



Ecole Doctorale Sciences Technologies Santé

THESE

En vue d'obtenir le grade de

DOCTEUR DE L'UNIVERSITE DE REIMS CHAMPAGNE-ARDENNE

Spécialité : Mécanique des Fluides & Biomécanique

Présentée par

Hanane ZAÏDI

CONTRIBUTION A L'ETUDE DES ECOULEMENTS TOURBILLONNAIRES EN BIOMECHANIQUE DU GESTE SPORTIF

Directeurs de thèse: G. POLIDORI
R. TAÏAR

*Soutenance publique le 08/07/2008, devant la commission d'Examen
-JURY-*

J. MOUREH	Chargé de recherche HDR, CEMAGREF, Antony	Rapporteur
M. SOULI	Professeur, Université de Lille I	Rapporteur
G. LOUIS	Professeur, Université Paris V	Président
G. PINEAU	Maître de conférences, Université de Poitiers	Examineur
G. POLIDORI	Professeur, Université de Reims Champagne Ardenne	Directeur de thèse
R. TAÏAR	Professeur, Université de Reims Champagne Ardenne	Directeur de thèse
S. FOHANNO	Maître de conférences HDR, Université de Reims Champagne Ardenne	Examineur

Remerciements

Ce travail de thèse a été effectué au Laboratoire de Thermomécanique (LTM) et au Laboratoire d'Analyse des Contraintes Mécaniques (LACM) à l'université de Reims Champagne-Ardenne. Il n'aurait pu voir le jour sans l'aide de plusieurs personnes.

En premier lieu, je tiens à remercier très chaleureusement mes directeurs de thèse Guillaume POLIDORI et Redha TAÏAR, Professeurs à l'université de Reims Champagne Ardenne, pour m'avoir fait travailler sur un sujet de recherche passionnant qui concerne l'amélioration de la performance hydrodynamique des nageurs de haut niveau. Je les remercie aussi de m'avoir accordé leur confiance tout au long de ces années de thèse. Ils m'ont donné la force d'aller jusqu'au bout, ma reconnaissance est sans limite et j'espère avoir comblé leurs attentes. Je les en remercie vivement.

Je tiens à remercier les rapporteurs Messieurs M. SOULI Professeur à l'université de Lille 1 et J. MOUREH, Chargé de recherche et HDR au CEMAGREF d'Antony, d'avoir accepté d'examiner ce travail et de prendre part au jury. Je remercie également Monsieur Gérard LOUIS, Professeur à l'université Paris V de m'avoir fait l'honneur de présider mon jury de thèse et monsieur Gérard PINEAU, maître de conférence à l'université de Poitiers d'avoir accepté d'examiner ce travail.

Je souhaite également adresser mes remerciements à Stéphane FOHANNO, Maître de Conférences HDR à l'université de Reims Champagne-Ardenne pour avoir suivi ce travail de thèse, surtout pendant le terrible moment de la rédaction et de la correction. Je le remercie aussi pour ses remarques précieuses, ses conseils et sa méthode de travail. Je profite de l'occasion pour remercier son épouse Véronique, sa gentillesse est sans limite.

Je tiens à remercier également Fabien BEAUMONT, technicien au laboratoire de thermomécanique et Catalin POPA, Maître de Conférences à l'université de Reims Champagne-Ardenne, pour leur aide à résoudre toutes les problèmes informatiques.

Les expériences de visualisation réalisées à l'Institut National de Sports et d'Education Physique **INSEP** en collaboration avec la Fédération Française de Natation **FFN** n'auraient probablement pas été réalisées sans l'aide de Nicolas HOUEL Ingénieur à l'INSEP et Régis MARION technicien informatique à l'UFR STAPS de Reims, qui ont travaillé efficacement pour la réussite des expériences. Ces séjours au sein de la **FFN** ont été très enrichissants en tous points de vue.

Je remercie le Professeur Ton Hoang MAI, directeur du Laboratoire de Thermomécanique, de m'avoir accueilli dans le laboratoire et d'avoir mis à disposition le matériel nécessaire pour le bon déroulement de ce travail de thèse. À l'occasion, je tiens à exprimer ma reconnaissance aux membres du laboratoire, en particulier au Professeur Jacques PADET, ex Directeur de l'UTAP, et son épouse Colette PADET.

Je remercie également monsieur Serge ZIMMERMANN directeur de l'UFR STAPS de Reims et monsieur Thierry LETELLIER de m'avoir donné la joie d'enseigner pendant deux ans en tant qu'ATER à l'UFR STAPS de Reims. Je remercie chaleureusement tous les membres de l'UFR STAPS de REIMS enseignants et administrateurs.

Je remercie Monsieur Vincent FRERBEAU, ingénieur dans la société RapidForm, pour l'aide précieuse qu'il m'a apportée pour la construction du modèle géométrique 3D de la nageuse, une étape très importante pour la réalisation de ce travail.

Je tiens à remercier Monsieur Anthony MIRANDE, Responsable Marché Enseignement et Recherche de Fluent, de nous avoir aidés à dépasser toutes les difficultés rencontrées lors du maillage du nageur et de répondre à toutes les questions que nous nous sommes posées lors de l'utilisation de Fluent.

Mon activité d'enseignement pendant quatre ans, en tant que vacataire puis en tant qu'Attaché Temporaire d'Enseignement et de Recherche **ATER**, a été une expérience très riche grâce à mes tuteurs et collègues de l'IUT, UFR STAPS et UFR Science de Reims.

Le travail de thèse a été réalisé dans le cadre très convivial. Je remercie toutes les personnes qui ont participé de près ou de loin à la réussite de ce travail surtout Idriss et Karen et ceux qui m'ont entourée pendant ces quelques années. Je veux remercier tous les thésards et tout les amis qui m'ont apporté leur soutien tout au long de ce travail, pour les conversations amicales que nous avons eues.

Je profite de l'occasion pour remercier chaleureusement Marie l'épouse de Guillaume pour son accueil chaleureux, merci pour le repas et les gâteaux délicieux. Je remercie également les fillettes, Manu et Elisa, pour les beaux morceaux musicaux de piano, bravo.

