OpenFoam montrent une moins forte augmentation de traînée que celle obtenue expérimentalement. Cela peut être dû à des effets de vagues difficiles à capturer numériquement.

3.5 Discussion : est-il possible d'obtenir les résultats mesurés dans des pelotons à partir des résultats obtenus pour 2 nageurs dans le chapitre 2 ?

Nous cherchons ici à mettre en place une méthode de calcul simple qui permettrait d'obtenir la force de traînée subie par un nageur (ou son coefficient de traînée normalisé) au sein d'un peloton donné, à partir de sa position relative aux autres nageurs formant ce groupe.

3.5.1 Méthode

D'abord, nous avons observé dans le chapitre 2, que les variations de traînée rencontrées par un nageur sont dues soit à des effets de sillage, lorsque les 2 nageurs sont l'un derrière l'autre, soit à des effets de vagues, lorsque les 2 nageurs sont côte à côte.

Concernant les effets de vagues, nous considérons dans un premier temps que ces effets peuvent être superposés. Ainsi, pour le nageur considéré dans un peloton, nous calculons, à partir des cartes des forces obtenues au chapitre 2, la valeur du coefficient de traînée normalisé pour chaque couple nageur-autre membre du peloton (si le nageur étudié ne se trouve pas dans le sillage de celui-ci). Nous sommes ensuite ces contributions pour obtenir la variation de traînée due aux effets de vague :

$$\overline{C_{d,i}} = \sum_{j \neq i} (\overline{C_{d,i,j}} - 1) \quad (3.1)$$

où $\overline{C_{d,i,j}}$ est la valeur du coefficient de traînée normalisé du nageur i , en considérant uniquement l'impact du nageur j , calculé à partir des résultats du chapitre 2.

En revanche, comme le montrent les résultats obtenus pour un peloton de plusieurs nageurs en file indienne, les réductions de traînée dues aux effets de sillage ne s'additionnent pas. Pour les combiner, lorsque plusieurs nageurs se suivent (à la manière des pelotons en double file et en file indienne), nous isolons chacun des couples de nageurs se suivant dans la file en position i et $i + 1$. Alors, la réduction de la traînée subie par le nageur $i + 1$ sous l'action du nageur i s'écrit :

$$\overline{C_{d,i+1,i}} = \left(\frac{V_{i+1}}{V_i} \right)^2 \quad (3.2)$$

où V_i désigne la vitesse de l'écoulement vue par le nageur i . Le coefficient de traînée normalisé du nageur i peut alors s'obtenir par récurrence de l'équation précédente sur tous les membres de la file. Nous avons alors :

$$\overline{C_{d,i}} = \prod_{j=1}^i \overline{C_{d,j+1,j}} \quad (3.3)$$

3.5.2 Comparaison aux résultats expérimentaux

Dans un premier temps, nous nous intéressons à un peloton en flèche avec $L_{x,1-2}/L = 1$ et $L_{y,1-2}/L = 0,45$. Nous comparons sur la figure 3.34 les résultats obtenus expérimentalement avec ceux obtenus via notre modèle simple, pour une vitesse d'écoulement égale à 0,68 m/s.

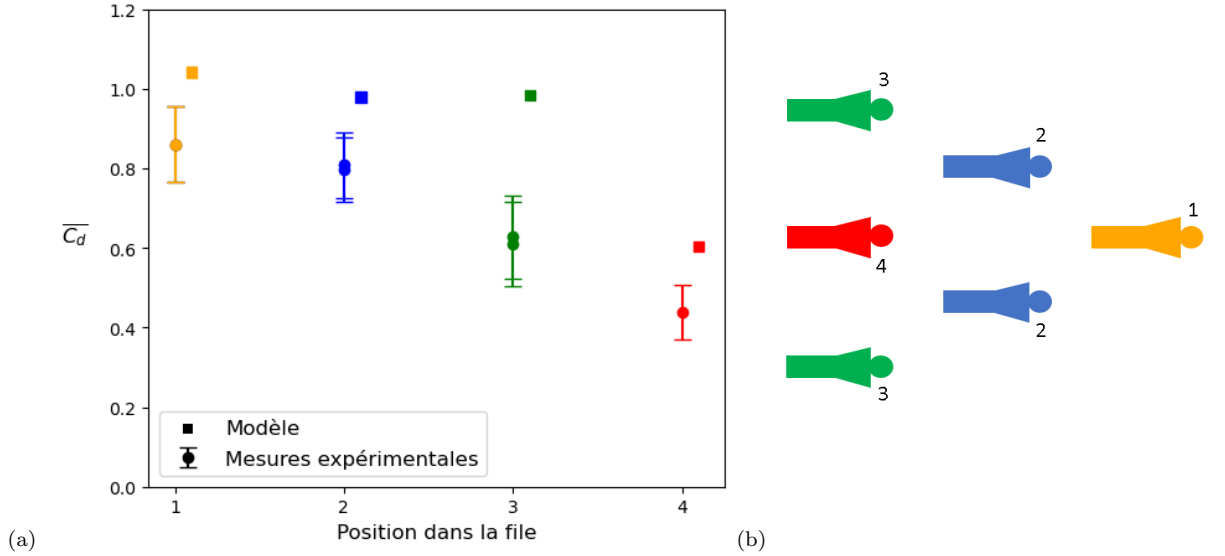


FIGURE 3.34 – Comparaison des mesures expérimentales avec les résultats obtenus avec le modèle créé à partir des résultats du chapitre 2, pour un peloton en file avec $L_{x,1-2}/L = 1$ et $L_{y,1-2}/L = 0,45$, pour une vitesse $V = 0,68$ m/s. (a) Résultats. (b) Schéma de la configuration.

Il ressort de cette comparaison que les réductions de traînée semblent être sous-estimées par notre modèle, notamment pour les nageurs en position 3. Cela peut venir du fait que ce modèle simple ne tient pas compte des interactions entre les champs de vagues créés par les nageurs. En revanche, il permet bien d'identifier la position la plus favorable à l'économie d'énergie au sein d'un peloton en file. Ensuite, nous réalisons le même type de comparaison pour un peloton en quinconce, avec $L_{x,1-2}/L = 1$ et $L_{y,1-2}/L = 0,6$. Les résultats sont donnés sur la figure 3.35.

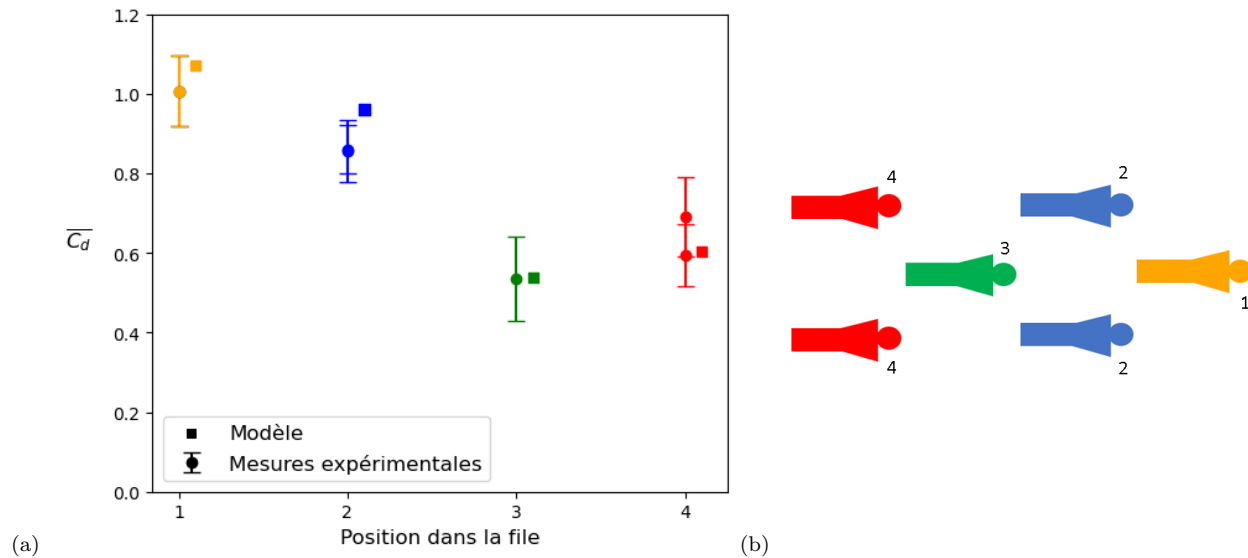


FIGURE 3.35 – Comparaison des mesures expérimentales avec les résultats obtenus avec le modèle créé à partir des résultats du chapitre 2, pour un peloton en quinconce avec $L_{x,1-2}/L = 1$ et $L_{y,1-2}/L = 0,6$, pour une vitesse $V = 0,68$ m/s. (a) Résultats. (b) Schéma de la configuration.

Ici, nous observons que le modèle est parfaitement en accord avec les mesures expérimentales : les réductions de traînée calculées sont égales (aux barres d'erreur près) et les tendances quant aux positions à privilégier

sont les mêmes. Ensuite, nous nous intéressons à un peloton en double file, avec $L_{x,1-2}/L = 1,25$ et $L_{y,1-2}/L = 0,6$. La comparaison avec les données recueillies expérimentalement est donné sur la figure 3.36.

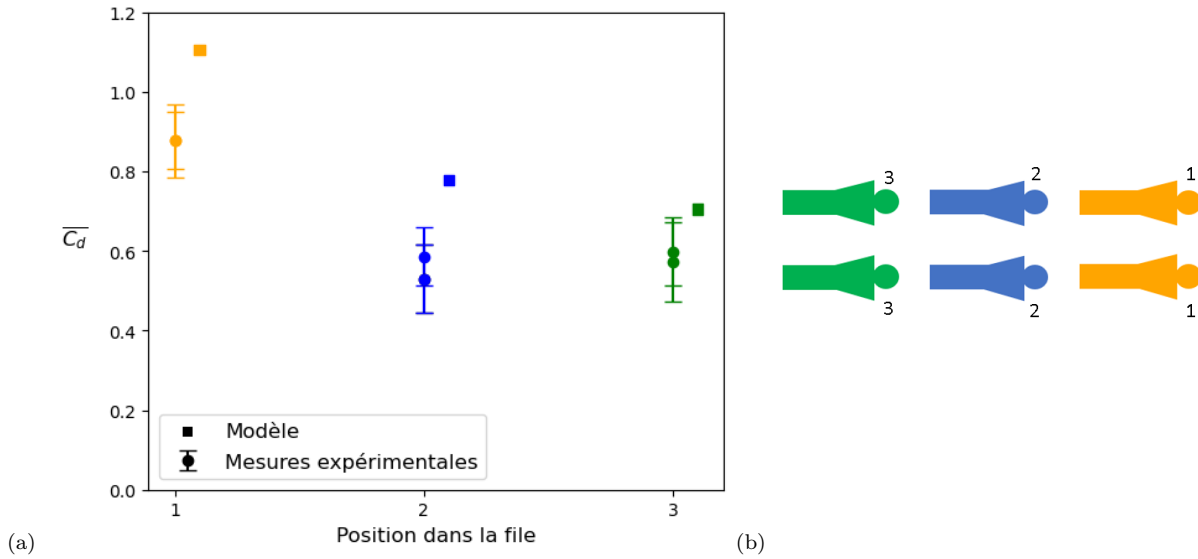


FIGURE 3.36 – Comparaison des mesures expérimentales avec les résultats obtenus avec le modèle créé à partir des résultats du chapitre 2, pour un peloton en double file avec $L_{x,1-2}/L = 1,25$ et $L_{y,1-2}/L = 0,6$, pour une vitesse $V = 0,68$ m/s. (a) Résultats. (b) Schéma de la configuration.

Nous notons ici, à l’image de la comparaison faite pour le peloton en flèche, que le modèle semble sous-estimer les réductions de traînée pour les nageurs en position 2 et 3. Cependant, les tendances sont bien les mêmes : il faut éviter de mener un tel peloton et les positions 2 et 3 génèrent des réductions de traînée quasiment équivalentes. Par ailleurs, nous réalisons également une comparaison pour un peloton en file indienne, avec $L_{x,1-2}/L = 1,5$. Elle est visible sur la figure 3.37.

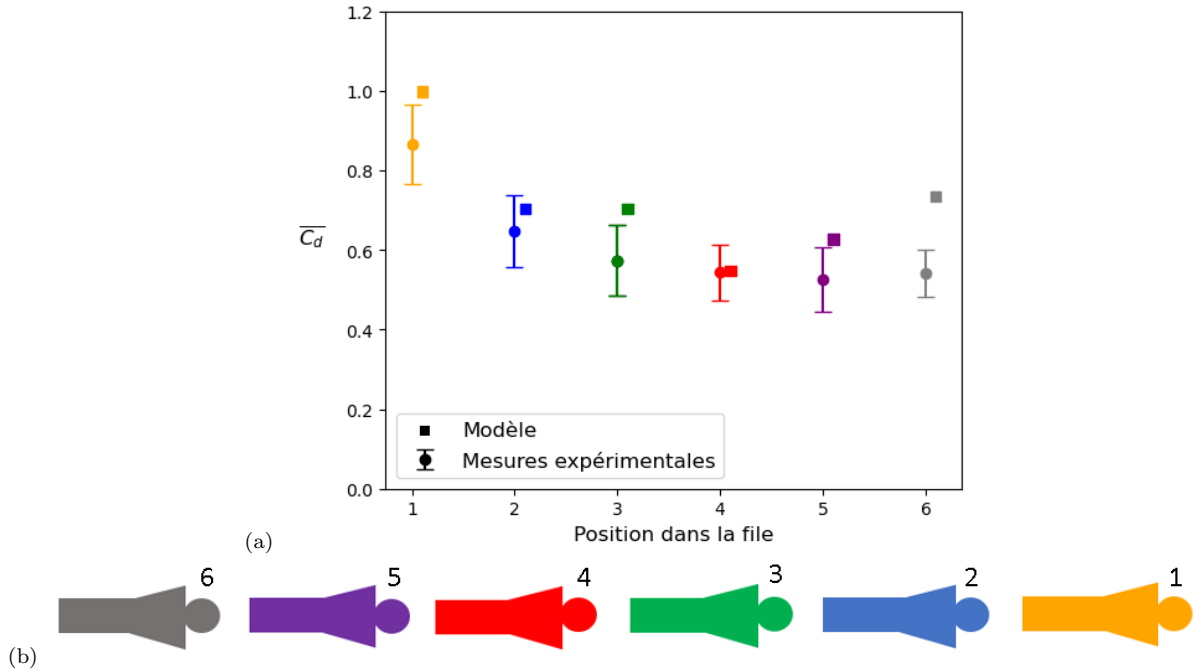


FIGURE 3.37 – Comparaison des mesures expérimentales avec les résultats obtenus avec le modèle créé à partir des résultats du chapitre 2, pour un peloton en file indienne avec $L_{x,1-2}/L = 1,5$, pour une vitesse $V = 0,68$ m/s. (a) Résultats. (b) Schéma de la configuration.

Nous observons ici, malgré une tendance à légèrement sous-estimer les réductions de traînée, que les résultats donnés par le modèle se comparent assez bien avec les données expérimentales. En effet, les tendances sont similaires : les positions les plus favorables sont celles en milieu de peloton et la traînée du nageur en dernière position est supérieure à celle des nageurs le précédant. Enfin, nous appliquons notre modèle à une configuration composée de 3 nageurs nageant de front. Les résultats sont donnés sur la figure 3.38.

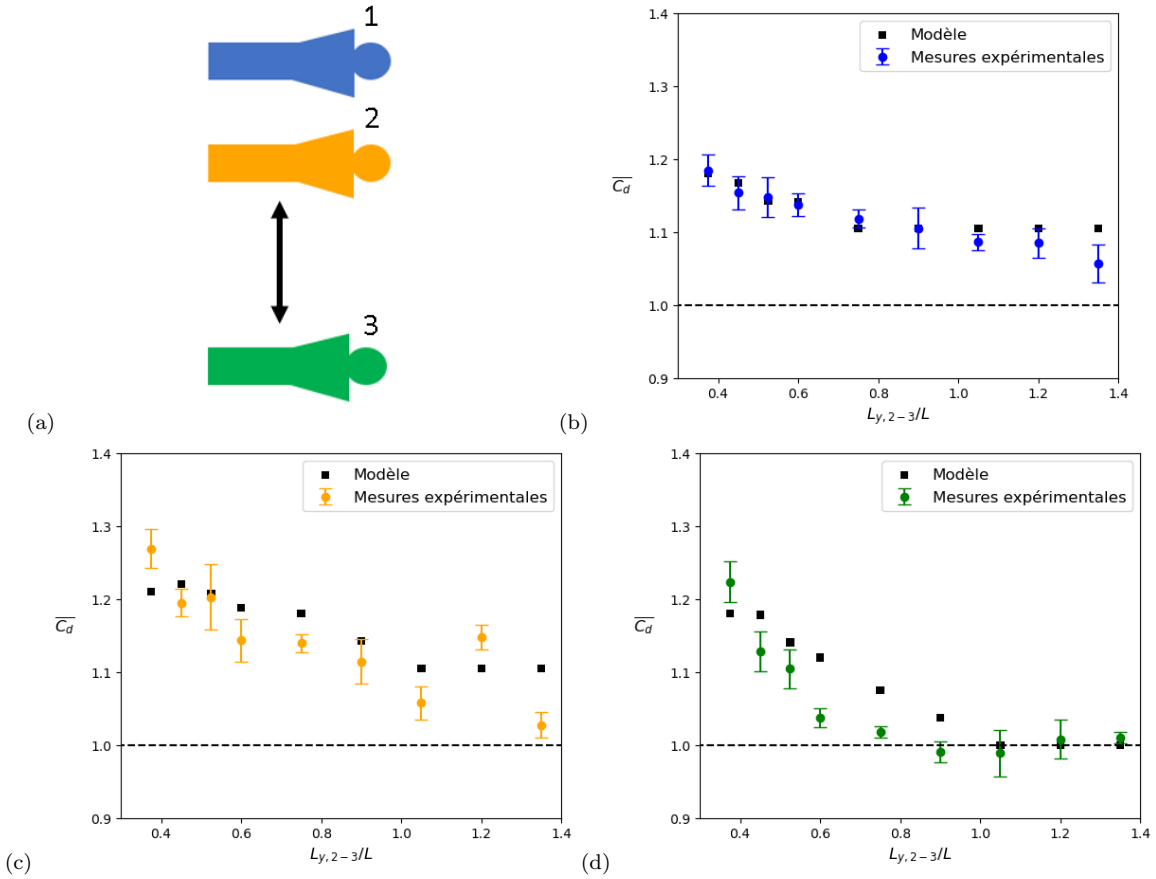


FIGURE 3.38 – Comparaison des mesures expérimentales avec les résultats obtenus avec le modèle créé à partir des résultats du chapitre 2, pour 3 nageurs de front avec $L_{y,1-2}/L = 0,375$, pour une vitesse $V = 0,68$ m/s. (a) Schéma de la configuration. (b) Nageur 1. (c) Nageur 2. (d) Nageur 3.

Nous observons ici que les résultats obtenus avec le modèle sont comparables aux résultats des mesures expérimentales. En effet, nous observons bien l'augmentation de traînée lorsque les nageurs se rapprochent. La valeur du maximum de traînée est quasiment la même pour le modèle et les mesures en canal.

Conclusion du chapitre 3

Dans ce chapitre, nous avons étudié expérimentalement et numériquement le phénomène de « drafting » au sein de différents types de peloton de nageurs. Ce travail nous a permis d'identifier les positions les plus favorables à l'économie d'énergie lors d'une course. Elles sont récapitulées dans le tableau 3.1. La figure 3.39 redonne la vue schématique des pelotons étudiés.

Configuration	Paramètres	Position la plus favorable	$\overline{C_d}$
En flèche	$L_{x,1-2} = 1, L_{y,1-2} = 0,45$	4	0,57
En quinconce	$L_{x,1-2} = 1, L_{y,1-2} = 0,6$	3	0,52
En double file	$L_{x,1-2} = 1,25, L_{y,1-2} = 0,6$	2	0,55
En file indienne	$L_{x,1-2} = 1,5, L_{y,1-2} = 0,6$	4	0,57

TABLE 3.1 – Récapitulatifs des principaux résultats obtenus au cours de l'étude du drafting au sein de pelotons de nageurs, pour une vitesse de 0,68 m/s.

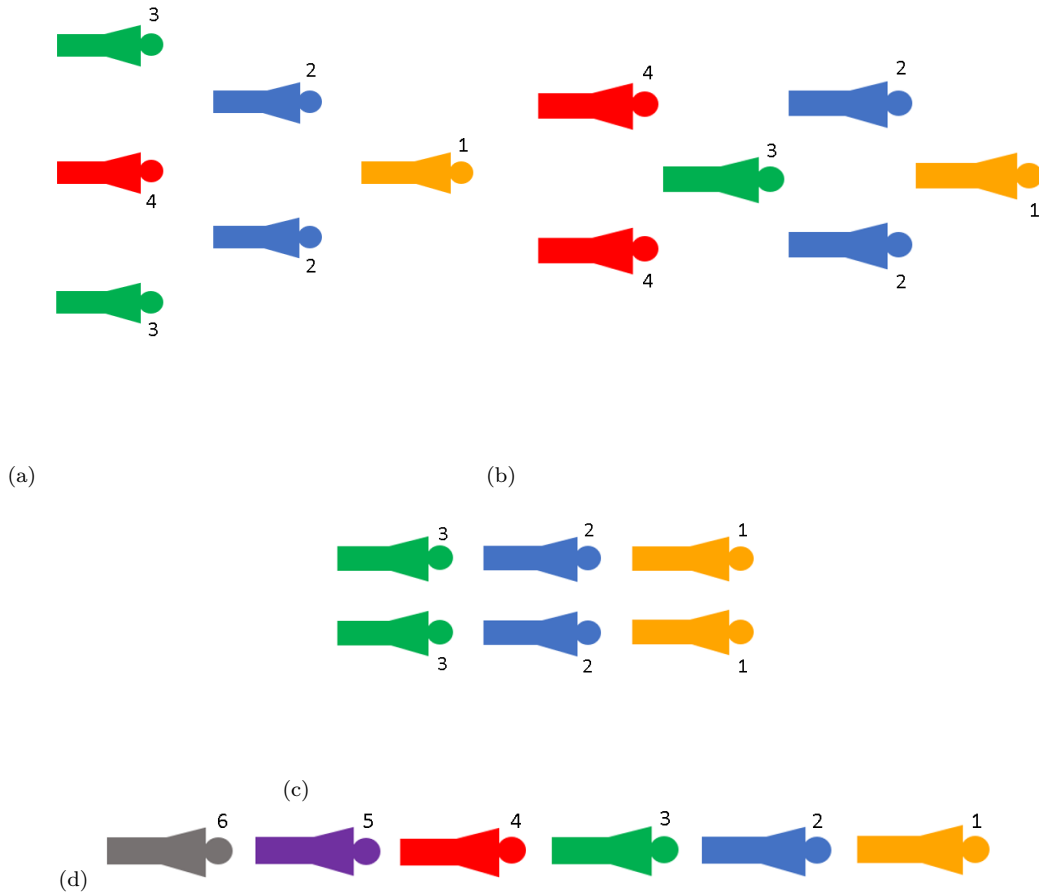


FIGURE 3.39 – Récapitulatif des principales configurations étudiées. (a) Peloton en flèche. (b) Peloton en quinconce. (c) Peloton en double file. (d) Peloton en file indienne.

Il est important de retenir que les positions qui permettent les réductions de traînée maximales engendrent souvent un positionnement peu favorable stratégiquement (loin de la tête de course et/ou enfermement pas d'autres nageurs). Il faudra donc, dans la plupart des situations, chercher un compromis entre économie d'énergie et stratégie. Enfin, nous avons développé un modèle simple qui, à partir des résultats obtenus pour 2 nageurs dans le chapitre 2, permet d'évaluer la traînée subie par un nageur au sein d'un peloton donné. Ce modèle permet de capturer les grandes tendances observés expérimentalement. En revanche, il faudra améliorer la prise en compte des interactions des champs de vagues créés par tous les membres du peloton afin de le rendre plus précis et plus fidèle aux observations.

4 Chapitre 4 : Optimisation du dépassement dans une situation à 2 nageurs

Lors d'une course de natation en eau libre, les nageurs doivent régulièrement dépasser d'autres concurrents afin de se replacer ou bien de prendre la tête lors du sprint final. C'est pourquoi nous cherchons dans ce chapitre à trouver une manière optimale de dépasser un autre nageur lors d'une course à partir des résultats obtenus dans le chapitre 2. Dans un premier temps, nous mettons en place un modèle physique permettant de modéliser le dépassement d'un nageur par un autre. Dans un second temps, nous utilisons un algorithme génétique afin d'optimiser la trajectoire de dépassement.

4.1 Modèle physique et hypothèses

Nous considérons dans toute la suite une situation à 2 nageurs. Nous utilisons la convention suivante : les grandeurs physiques liées au nageur qui double sont notées avec l'indice 1 et celles liées au nageur qui est doublé avec l'indice 2. D'après le principe fondamental de la dynamique, appliqué aux 2 nageurs, nous obtenons les équations du mouvement suivantes :

$$m_1 \frac{d\vec{V}_1(t)}{dt} = \vec{F}_{P,1}(t) + \vec{F}_{T,1}(t) \quad (4.1)$$

et

$$m_2 \frac{d\vec{V}_2(t)}{dt} = \vec{F}_{P,2}(t) + \vec{F}_{T,2}(t) \quad (4.2)$$

Où m_i représente la masse effective du nageur i , V_i sa vitesse, $F_{P,i}$ la force avec laquelle il se propulse et $F_{T,i}$ la force de traînée qu'il subit. Nous modélisons cette dernière de la manière suivante :

$$\vec{F}_{T,1}(t) = -k_{b,1} \overline{C_D}(x_1, y_1, x_2, y_2, t) \|\vec{V}_1(t)\| \vec{V}_1(t) \quad (4.3)$$

et

$$\vec{F}_{T,2}(t) = -k_{b,2} \overline{C_D}(x_2, y_2, x_1, y_1, t) \|\vec{V}_2(t)\| \vec{V}_2(t) \quad (4.4)$$

où $k_{b,i}$ est un coefficient de frottement ($k_{b,i} = \frac{1}{2} \rho S C_d$), souvent utilisé dans la littérature liée à la natation [38], x_i la position du nageur i selon l'axe défini par \vec{e}_x (défini sur la figure 4.1), y_i la position du nageur i selon l'axe défini par \vec{e}_y (défini sur la figure 4.1) et $\overline{C_D}$ est le coefficient de traînée normalisé dont la valeur sera calculée grâce à l'interpolation présentée sur les cartes de forces de la figure 2.15 dans le chapitre 2. Il ne dépend pas du nageur étudié mais seulement de la position relative des nageurs. Nous avons fait l'hypothèse que le coefficient $k_{b,i}$ est constant et indépendant du nombre de Froude et que la force de traînée est proportionnelle au carré de la vitesse. Ces hypothèses sont justifiées dans la mesure où les nombres de Froude liés à l'écoulement autour de nos nageurs sont inférieurs à 0,5. En effet, pour des nombres de Froude plus grand que 0,5, la traînée de vague des nageurs augmente fortement [38], rendant alors dans ce cas l'hypothèse de la dépendance de la force de traînée avec le carré de la vitesse ainsi que de la constance du coefficient de frottement non valables. Nous faisons de plus l'hypothèse que les effets de variations de traînée mesurés sur des nageurs passifs dans le chapitre 2 sont transposables, c'est à dire que le flux de quantité de mouvement lié à la propulsion des nageurs n'influence pas les résultats.