*Pour ma part, je garde un très bon souvenir
Et encore mille mercis*

♥ *A mes très chers parents ZAHIA et SAAD* ♥
A mes frères : Zoheir, Tarek, Mouloud et Mouhamed.
♥ *A Ma petite soeur Iman* ♥

Résumé

Ce travail concerne l'étude des écoulements hydrodynamiques turbulents en natation humaine pendant les phases submergées de coulée et de retour après un virage. Son objectif est de tester différentes positions de nage afin d'améliorer la performance hydrodynamique des nageurs de haut niveau. Plus précisément, l'effet de la position de la tête sur la résistance à l'avancement rencontrée par les nageurs a été analysé de manière fine. Des simulations numériques par CFD ont été effectuées dans les cas 2D et 3D. Trois positions de la tête du nageur ont été étudiées dans le cas 2D : relevée, alignée et baissée par rapport à l'axe supposé rectiligne du corps du nageur. Les résultats montrent qu'une position "alignée" offre moins de résistance par comparaison aux positions "relevée" et "baissée". L'effet du choix du modèle de turbulence a aussi été étudié dans les cas 2D et 3D. La comparaison des résultats numériques obtenus avec ceux issus d'expériences réalisées à l'INSEP avec des nageurs de l'équipe de France de natation montre que le modèle de turbulence $k-\omega$ standard est le modèle étudié le mieux adapté pour retrouver les structures tourbillonnaires se développant autour du corps du nageur et pour prédire les forces de résistances opposées par le fluide. Ce travail est complété par une étude thermique. Une partie expérimentale, visant à mettre en parallèle la dépense énergétique des nageurs et leur température cutanée après effort en utilisant la thermographie infrarouge, a permis de montrer des variations significatives de la distribution de la température cutanée selon le type de nage. Enfin, une étude numérique de l'influence du gradient thermique entre l'eau du bassin et de la température cutanée du nageur montre qu'une diminution de l'ordre de 1,2% sur la traînée totale est possible en augmentant la température de l'eau de 20°C à 30°C.

Mots clés :

Natation, simulation numérique, CFD, Nageur, Structures tourbillonnaires, Modèle de turbulence, Traînée, Thermographie Infrarouge, Température cutanée.

Abstract

This work focusses on the study of the turbulent hydrodynamic flows in human swimming during the submerged phases: after the start dive and after a turn. Its objective is to test various swimming positions in order to improve the hydrodynamic performance of high-level swimmers. More precisely, the study of the effect of the head position on the resisting drag force met by the swimmers was analyzed in a fine way. 2D and 3D CFD simulations were carried out. Three positions of the swimmer's head were studied in the 2D case: raised, aligned and lowered with respect to the presumed rectilinear axis of the swimmer's body. The results show that a position of the head "aligned" offers less resistance by comparison to the "raised" and "lowered" positions. The effect of the choice of the turbulence model was also studied in the 2D and 3D cases. The comparison of the numerical results obtained with results from experiments carried out at INSEP with high-level swimmers of the French swimming team shows that the standard $k-\omega$ turbulence model is the most appropriate tested model to find the vortical structures which develop around the body of the swimmer and to predict the drag forces opposed by the fluid. This work is supplemented by a thermal study. An experimental part, aiming at drawing a parallel between the energy expenditure of the swimmers and their cutaneous temperature after effort by using infrared thermography, made it possible to show significant variations of the distribution of the cutaneous temperature according to the swimming style. Finally, a numerical study of the influence of the thermal gradient between the water of the pool and the cutaneous temperature of the swimmer shows that a reduction of about 1.2 % on the total drag force is possible by increasing the temperature of the water from 20°C to 30°C .

Key words:

Swimming, Numerical simulation, CFD, Swimmer, Vortical structures, Turbulence model, Drag, Infrared thermography, Skin temperature.

Table des matières

Résumé	i
Abstract	ii
Table des matières	iii
Table des figures	vi
Liste des tableaux	x
Nomenclature	xi
 INTRODUCTION.....	 1
 Chapitre I : Synthèse bibliographique	 4
I.1. Introduction	5
I.2. La résistance totale	5
I.3. Composantes de la force de résistance	8
I.3.1. Traînée visqueuse	8
I.3.2. Traînée de forme	11
I.3.3. Traînée de vague	15
I.3.4. Contribution des différentes formes de traînée sur la traînée totale.....	18
I.4. Mesure de la résistance du nageur.....	19
I.4.1. Résistance passive	19
I.4.1.a. Mesure de la résistance passive.....	19
I.4.1.b. Quelques résultats	20
I.4.1.c. Relation entre la résistance passive et la morphologie humaine.....	29
I.4.1.d. Limites.....	29
I.4.2. Résistance active	30
I.4.2.a. Estimation de la résistance active par mesure du coût énergétique	30
I.4.2.b. Méthode de Schleihauf.....	31
I.4.2.c. Utilisation du système MAD.....	32
I.4.2.d. Méthode de Komolgorov et Duplisheva	33
I.5. Utilisation de la mécanique des fluides numérique en natation	34
I.6. Conclusion.....	43
 Chapitre II : Matériels & Méthodes	 45
II.1. Modélisation géométrique du modèle du nageur	46
II.1.1. Utilisation du scanner et du logiciel RapidForm [®]	47
II.1.1.a. Le scanner	47
II.1.1.b. Utilisation du logiciel RapidForm [®]	47
II.1.2. Utilisation du logiciel CATIA V5 [®] et des photos numériques	52
II.1.2.a. Présentation du logiciel CATIA V5 [®]	52
II.1.2.b. Construction du modèle 2D.....	52
II.1.2.c. Construction du modèle 3D.....	53
II.2. Maillage du domaine fluide autour du nageur	55
II.2.1. Présentation du logiciel Gambit [®]	55
II.2.2. Procédure sous Gambit [®]	56
II.2.2.a. Importation du contour du nageur dans Gambit [®]	56
II.2.2.b. Création de la géométrie finale	58
II.2.2.c. Maillage.....	58
II.2.2.d. Qualité de maillage.....	63
II.2.2.e. Choix des conditions aux limites	64

II.3.	Formulation mathématique du problème	65
II.3.1.	Rappel des équations instantanées	65
II.3.2.	Les équations de conservation.....	67
II.3.3.	Les modèles de turbulence	67
II.3.4.	Modèles de turbulence du premier ordre.....	68
II.3.4.a.	Le modèle $k-\varepsilon$ standard	68
II.3.4.b.	Le modèle RNG $k-\varepsilon$	70
II.3.4.c.	Le modèle Réalisable $k-\varepsilon$	71
II.3.4.d.	Le modèle $k-\omega$ standard.....	71
II.3.4.e.	Le modèle Spalart -Allmaras.....	72
II.3.5.	Traitement de l'écoulement près de la paroi	73
II.3.5.a.	Région interne	74
II.3.5.b.	Région externe.....	75
II.4.	Simulation numérique de l'écoulement autour du nageur par Fluent [®]	75
II.4.1.	Présentation du logiciel Fluent [®]	75
II.4.2.	Description générale de la méthode des volumes finis	76
II.4.3.	Avantages de la méthode des volumes finis.....	77
II.4.4.	Les étapes de résolution par la méthode des volumes finis.....	77
II.4.5.	Discrétisation.....	77
II.4.5.a.	Principe de discrétisation de l'équation de transport	77
II.4.5.b.	Discrétisation du terme convectif.....	79
II.4.5.c.	Linéarisation des équations discrétisées.....	79
II.4.6.	Etapes de résolution	80
II.4.6.a.	Discrétisation de l'équation de quantité de mouvement	80
II.4.6.b.	Discrétisation de l'équation de continuité.....	81
II.4.7.	Facteurs de sous-relaxation	82
II.4.8.	Critère de convergence.....	83
II.5.	Conclusion.....	84
CHAPITRE III : CHOIX ET VALIDATION DE LA PROCEDURE NUMERIQUE.....		85
III.1.	Procédure de simulation numérique de l'écoulement autour du nageur	86
III.1.1.	Définition de l'échelle	86
III.1.2.	Choix de la formulation du solveur.....	86
III.1.3.	Définition du fluide et de ses propriétés.....	87
III.1.4.	Spécification des conditions aux limites	87
III.1.5.	Choix de la loi de paroi	88
III.1.6.	Choix du schéma de discrétisation :	88
III.1.7.	Choix de la méthode d'interpolation de la pression.....	89
III.1.8.	Choix de l'algorithme de couplage pression-vitesse.....	89
III.1.9.	Initialisation du calcul	90
III.1.10.	Convergence du calcul	90
III.1.11.	Traitement du maillage près de paroi.....	91
III.1.12.	Adaptation du maillage autour de la géométrie du nageur.....	91
III.2.	Validation de la procédure de simulation numérique.....	92
III.2.1.	Domaine de simulation numérique	93
III.2.2.	Maillage du domaine fluide autour du profil NACA0012	93
III.2.3.	Validation qualitative	95
III.2.4.	Validation quantitative	97
III.3.	Etude d'influence des paramètres du calcul numérique.....	98
III.3.1.	Influence de la taille du domaine fluide autour du nageur.....	98

III.3.1.a.	Choix de la longueur de la sortie.....	98
III.3.1.b.	Choix de la longueur d'entrée	99
III.3.2.	Etude d'indépendance du maillage	100
III.3.3.	Influence du critère de convergence.....	101
III.4.	Conclusion.....	102
Chapitre IV :	RESULTATS & DISCUSSIONS	103
IV.1.	Résultats 2D avec le modèle de turbulence $k-\varepsilon$ standard	104
IV.1.1.	Profils de vitesse.....	104
IV.1.2.	Champs de vitesse	113
IV.1.3.	Forces de traînée pour l'étude 2D	115
IV.1.4.	Coefficient de traînée pour l'étude 2D.....	118
IV.1.5.	Lignes de courant pour l'étude 2D.....	120
IV.2.	Influence du modèle de turbulence	122
IV.2.1.	Etude expérimentale à l'INSEP.....	122
IV.2.1.a.	Introduction	122
IV.2.1.b.	Piscine de l'INSEP	122
IV.2.1.c.	Matériels utilisés	124
IV.2.1.d.	Position du matériel dans la piscine	125
IV.2.1.e.	Technique des fils utilisée pour la visualisation des écoulements	125
IV.2.1.f.	Résultats et discussion.....	128
IV.2.2.	Confrontation des résultats numériques et expérimentaux	129
IV.2.2.a.	Résultats à proximité de la tête	131
IV.2.2.b.	Résultats autour du dos et des fesses.....	131
IV.2.3.	Comparaison entre les résultats des modèle $k-\varepsilon$ et $k-\omega$ standard	133
IV.3.	Etude de l'écoulement autour du nageur 3D	134
IV.3.1.	Introduction	134
IV.3.2.	Construction de la géométrie et le maillage du nageur	134
IV.3.3.	Génération du maillage du domaine fluide autour du nageur	136
IV.3.4.	Conditions aux limites.....	139
IV.3.5.	Adaptation du maillage 3D	139
IV.3.6.	Résultats et discussions	140
IV.3.6.a.	Validation du code de calcul	140
IV.3.6.b.	La force de traînée.....	141
IV.3.6.c.	Champs de pression statique et des contraintes	142
IV.3.6.d.	Structures tourbillonnaires	145
IV.3.7.	Comparaison 2D-3D-expérience.....	148
IV.4.	Conclusion.....	148
Chapitre V :	ETUDE THERMIQUE.....	150
V.1.	Etude expérimentale	151
V.1.1.	Matériels et méthodes.....	151
V.1.1.a.	Le sujet	152
V.1.1.b.	La décomposition corporelle	152
V.1.1.c.	La caméra thermique	153
V.1.1.d.	Le protocole.....	153
V.1.1.e.	Utilisation du logiciel ThermaCAMResearcher99.....	154
V.1.2.	Résultats et discussion.....	154
V.1.2.a.	Température de référence.....	154
V.1.2.b.	Température après l'effort : influence de style de nage	155