Concernant la force de propulsion, une première manière de la modéliser est de considérer que les nageurs se propulsent avec une force constante en norme durant toute la durée de la phase de dépassement. Cette hypothèse correspondrait au régime de « force maximale » mis en avant dans les travaux de Carmigniani *et al.* [42] dans lequel les nageurs se propulsent avec la force maximale qu'ils peuvent produire pendant un temps de propulsion noté t_p et accélèrent en réduisant le temps de retour aérien des bras, c'est à dire en augmentant leur fréquence de coups de bras. Notre hypothèse de force de norme constante au cours du dépassement reviendrait alors à considérer que les nageurs se propulsent avec une fréquence de coup de bras constante. Dans le cadre de cette hypothèse, nous modélisons la force de propulsion du nageur qui double comme suit :

$$\overrightarrow{F_{P,1}(t)} = F_{P,1} \overrightarrow{e_\alpha(t)} \quad (4.5)$$

Où le vecteur $\overrightarrow{e_\alpha(t)}$ forme un angle $\alpha(t)$ avec l'axe horizontal $\overrightarrow{e_x}$. Ces vecteurs et cet angle sont définis sur le schéma 4.1. Le nageur 1 a donc la liberté de se propulser dans n'importe quelle direction. En revanche, pour le nageur doublé, nous considérons qu'il oriente sa force de propulsion constamment selon l'axe $\overrightarrow{e_x}$ afin de simplifier le problème étudié et nous avons donc :

$$\overrightarrow{F_{P,2}(t)} = F_{P,2} \overrightarrow{e_x} \quad (4.6)$$

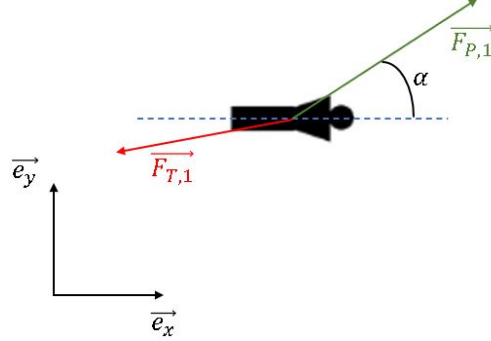


FIGURE 4.1 – Schéma explicatif des conventions utilisées pour le nageur 1 dans le modèle physique du dépassement.

Une seconde hypothèse de travail plus classique est que les nageurs se propulsent à puissance mécanique constante, notée P_m . Elle est définie comme le produit de la force de propulsion par la vitesse de nage : $P_m = F_p V$. Sous cette hypothèse, la force de propulsion du nageur 1 n'est pas constante au cours du dépassement et elle s'écrit :

$$\overrightarrow{F_{P,1}(t)} = \frac{P_{m,1}}{\|V_1(t)\|} \overrightarrow{e_\alpha(t)} \quad (4.7)$$

A l'image de ce qui a été fait pour l'hypothèse de propulsion à force constante, le nageur qui double a la liberté de se propulser dans n'importe quelle direction. En revanche, le nageur doublé se propulse uniquement selon la direction $\overrightarrow{e_x}$ et sa force de propulsion s'écrit donc :

$$\overrightarrow{F_{P,2}(t)} = \frac{P_{m,2}}{\|V_2(t)\|} \overrightarrow{e_x} \quad (4.8)$$

Sous ces hypothèses, il faudra s'assurer que la vitesse des nageurs n'est jamais nulle, mais cette situation reste assez improbable lors d'une course. Les résultats obtenus avec ces 2 hypothèses de travail seront comparés dans la suite. Quelle que soit la modélisation choisie, nous considérons les 2 nageurs comme similaires : nous décidons que $m_1 = m_2 = m = 100$ kg, qui correspond à la masse d'un nageur et à sa masse ajoutée : la masse typique d'un nageur en eau libre est de 80 kg et la masse ajoutée d'un nageur est prise égale à 0,25 fois sa masse, d'après [43], ce qui donne une masse totale de 100 kg. Nous posons également $k_{b,1} = k_{b,2} = k_b = 40$ kg/m, valeur correspondant à celle mise en avant dans les travaux de Pretot [38], pour un nageur actif. En prenant en compte ces hypothèses, la modélisation choisie pour la force de traînée et en projetant les équations 4.1 et 4.2 dans le repère $(\overrightarrow{e_x}, \overrightarrow{e_y})$, le problème se résume à 3 équations scalaires, les deux premières concernent le nageur 1 (qui double) et la troisième le nageur 2 (qui est doublé) :

$$m \frac{dV_{x,1}(t)}{dt} = F_{P,1} \cos(\alpha(t)) - k_b \overline{C_D}(x_1, y_1, x_2, y_2, t) \|V_1(t)\| V_{x,1}(t) \quad (4.9)$$

$$m \frac{dV_{y,1}(t)}{dt} = F_{P,1} \sin(\alpha(t)) - k_b \overline{C_D}(x_1, y_1, x_2, y_2, t) \|V_1(t)\| V_{y,1}(t) \quad (4.10)$$

$$m \frac{dV_2(t)}{dt} = F_{P,2} - k_b \overline{C_D}(x_2, y_2, x_1, y_1, t) V_2^2(t) \quad (4.11)$$

où $F_{P,i}$ peut prendre les deux formes détaillées plus haut. Dans la suite, ces équations nous permettront, en se donnant des valeurs de force de propulsion et des conditions initiales en vitesse et en position, à partir de la valeur de l'angle α à chaque instant, de reconstruire la trajectoire correspondante pour chacun des deux nageurs. Le but sera alors de déterminer la suite des valeurs de α qui permet de minimiser le temps de dépassement pour le nageur qui double.

4.2 Méthode d'optimisation : algorithme génétique

Afin d'étudier le problème numériquement, nous discrétisons les équations 4.9, 4.10 et 4.11. Nous utilisons un schéma d'Euler explicite d'ordre 1. Ainsi les équations du mouvement deviennent :

$$m \frac{V_{x,1,j+1} - V_{x,1,j}}{\Delta t} = F_{P,1} \cos(\alpha_j) - k_b \overline{C_{D,j}}(x_1, y_1, x_2, y_2) \|\vec{V}_{1,j}\| V_{x,1,j} \quad (4.12)$$

$$m \frac{V_{y,1,j+1} - V_{y,1,j}}{\Delta t} = F_{P,1} \sin(\alpha_j) - k_b \overline{C_{D,j}}(x_1, y_1, x_2, y_2) \|\vec{V}_{1,j}\| V_{y,1,j} \quad (4.13)$$

$$m \frac{V_{2,j+1} - V_{2,j}}{\Delta t} = F_{P,2} - k_b \overline{C_{D,j}}(x_2, y_2, x_1, y_1) V_{2,j}^2 \quad (4.14)$$

où l'indice j désigne le j -ème pas de temps du calcul et Δt est la durée entre deux pas de temps. La valeur des différentes composantes de la vitesse des deux nageurs à un pas de temps donné sont donc entièrement calculables en fonction des valeurs des grandeurs du problème au pas de temps précédent. Ainsi, à partir des conditions initiales du problème et en se donnant les valeurs de l'angle α à chaque pas de temps, nous pouvons remonter à la trajectoire discrète des deux nageurs.

Afin de trouver la trajectoire de dépassement optimale, nous utilisons un algorithme génétique. Un tel algorithme cherche à reproduire les mécanismes de sélection naturelle observés dans la nature afin d'obtenir un individu optimal à partir d'une population non optimale. Son principe est le suivant : une population aléatoire d'individus est créée. Pour chaque individu, l'algorithme calcule un score. Plus ce score est faible, meilleur est l'individu en rapport avec le problème étudié. Parmi cette population initiale, l'algorithme garde les meilleurs individus (ceux ayant le plus petit score), élimine les plus mauvais, puis crée une nouvelle génération d'individus en croisant ceux restants et en effectuant des mutations sur les nouveaux individus obtenus, à l'image de ce qu'il se passe au cours de la reproduction sexuée chez les êtres vivants. Le score des nouveaux individus est calculé puis le processus de sélection des meilleurs et de création de nouveaux individus reprend. L'algorithme s'arrête lorsque le nombre de générations atteint une valeur prédéfinie en amont : le meilleur individu de la population est alors l'individu considéré comme optimal. Ce fonctionnement est résumé sur la figure 4.2.

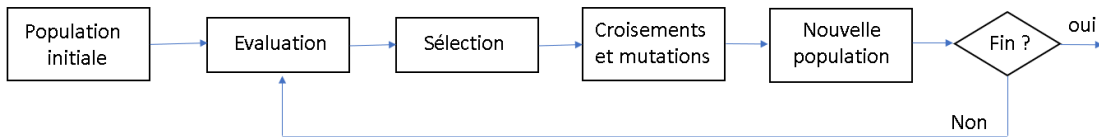


FIGURE 4.2 – Schéma explicatif du principe d'un algorithme génétique.

Dans le cadre de notre problème, un individu est défini par une liste dont chaque élément (également appelé gène) représente une variation de l'angle de propulsion du nageur qui double à chaque pas de temps. Ainsi, au pas de temps $j + 1$, l'angle de propulsion du nageur 1 sera donné par l'opération :

$$\alpha_{j+1} = \alpha_j + \text{individu}[j] \times pas_\alpha \quad (4.15)$$

où pas_α est un coefficient constant qui nous permet de limiter les variations de l'angle de propulsion entre 2 pas de temps afin d'éviter des situations impossibles en réalité. Tous les gènes de tous les individus ont des valeurs entières, comprises entre -5 et 5. Une fois la population créée, chaque individu se voit attribuer un score. Pour calculer le score, les trajectoires des 2 nageurs correspondantes à l'individu sont reconstruites à l'aide des valeurs des gènes et des équations 4.12, 4.13 et 4.14. Cette reconstruction nous permet d'accéder à la position de chacun des nageurs au cours du temps. A partir de ces positions, nous calculons différentes pénalités :

- La première sert à s'assurer que le nageur qui double reste dans la zone de course : le nageur qui double ne peut pas s'éloigner à plus de 2 mètres, selon l'axe y de son concurrent. Pour chaque position $(x_{1,j}, y_{1,j})$ du nageur qui double, l'algorithme vérifie si celle-ci se trouve dans la zone de course. Cette pénalité est proportionnelle au nombre de positions composant la trajectoire et se trouvant hors zone et donc proportionnelle au temps passé par le nageur dans la zone interdite.
- La seconde permet de vérifier que les 2 nageurs ne se chevauchent pas au cours du temps. De manière similaire à la pénalité précédente, l'algorithme calcule, pour chaque position $(x_{1,j}, y_{1,j})$ du nageur qui double et $(x_{2,j}, y_{2,j})$ du nageur doublé, si les nageurs se chevauchent. Cette pénalité sera proportionnelle au nombre de positions pour lesquelles les nageurs se chevauchent et donc au temps de chevauchement entre les nageurs.
- Enfin, la troisième pénalise les trajectoires qui ne permettent pas au dépassement de se faire complètement. Nous considérons un dépassement comme « complet » lorsque les pieds du nageur 1 se trouvent à une abscisse x plus grande que celle de la tête du nageur 2. Cette pénalité est proportionnelle à la distance manquante au nageur 1 pour obtenir un dépassement complet.

A ces 3 pénalités vient s'ajouter le temps total de dépassement. L'algorithme va permettre d'obtenir des individus ayant des scores de plus en plus petit : dans un premier temps des individus avec des pénalités de moins en moins grandes et une fois que toutes les pénalités sont nulles, des individus qui engendrent des temps de dépassement de plus en plus faibles. Enfin, en plus des paramètres physiques présents dans les équations du mouvement et les conditions initiales, le déroulé de l'algorithme dépend de différents paramètres que l'utilisateur choisit avant de procéder à une optimisation : le nombre d'individus au sein de la population, le nombre de générations maximal autorisé, le nombre d'individus sélectionnés par génération, le nombre de gènes composant chaque individu, la probabilité de mutation d'un gène d'un individu...

4.3 Influence des paramètres du modèle

Nous nous intéressons ici à l'influence du choix de nos différents paramètres sur les résultats obtenus par l'algorithme. Ce travail a été effectué avec le modèle de propulsion à puissance mécanique constante. Pour cela, nous allons comparer les trajectoires optimales obtenues pour différents jeux de paramètres avec la meilleure trajectoire obtenue lors de l'ensemble de notre travail (celle avec le temps de dépassement le plus faible), les valeurs des puissances de nage étant les mêmes tout au long de cette étude. Cette comparaison se fait selon 2 critères : le temps de dépassement obtenu et son écart avec le temps de dépassement minimal, ainsi que la distance de Fréchet [44] entre la trajectoire obtenue et la meilleure trajectoire. Cette distance permet de mesurer la similarité entre 2 courbes. Un exemple classique permettant de comprendre ce qu'est la distance de Fréchet est un homme promenant son chien avec une laisse. L'homme suit sa propre trajectoire, le chien la sienne, les 2 peuvent ralentir ou accélérer mais ne peuvent pas reculer. Alors la distance de Fréchet entre les trajectoires de l'homme et du chien représente la plus petite longueur de laisse nécessaire à ce que l'homme et le chien puissent suivre leurs trajectoires respectives. Dans notre cas, nous étudions la trajectoire du nageur qui double relative au nageur doublé. L'espace est donc adimensionné, la distance de Fréchet entre 2 trajectoires le sera donc aussi. Afin d'établir un critère de similarité entre 2 trajectoires, nous calculons, pour 100 trajectoires générées aléatoirement, leur distance de Fréchet à la meilleure trajectoire. Nous obtenons alors une distance de Fréchet moyenne de 9,03. Nous considérons alors, de manière arbitraire, 2 courbes comme non-significativement différentes si la distance de Fréchet qui les sépare est inférieure à 0,1. Dans la suite, la distance de Fréchet sera notée D_f et la valeur de 0,1 séparant les trajectoires significativement différentes sera noté $D_{f,crit}$.

D'abord, nous étudions l'influence du nombre d'individus composant la population, noté N_{ind} sur la trajectoire optimale de dépassement. Pour ce faire, nous réalisons plusieurs optimisations pour différentes valeurs

de N_{ind} , les valeurs des autres paramètres étant fixées. Celles-ci sont regroupées dans le tableau 4.1. Les valeurs des conditions initiales et des puissances sont les mêmes dans toute cette section.

Paramètres de l'algorithme	Valeurs
Nombre maximal de génération	2000
Nombre de gènes par individu	1000
Probabilité de mutation d'un gène	0,0015
Pas de temps Δt	0,1 s
Pas d'angle pas_α	0,0015 rad
Puissance du nageur 1	150 W
Puissance du nageur 2	100 W
Vitesse selon \vec{e}_x , à $t = 0$ du nageur 1	1,55 m/s
Vitesse selon \vec{e}_x , à $t = 0$ du nageur 2	1,36 m/s
Vitesse selon \vec{e}_y , à $t = 0$ du nageur 1	0 m/s
Position selon \vec{e}_x , à $t = 0$ du nageur 1	-3 m
Position selon \vec{e}_x , à $t = 0$ du nageur 2	0 m
Position selon \vec{e}_y , à $t = 0$ du nageur 1	0 m

TABLE 4.1 – Paramètres utilisés pour l'étude de l'influence du nombre d'individus composant la population.

Les différentes trajectoires obtenues sont données sur la figure 4.3. Le tableau 4.2 présente les valeurs des critères de similarités des trajectoires obtenues, en comparaison à la meilleure trajectoire.

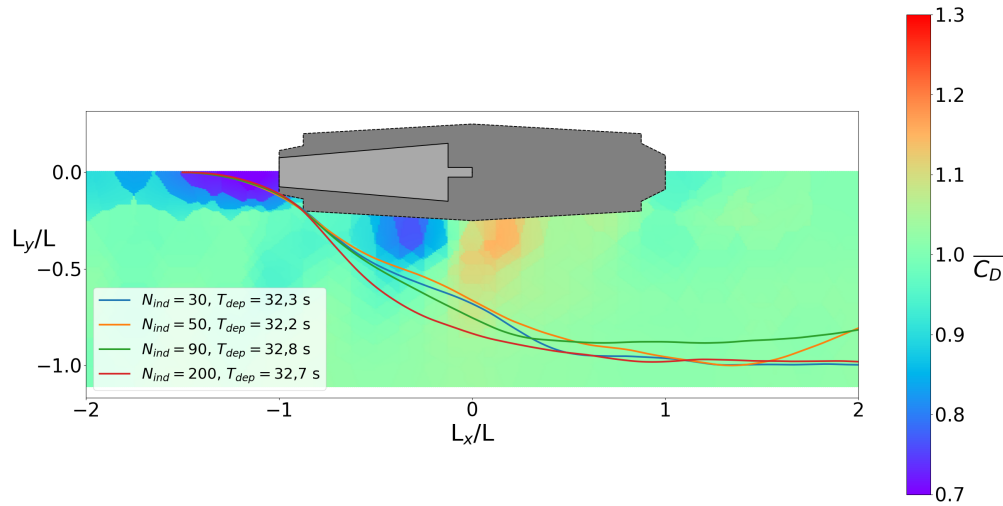


FIGURE 4.3 – Trajectoires optimales de dépassement obtenues pour différentes valeurs du paramètre N_{ind} .

N_{ind}	Écart relatif au meilleur temps (%)	D_f à la meilleure trajectoire
30	6,2	0,121
50	5,9	0,121
90	7,9	0,081
200	7,6	0,139

TABLE 4.2 – Critères de similarité à la meilleure trajectoire, pour différentes valeurs de N_{ind} .

Nous observons ici que le nombre d'individus dans la population ne semble pas avoir d'impact sur le temps de dépassement obtenu, ni ne provoque de différence importante sur l'allure de la trajectoire optimale de

dépassement. En revanche, augmenter fortement N_{ind} entraîne une augmentation du temps de calcul. C'est pourquoi nous nous limitons à une valeur de 90 individus dans notre étude.

Dans un second temps, nous nous intéressons au nombre d'individus sélectionnés par l'algorithme (pour créer la prochaine génération) par génération, noté K . Pour cela, nous lançons l'algorithme avec différentes valeurs de ce paramètre, tous les autres étant fixés. Leurs valeurs sont regroupées dans le tableau 4.3.

Paramètres de l'algorithme	Valeurs
Nombre maximal de génération	2000
Nombre d'individus par génération	90
Nombre de gènes par individu	1000
Probabilité de mutation d'un gène	0,0015
Pas de temps Δt	0,1 s
Pas d'angle pas_α	0,0015 rad

TABLE 4.3 – Paramètres utilisés pour l'étude de l'influence du nombre d'individus sélectionnés par génération.

Les allures des trajectoires obtenues lors de cette étude sont données sur la figure 4.4. Le tableau 4.4 présente les critères de similarité, à la meilleure trajectoire, des trajectoires obtenues.

K	Écart relatif au meilleur temps (%)	D_f à la meilleure trajectoire
5	4,9	0,136
20	7,9	0,089
40	10,9	0,102
50	3,0	0,104
70	7,9	0,071
80	7,9	0,057

TABLE 4.4 – Critères de similarité à la meilleure trajectoire, pour différentes valeurs de K .

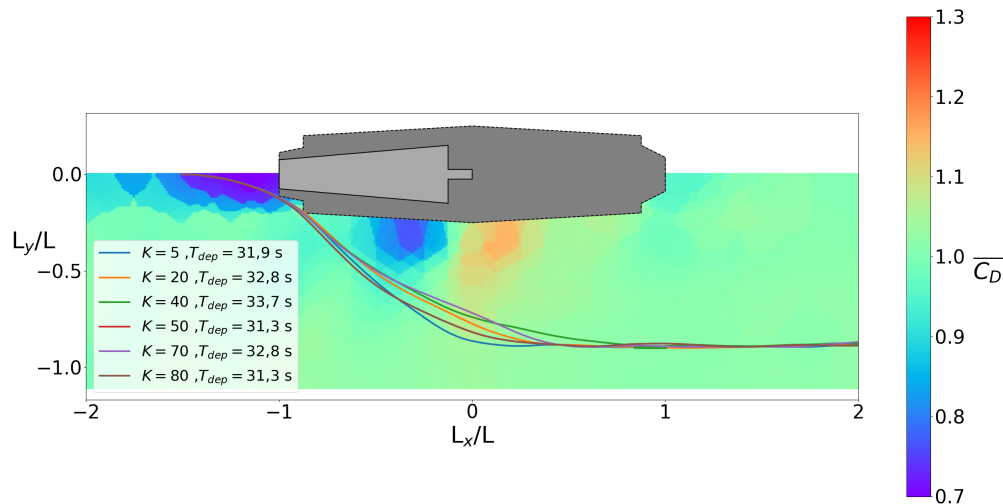


FIGURE 4.4 – Trajectoires optimales de dépassement obtenues pour différentes valeurs du paramètre K .

Les temps de dépassement obtenus sont assez proches du meilleur temps de dépassement et aucune tendance ne se dégage en fonction de la valeur de K . De plus, toutes les trajectoires obtenues ont une distance de Fréchet inférieure ou très proche du critère associé. Nous pouvons donc dire qu'elles ne sont pas significativement différentes de la meilleure trajectoire. Enfin, Nous n'observons pas, à l'oeil, de différence majeure

dans l'allure des différentes trajectoires de dépassement sur la figure 4.4. Nous concluons donc que la valeur de K a très peu d'influence sur le résultat de l'optimisation. Nous prenons donc dans toute la suite $K = 20$.

Nous nous intéressons ensuite à l'influence de la probabilité de mutation de chaque gène de chaque individu, noté P_{mut} . Tous les gènes ont la même probabilité de muter lors de l'évolution génétique. Nous reprenons la même méthode que précédemment. Les paramètres utilisés sont regroupés dans le tableau 4.5.

Paramètres de l'algorithme	Valeurs
Nombre maximal de génération	2000
Nombre d'individus par génération	90
Nombre d'individus sélectionnées par génération	20
Nombre de gènes par individu	1000
Pas de temps Δt	0,1 s
Pas d'angle pas_α	0,0015 rad

TABLE 4.5 – Paramètres utilisés pour l'étude de l'influence du nombre maximal de générations.

Les résultats de l'étude de ce paramètre sont donnés dans le tableau 4.6 et les allures des trajectoires sur la figure 4.5.

P_{mut}	Écart relatif au meilleur temps (%)	D_f à la meilleure trajectoire
0,0001	6,6	0,351
0,0005	8,2	0,118
0,001	8,8	0,140
0,05	4,9	0,245
0,1	6,6	0,151

TABLE 4.6 – Critères de similarité à la meilleure trajectoire, pour différentes valeurs de P_{mut} .

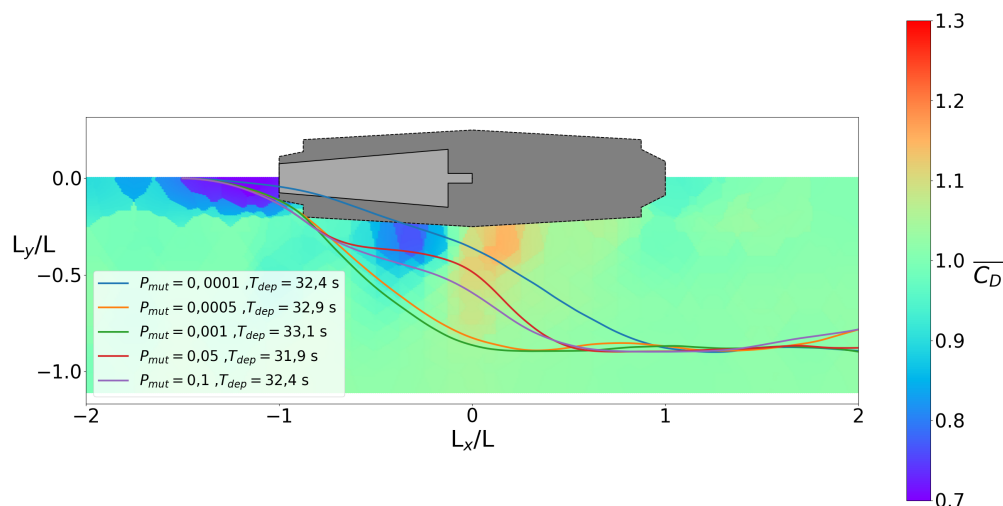


FIGURE 4.5 – Trajectoires optimales de dépassement obtenues pour différentes valeurs du paramètre P_{mut} .

Nous remarquons ici que la trajectoire obtenue pour la plus faible valeur de P_{mut} (en bleu sur la figure 4.5) n'est pas valable : les 2 nageurs se chevauchent. L'algorithme n'a donc pas convergé vers un optimum plausible. Cela peut s'expliquer par le fait qu'une faible valeur de P_{mut} engendre une faible diversité génétique puisque les mutations sont alors peu probables. L'algorithme aura donc tendance à rester bloqué dans des optima locaux et non globaux, donnant lieu comme ici à des résultats non conformes à ce que nous attendons.

Au contraire, pour les plus hautes valeurs de P_{mut} (trajectoire violette et rouge sur la figure 4.5), nous obtenons des trajectoires plausibles mais significativement différentes en terme d'allure, d'après les distances de Fréchet calculées. Ici, une trop grande diversité génétique empêche l'algorithme de converger correctement. Pour la suite, nous choisissons donc une valeur du paramètre P_{mut} qui permet un compromis entre trop faible et trop grande diversité génétique soit $P_{mut} = 0.0015$.

Ensuite, nous étudions l'influence du paramètre de variation d'angle pas_α défini dans la section 4.1. Les paramètres utilisés sont regroupés dans le tableau 4.7.

Paramètres de l'algorithme	Valeurs
Nombre maximal de génération	2000
Nombre d'individus par génération	90
Nombre d'individus sélectionnées par génération	20
Nombre de gènes par individu	1000
Probabilité de mutation d'un gène	0,0015
Pas de temps Δt	0,1 s

TABLE 4.7 – Paramètres utilisés pour l'étude de l'influence du paramètre pas_α .

Les résultats de cette étude sont donnés dans le tableau 4.8 et les allures des trajectoires sur la figure 4.6.

pas_α	Écart relatif au meilleur temps (%)	D_f à la meilleure trajectoire
0,0001	12,2	0,566
0,0005	3,0	0,245
0,001	5,9	0,092
0,002	6,2	0,206
0,003	5,3	0,279
0,005	5,3	0,292
0,01	5,9	0,263

TABLE 4.8 – Critères de similarité à la meilleure trajectoire, pour différentes valeurs de pas_α .