V.1.2.c. Température cutanée globale	159
V.2. Etude numérique	160
V.2.1. Introduction	160
V.2.2. Simulation numérique	161
V.2.2.a. Géométrie et maillage	161
V.2.2.b. Conditions aux limites.....	162
V.2.3. Résultats et discussion.....	162
V.3. Conclusion.....	166
 CONCLUSION GENERALE	 167
 REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	 172

Table des figures

CHAPITRE I

Figure I- 1 : Longueur caractéristique L_c de nageur de niveau national	6
Figure I- 2 : Régions d'écoulement laminaire et turbulent en fonction du nombre du Reynolds d'après Clarys (1979).....	7
Figure I- 3 : Relation entre le coefficient de traînée et le nombre de Reynolds pour des nageurs de différents niveaux d'après Taiar et al. (2005).....	8
Figure I- 4 : Résistance de frottement selon la nature de la surface corporelle d'après Rushall et al. (1994).	9
Figure I- 5 : Effet du port de la combinaison sur la traînée totale d'après Van Manen et Rijken (1975).	10
Figure I- 6: Combinaison « La powerskin xtreme » d'Arena	11
Figure I- 7 : Allure de la relation linéaire entre la traînée de frottement et la vitesse de nage d'après Rushall et al. (1994).....	11
Figure I- 8 : Traînée de pression causée par la différence de pression d'après Barthels (1997).....	12
Figure I- 9 : Traînée de forme s'opposant à l'avancement du nageur d'après Barthels (1977)	12
Figure I- 10 : Comparaison entre une bonne et une mauvaise position hydrodynamique d'après Costill et al (1992).....	13
Figure I- 11 : Comparaison entre deux positions correspondent à deux mouvements latéraux des membres inférieurs du nageur d'après Costill et al (1992).....	14
Figure I- 12 : Allure de la relation entre la traînée de pression et la vitesse de nage d'après Rushall et al. (1994).....	15
Figure I- 13 : Résistance de vague rencontrée lors du déplacement du nageur à la surface de bassin; λ est la longueur d'onde d'après Toussaint et Truijens (2005.).....	15
Figure I- 14: Allure de la relation entre la traînée de vague et la vitesse de nage d'après Rushall et al. (1994). 16	
Figure I- 15 : Traînée de vague en fonction du nombre de Froude d'après Larsen et al. (1981).	17
Figure I- 16 : Résistance de vague en fonction de la profondeur d'immersion de l'objet d'après Herthel (1966).	17
Figure I- 17 : Appareillage pour le calcul de la résistance passive par la méthode de remorquage cité par Taiar (2000).	20
Figure I- 18 : Technique de remorquage utilisée pour mesurer la résistance passive du nageur d'après Lyttle et al. (2000).	20
Figure I- 19 : Résistance passive pour une coulée ventrale et une coulée latérale d'après Clarys & Jiskoot (1975).....	22
Figure I- 20 : Comparaison entre les résultats Counsilman et Clarys & Jiskoot d'après Clarys et Jiskoot (1975).	22
Figure I- 21 : Résistance rencontrée en fonction de la vitesse pour les différents auteurs dans le cas de position ventrale d'après Clarys et Jiskoot (1975).	23
Figure I- 22 : Evolution de la résistance passive en fonction de la vitesse au niveau de la surface et à 60cm profondeur d'après Lyttle et al. (1999).....	25
Figure I- 23 : Mannequin remorqué au niveau de la surface et en profondeur d'après Vennell et al. (2006).	25
Figure I- 24 : Variation de la résistance passive en fonction de la vitesse au niveau de la surface et à 60cm de profondeur pour des températures de 18°C et 24°C d'après Jiskoot et Clarys (1975).....	26
Figure I- 25 a) ; b) ; c): Profondeur de glissement optimale. Distance de glissement, temps et vitesse résultant d'après Lyttle (1999).	28
Figure I- 26 : Appareillage permettant au nageur de se déplacer contre ou avec l'aide de charges supportées par un chariot poussé à la même vitesse que celle du nageur. Di Prampero et al. (1974).	30
Figure I- 27 : Augmentation linéaire des VO_2 en fonction des charges à tracter (DA) chez un nageur se déplaçant à vitesse constante. Par extrapolation, il est possible d'obtenir la valeur de la traînée active ici : 4,3kg. Di Prampero et al. (1974).	30
Figure I- 28 : Etude en soufflerie réalisée par Schleihauf (1979)	31
Figure I- 29 : Forces exercées par la main au cours d'un cycle de nage en papillon d'après Schleihauf (1979) 31	
Figure I- 30 : Vue d'ensemble du MAD System d'après Hollander et al. (1986).	32
Figure I- 31 : Géométrie et maillage de la main et de l'avant-bras 'après Bixler & Riewald (2002).....	35
Figure I- 32 : Angle d'attaque entre l'axe x et la direction de l'écoulement d'après Bixler & Riewald (2002)...	35
Figure I- 33 : Décollement de l'écoulement autour de la main d'après Bixler & Riewald (2002).....	36
Figure I- 34 : Dimensions du modèle d'après Rouboa et al. (2006).....	36
Figure I- 35 : Orientations étudiées de la main et de l'avant-bras d'après Rouboa et al. (2006).....	36