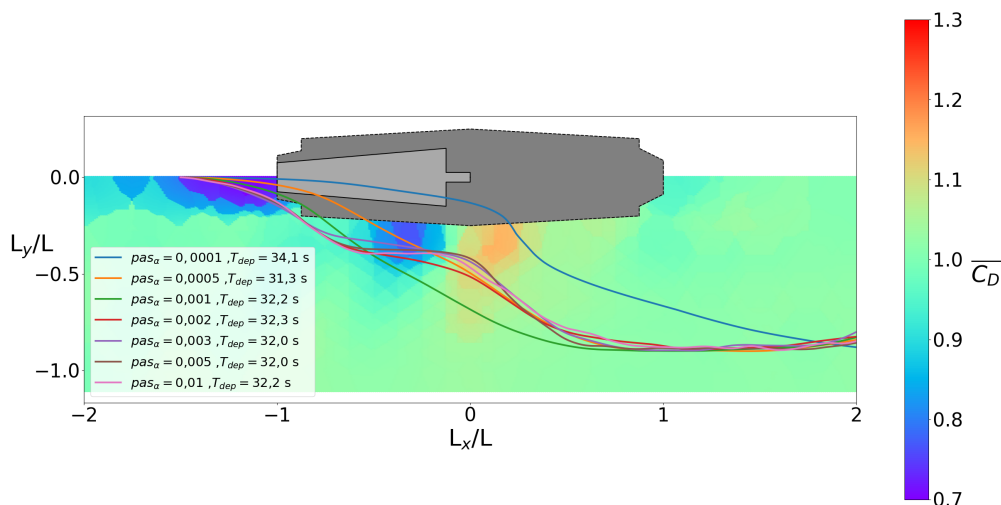


FIGURE 4.6 – Trajectoires optimales de dépassement obtenues pour différentes valeurs du paramètre pas_α .

Nous observons ici, que pour les 3 plus petites valeurs du paramètre pas_α (trajectoire bleue, orange et verte sur la figure 4.6, nous obtenons des trajectoires qui ne sont pas plausibles : les 2 nageurs se chevauchent

à un moment donné du dépassement. Cela s'explique par le fait qu'une faible valeur de pas_α limite la capacité de rotation du nageur, l'empêchant ainsi de s'écarter rapidement de son vis à vis et entraînant ainsi le chevauchement. Nous choisissons donc dans la suite une valeur de ce paramètre qui évite ce genre de résultats. En revanche, si la valeur de pas_α est trop grande, le nageur a une capacité de rotation trop grande, ce qui donne des trajectoires significativement différentes de la meilleure trajectoire selon le critère de la distance de Fréchet. Afin de remédier à ces deux problèmes, nous posons $pas_\alpha = 0,0015$ rad.

4.4 Trajectoire optimale de dépassement

4.4.1 Modèle de propulsion à force constante

Dans un premier temps, nous utilisons le modèle de propulsion à force constante. Afin de procéder à l'optimisation, nous choisissons les paramètres définis dans le tableau 4.9.

Paramètres de l'algorithme	Valeurs
Nombre maximal de génération	2000
Nombre d'individus par génération	90
Nombre d'individus sélectionné par génération	20
Nombre de gènes par individu	1000
Probabilité de mutation d'un gène	0,0015
Pas de temps Δt	0,1 s
Pas d'angle pas_α	0,0015 rad
Force de propulsion du nageur 1	95 N
Force de propulsion du nageur 2	80 N
Vitesse selon \vec{e}_x , à $t = 0$ du nageur 1	1,55 m/s
Vitesse selon \vec{e}_x , à $t = 0$ du nageur 2	1,41 m/s
Vitesse selon \vec{e}_y , à $t = 0$ du nageur 1	0 m/s
Position selon \vec{e}_x , à $t = 0$ du nageur 1	-3 m
Position selon \vec{e}_x , à $t = 0$ du nageur 2	0 m
Position selon \vec{e}_y , à $t = 0$ du nageur 1	0 m

TABLE 4.9 – Paramètres utilisés lors de l'optimisation avec le modèle de propulsion à force constante.

A la fin de l'optimisation, nous obtenons la trajectoire du nageur 1, dans le référentiel du nageur 2, visible sur la figure 4.7.

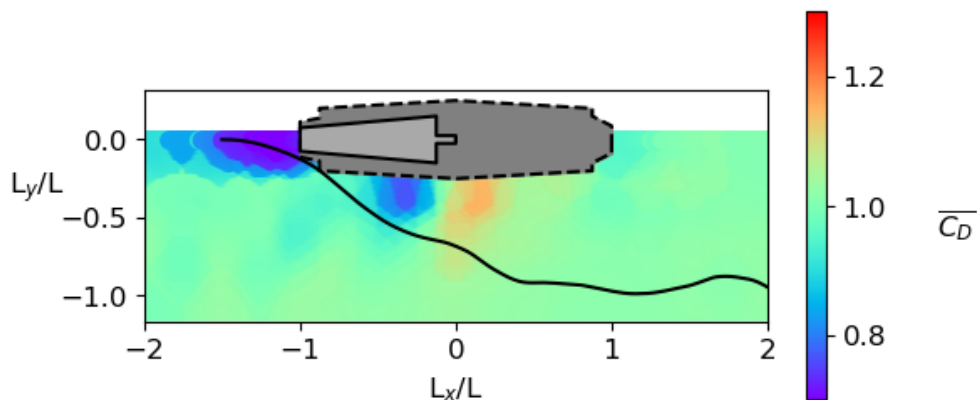


FIGURE 4.7 – Trajectoire optimale de dépassement obtenue, dans le référentiel du nageur doublé, pour le modèle de propulsion à force constante.

Ce résultat nous montre que pour réaliser un dépassement optimal, un nageur doit se rapprocher des pieds de son concurrent, afin de profiter de fortes réductions de traînés. Il faut ensuite se rapprocher d'une zone

favorable au niveau de la hanche sans s’y attarder afin d’éviter la zone de forte traînée lorsque les 2 nageurs sont côte à côte. La fin du dépassement se fait en restant à l’écart de son voisin afin d’éviter de lui faire profiter de la zone de faible traînée qu’il rencontrerait en se plaçant au niveau de la hanche du nageur qui double. Les trajectoires des 2 nageurs peuvent également être visualisées dans le référentiel (\vec{e}_x, \vec{e}_y) , sur la figure 4.8.

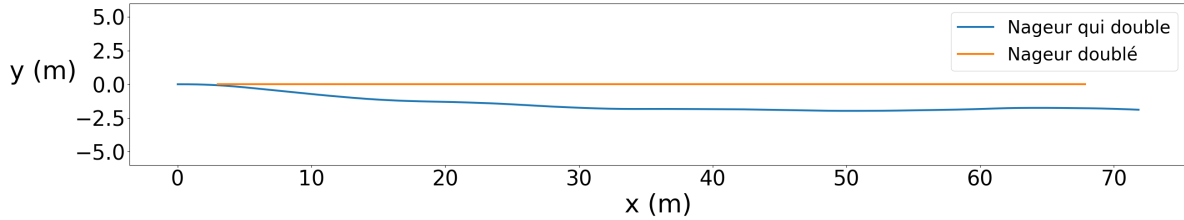


FIGURE 4.8 – Trajectoire des 2 nageurs, dans le référentiel global, pour le modèle de propulsion à force constante.

Ces tracés montrent que la distance D_{dep} sur laquelle a lieu le dépassement est de 75 m environ. De plus, le temps de dépassement T_{dep} est de 46,4 s. Nous vérifions ensuite la répétabilité de nos résultats. Pour ce faire nous répétons 10 fois l’optimisation, pour une population initiale aléatoire différente pour chacun des 10 essais. Les trajectoires obtenues sont données sur la figure 4.9. Les valeurs des critères de similarité sont données dans le tableau 4.10.

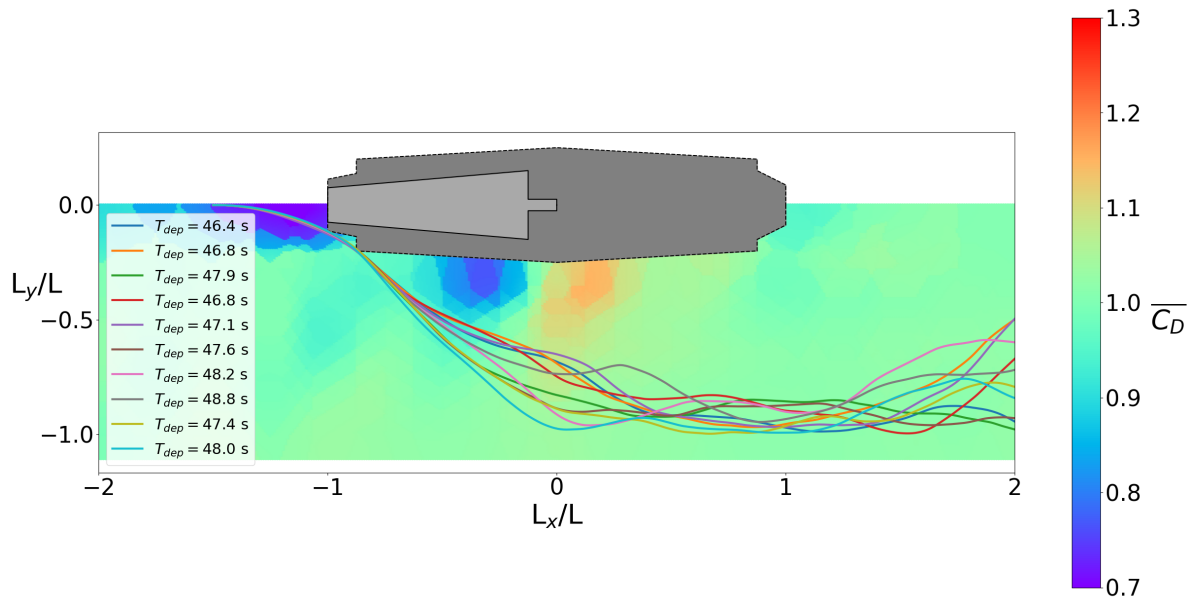


FIGURE 4.9 – Trajectoires obtenues lors de 10 répétitions de l’optimisation, pour le modèle de propulsion à force constante.

T_{dep} (s)	Écart relatif au meilleur temps (%)	D_f à la meilleure trajectoire
46,4	0,0	0,000
46,8	0,9	0,447
47,9	3,2	0,143
46,8	0,9	0,278
47,1	1,5	0,452
47,6	2,6	0,188
48,2	3,9	0,346
48,8	5,2	0,227
47,4	2,2	0,190
48,0	3,4	0,273

TABLE 4.10 – Critères de similarité à la meilleure trajectoire, pour l'étude de la répétabilité des résultats, pour le modèle de propulsion à force constante.

Ces résultats montrent que l'allure des trajectoires, en début de dépassement, sont similaires. En revanche, nous notons une dispersion des trajectoires à partir de l'abscisse $L_x/L = -0,5$, les rendant significativement différentes au vu du critère établi sur la distance de Fréchet à la meilleure trajectoire. En revanche, les différents temps de dépassements obtenus sont proches les uns des autres : le temps de dépassement moyen obtenu sur les 10 optimisations est égal à 47,5 s et l'écart relatif maximal au temps minimal est de 5,2%. La répétabilité des résultats du modèle à force de propulsion constante n'est donc pas satisfaisante, notamment sur l'allure générale des trajectoires.

4.4.2 Modèle de propulsion à puissance mécanique constante

Nous reprenons la même démarche pour le modèle de propulsion à puissance mécanique constante. Les paramètres utilisés sont regroupés dans le tableau 4.11. Ce sont les mêmes que pour l'étude à force de propulsion constante, à l'exception des paramètres de puissance.

Paramètres de l'algorithme	Valeurs
Nombre maximal de génération	2000
Nombre d'individus par génération	90
Nombre d'individus sélectionné par génération	20
Nombre de gènes par individu	1000
Probabilité de mutation d'un gène	0,01
Pas de temps Δt	0,1 s
Pas d'angle pas_α	0,0015 rad
Puissance mécanique du nageur 1	150 W
Puissance mécanique du nageur 2	100 W
Vitesse selon \vec{e}_x , à $t = 0$ du nageur 1	1,54 m/s
Vitesse selon \vec{e}_x , à $t = 0$ du nageur 2	1,35 m/s
Vitesse selon \vec{e}_y , à $t = 0$ du nageur 1	0 m/s
Position selon \vec{e}_x , à $t = 0$ du nageur 1	-3 m
Position selon \vec{e}_x , à $t = 0$ du nageur 2	0 m
Position selon \vec{e}_y , à $t = 0$ du nageur 1	0 m

TABLE 4.11 – Paramètres utilisés lors de l'optimisation avec le modèle de propulsion à puissance constante.

A la fin de l'optimisation, nous obtenons la trajectoire du nageur 1, dans le référentiel du nageur 2, visible sur la figure 4.10.

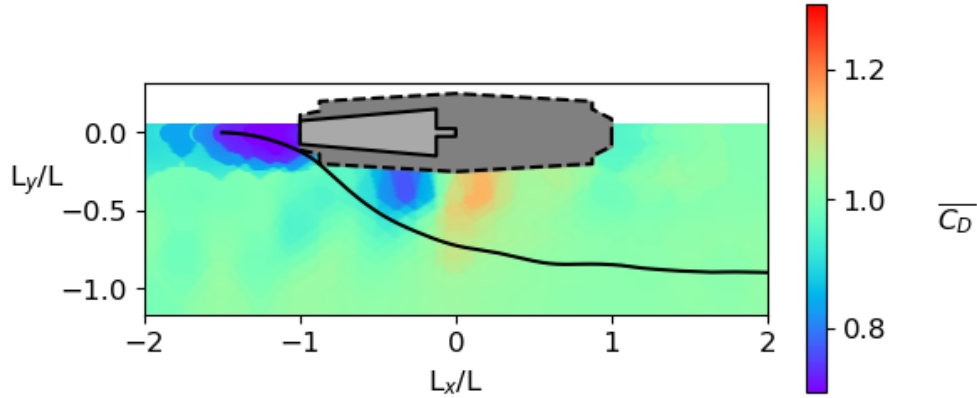


FIGURE 4.10 – Trajectoire optimale de dépassement obtenue, dans le référentiel du nageur doublé, pour le modèle de propulsion à puissance mécanique constante.

Ces résultats nous montrent, à l’image des résultats obtenus pour le modèle de propulsion à force constante, que le nageur qui double profite de la zone de réduction de traînée au niveau des pieds de son concurrent. Ensuite, il s’écarte de ce dernier en ne passant pas totalement dans la zone de réduction de traînée au niveau de la hanche de son voisin, dans le but d’éviter la zone de forte traînée lorsque les 2 nageurs sont côte à côte. La fin du dépassement se fait de manière quasiment rectiligne. Afin de confirmer cette analyse, nous traçons, sur la figure 4.11 l’évolution du coefficient de traînée normalisé des 2 nageurs au cours du dépassement, en fonction de la position du nageur qui double dans le référentiel du nageur doublé.

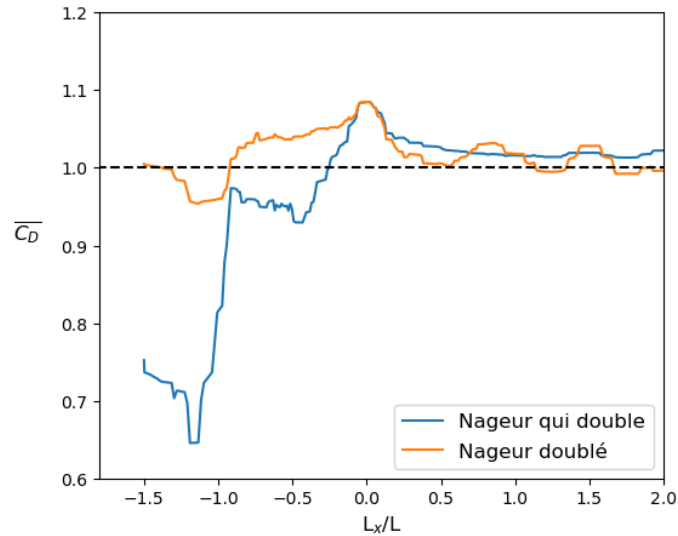


FIGURE 4.11 – Évolution du coefficient de traînée normalisé des 2 nageurs lors d’un dépassement optimal, pour le modèle de propulsion à puissance mécanique constante.

D’abord, pour le nageur qui double, nous observons sur la figure 4.11, que son coefficient de traînée normalisé est très faible en début de dépassement, ce qui est attendu d’après la carte des forces de traînée. En se rapprochant de son concurrent, il diminue encore légèrement avant de fortement augmenter à partir de $L_x/L = -1$, c’est à dire lorsqu’il commence à s’écarter de l’autre nageur et sortir de son sillage. Ensuite, son $\overline{C_D}$ diminue à nouveau légèrement, jusqu’à $L_x/L = -0,2$: il profite de la zone de réduction de traînée au niveau de la hanche de son concurrent. Ensuite, son coefficient de traînée normalisé connaît encore une forte augmentation aux alentours de $L_x/L = 0$: les 2 nageurs se retrouvent côte à côte. Enfin, pour la fin

du dépassement, le $\overline{C_D}$ du nageur qui double diminue pour quasiment atteindre 1, valeur attendue pour un nageur isolé. Pour le nageur doublé, en début de dépassement, son coefficient de traînée normalisé diminue : il bénéficie d'être suivi de près par un concurrent. Ce bénéfice est cependant de courte durée, son $\overline{C_D}$ augmente jusqu'à un maximum à $L_x/L = 0$ lorsque les 2 nageurs sont côte à côte. En fin de dépassement, nous observons des oscillations dans la valeur de son coefficient de traînée normalisé. Elles sont dues à la présence des vagues créées par le nageur qui double. Par ailleurs, nous visualisons les trajectoires des deux nageurs dans le référentiel global, sur la figure 4.12.

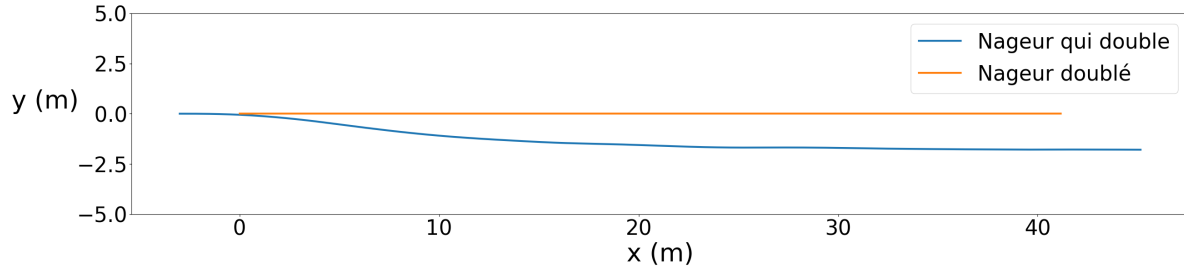


FIGURE 4.12 – Trajectoires des 2 nageurs dans le référentiel global lors d'un dépassement optimal, pour le modèle de propulsion à puissance mécanique constante.

Ces résultats montrent que le dépassement a lieu sur une distance, notée D_{dep} , de 48 mètres. Le temps de dépassement, noté T_{dep} est de 30,4 s. Afin d'évaluer l'effet de la différence de puissance entre les 2 nageurs sur ce temps de dépassement, sur la distance sur laquelle a lieu le dépassement mais aussi sur la trajectoire du nageur qui double, nous procédons à plusieurs optimisations en faisant varier la puissance du nageur doublé, entre 100 et 125 W, toutes les valeurs des autres paramètres étant égales à celles utilisées précédemment. Les trajectoires obtenues sont données sur la figure 4.13 et les temps et distances de dépassement sont accessibles dans le tableau 4.12.

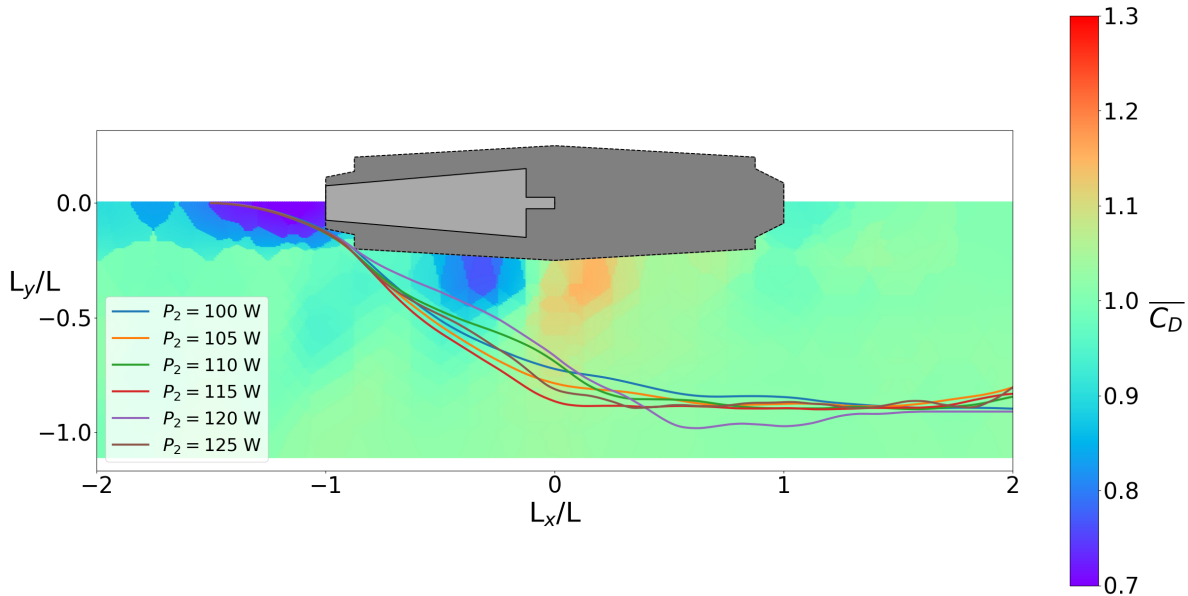


FIGURE 4.13 – Trajectoires du nageur qui double, dans le référentiel du nageur doublé, pour différentes valeurs de P_2 , pour le modèle de propulsion à puissance mécanique constante.

P_2 (W)	T_{dep} (s)	D_{dep} (m)
100	30,4	48,4
105	36,9	54,7
110	41,1	61,3
115	47,8	71,7
120	53,5	80,7
125	65,9	99,8

TABLE 4.12 – Paramètres utilisés lors de l’optimisation avec le modèle de propulsion à puissance constante.

La figure 4.13 nous montre, à l’exception de celle obtenue pour $P_2 = 120$ W, que les trajectoires optimales de dépassement sont très semblables, peu importe la différence de puissance entre les 2 nageurs. Ensuite, les résultats du tableau 4.12 montrent que plus la différence de puissance est faible, plus le temps de dépassement et la distance de dépassement sont longues. Lors d’une course réelle, en fin d’épreuve, les nageurs sont tous à effort quasi-maximal, les différences de puissances sont donc faibles (puisque les nageurs élités sont tous de niveau similaire). Il faudra donc ne pas entamer le dépassement trop tardivement, sous peine de ne pas le réussir avant la ligne d’arrivée. Par ailleurs, pour analyser la robustesse de notre algorithme et de notre modèle, nous réalisons cette même optimisation de trajectoire 10 fois, en partant à chaque fois d’une population aléatoire de trajectoires. Les résultats pour chacun de ces 10 essais sont présentés sur la figure 4.14 ainsi que dans le tableau 4.13.

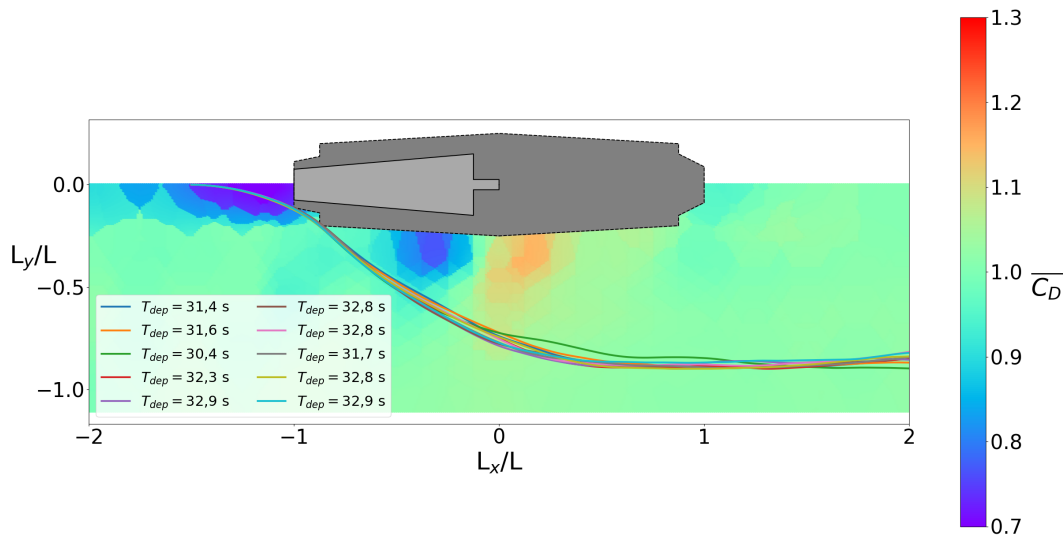


FIGURE 4.14 – Trajectoires obtenues lors de 10 répétitions de l’optimisation, pour le modèle de propulsion à puissance mécanique constante.

T_{dep} (s)	Écart relatif au meilleur temps (%)	D_f à la meilleure trajectoire
31,4	3,3	0,060
31,6	3,9	0,047
30,4	0,0	0,000
32,3	6,2	0,083
32,9	8,2	0,086
32,8	7,9	0,062
32,8	7,9	0,081
31,7	4,3	0,075
32,8	7,9	0,069
32,9	8,2	0,076

TABLE 4.13 – Critères de similarité à la meilleure trajectoire, pour l'étude de la répétabilité des résultats, pour le modèle de propulsion à puissance mécanique constante.

Ces résultats nous montrent que toutes les trajectoires obtenues sont très semblables. En effet, toutes les trajectoires ne sont pas significativement différentes de la meilleure, au sens du critère de la distance de Fréchet. La répétabilité des résultats est donc bien meilleure que pour le modèle de propulsion à force constante. De plus, le temps de dépassement moyen obtenu vaut 32,16 s et l'écart maximal relatif au meilleur temps est de 8,2%. Ensuite, nous comparons les trajectoires optimales obtenues pour les deux modèles de propulsion utilisés. Cette comparaison est donnée sur la figure 4.15.

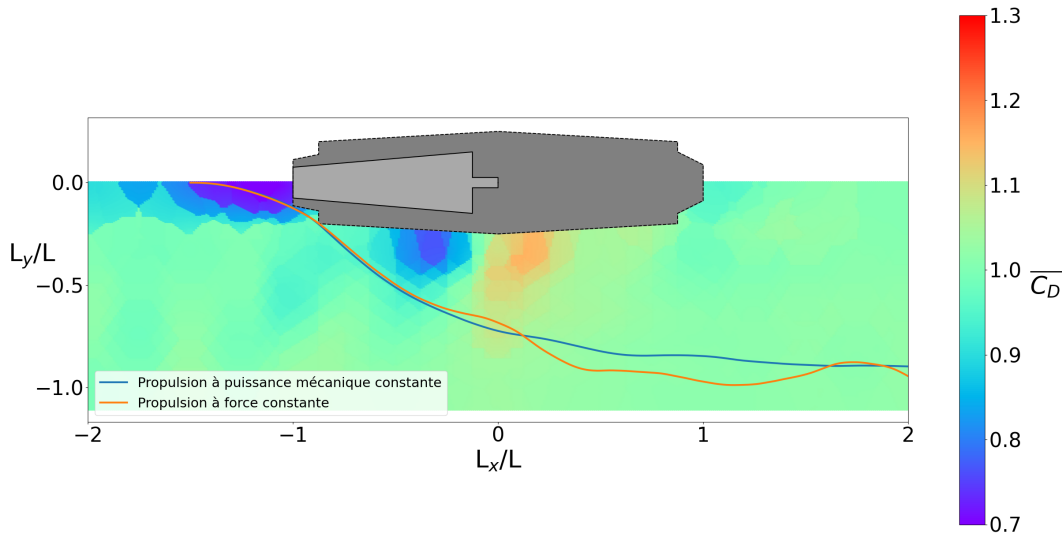


FIGURE 4.15 – Trajectoires optimales obtenues pour les 2 modèles de propulsion étudiés.

Ces résultats montrent que l'allure générale des trajectoires obtenues avec les 2 modèles assez similaire, bien que la distance de Fréchet qui les sépare est de 0,129 soit un peu plus que le critère que nous avons choisi. Cela est dû au fait que la trajectoire obtenue avec le modèle de propulsion à force constante est plus « bruitée ». Enfin, nous comparons la trajectoire optimale obtenue à une trajectoire observée lors de courses d'eau libre et habituellement suivie par les nageurs pour effectuer un dépassement. En la suivant, le nageur qui double ne s'écarte pas de son concurrent après être arrivé au niveau de sa hanche. Les 2 trajectoires sont données sur la figure 4.16.

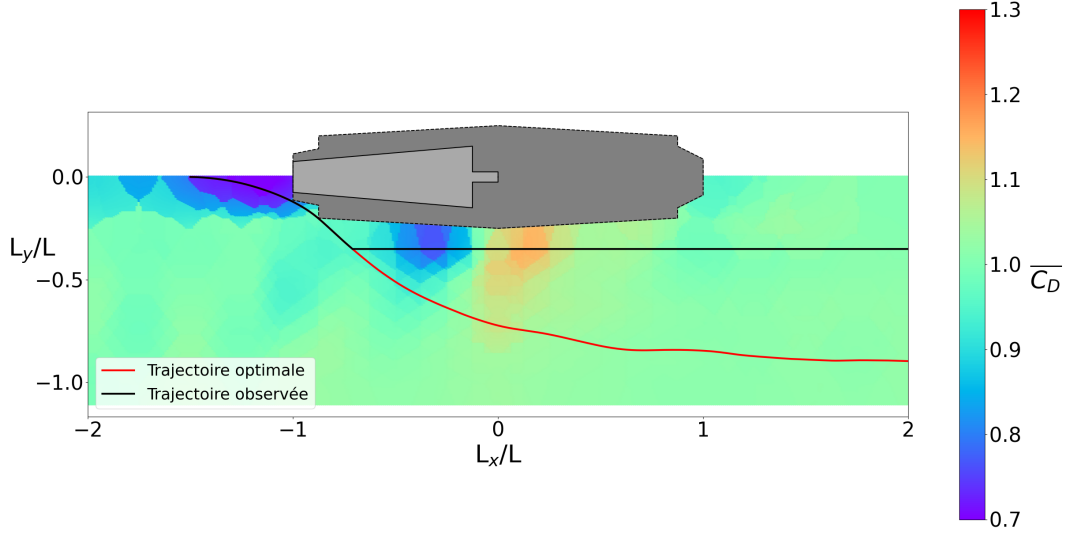


FIGURE 4.16 – Visualisation de la trajectoire réelle étudiée et de la trajectoire optimale de dépassement.

Pour des puissances mécaniques $P_1 = 150$ W et $P_2 = 100$ W, nous obtenons pour la trajectoire observée un temps de dépassement de 47,9 s contre 30,4 s pour la trajectoire optimale. Ce résultat montre l'importance de suivre cette dernière afin d'effectuer le dépassement le plus rapidement possible. Les distances de dépassement confirment cette observation : nous avons $D_{dep} = 73,7$ m pour la trajectoire réelle contre $D_{dep} = 48,4$ m pour la trajectoire optimale.

4.5 Etude du « burst » de puissance

Afin de se rapprocher d'une situation plus réaliste, nous autorisons une variation de la puissance mécanique du nageur qui double, appelée « burst » de puissance. Ce terme désigne une augmentation de la puissance de propulsion pendant une période de temps donnée. Elle s'écrit alors, pour le nageur qui double :

$$P_1(t) = P_1 \text{ si } t < t_{o,burst} \text{ ou } t > t_{o,burst} + T_{burst} \quad (4.16)$$

Et

$$P_1(t) = P_1 + P_{burst} \text{ si } t_{o,burst} < t < t_{o,burst} + T_{burst} \quad (4.17)$$

Où $t_{o,burst}$ est l'instant auquel le nageur commence à produire son effort supplémentaire, T_{burst} est la durée de cet effort et P_{burst} est la puissance supplémentaire produite par le nageur, supposée constante sur la durée T_{burst} . D'après les résultats obtenus à la section 4.3, la trajectoire optimale de dépassement est indépendante de la puissance de propulsion du nageur qui double. Nous travaillons donc ici à trajectoire fixée et nous cherchons à quelle position de la trajectoire le nageur doit déclencher son « burst » de puissance afin de minimiser le temps de dépassement. Pour ce faire, nous calculons le temps de dépassement obtenu pour différentes valeurs de $t_{o,burst}$. Nous avons dans cette section, $P_1 = 150$ W et $P_2 = 130$ W. La puissance supplémentaire P_{burst} est prise égale à $0,1P_1$ et la durée de l'effort supplémentaire T_{burst} est prise égale à 10 s. La figure 4.17 présente les résultats de cette étude.

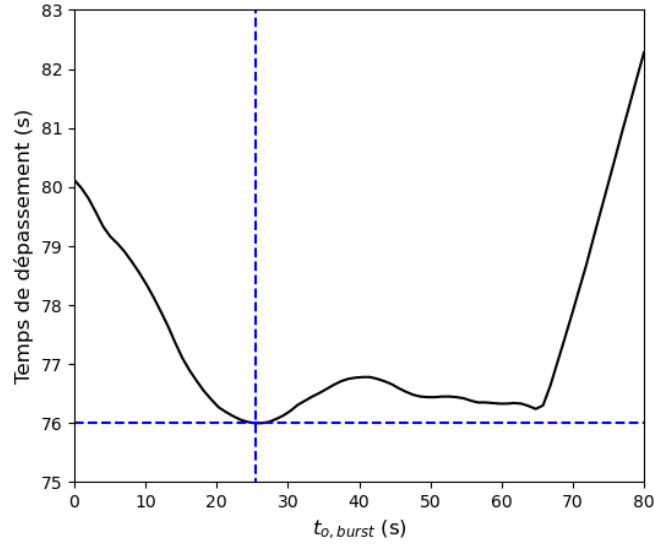


FIGURE 4.17 – Évolution du temps de dépassement en fonction de l’instant du début du burst de puissance.

Cette étude nous montre donc l’existence d’un instant idéal pour porter un effort supplémentaire lors d’un dépassement. Dans la configuration étudiée, le temps de dépassement optimal vaut 76 s et il est obtenu pour $t_{o,burst} = 25,5$ s. Par ailleurs, nous observons qu’il est moins grave de porter son effort supplémentaire un peu trop tard plutôt qu’un peu trop tôt. En effet, si l’instant choisi est avant la valeur optimale de $t_{o,burst}$, alors le temps de dépassement augmente jusqu’à 4 secondes supplémentaires par rapport au temps minimal de dépassement. En revanche, si l’effort est porté trop tard, le temps de dépassement évolue très peu. Cependant, cette notion d’instant idéal pour porter son effort est difficile à mettre en oeuvre pour les athlètes qui ont difficilement une idée précise de l’évolution du temps. C’est pourquoi, pour le temps de dépassement minimal, nous représentons sur la figure 4.18 l’endroit où l’effort supplémentaire a lieu sur la trajectoire de dépassement.

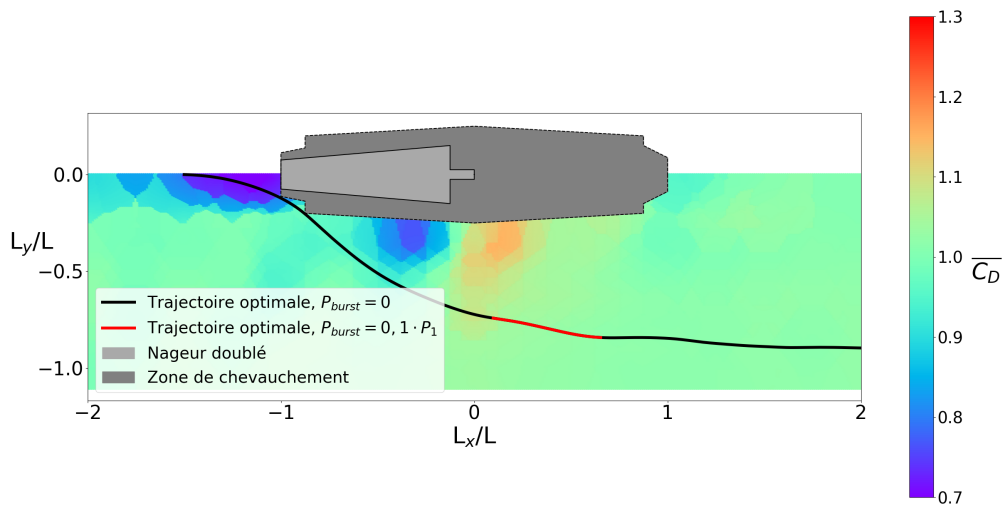


FIGURE 4.18 – Trajectoire optimale de dépassement et lieu de l’effort supplémentaire à fournir pour minimiser le temps de dépassement.

Nous observons ici que l’effort doit être porté lorsque la tête du nageur qui double vient de passer devant celle du nageur doublé, juste après que la force de traînée qu’ils subissent ait été maximale. Cela arrive donc relativement tard dans le processus de dépassement. Ceci peut être confirmé sur la figure 4.19 qui montre

l'évolution du coefficient de traînée normalisé tout au long du dépassement.

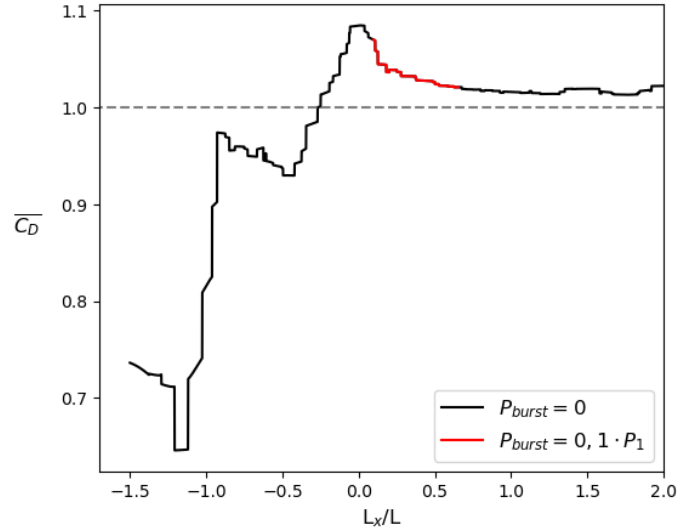


FIGURE 4.19 – Évolution du coefficient de traînée normalisé lors d'un dépassement et localisation idéale de l'effort supplémentaire fourni.

Ainsi, si un nageur est capable de porter un effort supplémentaire lors d'un dépassement, il sera optimal de le faire lorsqu'il se retrouvera à la même hauteur que son concurrent, afin de minimiser le temps de dépassement.

4.6 Discussion autour d'un modèle simplifié d'optimisation

L'idée de simplifier l'optimisation de la trajectoire de dépassement, vient de l'observation de l'évolution de l'angle de propulsion α du nageur qui double au cours du temps. Cette évolution est donnée sur la figure 4.20.

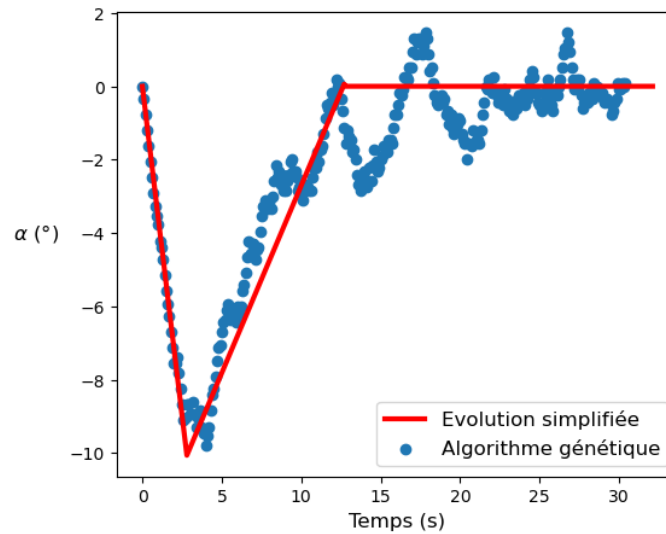


FIGURE 4.20 – Évolution de l'angle de propulsion α du nageur qui double lors d'un dépassement le long de la trajectoire optimale.

Sur cette figure, la courbe bleue représente l'évolution de α le long de la trajectoire optimale de dépassement obtenue pour le modèle de propulsion à puissance mécanique constante. Cette évolution est décrite par la valeur des gènes composant l'individu issu de l'algorithme génétique. Ils sont au nombre de 304 pour cet exemple précis. La courbe rouge est une représentation simplifiée de cette évolution : l'angle de propulsion décroît avec une dérivée constante, notée $\frac{d\alpha_1}{dt}$, jusqu'à atteindre un angle minimum, noté α_{min} . Ensuite, l'angle de propulsion croît avec une dérivée constante, notée $\frac{d\alpha_2}{dt}$, jusqu'à atteindre une valeur nulle. L'angle de propulsion est ensuite nul pour le reste du dépassement. Cette évolution est donc décrite uniquement par 3 paramètres, qui permettent, à partir des conditions initiales, de reconstruire la trajectoire du nageur qui double. Nous cherchons donc dans cette section, le jeu de paramètres $(\frac{d\alpha_1}{dt}, \alpha_{min}, \frac{d\alpha_2}{dt})$, qui permet de minimiser le temps de dépassement.

Afin de trouver le jeu de paramètres permettant de minimiser le temps de dépassement, nous codons un algorithme qui parcourt l'espace E défini par le produit des 3 intervalles discrétisés au sein desquels peuvent varier les 3 paramètres étudiés :

$$E = [\min(\frac{d\alpha_1}{dt}), \max(\frac{d\alpha_1}{dt})] \times [\min(\alpha_{min}), \max(\alpha_{min})] \times [\min(\frac{d\alpha_2}{dt}), \max(\frac{d\alpha_2}{dt})] \quad (4.18)$$

Le tableau 4.14 donne les valeurs des bornes de chaque intervalle.

Bornes	Valeur
$\min(\frac{d\alpha_1}{dt})$	-90 °/s
$\max(\frac{d\alpha_1}{dt})$	0 °/s
$\min(\alpha_{min})$	-90 °
$\max(\alpha_{min})$	0 °
$\min(\frac{d\alpha_2}{dt})$	0 °/s
$\max(\frac{d\alpha_2}{dt})$	90 °/s

TABLE 4.14 – Valeurs des bornes des 3 paramètres de l'optimisation simplifiée de la trajectoire de dépassement.

Par construction expliquée plus haut, $\frac{d\alpha_1}{dt}$ ne peut pas être positif, α_{min} non plus et $\frac{d\alpha_2}{dt}$ ne peut pas être négatif. Ceci explique la valeur nulle des bornes $\max(\frac{d\alpha_1}{dt})$, $\max(\alpha_{min})$ et $\min(\frac{d\alpha_2}{dt})$. Pour les valeurs des autres bornes, nous choisissons des valeurs bien au delà de ce qui a été observé dans les résultats de l'algorithme génétique, afin de s'assurer de parcourir un ensemble de trajectoires très différentes. La meilleure trajectoire obtenue avec ce modèle simple est donnée sur la figure 4.21.

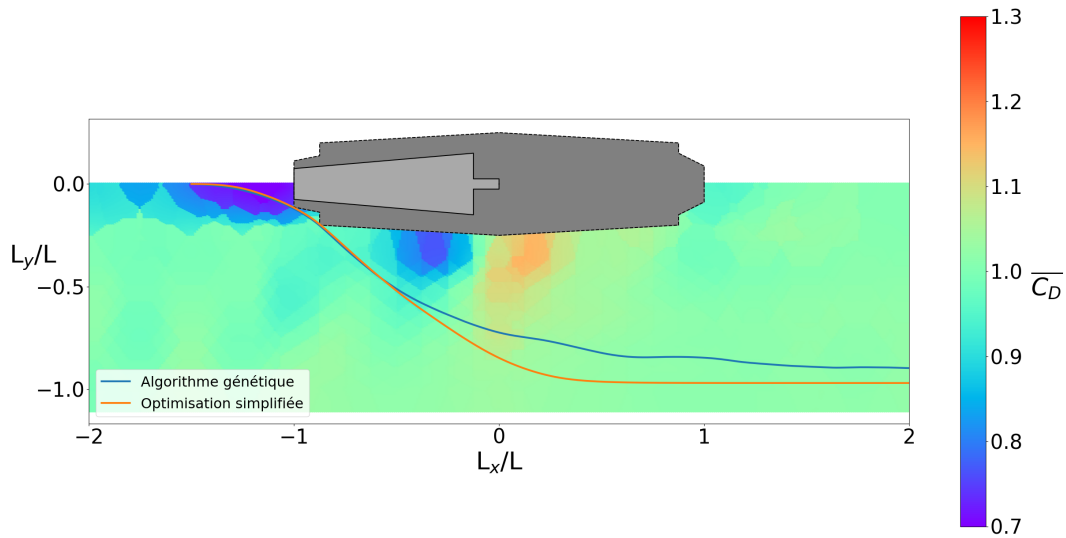


FIGURE 4.21 – Comparaison des meilleures trajectoires obtenues par l’algorithme génétique et l’optimisation simplifiée.

Le temps de dépassement obtenu avec l’optimisation simplifiée est de 32,2 s soit 5,9% de plus que pour la meilleure trajectoire obtenue avec l’algorithme génétique. Cependant, le temps de dépassement moyen obtenu pour 10 répétitions de l’algorithme génétique était de 32,16 s. L’optimisation simplifiée permet donc d’avoir une bonne idée du temps de dépassement optimal. Concernant la similarité des trajectoires, la distance de Fréchet qui les sépare est de 0,164. Elles sont donc significativement différentes. L’optimisation simplifiée ne permet donc pas de retrouver complètement les résultats obtenus avec l’algorithme génétique. Afin d’expliquer cette différence, nous comparons l’évolution de l’angle de propulsion du nageur qui double α le long des 2 trajectoires de la figure 4.21. Cette comparaison est donnée sur la figure 4.22.

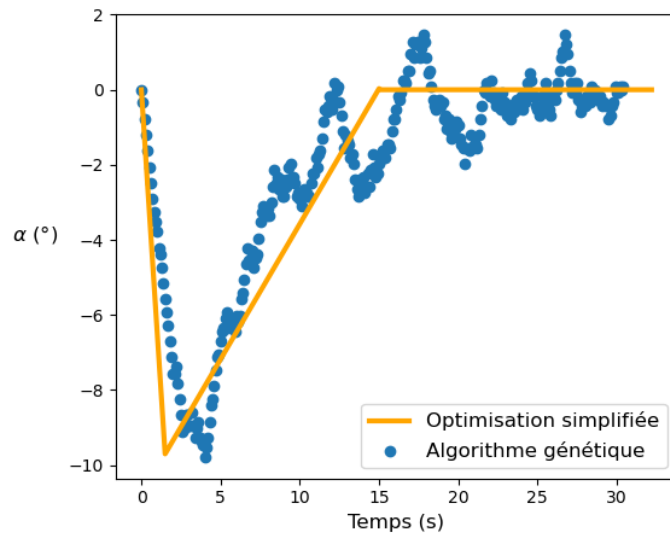


FIGURE 4.22 – Comparaison de l’évolution de l’angle de propulsion du nageur qui double le long des meilleures trajectoires obtenues par l’algorithme génétique et l’optimisation simplifiée.

Nous observons sur cette figure, que le long de la trajectoire obtenue via l’optimisation simplifiée, le nageur fait décroître plus rapidement son angle de propulsion. La valeur minimale de α est équivalente pour les 2 trajectoires. Ensuite, l’angle de propulsion croît plus vite le long de la trajectoire obtenue par l’algorithme

génétique. Ces différences dans la variation de l'angle de propulsion expliquent que les 2 trajectoires obtenues soient significativement différentes. Alors, nous cherchons « à la main » à créer une trajectoire dont l'évolution de l'angle de propulsion en fonction du temps collerait mieux avec les résultats de l'algorithme génétique. Cette évolution est donnée sur la figure 4.23 et la trajectoire correspondante sur la figure 4.24.

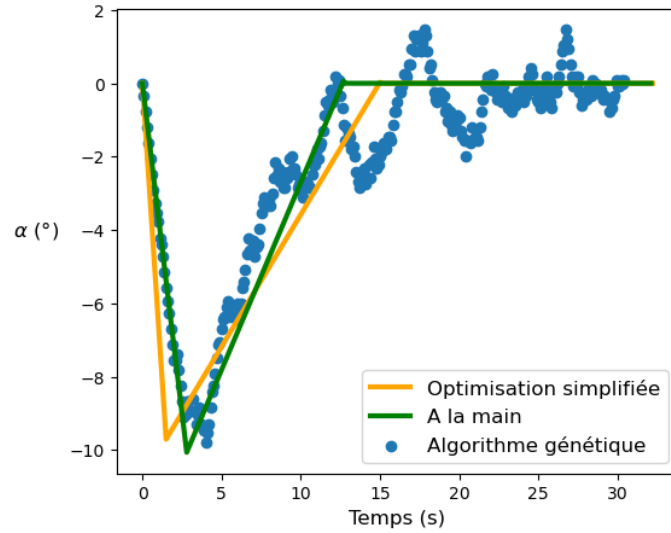


FIGURE 4.23 – Comparaison de l'évolution de l'angle de propulsion du nageur qui double le long des meilleures trajectoires obtenues par l'algorithme génétique et l'optimisation simplifiée et d'une trajectoire créée à la main.

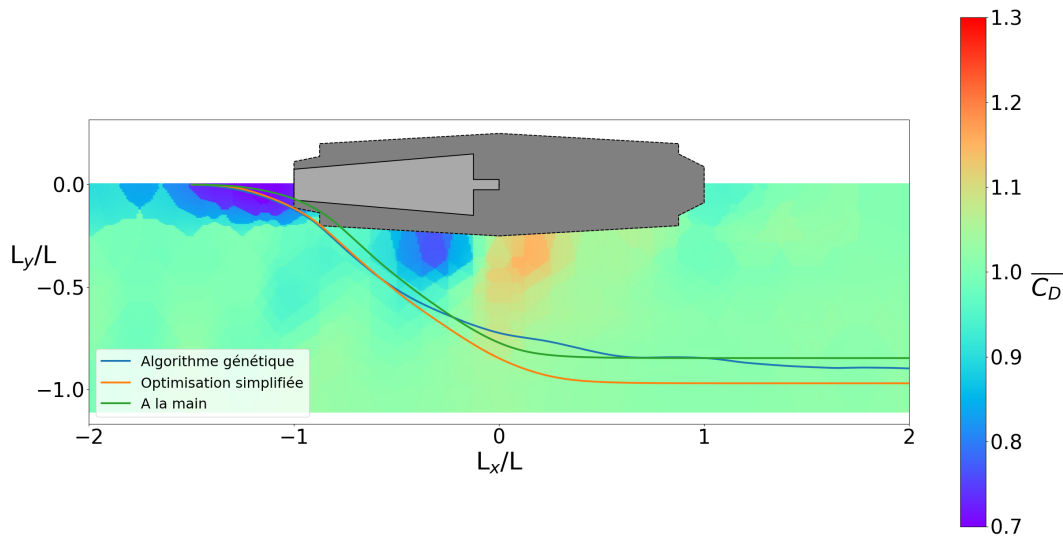


FIGURE 4.24 – Comparaison des meilleures trajectoires obtenues par l'algorithme génétique et l'optimisation simplifiée et d'une trajectoire créée à la main.

Ainsi, la trajectoire créée en faisant coller autant que faire se peut l'évolution de l'angle de propulsion à celle de la trajectoire obtenue par l'algorithme génétique n'est pas significativement différente de la trajectoire de l'algorithme génétique, puisque la distance de Fréchet qui les sépare est de 0,067. Cependant, elle n'est pas réaliste car les 2 nageurs se chevauchent pour une abscisse L_x/L environ égale à -0,8. Cela est dû au fait que l'angle de propulsion du nageur ne décroît pas assez vite avec L_x/L , comme le montre la figure 4.25.

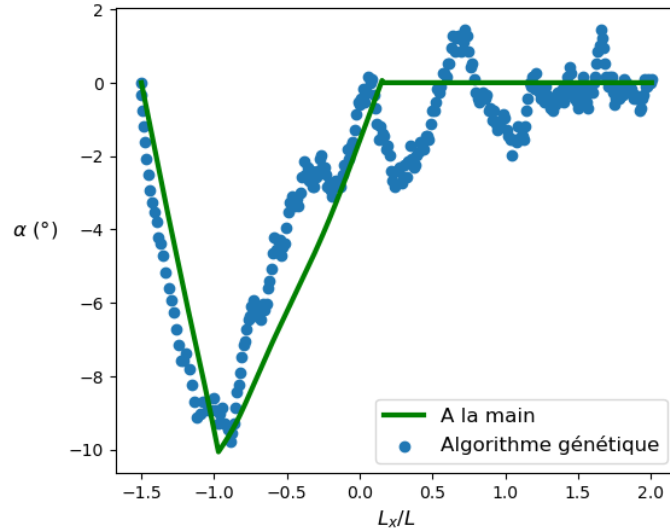


FIGURE 4.25 – Évolution de l’angle de propulsion du nageur qui double en fonction de L_x/L

Enfin, nous représentons sur la figure 4.26, l’ensemble des trajectoires qui permettent un dépassement en un temps supérieur de moins de 0,5 seconde au meilleur temps obtenu par l’optimisation simplifiée.