Figure I- 36 : Domaine fluide autour du modèle étudié; conditions aux limites d'après Rouboa et al. (2006) ...	37
Figure I- 37 : Cheminement d'un point fixe sur la main du nageur d'après Yohei & Takanori (2002)	38
Figure I- 38 : Maillage surfacique de la main et volumique du domaine fluide autour de la main d'après Yohei & Takanori (2002)	38
Figure I- 39 : Géométrie et maillage du domaine fluide utilisé d'après Yohei & Takanori (2002).....	38
Figure I- 40: Dispositif expérimental utilisé pour mesurer les forces qui agissent sur le bras entier d'après Gardano & Dabnichki (2006).....	39
Figure I- 41 : Position adoptée par le nageur pendant le scanner d'après Lyttle & Keys (2004).....	40
Figure I- 42 : Modèle du nageur réalisé à partir d'un scanner 3D d'après Lyttle & Keys (2004)	40
Figure I- 43 a), b) : Mouvements de coups de pieds testés	41
Figure I- 44 : Géométrie du nageur étudiée en phase de coulée d'après Bixler et al. (2007).	42
Figure I- 45 : Maillages de la tête, des mains et des pieds du nageur construits à base de cellules triangulaires d'après Bixler et al. (2007).	42
Figure I- 46 : Evolution de la force de traînée en fonction de la vitesse avec et sans combinaison de natation d'après Bixler et al. (2007)	43

CHAPITRE II

Figure II- 1 : Trois positions de la tête pendant la phase de coulée et de retour après un virage.....	46
Figure II- 2: Scanner 3D KONICA MINOLTA utilisé pour la construction du modèle du nageur.	47
Figure II- 3: Nuage de points récupérés à partir du scanner et utilisés lors de la construction de la géométrie.	48
Figure II- 4 : Quelques problèmes rencontrés lors de la construction de la géométrie du nageur	48
Figure II- 5 : Vue de face et du dos du nageur avant et après la construction géométrique	50
Figure II- 6 : Vue de face et de dos de la nageuse avant et après le scanner	51
Figure II- 7 : Photo numérique de la nageuse en position de coulée ventrale; vue de profil	52
Figure II- 8: Série de points et une partie de la courbe utilisée pour construire la géométrie bidimensionnelle.	53
Figure II- 9 : Exemple du contour de la nageuse produit par le logiciel CATIA V5 [®]	53
Figure II- 10 : Exemple de construction de la géométrie 3D.....	54
Figure II- 11 : Quelques parties du corps construites avec CATIA V5 [®]	54
Figure II- 12 : Modèle du nageur construit par le logiciel CATIA V5 [®]	55
Figure II- 13 : Représentation graphique d'un maillage (a) structuré et (b) non structuré construit par le logiciel Gambit [®] en 2D	56
Figure II- 14 : Variation de la position de la tête pour les trois postures étudiées	56
Figure II- 15 : Schématisation des trois positions de la tête retenues pour l'étude.....	57
Figure II- 16 : Détail du domaine fluide utilisé lors de la simulation numérique.	58
Figure II- 17 : Diamètre de la nageuse.....	58
Figure II- 18 : Maillage du domaine de fluide avec des densités de nœuds plus élevées à proximité de la surface du nageur.	60
Figure II- 19 : Détails du maillage du domaine fluide en amont et autour du nageur.	61
Figure II- 20 : Détails du maillage en aval et autour de la tête de la nageuse.....	62
Figure II- 21 : Deux éléments pouvant être présents dans un maillage.....	63
Figure II- 22 : Décomposition de la région proche de la paroi.....	73
Figure II- 23 : Les formes de cellules traitées par le logiciel Fluent [®] en bidimensionnel et tridimensionnel.	76
Figure II- 24: Exemple de volume de contrôle utilisé pour la discrétisation de l'équation de transport d'un scalaire.....	78

CHAPITRE III

Figure III- 1 : Dimension du domaine fluide	86
Figure III- 2 : Conditions aux limites imposées.....	88
Figure III- 3 : Convergence du calcul dans le cas tridimensionnel	90
Figure III- 4: Distance y^+ entre la paroi et le centre de la première cellule du maillage	91
Figure III- 5 : Exemple d'adaptation du maillage près de la tête, diminution de la taille de la maille après adaptation	92
Figure III- 6 : Valeurs de y^+ près de la surface de la nageuse	92
Figure III- 7 : Allure du profil NACA0012 utilisé dans les simulations	93
Figure III- 8 : Dimensions de domaine fluide autour du profil de NACA0012.....	93

Figure III- 9 : Maillage du domaine fluide autour du NACA0012	94
Figure III- 10 : Agrandissement du maillage près de la surface du NACA0012	94
Figure III- 11 : Comparaison des structures tourbillonnaires autour de NACA0012	95
Figure III- 12 : Comparaison des structures tourbillonnaires autour de NACA0012	96
Figure III- 13: Axe sur lequel le profil de vitesse est tracé.....	97
Figure III- 14 : Profils de vitesse adimensionnelle axiale	97
Figure III- 15 : Géométrie choisie pour le test	98
Figure III- 16 : Coefficient de traînée en fonction de la longueur de la sortie	99
Figure III- 17 : Coefficient de traînée en fonction de la longueur de l'entrée.....	99
Figure III- 18 : Dimensions du domaine fluide créé autour du nageur et utilisé pour la simulation numérique	100
Figure III- 19 : Evolution du coefficient de traînée en fonction du nombre de mailles.	101
Figure III- 20 : Effet du critère de convergence sur le calcul numérique.....	102

CHAPITRE IV

Figure IV- 1: Système de coordonnées et plans P_i utilisés pour le contrôle de l'écoulement.	105
Figure IV- 2: Profils de la vitesse longitudinale pour les trois positions de la tête sur le plan P_1 situé à $x=2,5m$ par rapport à l'entrée du domaine fluide.....	106
Figure IV- 3 : Profils de vitesse longitudinale au niveau des plans P_2 et P_3 situés juste en amont de la tête du nageur	107
Figure IV- 4: Profils de vitesse longitudinale au niveau des plans 4 et 5 situés derrière la tête et au niveau du bassin du nageur.....	108
Figure IV- 5 : Profils de vitesse longitudinale situés au niveau des plans 6 et 7 situés derrière les fesses et l'extrémité du corps	109
Figure IV- 6 : Profils de vitesse longitudinale dans la zone de sillage au niveau des plans 8 et 9.....	110
Figure IV- 7: Profils de vitesse longitudinale au niveau des plans 10 et 11	111
Figure IV- 8 : Champs de vitesses pour les trois positions de la tête pour les vitesses 1,4m/s ; 2,2m/s ; 3,1m/s	114
Figure IV- 9 : Evolution de la traînée visqueuse et de la traînée de forme en fonction de la vitesse pour les trois positions de la tête.....	116
Figure IV- 10 : Evolution de la traînée totale en fonction de la vitesse pour les trois positions de la tête.....	117
Figure IV- 11 : Evolutions de la force de traînée visqueuse, de forme et totale en fonction de la vitesse lorsque la tête est alignée avec l'axe du corps (position2).	118
Figure IV- 12: Coefficient de traînée en fonction de la vitesse et de la position de la tête.....	119
Figure IV- 13 : Lignes de courant autour de la tête de la nageuse pour les trois positions étudiées.	120
Figure IV- 14 : Lignes de courant autour du nageur pour la position de la tête 2 et pour $U_0=2,2m/s$	121
Figure IV- 15 : Vue de l'extérieur de la piscine de l'INSEP utilisée durant l'étude expérimentale.	123
Figure IV- 16 : Vue de l'intérieur de la piscine utilisée durant les expériences.	123
Figure IV- 17 : Appareil photo et caméra numérique utilisés durant les expériences.....	124
Figure IV- 18 : Caisson IKELITE utilisé pour la caméra et l'appareil photo.	124
Figure IV- 19 : Caméra utilisée pour filmer le déplacement des nageurs et des nageuses en phase de coulée .	125
Figure IV- 20 : Fils fluorescents utilisés pour la visualisation des écoulements	126
Figure IV- 21: Combinaison avant et après l'équipement par les fils	126
Figure IV- 22 : Coulées ventrales et latérales effectuées par une nageuse et un nageur à la piscine de l'INSEP à Paris.....	127
Figure IV- 23 : Structures tourbillonnaires au niveau du dos et des fesses pour un sujet masculin ($V=2,2m/s$)	128
Figure IV- 24 : Points de décollement et de recollement des structures tourbillonnaires au niveau du dos et des fesses ($V=2,2m/s$).	128
Figure IV- 25 : Lignes de courant autour de la tête, du dos et des fesses en utilisant les différents modèles de turbulence ($V=2,2m/s$).	130
Figure IV- 26 : Zones tourbillonnaires au niveau de la tête obtenues par le modèle $k-\omega$ standard ($V=2,2m/s$)	131
Figure IV- 27 : Lignes de courant autour du nageur en utilisant le modèle $k-\epsilon$ standard ($V=2,2m/s$)	131
Figure IV- 28 : Structures tourbillonnaires au niveau des fesses captées par les modèles de turbulence RNG, Réalisable et Spalart-Allmaras ($V=2,2m/s$).....	132
Figure IV- 29 : Comparaisons des structures tourbillonnaires expérimentales et numériques en utilisant le modèle de turbulence $k-\omega$ standard ($V=2,2m/s$).....	132
Figure IV- 30: Evolution de la traînée totale en fonction de la vitesse pour les trois positions de la tête en utilisant les deux modèles de turbulence $k-\epsilon$ et $k-\omega$ standard.	133
Figure IV- 31 : Position de la tête choisie pour la simulation en 3D	134

Figure IV- 32 : Domaine fluide créé autour du nageur	135
Figure IV- 33 : Vue globale du maillage surfacique des frontières du domaine fluide autour du nageur	136
Figure IV- 34 : Maillage de l'entrée et de la sortie du domaine fluide.....	136
Figure IV- 35 : Maillage surfacique du nageur	137
Figure IV- 36 : Maillage progressif, raffiné près du corps et relâché loin du corps du nageur.....	138
Figure IV- 37 : Conditions aux limites imposées dans le cas 3D.....	139
Figure IV- 38 : Maillage surfacique du nageur avant et après adaptation	139
Figure IV- 39 : Comparaison entre nos résultats et ceux de Bixler et al. (2007) en fonction de la vitesse	140
Figure IV- 40 : Evolution des traînées visqueuse, de forme et totale en fonction de la vitesse	142
Figure IV- 41 : Pressions statiques en fonction de la vitesse (position 2)	143
Figure IV- 42 : Champ de contrainte en fonction de la vitesse (position 2)	144
Figure IV- 43 : Comparaison entre les structures tourbillonnaires au niveau du dos obtenues par voies expérimentale et numérique (V=2,2m/s).....	145
Figure IV- 44 : Comparaison entre les structures tourbillonnaires au niveau des fesses obtenues par voies expérimentale et numérique (V=2,2m/s).....	146
Figure IV- 45 : Lignes d'émission autour du corps du nageur colorées selon l'amplitude de la vitesse	147
Figure IV- 46 : Structure tourbillonnaire au niveau du cou près de la tête.....	147
Figure IV- 47 : Comparaison entre l'étude numérique en 2D, 3D et expérimentale de Bixler et al. (2007).	148

CHAPITRE V

Figure V- 1 : Définition des zones corporelles frontales (1) et dorsales (2).....	152
Figure V- 2 : Caméra thermique infrarouge utilisée pour mesurer les températures cutanées du nageur	153
Figure V- 3 : Thermographies des membres supérieurs et inférieurs lorsque le nageur est au repos.....	154
Figure V- 4 : Température de référence du nageur au repos	155
Figure V- 5 : Thermographies de la partie supérieure du corps pour différentes nages	156
Figure V- 6: Thermographies de la partie inférieure du corps pour différentes nages	157
Figure V- 7 : Influence de type de nage sur les écarts de température mesurés après effort et au repos.....	158
Figure V- 8 : Augmentation de la température corporelle moyenne après effort pour les quatre nages.....	160
Figure V- 9 : Amélioration de la traînée visqueuse d'après Polidori et al (2006).	161
Figure V- 10 : Géométrie choisie de la nageuse pour l'étude thermique correspond à la tête alignée avec l'axe du corps.....	162
Figure V- 11 : Evolution des deux traînées en fonction de la vitesse et pour deux températures d'eau de bassin (20°C et 30°C)- (a) traînée visqueuse (b) traînée de forme	163
Figure V- 12 : Evolution de la traînée totale en fonction de la vitesse pour les deux températures d'eau de bassin (20°C et 30°C)	164
Figure V- 13 : Evolution des traînées visqueuse, de forme et totale en fonction de la vitesse de nage pour une température 20°C.....	165
Figure V- 14 : Gain de traînée visqueuse en fonction de la vitesse pour les deux températures étudiées 20°C et 30°C.	166