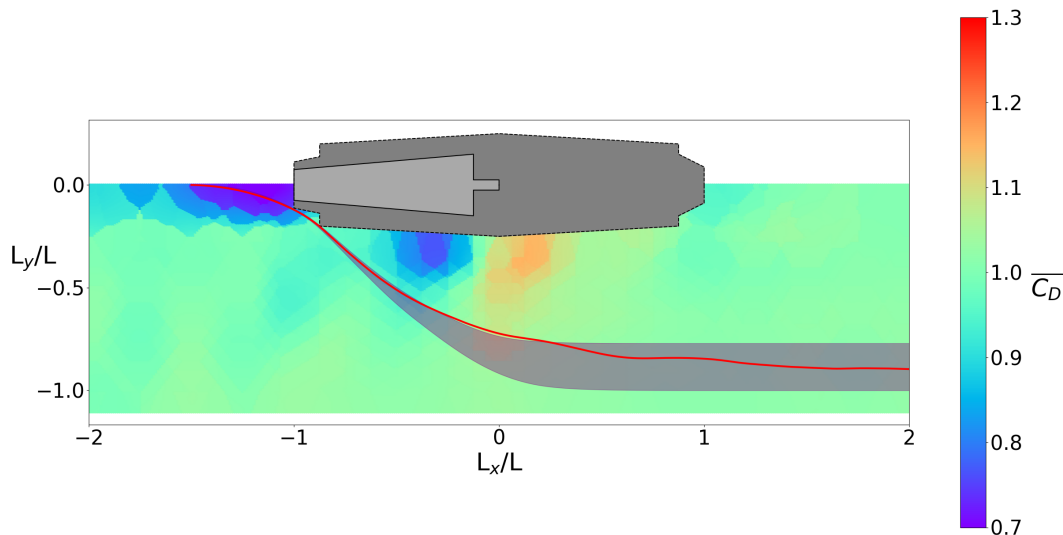


FIGURE 4.26 – Tracé de l’enveloppe de l’ensemble des trajectoires obtenues avec l’optimisation simplifiée, dont le temps de dépassement n’excède pas 0,5 s de plus que le meilleur temps de dépassement obtenu avec cette même optimisation.

Cette figure montre que les trajectoires les plus rapides sont toutes identiques en début de dépassement. Une différence apparaît ensuite selon la manière dont le nageur se redresse. Par ailleurs, la courbe rouge représente la meilleure trajectoire obtenue par l’algorithme génétique. Elle est presque totalement contenue dans l’enveloppe obtenue avec l’optimisation simplifiée.

Nous concluons donc que le modèle d’optimisation simplifiée donne une bonne approximation de la trajectoire optimale de dépassement, sans pour autant retrouver exactement les mêmes résultats que ceux de l’algorithme génétique. Cependant, il a l’avantage d’avoir grandement réduit le nombre de paramètre à optimiser. Cela permet aussi de donner des consignes plus facilement applicables par les nageurs du fait de la

simplicité de la description de la trajectoire et de l'évolution de l'angle de propulsion au cours du temps. Dans le futur, ce modèle simple pourra être enrichi par d'autres paramètres afin de reproduire plus fidèlement les résultats de l'algorithme génétique si le besoin s'en ressent.

Conclusion du chapitre 4

Dans ce chapitre, nous avons mis en place un modèle permettant de modéliser une situation d'un dépassement d'un nageur par un autre. Afin de trouver la trajectoire optimale de dépassement, nous avons utilisé un algorithme génétique. Les résultats obtenus ont montré que la trajectoire optimale de dépassement consiste à se rapprocher des pieds du concurrent en profitant d'une réduction de traînée dans cette situation. Puis, il faut ensuite s'écarter du nageur afin d'éviter les configurations où la force de traînée augmente fortement. L'allure de la trajectoire optimale de dépassement est la même pour les deux modèles de propulsion étudiés. De plus, lorsque les nageurs sont de niveau très proche, le dépassement se déroule sur une centaine de seconde et plusieurs dizaines de mètres. Il faut donc, notamment lors du sprint final, ne pas tarder à commencer le dépassement sous peine de ne pas le compléter avant la ligne d'arrivée. Par ailleurs, nous avons étudié le moment idéal, le long de la trajectoire optimale, pour porter un effort supplémentaire. Celui-ci se révèle être le moment où la tête du nageur qui double passe devant celle du nageur doublé. Enfin, nous avons tenté de créer un modèle permettant de décrire les trajectoires de dépassement avec uniquement 3 paramètres. Ce modèle donne des résultats proches de ceux obtenus par l'algorithme génétique mais peut encore être perfectionné.

5 Chapitre 5 : Optimisation spécifique à la course des Jeux Olympiques de Paris dans la Seine

Lors des précédents Jeux Olympiques, l'épreuve de natation en eau libre s'est successivement déroulée sur un plan d'eau artificiel au parc aquatique de Shunyi, à Pékin en 2008, dans le lac Serpentine de Hyde Park à Londres en 2012, dans la baie de Rio en 2016 et au Odaiba Marine Park, dans la baie de Tokyo, en 2021. A Paris, en 2024, l'épreuve se déroule dans la Seine. L'épreuve se démarque donc des olympiades précédentes puisque les nageurs auront à faire face à des courants importants. Des discussions avec les conseillers scientifiques et les entraîneurs des fédérations françaises de natation et de triathlon nous ont amené à nous poser deux grandes questions : Existe-t-il une trajectoire, sur le parcours de course, permettant de profiter un maximum des courants et de minimiser le temps de course d'un nageur ? Comment un nageur doit-il gérer sa dépense énergétique pour minimiser son temps de course ? Nous tâcherons d'apporter des réponses dans ce chapitre.

L'épreuve de natation en eau libre consiste en 6 tours d'une longueur de 1667 m chacun, tandis que le parcours de la partie nagée du triathlon est constitué de 2 boucles parcourues successivement : l'une de 910 m et l'autre de 590 m. Pour les 2 épreuves, les nageurs prennent le départ depuis un ponton flottant situé au niveau du pont Alexandre III. Ils sont alors poussés par un courant favorable. Ils font ensuite demi-tour en tournant autour des bouées qui délimitent le parcours, puis remontent le courant jusqu'au ponton. la figure 5.1 donne une vue des différents parcours.

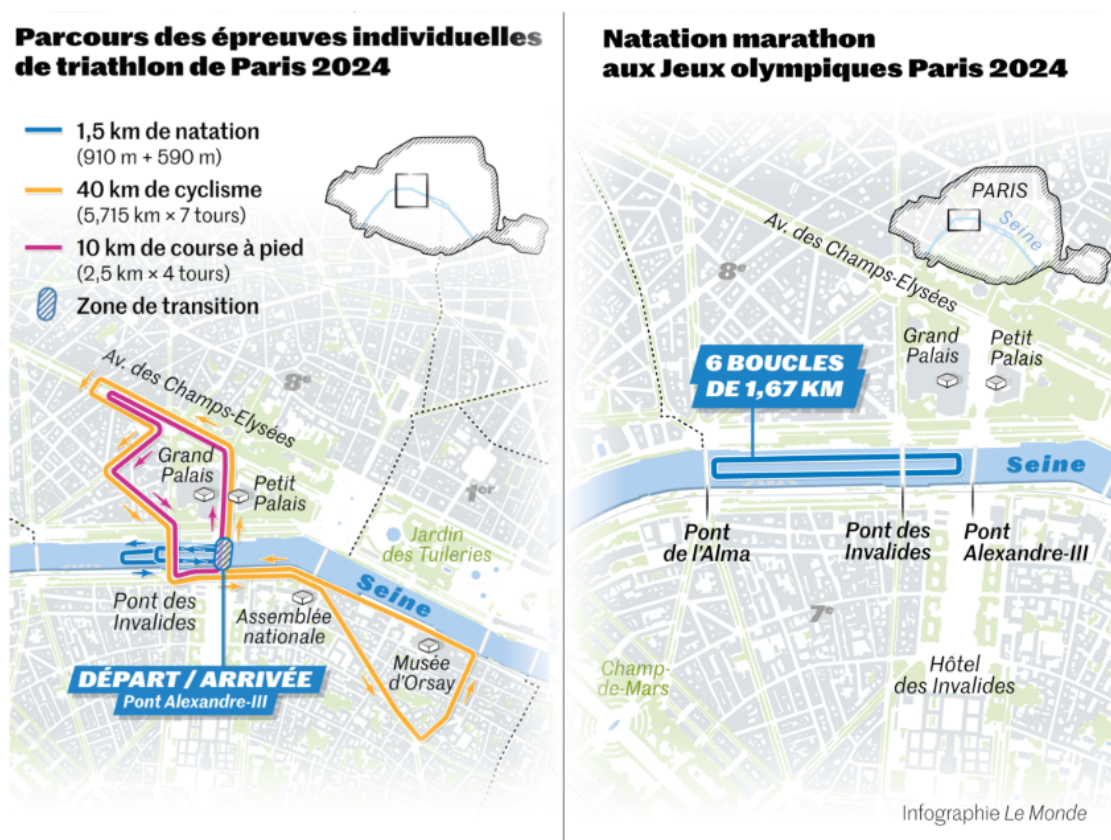


FIGURE 5.1 – Parcours des épreuves de triathlon et de natation marathon des Jeux Olympiques de Paris 2024. [45]

5.1 Optimisation de la trajectoire de course

5.1.1 Modélisation de la situation étudiée : courants dans la Seine, modèle physique et méthodes.

Afin de pouvoir répondre aux questions posées, il faut d'abord connaître les courants dans la Seine. Ce travail a été réalisé par Minh Le, ingénieur de recherche au Laboratoire d'Hydraulique Saint-Venant. Pour cela, une simulation numérique de l'écoulement de la Seine a été effectuée en utilisant le logiciel Télémac [46]. Les résultats ont ensuite été comparés à des mesures de terrain réalisées par EDF. De ces simulations, nous tirons la valeur du courant moyen dans la zone de course. Utiliser le courant moyen est suffisant dans notre étude puisque la période de détachement des tourbillons dans le sillage des piles de pont est grande devant la durée de déplacement des nageurs dans cette zone. Pour justifier cette affirmation, nous étudions le nombre de Strouhal de l'écoulement au niveau des piles de pont, noté St . Nous avons :

$$St = \frac{fD}{V} \quad (5.1)$$

où f est la fréquence de détachement des tourbillons, D est la longueur caractéristique des piles de pont et V la vitesse de l'écoulement. De plus, le nombre de Reynolds de l'écoulement est défini par :

$$Re = \frac{VD}{\nu} \quad (5.2)$$

où ν est la viscosité cinématique de l'eau, prise ici égale à $\nu = 1 \times 10^{-6}$. De plus, nous avons $D \approx 30$ m et la vitesse moyenne observée en surface est $V = 0,5$ m/s. Alors nous avons : $Re = 1,5 \times 10^7$. Pour un nombre de Reynolds aussi grand, la valeur typique du nombre de Strouhal d'un objet cylindrique est $St = 0,2$. Alors nous obtenons la fréquence de détachement des tourbillons au niveau de la pile de pont comme étant égale à $f = 0,0067$ Hz, soit une période de détachement $T = 300$ s, ce qui est une durée bien plus grande que le temps passé par les nageurs dans les zones de détachements tourbillonnaires. Ensuite, nous récupérons des simulations uniquement le courant de surface. Cette démarche nous permet alors d'obtenir des cartes de courants de la Seine, dans la zone de course, pour des débits allant de 70 à 300 m³/s qui sont les bornes minimales et maximales des débits réels observés dans la Seine au mois d'Août (date des Jeux Olympiques) sur les 20 dernières années. Un exemple d'une carte de courants est donné sur la figure 5.2. Sur cette carte, les zones colorées en noir représentent les piliers du pont des Invalides. La couleur de chaque point représente la vitesse du courant par rapport à la berge. Cette vitesse est notée $V_{courant}$. L'eau s'écoule de la droite vers la gauche de la figure. Nous observons que le courant dans la zone de course est loin d'être uniforme : des sillages se forment derrière les piliers de pont. A 60 mètres derrière la pile Sud, la vitesse de l'écoulement est de l'ordre de 0,14 m/s selon l'axe x . De plus, la vitesse du courant est aussi assez faible le long des berges, ce qui est attendu. A l'abscisse $x = 500$ m, au niveau de la berge Sud, elle vaut environ 0,24 m/s pour le débit présenté sur la figure 5.2. Enfin, les vitesses les plus grandes apparaissent au centre des arches du pont : la vitesse maximale observée vaut 0,92 m/s.

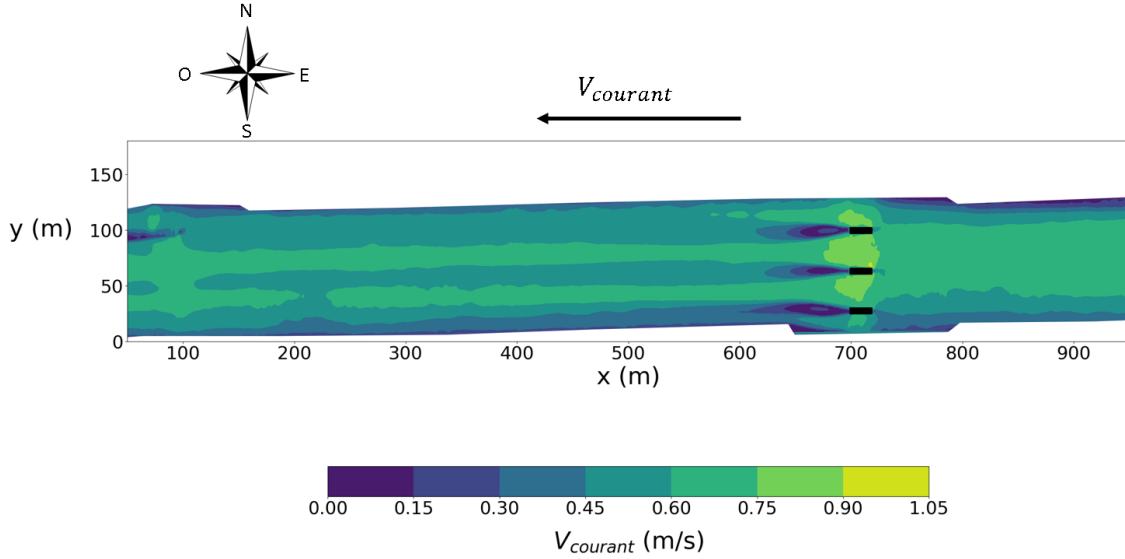


FIGURE 5.2 – Carte de courant obtenue par simulation numérique, pour un débit de $270 \text{ m}^3/\text{s}$.

Nous considérons dans cette section un nageur isolé : il n’y aura pas d’effet de drafting. Nous considérons de plus qu’il produit son effort avec la même intention qu’il soit poussé ou freiné par le courant. Par conséquent, nous considérons que la vitesse du nageur par rapport à l’eau est constante. Elle est notée $\vec{V}_{n/eau}$. La vitesse du nageur par rapport à la berge est notée $\vec{V}_{n/b}$ et nous avons l’égalité suivante :

$$\vec{V}_{n/b} = \vec{V}_{n/eau} + \vec{V}_{courant} \quad (5.3)$$

Les positions successives du nageur dans le référentiel (x,y) sont obtenues en intégrant la vitesse du nageur par rapport à la berge. Ensuite, nous ajoutons à notre modèle la barge Nikki Saint-Phalle et les bateaux qui resteront amarrés au quai pendant les épreuves. Il est à noter que ces éléments ne sont pas pris en compte dans les simulations numériques permettant d’obtenir les cartes de courants mais qu’ils sont considérés lors de l’optimisation de trajectoire comme des zones interdites aux nageurs. Ces obstacles sont visibles sur la figure 5.3.



FIGURE 5.3 – Visualisation, à l’aide de Google Maps, de la barge Nikki Saint-Phalle (en rouge), des bateaux amarrés (en jaune) ainsi que la position des bouées du parcours de natation.

Nous rajoutons également le ponton flottant à notre modèle. La superposition d’une carte des courants avec ces différents éléments est donnée sur la figure 5.4.

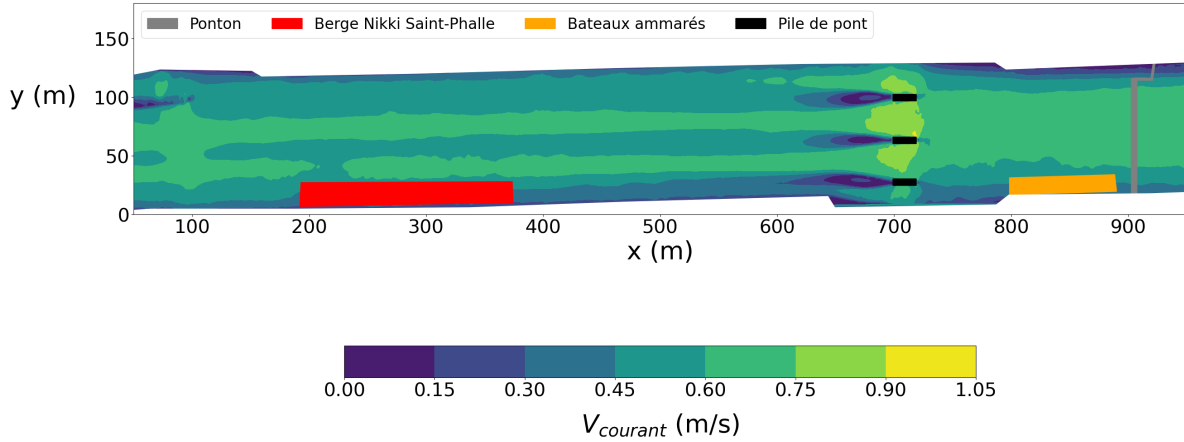


FIGURE 5.4 – Visualisation de la modélisation des différents éléments présents sur le parcours, par rapport à la carte des courants.

Le but de notre travail est de trouver la trajectoire, pour le parcours de natation et celui de triathlon, qui minimise le temps de course. Pour cela nous utilisons le logiciel d'optimisation Bocop [47] et le package BocopHJB. Ce package implémente une méthode d'optimisation globale. Il résout l'équation d'Hamilton-Jacobi-Bellman vérifiée par la fonction à minimiser (dans notre cas, le temps de parcours). Puis l'optimum est calculé à partir des conditions initiales du problème. Les détails de cet algorithme sont donnés dans la documentation utilisateur de Bocop [47].

5.1.2 Résultats pour le parcours de natation

Afin de trouver la trajectoire optimale sur le parcours de natation, nous découpons le parcours en différents segments. Chaque segment relie des points qui définissent le parcours : la zone de départ, les bouées et la zone d'arrivée. Nous optimisons la trajectoire sur chacun de ces segments de manière indépendante. La convention de numérotation des bouées ainsi que la position de la ligne d'arrivée (ligne bleue) sont données sur la figure 5.5.

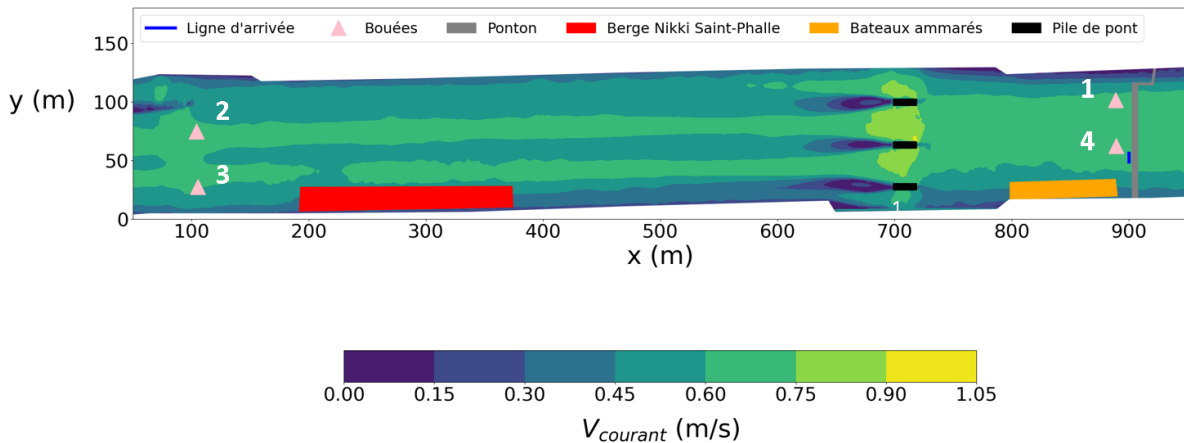


FIGURE 5.5 – Convention de numérotation des bouées et position de la ligne d'arrivée sur le parcours de natation.

Segment 1 : De la première bouée après le ponton à la seconde bouée.

Nous définissons le premier segment par le trajet entre la bouée qui se situe juste après le ponton de départ et la seconde bouée du parcours, qui définit le début du demi-tour. La trajectoire « à vol d'oiseau » sur

ce segment est donnée par la courbe noire sur la figure 5.6. Nous donnons également sur cette figure la trajectoire optimale obtenue pour un débit de la Seine, noté Q , de $180 \text{ m}^3/\text{s}$.

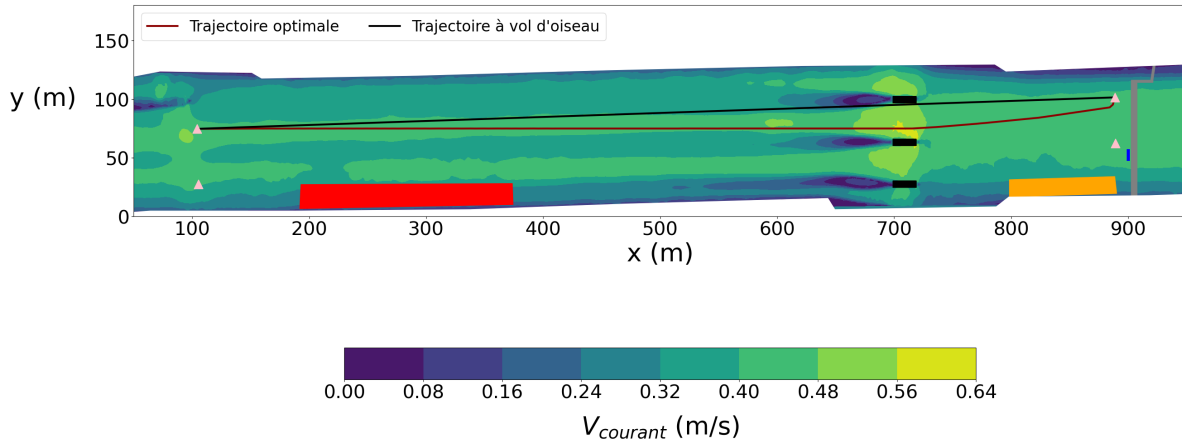


FIGURE 5.6 – Visualisation de la trajectoire « à vol d'oiseau » et de la trajectoire optimale obtenue pour un débit de la Seine de $180 \text{ m}^3/\text{s}$.

Le temps de parcours le long de la trajectoire optimale, noté T_{opti} est de $388,7\text{s}$, pour une distance parcourue de $791,3 \text{ m}$, tandis que celui le long de la trajectoire à vol d'oiseau, noté T_{oiseau} , est de $394,2 \text{ s}$, pour une distance parcourue de $785,1 \text{ m}$. Nous observons de plus que l'allure de la trajectoire optimale, qui minimise le temps de parcours, est différente de la trajectoire à vol d'oiseau : elle semble aller chercher une zone de plus fort courant favorable. Afin de vérifier cette observation, nous traçons sur la figure 5.7 la vitesse du courant rencontré par le nageur sur les 2 trajectoires en fonction de son abscisse x .

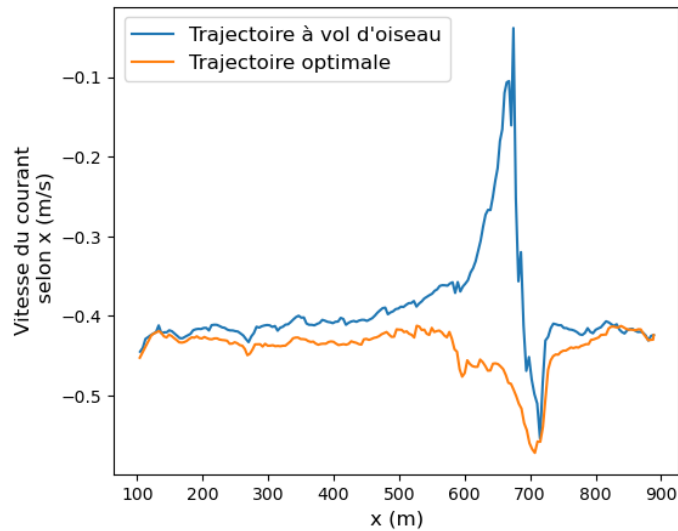


FIGURE 5.7 – Vitesse du courant rencontré par le nageur le long de la trajectoire « à vol d'oiseau » et de la trajectoire optimale, pour un débit de la Seine de $180 \text{ m}^3/\text{s}$, sur le segment 1.

Nous observons ici que le long de la trajectoire optimale, le nageur rencontre toujours un courant plus favorable que le long de la trajectoire à vol d'oiseau. Ceci explique qu'elle soit plus rapide bien que plus longue en distance. Ensuite, nous cherchons à comprendre l'influence du débit sur l'allure de la trajectoire optimale. Nous comparons donc, sur la figure 5.8, les trajectoires optimales obtenues pour différents débits.

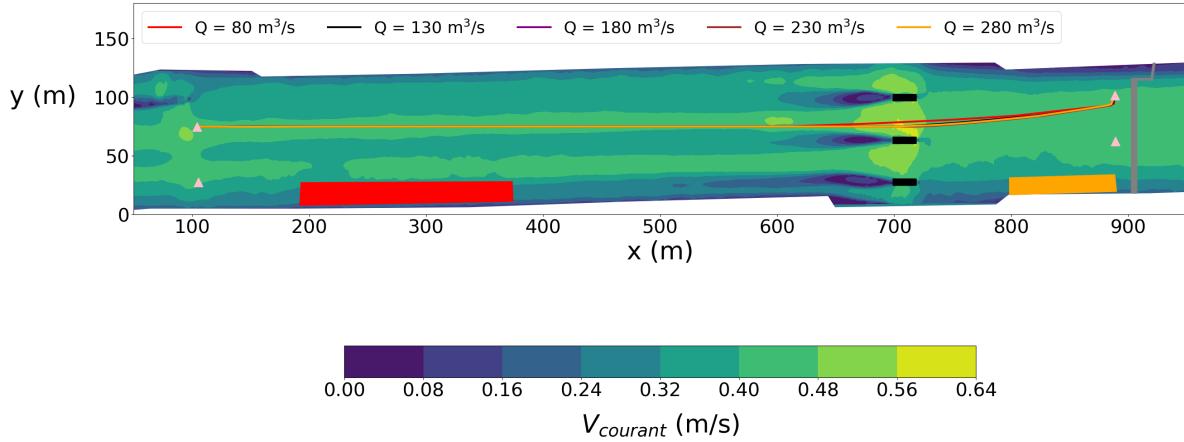


FIGURE 5.8 – Comparaison des trajectoires optimales obtenues pour différents débits de la Seine. La carte des courants correspond à un débit $Q = 180 \text{ m}^3/\text{s}$.