Liste des tableaux

<i>Tableau I- 1 : Vitesse maximale pour différentes profondeurs d'après Larsen et al. (1981).....</i>	18
<i>Tableau II- 1: Qualité de maillage en fonction du nombre de Skewness (Gambit® 2.2 User's Guide)</i>	64
<i>Tableau II- 2 : Constantes du modèle de turbulence k-ϵ standard</i>	69
<i>Tableau II- 3: Valeurs par défaut des facteurs de sous relaxation</i>	83
<i>Tableau III- 1 : Caractéristiques des différents maillages testés</i>	100
<i>Tableau IV- 1 : Maître couple pour chaque position de la tête.</i>	119
<i>Tableau IV- 2 : Caractéristiques du maillage 3D avant et après l'adaptation</i>	140
<i>Tableau V- 1 : Données anthropométriques du sujet</i>	152
<i>Tableau V- 2 : Protocole mise en place</i>	154
<i>Tableau V- 3 : Différence de température maximale et minimale en fonction de la nage pour les membres supérieurs.....</i>	159
<i>Tableau V- 4 : Différence de température maximale et minimale en fonction de la nage pour les membres inférieurs.....</i>	159
<i>Tableau V- 5 : Température cutanée totale pour les quatre styles nage.....</i>	159
<i>Tableau V- 6 : Propriétés de l'eau pour les températures étudiées</i>	162

Nomenclature

	Symbole	Définition	Unités
Chapitre I	F_t	Force de traînée totale	(N)
	C_t	Coefficient de traînée	-
	S	Maître couple	(m^2)
	V	Vitesse du nageur	(m/s)
	Re	Nombre de Reynolds	-
	L_c	Longueur caractéristique du nageur	(m)
	F_f	Force de traînée de visqueuse (frottement)	(N)
	F_p	Force de traînée de forme (pression)	(N)
	F_v	Force de traînée de vague	(N)
	F_r	Nombre de Froude	-
	L	Longueur de l'objet	(m)
	g	Accélération de la gravité	(m/s^2)
	V_{max}	Vitesse maximale	(m/s)
	H	Profondeur de la surface vers le fond du bassin	(m)
	F_{obj}	Force de résistance rencontrée lorsque le nageur tracte un objet	(N)
	θ	Angle d'orientation de la main et l'avant bras	(°)
	Φ	Angle d'orientation de la main et l'avant bras	(°)
Chapitre II	D	Diamètre du nageur, diamètre hydraulique	(m)
	Q_{EAS}	Nombre de Skewness	-
	θ_{max}	Angle maximal	(°)
	θ_{min}	Angle minimal	(°)
	θ_{eq}	Angle caractéristique	(°)
	u_i	Composante de la vitesse instantanée dans la direction x_i	(m/s)
	x_i	Cordonnées cartésiennes ($i \in \{1,2,3\}$)	(m)
	p	Pression statique instantanée	(Pa)
	θ	Température instantanée	(°C)
	a	Diffusivité thermique	(m^2/s)
	h_s	Source volumique de chaleur	(W/m^3)
	\vec{F}_i	Force volumique	(N/m^3)
	ϕ	Variable instantanée généralisée (u, v, p, θ, \dots)	-
	Φ	Variable moyenne de ϕ	-
	ϕ'	Fluctuation de la variable instantanée ϕ	-
	t	Temps	(s)
	ΔT	La période	(s)
	u	Composante instantanée de la vitesse suivant x	(m/s)
	v	Composante instantanée de la vitesse suivant y	(m/s)
	w	Composante instantanée de la vitesse suivant z	(m/s)
p	Composante instantanée de la pression	(Pa)	

θ	Composante instantanée de la température	(°C)
U	Composante de la vitesse moyenne suivant x	(m/s)
V	Composante de la vitesse moyenne suivant y	(m/s)
W	Composante de la vitesse moyenne suivant z	(m/s)
P	Composante moyenne de la pression	(Pa)
Θ	Composante moyenne de la température	(°C)
u'	Composante de la vitesse fluctuante suivant x	(m/s)
v'	Composante de la vitesse fluctuante suivant y	(m/s)
w'	Composante de la vitesse fluctuante suivant z	(m/s)
p'	Composante fluctuante de la pression	(Pa)
θ'	Composante fluctuante de la température	(°C)
U_i	Composante de la vitesse moyenne selon la direction i	(m/s)
R_{ij}	Contraintes de Reynolds	(Pa)
H_s	Source moyenne volumique de chaleur	(W/m ³)
g_i	Accélération gravitationnelle dans la direction x_i	(m/s ²)
k	Energie cinétique turbulente	(m ² /s ²)
G_k	Production de l'énergie cinétique due au gradient de vitesse moyenne	(kg/m ³ s ³)
G_ω	Génération de ω	(kg/s ² m ³)
f_{v1}	Terme d'amortissement visqueux	-
U_τ	Vitesse de frottement	(m/s)
U^+	Vitesse adimensionnelle $U^+ = U / U_\tau$	-
K	Constante de Von Karman	-
y^+	Distance de la paroi	(m)
ϕ	Grandeur quelconque	-
S_ϕ	Terme source	-
V	Volume du volume de contrôle	(m ³)
$\Delta\vec{s}$	Vecteur de déplacement	-
N_{faces}	Nombre de faces qui entourent la cellule	-
\vec{A}_f	Vecteur d'aire de la surface	-
$\rho_f \vec{v}_f \cdot \vec{A}_f$	Flux massique à travers la face f	(kg/s)
a_p, a_{nb}	Coefficient de linéarisation	-
b	Constante	-
I	Matrice d'identité	-
p_f	Pression à la surface d'une cellule	(Pa)
A_f	L'aire de l'une de N faces qui entourent le volume de contrôle	(m ²)
J_f	Flux massique qui traverse la face f	(kg/s)
p^*	Champ de pression initial	(Pa)
P'	Correction de la pression	(Pa)
R	Résidus	-