Nous notons ici que la trajectoire optimale sur le segment 1 est identique quel que soit le débit dans la Seine. La figure 5.9 donne l'ensemble des résultats obtenus pour chacun des débits étudiés. Ils montrent que plus le débit est important, plus le temps de trajet sur le segment 1 sera réduit. Cela était attendu car plus le débit est grand plus les nageurs rencontreront un courant favorable. De plus, le gain de temps est lui aussi plus important lorsque le débit est plus grand. La valeur du gain de temps peut paraître faible en comparaison du temps de parcours total, puisqu'il ne dépasse pas la quinzaine de secondes pour les plus forts débits, mais il est significatif en comparaison des écarts observés pour le podium de la plupart des précédentes olympiades, d'après les chiffres donnés en introduction.

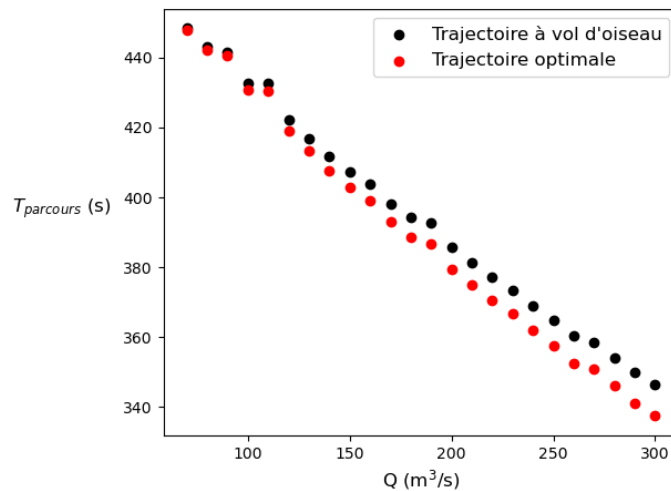


FIGURE 5.9 – Temps de parcours obtenus pour la trajectoire optimale et à la trajectoire à vol d'oiseau, pour l'ensemble des débits étudiés.

Segment 2 : De la seconde bouée à la troisième bouée.

Le segment 2 est défini comme le trajet entre les 2 bouées qui permettent aux nageurs de réaliser le demi-tour en milieu du circuit, numérotées 2 et 3 sur la figure 5.5. Il est perpendiculaire à la direction principale du courant. Sur ce segment, l'optimisation réalisée sous Bocop donne la trajectoire optimale comme étant la trajectoire à vol d'oiseau. Afin de suivre cet optimum, et donc de nager en ligne droite sur ce segment, les athlètes doivent se propulser en biais, dans le but d'éviter d'être déportés par le courant qui les pousse perpendiculairement à leur objectif. Cela est illustré par la figure 5.10.

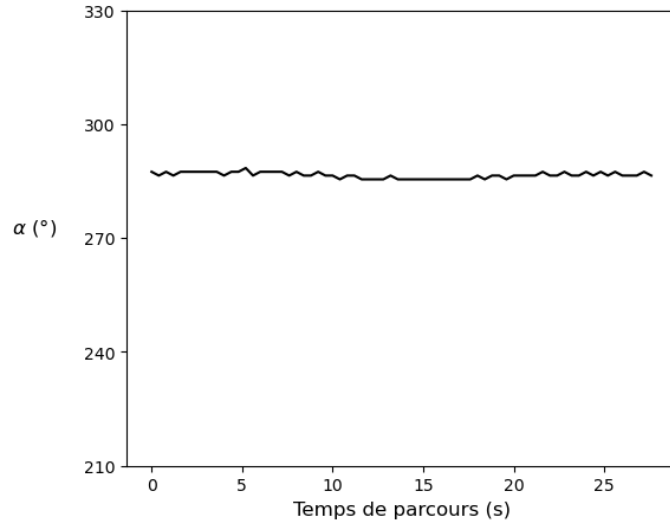


FIGURE 5.10 – Angle de propulsion du nageur le long du segment 2, pour un débit de $180 \text{ m}^3/\text{s}$.

Pour le débit étudié, l'angle de propulsion est quasiment constant sur le segment 2. Il vaut ici environ 285° par rapport à l'axe des abscisses x . S'il n'y avait pas de courant, afin de nager en ligne droite, les nageurs devraient se propulser avec un angle de 270° . Le courant les oblige donc bien à se propulser en biais, sur leur gauche, afin de nager en ligne droite sur le segment 2.

Segment 3 : De la troisième bouée à l'arrivée.

Nous définissons le segment 3 comme le trajet commençant à la troisième bouée et se terminant soit au niveau de la ligne d'arrivée soit à la quatrième bouée. La trajectoire « à vol d'oiseau » sur ce segment est donnée par la courbe noire sur la figure 5.11. Nous donnons également sur cette figure les 2 trajectoires optimales obtenues, pour les 2 variantes du segment 3, pour un débit de la Seine, noté Q , de $180 \text{ m}^3/\text{s}$.

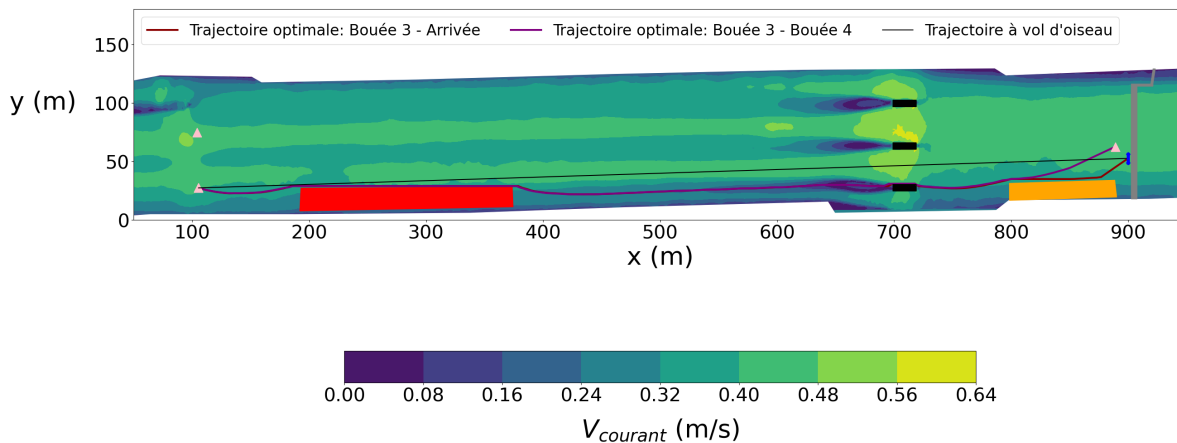


FIGURE 5.11 – Visualisation de la trajectoire « à vol d'oiseau » et de la trajectoire optimale obtenue pour un débit de la Seine de $180 \text{ m}^3/\text{s}$, sur le segment 3.

Nous notons ici que les trajectoires sur les 2 variantes du segment 3 sont identiques jusqu'à une abscisse x d'environ 820 m, avant de séparer en fin de parcours du fait que le point d'arrivée n'est pas le même. De par cette forte similarité entre les 2 variantes, nous ne présentons les résultats que pour la trajectoire reliant la troisième bouée à l'arrivée. Le temps de parcours le long de la trajectoire optimale se terminant à la ligne d'arrivée est de 618,7 s et la distance parcourue est de 805,6 m. Le long de la trajectoire à vol d'oiseau, le

temps de parcours est de 674,3 s et la distance parcourue vaut 794,9 m. L'idée générale des 2 trajectoires est de se coller au plus près de la barge Nikki Saint-Phalle, puis de se placer dans le sillage de la pile de pont la plus au Sud, afin de rencontrer le courant le plus faible possible. Après le pont, il faut longer les bateaux amarrés avant de bifurquer vers la ligne d'arrivée ou la quatrième bouée. Afin de confirmer cette analyse, nous traçons sur la figure 5.12 la vitesse du courant rencontré par le nageur sur la trajectoire à vol d'oiseau et la trajectoire optimale pour rejoindre la ligne d'arrivée, en fonction de son abscisse x .

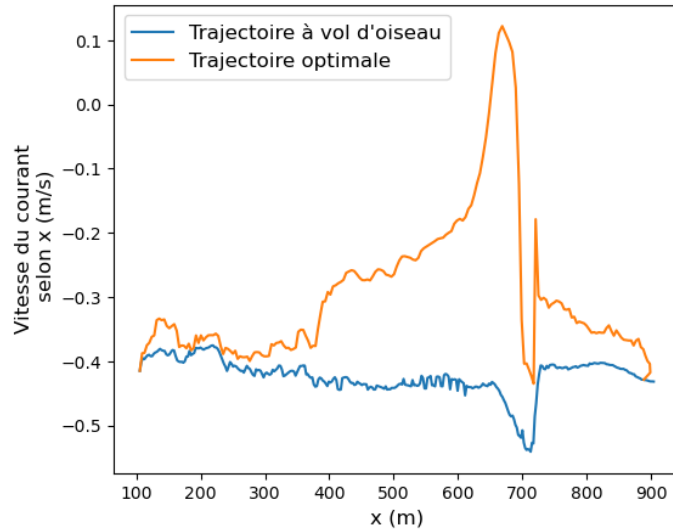


FIGURE 5.12 – Vitesse du courant rencontré par le nageur le long de la trajectoire « à vol d'oiseau » et de la trajectoire optimale, pour un débit de la Seine de $180 \text{ m}^3/\text{s}$, sur le segment 3.

Nous observons ici que, le long de la trajectoire optimale, le nageur rencontre un courant défavorable mais toujours plus faible que le long de la trajectoire à vol d'oiseau. Cette différence s'accroît au fur et à mesure que le nageur se rapproche de la pile du pont des Invalides (situé à une abscisse x environ égale à 700 m). Ensuite, nous répétons cette optimisation pour différents débits. Les trajectoires correspondantes sont données sur la figure 5.13.

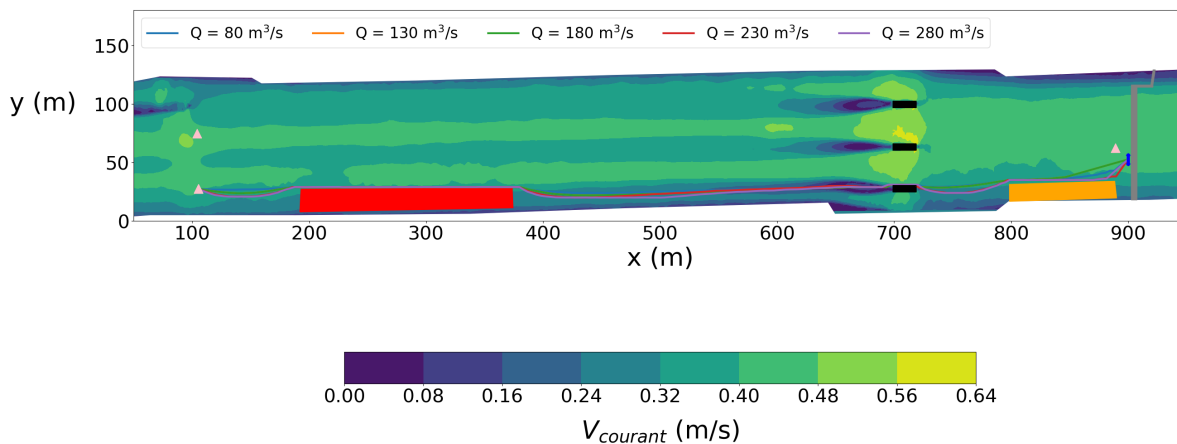


FIGURE 5.13 – Comparaison des trajectoires optimales obtenues pour différents débits de la Seine sur le segment 3.

Pour les différents débits, les trajectoires optimales sont très similaires jusqu'au 100 derniers mètres. Ensuite, elles diffèrent légèrement selon le débit : plus le débit est élevé, plus il faut longer la berge longtemps avant

de bifurquer vers l'arrivée. Enfin, pour tous les débits entre 70 et 300 m³/s, nous calculons le gain de temps obtenu en suivant la trajectoire optimale, en comparaison avec la trajectoire à vol d'oiseau. Les résultats sont donnés sur la figure 5.14.

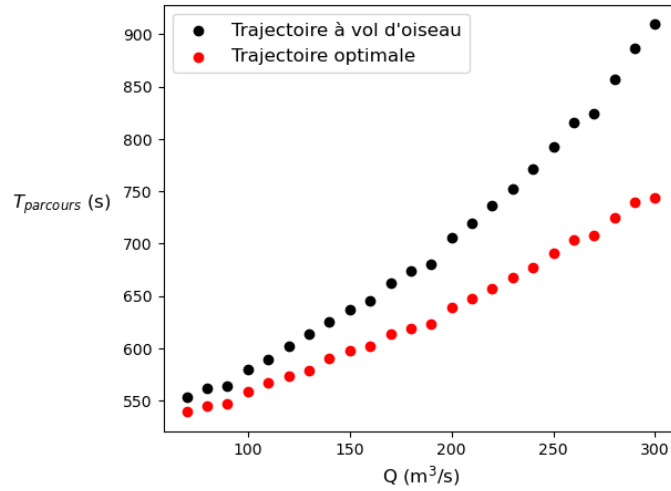


FIGURE 5.14 – Temps de parcours obtenus pour la trajectoire optimale et à la trajectoire à vol d'oiseau, pour la variante du segment 3 se terminant à la ligne d'arrivée, pour l'ensemble des débits étudiés.

Nous remarquons ici que les gains de temps le long de la trajectoire optimale sur le segment 3 sont beaucoup plus élevés que pour le segment 1. Ces gains sont compris entre 13 et 165 secondes selon le débit. Se tromper de trajectoire lors de la remontée du courant peut donc avoir un énorme impact sur le résultat de la course.

Trajectoire optimale complète.

Finalement, nous obtenons, pour chacun des débits étudiés, la trajectoire optimale complète sur un tour de circuit. Un exemple est donné sur la figure 5.15.

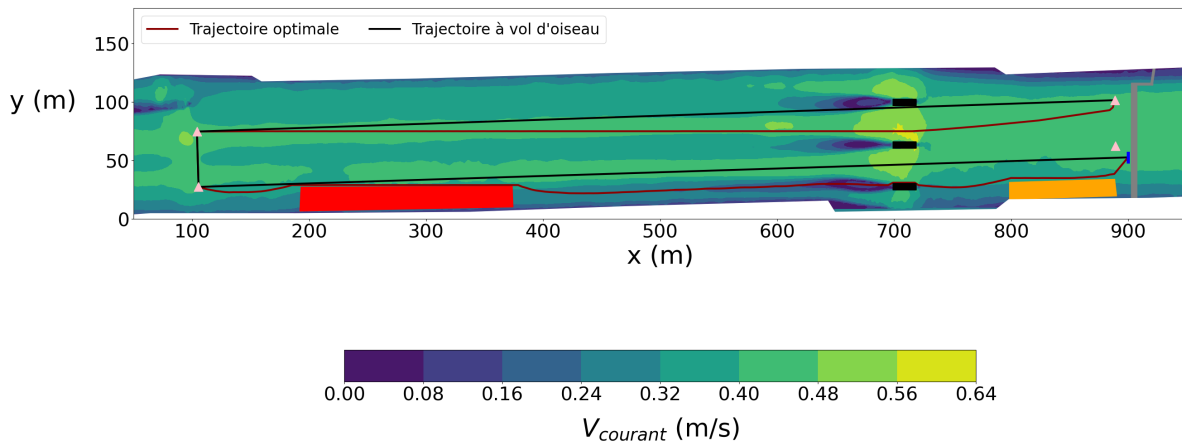


FIGURE 5.15 – Visualisation de la trajectoire « à vol d'oiseau » et de la trajectoire optimale obtenue pour un débit de la Seine de 180 m³/s, sur le parcours complet.

Les temps de parcours associés pour la trajectoire complète sont donnés sur la figure 5.16.

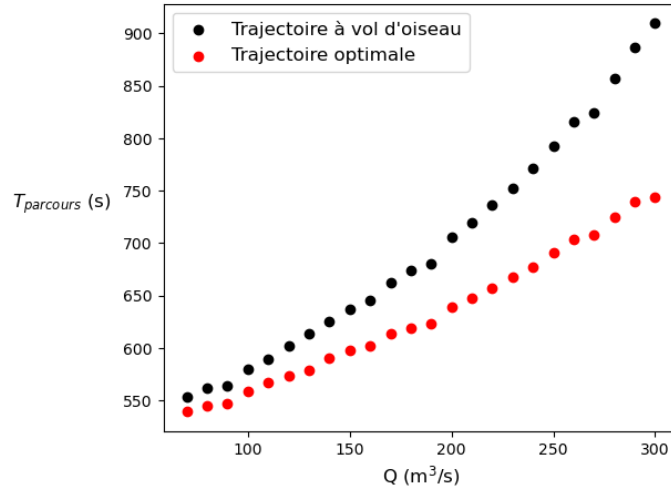


FIGURE 5.16 – Temps de parcours obtenus pour la trajectoire optimale et à la trajectoire à vol d’oiseau, sur le parcours complet, pour l’ensemble des débits étudiés.

Ces résultats montrent que les gains de temps totaux sont plus importants que les écarts habituellement observés en fin de course : le choix de la trajectoire sera donc crucial en vue d’obtenir un bon résultat. Par ailleurs, nous observons que le temps de parcours total augmente lorsque le débit est plus important. Cela dénote que l’impact du courant n’est pas équivalent à la descente et à la remontée.

5.1.3 Résultats pour le parcours de triathlon

Nous reprenons la démarche utilisée pour le parcours de natation mais cette fois pour le parcours de l’épreuve de triathlon.

Grande boucle du parcours de triathlon.

La grande boucle du parcours de triathlon est d’une distance de 910 mètres. C’est la première boucle que les athlètes vont parcourir. La trajectoire optimale obtenue sur cette boucle est donnée sur la figure 5.17

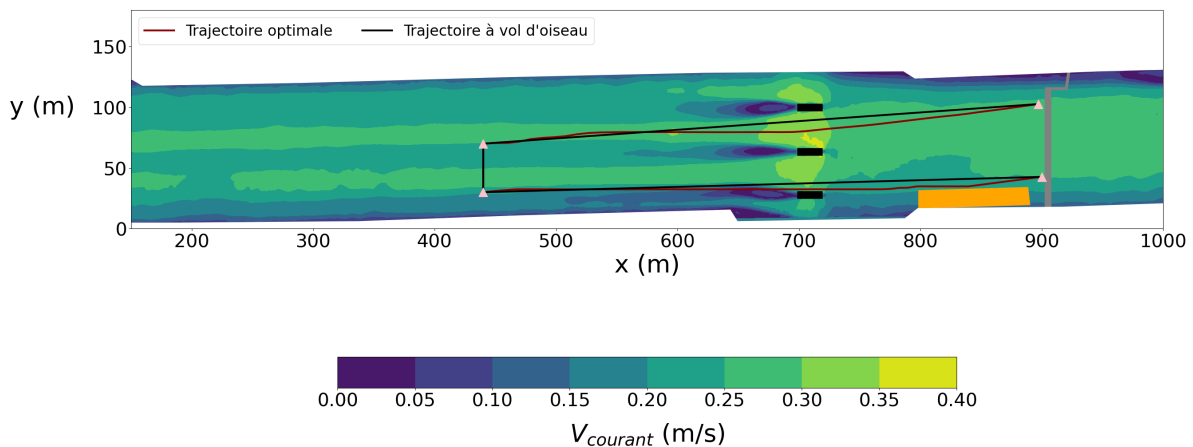


FIGURE 5.17 – Visualisation de la trajectoire « à vol d’oiseau » et de la trajectoire optimale obtenue pour un débit de la Seine de $120 \text{ m}^3/\text{s}$, pour la grande boucle du parcours du triathlon.

Nous observons, pour la descente du courant, un résultat similaire à celui obtenu pour le parcours de natation : la trajectoire optimale passe au centre de l’arche du pont des Invalides, bénéficiant ainsi des vitesses de

courant maximales. En revanche, pour la remontée du courant, la trajectoire à vol d’oiseau et la trajectoire optimale sont quasiment identiques. Cela vient du placement des bouées : la trajectoire à vol d’oiseau passe quasiment par le sillage de la pile de pont la plus au Sud, bénéficiant ainsi de vitesses de courant assez faibles. Cependant, il est préférable de se décaler légèrement de cette trajectoire, afin de complètement profiter du sillage de la pile, puis longer la barge pour atteindre la bouée finale. Ensuite, suite à une demande de la Fédération Française de Triathlon, nous étudions l’influence de la position de départ sur la trajectoire à suivre pour rejoindre la première bouée constituant le demi-tour. En effet, les athlètes partant alignés sur le ponton, ils ne partent pas tous à la même ordonnée y . Les résultats de cette étude sont donnés sur la figure 5.18.

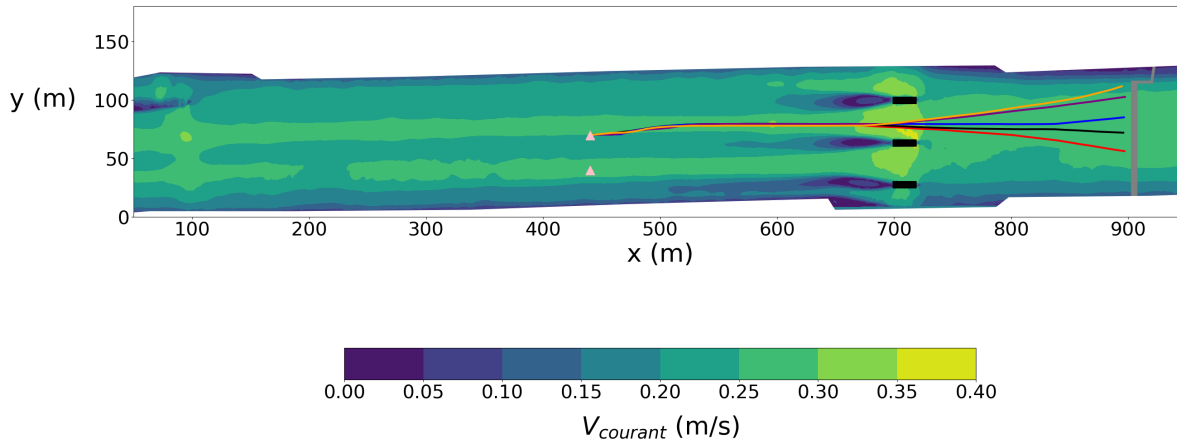


FIGURE 5.18 – Trajectoires optimales obtenues pour un débit de la Seine de $120 \text{ m}^3/\text{s}$, pour différentes positions de départ, pour le premier segment de la grande boucle du parcours du triathlon.

Nous notons ici que les trajectoires optimales obtenues sont identiques une fois le pont des Invalides atteint : la position de départ n’a donc pas d’influence sur la fin de la trajectoire à suivre sur le segment 1. De plus, toutes les trajectoires rejoignent le même point sous le pont : là où la vitesse du courant est maximale. Ainsi, peu importe la position de départ, le principe de la trajectoire à suivre est le même : rejoindre le pont des Invalides en visant la gauche de l’arche puis tirer droit jusqu’à la bouée. Les temps de parcours pour les différentes trajectoires sont donnés dans le tableau 5.1.

Trajectoire	Temps de parcours (s)
Orange	270,6
Violette	265,7
Bleue	263,9
Noire	263,1
Rouge	264,9

TABLE 5.1 – Temps de parcours sur le premier segment de la grande boucle du parcours de triathlon en fonction de la position de départ.

Ces résultats nous montrent que les positions de départ les plus avantageuses sont celles qui se situent au centre de la zone de départ (trajectoires noire et bleue). Partir proche de la berge (trajectoire orange) est désavantageux du fait que les vitesses du courant sont moins favorables dans cette zone. Le jour de la compétition, les athlètes n’ont pas le choix de leur zone de départ. Il faudra alors, pour les nageurs partant depuis des zones peu avantageuses, tenter de profiter des effets de drafting pour combler ce désavantage sans trop s’épuiser.

Petite boucle du parcours de triathlon.

La petite boucle du parcours du triathlon est longue de 590 mètres. Elle est parcourue après la grande boucle. La trajectoire optimale obtenue sur ce parcours est donnée sur la figure 5.19

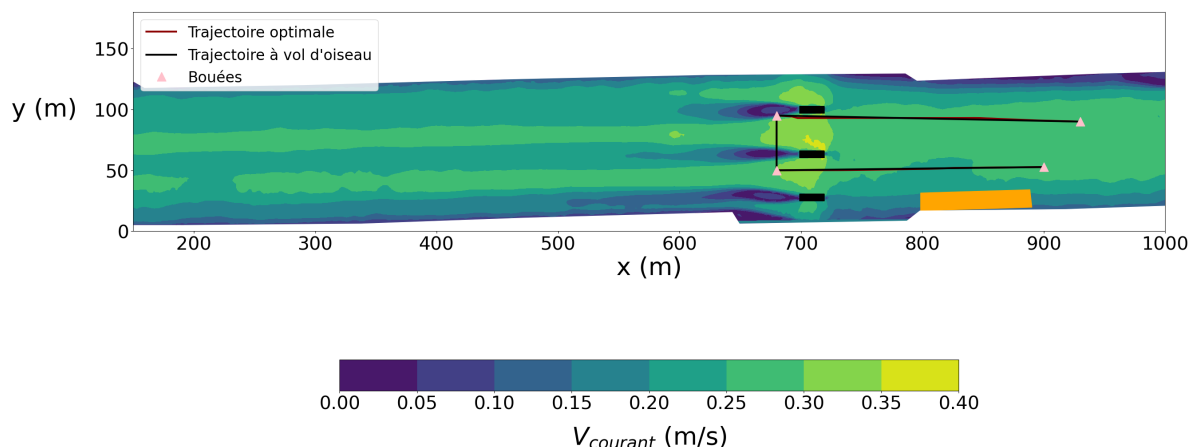


FIGURE 5.19 – Visualisation de la trajectoire « à vol d’oiseau » et de la trajectoire optimale obtenue pour un débit de la Seine de $120 \text{ m}^3/\text{s}$, pour la petite boucle du parcours du triathlon.

Nous observons que la trajectoire optimale et la trajectoire à vol d’oiseau sont confondues. Cela vient du placement des bouées, qui obligent à de trop grands détours pour profiter des zones de faible courant.

5.2 Optimisation de la dépense énergétique durant la course

Une partie de ce travail a été réalisée par Jeanne Chauris lors d’un stage de troisième année de licence de physique que j’ai encadré.

La course de natation en eau libre des Jeux Olympiques est une épreuve d’endurance, puisqu’elle représente un peu moins de deux heures d’effort pour les athlètes. Les nageurs doivent donc gérer leur énergie afin de pouvoir porter leur effort au moment opportun. Concernant le triathlon, la partie nagée précède le parcours à vélo et la course à pied. Les triathlètes doivent donc eux aussi gérer leur dépense énergétique au cours de la nage afin de conserver leurs capacités physiques pour le reste de l’épreuve. C’est pourquoi nous nous intéressons à l’optimisation de la dépense énergétique des nageurs en fonction des courants rencontrés dans la Seine.

5.2.1 Modèle physique et énergétique

Afin de modéliser la dépense énergétique des nageurs, nous utilisons le modèle de Keller [48]. Il décrit l’évolution de l’énergie d’un nageur via l’équation suivante :

$$\frac{dE}{dt} = \sigma - \frac{1}{\eta} P_m \quad (5.4)$$

où E désigne le stock d’énergie anaérobie du nageur par unité de masse, il vérifie la condition initiale $E(t = 0) = E_0$ et ne peut pas être négatif, σ est la production d’énergie, par unité de masse, liée à la respiration. Cette production est considérée constante dans un premier temps. Ensuite, η est un facteur adimensionné dont la valeur vaut 0,09 d’après [49]. Il décrit l’efficacité du corps à transformer l’énergie chimique en énergie mécanique. Le terme P_m est la puissance mécanique du nageur, définie comme le produit de la force de propulsion du nageur avec sa vitesse par rapport à l’eau. Afin de pouvoir utiliser ce modèle, il nous faut déterminer les valeurs de σ et de E_0 . Pour cela, nous relevons les temps des records du monde femme et homme pour des courses sur des distances allant de 100 à 1500 mètres. Ensuite, nous faisons

l'hypothèse que les nageurs évoluent à vitesse constante lors de ces courses : l'accélération est nulle, ce qui permet cela d'écrire l'égalité entre la force de propulsion et la force de traînée :

$$F_{propulsion} = k_b V_{n/e}^2 \quad (5.5)$$

Où k_b est le coefficient de frottement du nageur, classiquement utilisé dans le monde de la natation, introduit au chapitre 4 et pris ici égal à 40 kg/m d'après les observations de [38]. Alors, en injectant cette égalité dans l'expression de la puissance mécanique du nageur, nous obtenons :

$$P_m = F_{propulsion} V_{n/e} = k_b V_{n/e}^3 \quad (5.6)$$

Ainsi, en utilisant l'équation 5.4, nous pouvons exprimer le temps de parcours d'une course, en fonction de la vitesse de nage, de σ , de E_0 , de E_{final} qui est la valeur du stock d'énergie du nageur en fin de course et du temps de course t_c :

$$\frac{E_0 - E_{final}}{t_c} = \sigma - \frac{1}{\eta} k_b V_{n/e}^3 \quad (5.7)$$

Nous supposons que dans les courses étudiées, les nageurs terminent avec un stock d'énergie égal à 0. De plus, les courses étudiées ici se déroulent sans courant et nous avons donc la distance de course qui est égale à $d_c = V_{n/e} t_c$. En injectant ces deux hypothèses dans l'équation précédente, nous exprimons la vitesse de nage en fonction de la distance de course et des paramètres du problème :

$$V_{n/e}^2 = \frac{\eta(t_c \sigma - E_0)}{k_b d_c} \quad (5.8)$$

A l'aide de cette équation, nous traçons l'évolution de la vitesse de nage en fonction de la distance de course. Cela nous permet d'accéder aux valeurs des paramètres E_0 et σ par ajustement. Ces tracés sont donnés sur la figure 5.20.

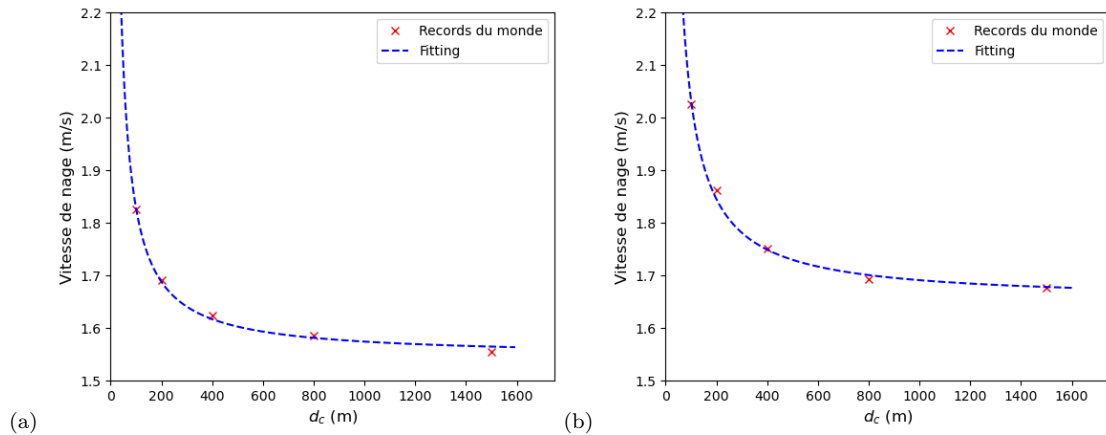
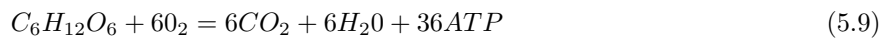
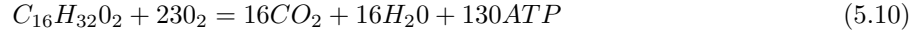


FIGURE 5.20 – Évolution de la vitesse de nage en fonction de la distance de course et fitting. (a) Femmes. (b) Hommes.

Ces tracés nous donnent alors chez les femmes : $\sigma = 18,5$ W/kg et $E_0 = 703,5$ J/kg, tandis que chez les hommes, nous obtenons $\sigma = 22,1$ W/kg et $E_0 = 1026,1$ J/kg. Les valeurs plus élevées chez les hommes s'expliquent par les vitesses de nage plus élevées. Afin de savoir si les valeurs de σ sont cohérentes avec la réalité, nous cherchons à convertir les résultats obtenus en mesure de $VO_{2,max}$. Pour cela, nous utilisons les équations chimiques qui permettent au corps humain de créer de l'énergie, tirées de [50] :



et



où la première équation représente la production d'adénosine triphosphate (ATP) à partir du glucose et la seconde la production d'adénosine triphosphate à partir de lipides. L'adénosine triphosphate est la principale source d'énergie du corps humain pour alimenter les fonctions cellulaires. Ces équations nous permettent de calculer que, à partir d'un litre de dioxygène, la première réaction chimique permet de produire 5,2 kCal tandis que la seconde permet de produire 4,9 kCal. Ainsi, en moyenne, le corps humain sera capable de produire à partir d'un litre de dioxygène 5,05 kCal en considérant les contributions des 2 équations égales. Sachant que nous avons 1 kCal qui vaut 4186 J, alors nous avons l'égalité $1\text{kCal}/\text{min} = 69,8 \text{ W}$. Cette dernière nous permet de calculer que la valeur de σ obtenue pour les femmes correspond à une $VO_{2,max}$ égale à 51,2 mL/min/kg et pour les hommes à 61,1 mL/min/kg. Ces valeurs sont en accord avec la littérature. En effet, d'après [51], la $VO_{2,max}$ des nageuses de niveau élite est comprise entre 42 et 55 mL/min/kg tandis qu'elle est comprise entre 50 et 65 mL/min/kg pour les nageurs masculins de niveau élite. Cependant, cette modélisation semble montrer, d'après la figure 5.20 qu'il existerait une vitesse asymptotique que les nageurs seraient capable de maintenir sur les grandes distances. Ceci n'est pas réaliste. En effet, la figure 5.21 montre que cette modélisation ne permet pas d'expliquer les meilleures performances sur des distances supérieures à 1500 mètres. Cela est dû au fait que cette première modélisation ne prend pas en compte les effets de la fatigue.

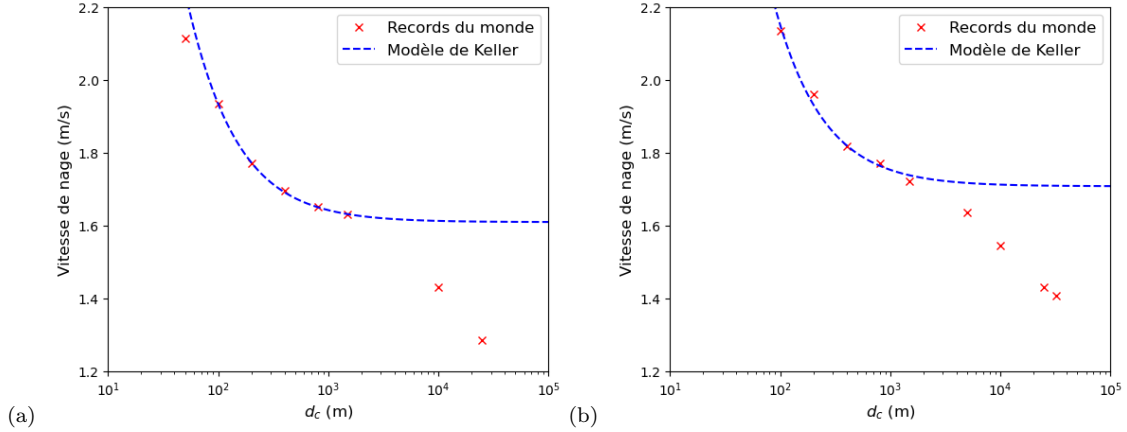


FIGURE 5.21 – Évolution de la vitesse de nage en fonction de la distance de course et fitting. (a) Femmes. (b) Hommes.

Nous cherchons donc à introduire les effets de la fatigue dans notre modèle afin de le rendre plus réaliste. Pour cela, nous nous basons sur le modèle de Woodside [52]. La production d'énergie via la respiration σ n'est plus constante et vérifie l'équation :

$$\sigma(t) = \sigma_0 - \frac{1}{\tau} \int_0^t \frac{F_{propulsion}(t')V_{n/e}(t')}{\eta} dt' \quad (5.11)$$

Où σ_0 est la valeur correspondante au modèle de Keller présenté précédemment et τ une constante de temps. Nous ajustons ce modèle aux données des records du monde et le comparons au modèle de Keller. Les résultats sont donnés sur la figure 5.22.

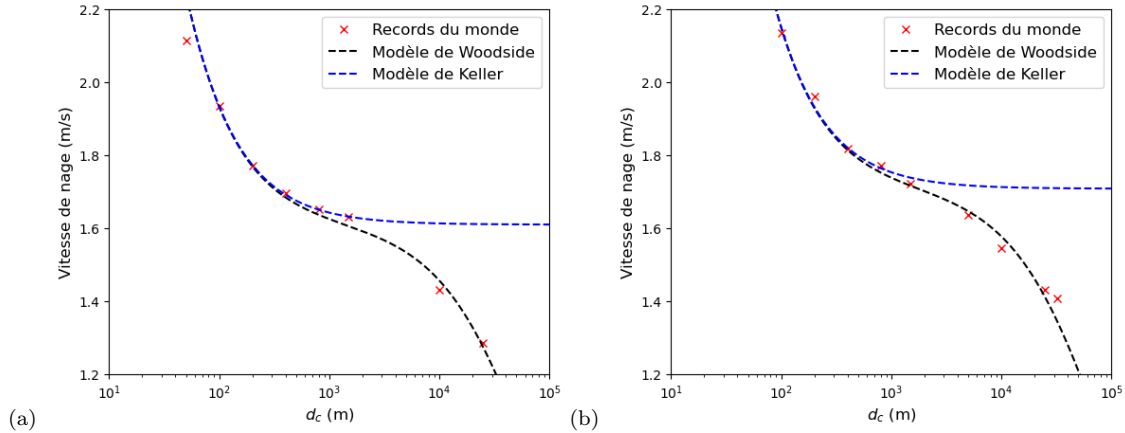


FIGURE 5.22 – Comparaison des modèles de Keller et de Woodside. (a) Femmes. (b) Hommes.

Ces résultats montrent que le modèle de Woodside permet, en prenant en compte les effets de la fatigue, d’expliquer les performances sur toutes les distances de nage. Nous utiliserons donc ce modèle dans la suite. La constante de temps du modèle vaut environ 3 heures 8 minutes pour les femmes et 2 heures 40 minutes pour les hommes, ce qui suggère que les femmes se fatiguent moins vite que les hommes et sont donc plus endurantes.

5.2.2 Résultats

Afin d’appliquer le modèle énergétique au contexte de la course des Jeux Olympiques de Paris, nous étudions une situation simplifiée du parcours de natation : les nageurs rencontrent un courant favorable pendant les 800 premiers mètres du parcours puis subissent un courant défavorable pendant les 800 derniers mètres. La zone de demi-tour, perpendiculaire au sens du courant est donc négligée. Le courant rencontré est considéré constant et égal à 0,3 m/s. Nous utilisons de nouveau le logiciel Bocop afin de déterminer la force de propulsion du nageur à tout instant et la dépense énergétique qui en découle, qui permet de minimiser le temps de parcours. La figure 5.23 donne les évolutions de la force de propulsion du nageur, de sa vitesse, de sa capacité à produire de l’énergie via la respiration σ et de son stock d’énergie E , lors du parcours de 3 aller-retours.

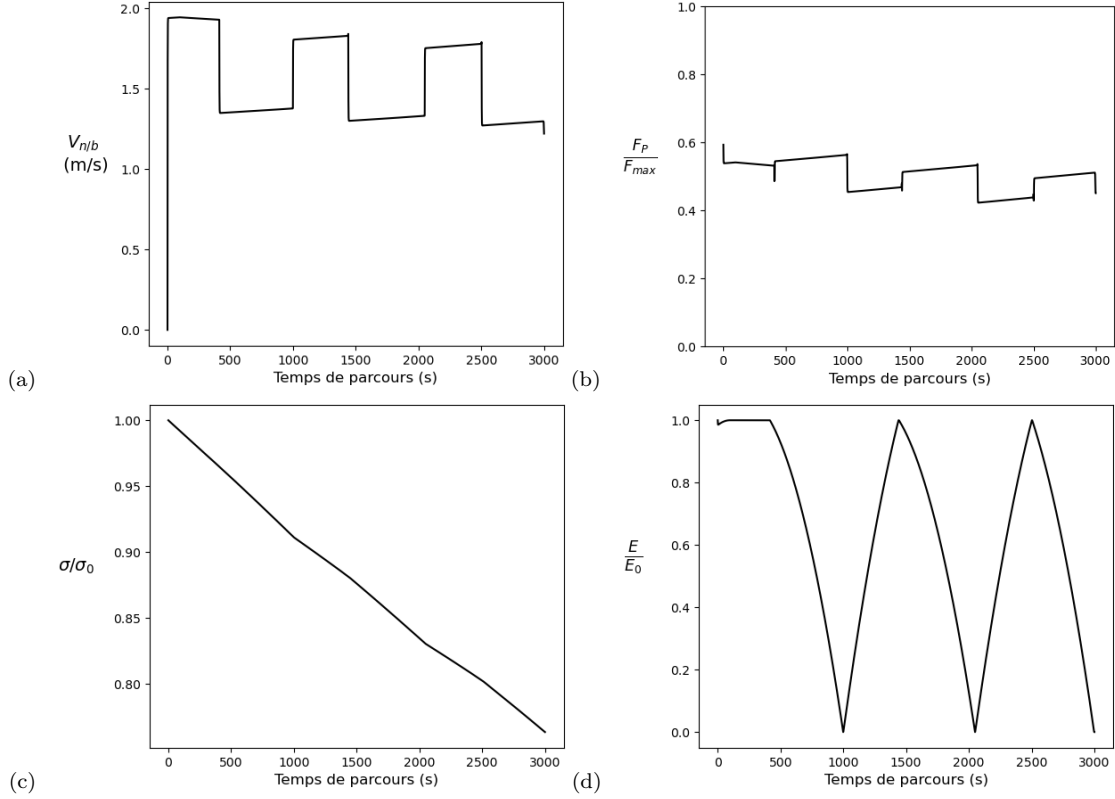


FIGURE 5.23 – Évolution des différents paramètres du problème, en utilisant le modèle de Woodside, sur 3 aller-retours. (a) Vitesse de nage. (b) Force de propulsion normalisée. (c) Production d'énergie via la respiration normalisée (d) Stock d'énergie normalisé.

La figure 5.23a montre que la vitesse du nageur est plus élevée lorsque le courant est favorable, ce qui est attendu. De plus, la figure 5.23b donne la stratégie optimale de propulsion : il est préférable de se propulser plus fort lorsque le nageur rencontre un courant défavorable. La figure 5.23c montre la décroissance de la capacité du nageur à produire de l'énergie via la respiration lors de la course, les effets de la fatigue sont donc visibles. Enfin, la figure 5.23d montre que le stock d'énergie du nageur se vide entièrement sur les parties où le courant est défavorable, puis se recharge entièrement lorsque le courant est favorable. Ce comportement est totalement irréaliste : le corps humain ne récupère jamais totalement lors d'un effort. Il faut donc modifier le modèle afin de le rendre plus réaliste sur l'aspect récupération d'énergie. Pour cela, nous introduisons un coefficient de récupération C . Nous avons alors :

$$\frac{dE}{dt} = \sigma(t) - \frac{F_P(t)V_{n/e}(t)}{\eta} \text{ si } \sigma(t) - \frac{F_P(t)V_{n/e}(t)}{\eta} < 0 \quad (5.12)$$

Et

$$\frac{dE}{dt} = \left(\sigma(t) - \frac{F_P(t)V_{n/e}(t)}{\eta}\right) \frac{1}{C} \text{ si } \sigma(t) - \frac{F_P(t)V_{n/e}(t)}{\eta} > 0 \quad (5.13)$$

Ainsi, en prenant $C = 10$ (choix arbitraire), la récupération d'énergie se fait 10 fois moins rapidement que la dépense, ce qui paraît plus réaliste. Cela est corroboré par le travail de Morton [53]. En effet, il a mis en place un modèle hydraulique du corps humain composé de 3 réservoirs d'énergie, reliés entre eux par des tuyaux. Il met en avant que le débit de remplissage des réservoirs lors des phases de récupération est très faible en comparaison du débit inverse lors d'une phase de dépense énergétique. Son modèle a permis de décrire de manière précise l'évolution de la consommation d'oxygène lors d'efforts de moyenne et haute intensité suivis d'une phase de récupération chez des athlètes entraînés. Notre choix de modèle de récupération permet de

reprendre les grandes lignes du modèle de Morton, tout en étant plus simple à implémenter : nous ajoutons un seul paramètre supplémentaire quand le modèle de Morton nécessite de connaître le volume des réservoirs modélisés ainsi que les débits maximaux des tuyaux les reliant. Avec cette nouvelle modélisation, nous obtenons les résultats présentés sur la figure 5.24.

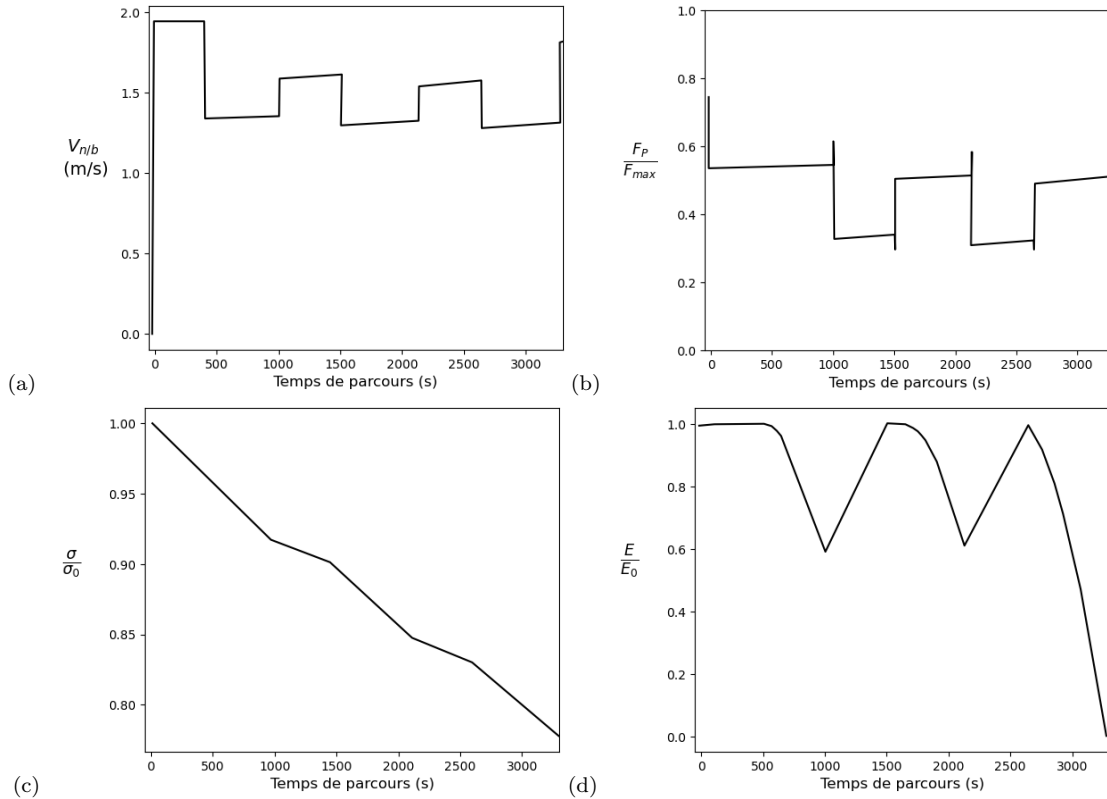


FIGURE 5.24 – Évolution des différents paramètres du problème, en utilisant le modèle de Woodside, avec un facteur pénalisant la récupération, sur 3 aller-retours. (a) Vitesse de nage. (b) Force de propulsion normalisée. (c) Production d'énergie via la respiration normalisée (d) Stock d'énergie normalisé.

D'abord, la figure 5.24a montre une évolution de la vitesse similaire que celle présentée sur la figure 5.23a : le nageur va plus vite lorsqu'il rencontre un courant favorable. Cependant, sa vitesse est ici moins élevée que précédemment, ce qui était attendu puisque sa récupération d'énergie étant pénalisée, il peut moins dépenser d'énergie et donc moins se propulser. Enfin, nous notons un pic de vitesse en fin de course que nous n'observons pas pour le précédent modèle. De plus, la figure 5.24b montre que le nageur se propulse avec moins de force que pour le modèle précédent. Enfin, la figure 5.24d montre que le nageur ne dépense plus totalement son énergie à chaque fois qu'il rencontre un courant défavorable, comme c'était le cas sur la figure 5.23b : le quotient du stock d'énergie sur le stock d'énergie initial ne passe pas sous 0,6 sauf au moment du sprint final où le nageur se vide totalement de son énergie. Finalement, la stratégie qui permet de minimiser le temps de parcours semble être donc de se propulser plus fort face à un courant défavorable et récupérer lorsque le courant est favorable. Cette observation est vraie pour les 2 variantes du modèles de Woodside utilisées. Afin d'évaluer le gain de temps obtenu en utilisant cette tactique, nous comparons 3 stratégies différentes, pour une dépense énergétique équivalente, sur un aller-retour. La stratégie optimale est désignée par S1, la stratégie S2 consiste à nager à une force de propulsion constante quel que soit le courant et S3 consiste à se propulser plus fort lorsque le courant est favorable et moins lorsque le courant est défavorable. Cela correspond à l'inverse de la stratégie optimale. Les temps de parcours, en utilisant ces 3 stratégies, sont donnés dans le tableau 5.2.

Stratégie	Temps de parcours (s)
S1	1131,8
S2	1147,8
S3	1163,5

TABLE 5.2 – Comparaison des temps de parcours sur un aller-retour dans la Seine.

Nous observons ici qu'un nageur employant la mauvaise stratégie pourra, pour une dépense énergétique équivalente, perdre du temps à hauteur de plusieurs dizaines de secondes sur un simple aller-retour. Il est donc important d'utiliser la bonne stratégie durant toute la course afin d'éviter de perdre du temps ou d'avoir à augmenter la dépense énergétique pour rester au contact des autres concurrents.

5.3 Conclusion du chapitre 5

Dans ce chapitre, nous avons mis en avant l'impact des courants dans la Seine sur les courses de natation et de triathlon. D'abord, pour l'épreuve de natation, nous avons montré l'existence d'une trajectoire qui permet de minimiser le temps de course et qui est différente de la trajectoire à vol d'oiseau. Les gains de temps observés peuvent varier de 15 secondes à plus de 2 minutes en fonction du débit de la Seine et sont donc non-négligeables en vue de maximiser la performance des athlètes. Une observation similaire a été faite pour les 2 boucles du parcours de triathlon, même si les gains de temps observés sont moins importants que pour la natation. Ensuite, les courants de la Seine ont également un impact sur la manière dont les nageurs doivent gérer leur énergie pendant la course. Nous avons montré que, pour minimiser le temps de parcours, la stratégie optimale consiste à se propulser plus fortement lorsque le courant rencontré est défavorable et à récupérer lorsque le courant est favorable. Suivre cette stratégie permet là encore des gains de temps substantiels et qui auront un impact sur le dénouement de la course.

Conclusions

Notre travail visait à répondre aux questionnements des entraîneurs et des conseillers scientifiques de la Fédération Française de Natation et de la Fédération Française de Triathlon. Ils concernaient à la fois les interactions (drafting) entre nageurs, dans des situations de duel mais aussi de peloton, et la stratégie à adopter pour la course des Jeux Olympiques de Paris dans la Seine, particulière en raison des courants attendus.

Le premier chapitre nous a permis de présenter les moyens utilisés pour étudier le phénomène de drafting en natation. Nous y décrivons les 2 canaux utilisés pour nos campagnes de mesures expérimentales, les moyens de mesures (capteur de force, capteur de vitesse), la conception des modèles réduits que nous avons utilisés et le modèle numérique mis en place.

Dans le second chapitre, nous avons étudié le phénomène de drafting dans des situations à 2 nageurs, de manière expérimentale et numérique. Nous avons mis en avant des positions favorables aux nageurs lors d'une course : suivre de près un autre nageur permet une réduction de la force de traînée subie de l'ordre de 40% par rapport à la nage seul, tandis que se placer au niveau de la hanche d'un concurrent permet une réduction de traînée d'environ 30%. Nous avons également montré qu'il existe une position fortement défavorable qui correspond au moment où 2 nageurs sont côte à côte, avec leurs têtes au même niveau. Ils rencontrent alors une augmentation de leur force de traînée de l'ordre de 20% par rapport à un nageur isolé. Le modèle numérique nous a permis de confirmer ces résultats, d'étudier de nombreuses configurations supplémentaires mais aussi d'étudier le lien entre la déformée de la surface libre et réduction/augmentation de traînée. Il ressort de cette étude que les effets observés pour les 2 dernières configurations mentionnées sont dus à des effets de surface libre.

Dans le troisième chapitre, nous nous sommes intéressés au drafting au sein de pelotons de nageurs. Notre étude est ici aussi expérimentale et numérique. Nous avons étudié différentes configurations de pelotons, observées lors de courses réelles : en file indienne, en « flèche », en quinconce, en double file. Ce travail a permis d'identifier les positions au sein d'un peloton qui permettent à un nageur de minimiser la traînée qu'il subit. Ces positions diffèrent selon la configuration étudiée. Cependant, il ressort qu'il faudra en général faire un compromis entre faible traînée et bon positionnement stratégique. En effet, les positions favorables sont le plus souvent situées loin de la tête du peloton et le nageur qui s'y trouve peut être enfermé par ses concurrents. Enfin, nous avons développé un modèle simple qui estime la traînée subie par un nageur dans un peloton donné, à partir des résultats obtenus pour des configurations à deux nageurs. Les premiers résultats de ce modèle sont encourageants mais il peut encore être amélioré notamment sur la prise en compte de l'interaction des sillages et des champs de vagues créés par l'ensemble des membres du peloton.

Le quatrième chapitre traite de la trajectoire optimale (qui minimise le temps de dépassement) de dépassement à adopter lors d'une course, dans une situation à 2 nageurs. Afin de déterminer cet optimum, nous avons modélisé le problème puis utilisé un algorithme génétique ainsi que les résultats du chapitre 2. Il ressort que la trajectoire optimale de dépassement consiste à se rapprocher du concurrent en profitant de la réduction de traînée observée dans cette configuration. Il faut ensuite s'écarter du nageur que l'on souhaite doubler, en ne profitant pas de la zone de faible traînée au niveau de sa hanche, ce qui permet d'éviter la zone de forte traînée lorsque les 2 nageurs sont côte à côte.

Enfin, le dernier chapitre s'intéresse à l'influence des courants rencontrés dans la Seine sur la stratégie à adopter lors des épreuves olympiques de 2024. A partir de simulations numériques de l'écoulement de la Seine et de mesures de terrain, menées par EDF, nous avons montré, à l'aide du logiciel d'optimisation Bocop, qu'il existe pour le parcours de natation et de triathlon, une trajectoire qui permet de minimiser le temps de course et qui n'est pas la trajectoire la plus courte en distance. L'idée générale de cette trajectoire est de viser, lors de la descente du courant, les zones de fortes vitesses, c'est à dire au centre de l'arche du pont des Invalides. Lors de la remontée, il faut en revanche s'aligner avec le pilier du pont des Invalides le plus au Sud, afin d'être dans son sillage et bénéficier de courants moins défavorables. Cette trajectoire est indépendante de la valeur du débit de la Seine. Les gains de temps obtenus en suivant cette trajectoire

sont conséquents par rapport aux écarts observés en fin de course lors des précédentes olympiades. Enfin, l'utilisation d'un modèle énergétique a mis en avant qu'il était préférable de se propulser plus fortement lorsque le courant est défavorable et récupérer lorsqu'il est favorable.

Perspectives

Notre travail a permis d'apporter une réponse aux questions posées mais aussi de quantifier le ressenti des athlètes et les phénomènes rencontrés lors des courses de natation en eau libre. Cependant, il dispose de plusieurs axes d'amélioration et pourrait être poursuivi de la manière suivante.

D'abord, afin de rendre notre dispositif expérimental plus réaliste, il serait possible de libérer le mouvement vertical des modèles, ce qui correspondrait mieux à des nageurs humains, qui ne sont jamais à profondeur fixe par rapport à la surface. Pour cela, il faudrait modifier le système d'attache entre les modèles réduits et le support du capteur de force. Dans un second temps, il serait également intéressant de créer des modèles réduits avec des bras mobiles, qui permettrait de recréer le mouvement de nage des nageurs humains, afin d'étudier l'impact de ce dernier sur le drafting. Il faudra cependant adapter la fréquence de coups de bras à l'échelle de nos modèles réduits.

Ensuite, afin de pouvoir transposer nos résultats à des courses de natation en bassin, nous pourrions mener une étude sur l'influence des lignes d'eau sur nos résultats. Cela pourrait être fait en réalisant des mesures de traînées sur des nageurs humains tractés par un moteur (dispositif de la figure 1.21), pour les configurations de nage remarquables mises en avant dans notre étude (côte à côte et au niveau de la hanche). Répéter ces mesures pour des nageurs séparés par une ligne d'eau puis sans ligne d'eau, permettrait de déterminer l'influence de cette dernière sur nos résultats.

Par ailleurs, l'étude du dépassement peut être améliorée. En effet, les résultats étant parfois bruités, il faut peut être réfléchir à d'autres types d'algorithmes qui pourraient donner de meilleurs résultats. De plus, il serait intéressant d'optimiser la manière de dépasser plusieurs concurrents, puisque cette situation se présente en course lorsqu'un nageur souhaite remonter un peloton.

Enfin, le modèle énergétique présenté dans le chapitre 5 n'est pas parfait, notamment avec une correction « à la main » de la capacité de récupération d'un nageur. Il pourrait être amélioré en s'inspirant des travaux de Morton [53]. De plus, il serait intéressant d'individualiser le modèle énergétique et de l'adapter à chaque nageur. Pour cela, il faudra mesurer les paramètres physiologiques des nageurs : σ , E_0 , τ et C , le coefficient de frottement du nageur k_b , sa vitesse de nage. Il serait alors possible de créer un « jumeau numérique » du nageur et lui proposer une stratégie adaptée à ses caractéristiques. Concernant la trajectoire optimale de course, les résultats étant spécifiques à la course dans la Seine, il serait intéressant de mener une étude similaire pour le lieu des prochains Jeux Olympiques : la baie de Los Angeles. Les courants seront certainement moins important que dans la Seine, mais l'impact des vagues, du vent et du clapot peuvent être étudiés.

Annexes

A Répétabilité des résultats entre les 2 canaux utilisés

Cette annexe a pour but de montrer que les résultats des mesures sont répétables entre les 2 canaux. Cette répétabilité n'était en effet pas garantie puisque les 2 canaux ne sont pas identiques et ne permettent pas de travailler avec la même hauteur d'eau du fait que les pompes des 2 canaux n'ont pas la même puissance et qu'ils n'ont pas non plus la même largeur. Ainsi, les mesures dans le canal 5 ont été réalisées avec une hauteur d'eau de 70 cm contre 35 cm dans le canal 1.

Dans un premier temps, nous comparons les mesures obtenues dans les 2 canaux pour un nageur isolé. La figure A.1 présente ces résultats.

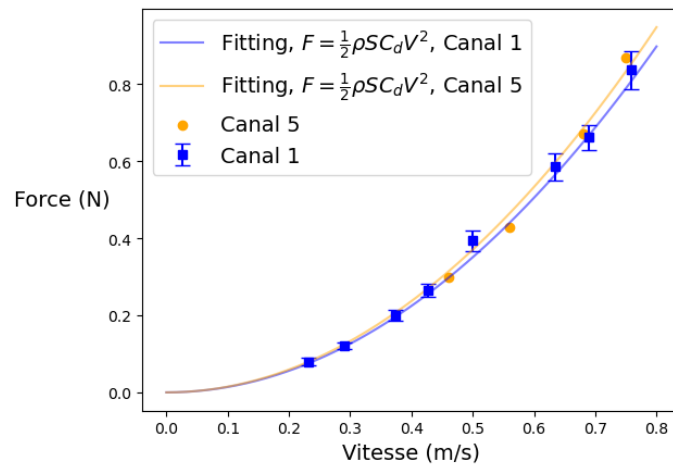


FIGURE A.1 – Comparaison des résultats obtenus dans les 2 canaux, pour des mesures de traînée d'un nageur isolé.

Nous observons que la force de traînée d'un nageur isolé semble suivre la même évolution dans les 2 canaux. L'ajustement donne un coefficient de traînée égal à 0,58 dans le canal 1 et 0,61 dans le canal 5, soit un écart relatif de 5,2%. Dans un second temps, nous comparons les mesures obtenues dans les 2 canaux pour des situations de nage en ligne à 2 nageurs. La figure A.2 présente ces résultats.

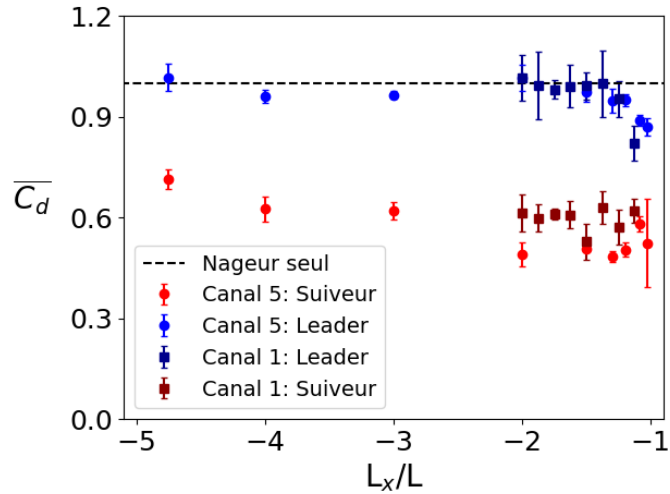


FIGURE A.2 – Comparaison des résultats obtenus dans les 2 canaux, pour des mesures pour des configurations de nage en ligne à 2 nageurs, à une vitesse de l'écoulement $V = 0,56$ m/s.

Concernant le leader, nous retrouvons bien dans les 2 canaux qu'il rencontre une réduction de traînée, d'au plus 15%, lorsqu'il est suivi de près par un autre nageur. Cet effet s'estompe rapidement lorsque la distance entre les 2 nageurs augmente. Le suiveur connaît lui une réduction de traînée de l'ordre de 40% lorsqu'il se trouve dans le sillage d'un autre nageur.

Nous concluons donc que les résultats obtenus dans les 2 canaux sont comparables. Cela permet d'être confiant quant à reproductibilité de l'ensemble de nos mesures.

B Influence du nombre de Reynolds sur le coefficient de traînée

Cette annexe a pour but de présenter une étude numérique réalisée sous OpenFoam afin d'évaluer l'influence du nombre de Reynolds sur le coefficient de traînée de notre modèle réduit de nageur. En effet, nous avons choisi de travailler en similitude de Froude, comme expliqué dans le premier chapitre. Par conséquent, nous ne pouvons pas avoir un nombre de Reynolds égal entre nos modèles réduits et les nageurs humains. Le nombre de Reynolds est défini comme suit :

$$Re = \frac{VL}{\nu} \quad (\text{B.1})$$

Où V est la vitesse de l'écoulement, L la longueur typique de l'objet étudié et ν la viscosité cinématique du fluide. Pour un nageur humain, nous prenons $L = 2$ m, $V = 1,5$ m/s et nous avons $\nu = 1 \times 10^{-6}$. Nous obtenons alors $Re = 3 \times 10^7$. De même, pour nos modèles réduits, nous prenons $L = 0,4$ m, $V = 0,56$ m/s. Nous obtenons alors $Re = 2.2 \times 10^5$. Sous OpenFoam, nous faisons varier les propriétés de l'écoulement autour de notre modèle réduit afin de faire varier le nombre de Reynolds. La figure B.1 présente l'évolution du coefficient de traînée en fonction du Reynolds.

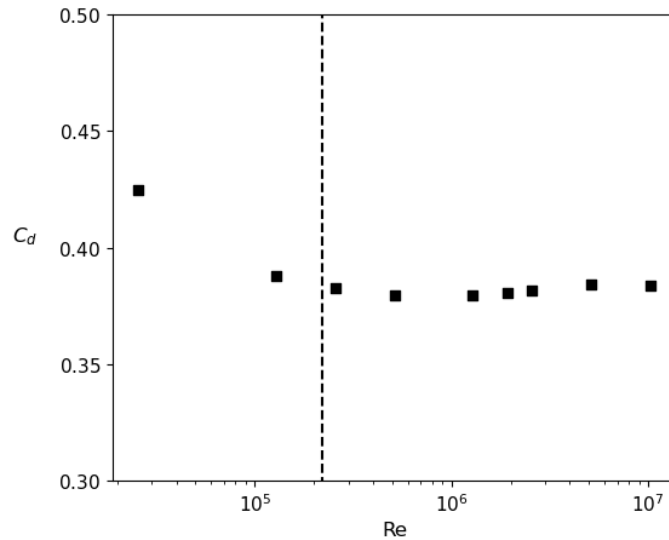


FIGURE B.1 – Évolution du coefficient de traînée du modèle réduit de nageur en fonction du nombre de Reynolds de l'écoulement.

Il est à noter que cette étude a été effectuée pour un nageur immergé dans un seul fluide (pas de surface libre). Il n'y a donc pas de traînée de vague. Cela explique que les coefficients de traînée obtenus ici soient plus faibles en valeur que ceux présentés dans le reste du manuscrit. La barre verticale pointillée représente le plus petit nombre de Reynolds rencontré au cours de nos mesures. Nous observons que le coefficient de traînée est très peu dépendant du nombre de Reynolds dans la gamme $[10^5, 10^7]$, dont les bornes correspondent respectivement au nombre de Reynolds calculé pour un modèle réduit dans nos expériences et un nageur humain en conditions réelles. Cela nous rassure quant à la transposabilité de nos résultats à des nageurs humains et nous permet de travailler en similitude de Froude afin de conserver les effets des vagues entre nos expériences et les conditions réelles.

C Analyse d'erreur sur la mesure expérimentale du coefficient de traînée

Le but de cette annexe est de décrire l'analyse d'erreur qui nous permet de calculer les barres d'erreur des résultats de mesures expérimentales. Nous posons, dans cette section, l'erreur de mesure notée u et l'intervalle de confiance à 95% noté U . Nous avons donc $U = 2u$.

La force de traînée $F_{trainee}$ d'un modèle réduit est obtenue expérimentalement en multipliant la constante du capteur $k_{conversion}$ par la tension renvoyée par le capteur, notée A . Alors, le coefficient de traînée du nageur s'écrit :

$$C_d = \frac{k_{conversion}A}{\frac{1}{2}\rho SV^2} \quad (C.1)$$

Où V est la vitesse de l'écoulement, ρ est la masse volumique de l'eau et S est la surface frontale du nageur. Celle-ci étant une ellipse, nous avons $S = \pi ab$ avec a et b qui sont respectivement les demi-grand axe et demi-petit axe de l'ellipse. Le coefficient de traînée s'écrit finalement :

$$C_d = \frac{k_{conversion}A}{\frac{1}{2}\rho\pi abV^2} \quad (C.2)$$

Nous pouvons alors appliquer la formule de propagation d'erreur. Elle donne :

$$\frac{u(C_d)}{C_d} = \sqrt{\left(\frac{u(k_{conversion})}{k_{conversion}}\right)^2 + \left(\frac{u(A)}{A}\right)^2 + \left(\frac{u(\rho)}{\rho}\right)^2 + \left(\frac{u(a)}{a}\right)^2 + \left(\frac{u(b)}{b}\right)^2 + \left(\frac{u(V^2)}{V^2}\right)^2} \quad (C.3)$$

Nous nous intéressons alors à chacun des termes du membre de droite :

- $k_{conversion}$ est le coefficient qui convertit la tension renvoyée par le capteur en force. Il est calculé selon le principe de calibration explicité dans le chapitre 1, en réalisant une régression linéaire. L'écart type de cette dernière avec les points réels de mesure nous donne l'incertitude sur $k_{conversion}$. La valeur de ce paramètre et l'incertitude qui lui est associé sont spécifiques à chacun des 6 capteurs utilisés. Par exemple, pour le premier capteur utilisé dans nos travaux, nous avons obtenu $k_{conversion,1} = 1,239$ N/V et $u(k_{conversion,1}) = 0,0095$ N/V.
- A désigne la tension renvoyée par le capteur au cours de 6 essais de 20 secondes pour une configuration donnée. L'incertitude $u(A)$ est obtenue en calculant l'écart type du signal mesuré. Les valeurs de A et $u(A)$ sont spécifiques à chaque mesure et sont calculées pour chaque essai.
- ρ désigne la masse volumique de l'eau du canal. Celle-ci est à la température ambiante, soit entre 15 et 20 °C selon la période de l'année. Nous avons $\rho(T=15^\circ\text{C}) = 999,73$ kg/m³ et $\rho(T=20^\circ\text{C}) = 998,29$ kg/m³. En considérant une distribution uniforme de température, nous avons $\rho = 999,03$ kg/m³ et $u(\rho) = 0,37$ kg/m³.
- a désigne le demi-grand axe de l'ellipse délimitant la surface frontale du modèle réduit de nageur. Il vaut 6 cm. D'après les données constructeur de l'imprimante 3D utilisée pour fabriquer les modèles réduits, nous avons $u(a) = 10$ μm. Ces valeurs sont indépendantes de l'essai considéré.
- b désigne le demi-petit axe de l'ellipse délimitant la surface frontale du modèle réduit de nageur. Il vaut 2,5 cm. D'après les données constructeur de l'imprimante 3D utilisée pour fabriquer les modèles réduits, nous avons $u(b) = 10$ μm. Ces valeurs sont indépendantes de l'essai considéré.
- V désigne la vitesse de l'écoulement. D'abord, nous utilisons la relation $\frac{u(V^2)}{V^2} = 2\frac{u(V)}{V}$. Ensuite, cette vitesse n'est pas mesurée à chaque essai, mais à chaque fois que la vitesse désirée dans le canal est modifiée. Ainsi pour chacune des 3 vitesses étudiées, nous calculons la vitesse moyenne obtenue et

l'intervalle de confiance à 95%. Nous obtenons, pour une vitesse objectif de 0,56 m/s : $V = 0,561$ m/s et $u(V) = 0,005$ m/s. Pour une vitesse objectif de 0,68 m/s : $V = 0,678$ m/s, et $u(V) = 0,006$ m/s. Enfin, pour une vitesse objectif de 0,75 m/s : $V = 0,750$ m/s, and $u(V) = 0.006$ m/s.

Nous sommes alors en mesure, pour chaque essai, d'obtenir la valeur du quotient $\frac{u(C_d)}{C_d}$. Par exemple, pour une mesure sur un modèle réduit seul dans le canal, choisie au hasard, nous avons $\frac{u(C_d)}{C_d} = 0,045$. Pour cet essai, nous avons calculé que $C_d = 0.580$. De plus, nous utilisons la relation $U(C_d) = 2u(C_d)$. Finalement, nous obtenons : $C_d = 0.580 \pm 0.052$

Références

- [1] https://fr.wikipedia.org/wiki/Natation_aux_Jeux_olympiques_de_1900
- [2] https://www.youtube.com/watch?v=jPmACAYAThE&ab_channel=F%C3%A9d%C3%A9rationFran%C3%A7aisedeNatation
- [3] <https://openswimstars.com/conseils-de-nageurs-passage-de-bouee-apprenez-a-virer/>
- [4] <https://tri-attitude-vincennes.clubeo.com/page/2023.html>
- [5] <https://acbourses.fr/category/natation/eau-libre/>
- [6] https://fr.wikipedia.org/wiki/Natation_aux_Jeux_olympiques_d%27%C3%A9t%C3%A9_de_2008
- [7] https://fr.wikipedia.org/wiki/Natation_aux_Jeux_olympiques_d%27%C3%A9t%C3%A9_de_2012
- [8] https://fr.wikipedia.org/wiki/Natation_aux_Jeux_olympiques_d%27%C3%A9t%C3%A9_de_2016
- [9] https://fr.wikipedia.org/wiki/Natation_aux_Jeux_olympiques_d%27%C3%A9t%C3%A9_de_2020
- [10] <https://sciences2024.polytechnique.fr/>
- [11] Bolon, B., Pretot, C., Clanet C., Larrarte, F. & Carmigniani, R. *Drafting of two passive swimmer scale models for open-water races*, B, Phys. Rev. Fluids,8, Sep 2023, 10.1103/PhysRevFluids.8.094802
- [12] Weihs D, *The Hydrodynamics of Dolphin Drafting*, Journal of Biology, 2004, <https://doi.org/10.1186/jbiol2>
- [13] Lissaman PBS and Shollenberger CA, *Formation Flight of Birds*, Science, Volume 168, Number 3934, Pages 1003-1005, 1970, 10.1126/science.168.3934.1003
- [14] Weihs D, *Hydromechanics of Fish Schooling*, Science, Volume 241, Number 5387, Pages 290-291, 1973
- [15] <https://www.directvelo.com/actualite/92960/publi-publi-cyclistes-pourquoi-devez-vous-faire-un-entrainement-croise>
- [16] <https://fr.wikipedia.org/wiki/Stock-car>
- [17] <http://www.brivemag.fr/nage-en-eau-libre-jetez-vous-a-leau/>
- [18] <https://www.saintgeorgesdedidon.fr/agenda/errc-roller/>
- [19] Blocken B, Defraeye T, Koninckx E, Carmeliet J & Hespel P, *CFD Simulations of the Aerodynamic Drag of Two Drafting Cyclists*, Computers and Fluid, Volume 71, Pages 435-445, 2013
- [20] Blocken B, van Druenen T, Toparlar Y, Malizia F, Mannion P, Andrienne T, Marchal T, Maas GJ and Diepens J, *Aerodynamic drag in cycling pelotons : New insights by CFD simulation and wind tunnel testing*, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Volume 179, Pages 319-337, 2018
- [21] Gan E, Fong M, and Ng YL, *CFD Analysis of Slipstreaming and Side Drafting Techniques Concerning Aerodynamic Drag in NASCAR Racing*, CFD Letters, Volume 12, 2020.
- [22] Dominy RG, *The influence of slipstreaming on the performance of a Grand Prix racing car*, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D : Journal of Automobile Engineering, Volume 204, Number 1, Pages 35-40, 1990.
- [23] <https://www.nike.com/running/breaking2/>
- [24] <https://www.ineos159challenge.com/>
- [25] Marro M, Leckert J, Rollier E, Salizzoni P, Bailly C. *Wind tunnel evaluation of novel drafting formations for an elite marathon runner* Proc. R. Soc. A 479 : 20220836. 2023 <https://doi.org/10.1098/rspa.2022.0836>
- [26] Chatard JC & Wilson B, *Drafting Distance in swimming*, Med. Sci. Sports Exerc., Volume 35, Pages 1176–1181, 2003.
- [27] Coast JR & Piatt CA, *Heart Rate and Lactate Responses to Swimming in Various Drafting positions*, Journal of Swimming Research, Volume 15, Pages 27-30, 2001.
- [28] Janssen M, Wilson BD, and Toussaint HM, *Effects of Drafting on Hydrodynamic and Metabolic Responses in Front Crawl Swimming*, Med. Sci. Sports Exerc., Volume 41, Pages 837–843, 2009.

- [29] Silva AJ, Rouboa A, Moreira A, Reis VM, Alves F, Vilas-Boas JP & Marinho DA, *Analysis of drafting effects in swimming using computational fluid dynamics*, Journal of Sports Science and Medicine, Volume 7, Pages 60-66, 2008
- [30] Yuan ZM, Li M, Ji CY, Li L, Jia L, Incecik A, *Steady hydrodynamic interaction between human swimmers*, Journal of Applied Biomechanics, Volume 25, Pages 253-257, 2009
- [31] Westerweel J, Aslan K, Pennings P, Yilmaz B, *Advantage of a lead swimmer in drafting*, 2016, arXiv :1610.10082v1
- [32] Roshan R, Sarkardeh H and Zarrati AR *Vortex study on hydraulic model of Godar-e-Landar dam and hydropower plant*. Proceedings of the 5th International Conference on Computational and Experimental Methods in Multiphase and Complex Flow, New Forest, UK (Mammoli AA and Brebbia CA (eds)), 2009 WIT Press, Southampton, UK, vol. 63, pp. 217–225
- [33] MIT, Marine Hydrodynamics, *Water waves*, <https://web.mit.edu/13.021/demos/lectures/lecture19.pdf>
- [34] <https://ubertone.com/products-ub-flow-uvp.html>
- [35] Nezu, I. and Rodi, W. *Experimental study on secondary currents in open channel flow*, Proc. 21st Congress of IAHR, Melbourne, 1995, volume 2, pages 115-119.
- [36] Phyling, Drahi-X-Novation Center, <https://www.phyling.fr/>
- [37] <https://www.freecad.org/index.php?lang=fr>
- [38] Prétot C, *Etude physique des courses de natation*, <https://pastel.hal.science/tel-04010340>, Ecole des Ponts ParisTech, Dec. 2022
- [39] OpenFoam, 2022, <https://openfoam.org/>
- [40] OpenFoam, UserGuide v2112, *k-omega Shear Stress Transport (SST)*, <https://www.openfoam.com/documentation/guides/latest/doc/guide-turbulence-ras-k-omega-sst.html>
- [41] https://www.youtube.com/watch?v=P-MXaLtc2mU&ab_channel=WorldAquatics
- [42] Carmigniani R, Seifert L, Chollet D, Clanet C. 2020 *Coordination changes in front-crawl swimming*. Proc. R. Soc. A 476 : 20200071. <http://dx.doi.org/10.1098/rspa.2020.0071>
- [43] C. Caspersen, P. A. Berthelsen, M. Eik, C. Pákozdi and P.-L. Kjendlie *Added mass in human swimmers : Age and gender differences*, Journal of Biomechanics, Vol. 43, n°12, pages 2369-2373, 2010, doi : <https://doi.org/10.1016/j.jbiomech.2010.04.022>
- [44] Eiter, T. & Mannila, H. *Computing discrete Fréchet distance*, 1994, Technical Report CD-TR 94/64, Christian Doppler Laboratory for Expert
- [45] https://www.lemonde.fr/sport/article/2023/07/28/paris-2024-des-epreuves-de-natation-marathon-et-de-triathlon-pourront-bien-avoir-lieu-dans-la-seine-en-aout_6183723_3242.html
- [46] <https://www.opentelemac.org/>
- [47] Team Commands, Inria Saclay, BOCOP : an open source toolbox for optimal control, <http://bocop.org>, 2017
- [48] JB Keller, *Optimal velocity in a race*, The American Mathematical Monthly, 81 :474–480, 1974
- [49] H. Behncke, B. Brosowski *Optimization models for the force and energy in competitive sports*, Volume 9, Issue 1, Pages 298-311, 1987, <https://doi.org/10.1002/mma.1670090123>
- [50] F. Peronnet, D. Massicotte, *Table of nonprotein respiratory quotient : an update.*, Can J Sport Sci, 1991, vol. 16, no 1, p. 23-29.
- [51] <http://www.culturestaps.com/app/download/13035112/La+consommation+maximale+d%27oxyg%C3%A8ne.pdf>
- [52] W. Woodside, *The optimal strategy for running a race (a mathematical model for world records from 50 m to 275 km)*, Mathematical and computer modelling, 1991, vol. 15, no 10, p. 1-12.
- [53] R.H. Morton, *A three component model of human bioenergetics*, Journal of Mathematical Biology, 1986, vol. 24, issue 2, p. 451-466, <https://doi.org/10.1007/BF01236892>