Chapitre III	I	Intensité de la turbulence	(%)
	ϕ	Variable quelconque	-
	V_x	Vitesse au niveau de la surface du nageur selon l'axe x	(m/s)
	V_y	Vitesse au niveau de la surface du nageur selon l'axe y	(m/s)
	x	Abscisse	(m)
	y	Abscisse	(m)
	U_0	Vitesse initiale à l'entrée du domaine fluide selon l'axe x	(m/s)
	V_0	Vitesse initiale à l'entrée du domaine fluide selon l'axe y	(m/s)
	y^+	Distance entre la paroi et le centre de la première cellule	(m)
	C	La corde de NACA0012	(cm)
	U_∞	Vitesse à l'entrée du domaine fluide	(m/s)
	t^*	Temps adimensionnel	-
	D	Diamètre du nageur, diamètre hydraulique	(m)
	L_s	Longueur de la sortie	(m)
	L_e	Longueur d'entrée	(m)
Chapitre IV	P_i	Plans au niveau desquelles les profils de vitesse ont été tracés	-
	U_0	Vitesse à l'entrée du domaine fluide	(m/s)
	U/U_0	Vitesse adimensionnelle	-
	F_t	Force de traînée totale	(N)
	F_p	Force de traînée de pression (de forme)	(N)
	F_v	Force de traînée visqueuse (de frottement)	(N)
	\vec{a}	Vecteur selon lequel la force est calculée	-
	z	Abscisse	(m)
Chapitre V	T_i	Température moyenne de la surface i	(°C)
	$\bar{T}_{Globale}$	Température globale moyenne de toutes les surfaces i	(°C)
	S_i	Nombre de pixels de la surface i	-
	i	Nombre des surfaces	-
	ΔT	Différence de température	(°C)

Symboles grecs

Symbole	Définition	Unités
ρ	Masse volumique du fluide	(kg/m^3)
ν	Viscosité cinématique du fluide	(m^2/s)
μ	Viscosité dynamique du fluide	$(kg/m\ s)$
μ_t	Viscosité dynamique turbulente du fluide	$(kg/m\ s)$
μ_{eff}	Viscosité effective turbulente du fluide	$(kg/m\ s)$
τ_{ij}	Tenseur des contraintes	(Pa)
ε	Dissipation de l'énergie cinétique turbulente	(m^2/s^3)
ω	Fréquence caractéristique de la turbulence	$(1/s)$
$\sigma_k, \sigma_\varepsilon$	Nombres de Prandtl turbulents	-
$C_{1\varepsilon}, C_{2\varepsilon}, C_\mu$	Constantes du modèle de turbulence $k - \varepsilon$ standard	-
$\alpha_k, \alpha_\varepsilon$	Inverse du nombre de Prandtl effective pour k et ε	-
Γ_k, Γ_ω	Diffusivité effective de k et ω	$(kg/m\ s)$
α^*	Coefficient d'atténuation	-
δ_{ij}	Delta de Kronecker	-
τ_p	Contrainte pariétale	(Pa)
Γ_ϕ	Coefficient de diffusion de la grandeur ϕ	-
$\nabla\phi$	Gradient de ϕ	-
ϕ_f	Valeur de ϕ à la surface f	-
$(\nabla\phi)_n$	Valeur de $(\nabla\phi)$ perpendiculaire à la face f	-
$\tilde{\phi}_f$	Moyenne de ϕ des deux cellules adjacentes	-
$\bar{\tau}$	Tenseur des contraintes	(Pa)
α_p	Coefficient de sous relaxation pour la pression	-
ϕ_P, ϕ_P^*	Deux solutions pour deux itérations successives	-
α	Facteur de sous relaxation	-

INTRODUCTION

La popularité de la natation en fait un sport reconnu du milieu sportif, pratiqué partout dans le monde à tous les niveaux, par les hommes et par les femmes, des plus jeunes aux seniors. La natation de nos jours comporte quatre spécialités olympiques : le papillon, le dos, la brasse et le crawl. D'autres ne sont pas olympiques telles que la brasse indienne. La performance hydrodynamique en natation dépend fortement de la technique adoptée par les nageurs durant les différentes phases de la nage ainsi que de la résistance à l'avancement rencontrée lors de leurs déplacements dans le milieu fluide. L'amélioration de la performance nécessite une meilleure compréhension et maîtrise de la structure de l'écoulement fluide autour des nageurs et une bonne connaissance des forces de résistance rencontrées afin de les minimiser en adoptant des techniques bien spécifiques.

Lors du déplacement d'un nageur dans le milieu aquatique, le fluide oppose toujours une résistance à son avancement. Cette résistance se divise en deux catégories ; résistance passive et résistance active. La première est rencontrée en phase de coulée et de retour après un virage où le corps du nageur est assimilé à un objet solide non déformable. La seconde se rencontre durant le reste du cycle de nage où tous les segments du corps sont en mouvement.

Ce travail de thèse s'intéresse à la performance en natation sous deux aspects : l'un dynamique et l'autre thermique. L'aspect dynamique est abordé par l'étude de la structure de l'écoulement autour des nageurs de haut niveau ainsi que par le calcul de la force de résistance rencontrée. Deux phases très importantes du cycle de nage sont plus particulièrement étudiées : la coulée et le retour après un virage. Ces phases sont considérées comme un critère jugeant le niveau des nageurs ; la durée de ces deux phases augmentant avec le niveau des nageurs, elle est plus importante chez les nageurs de haut niveau. L'aspect dynamique a été abordé expérimentalement en utilisant la technique des fils dans le but de visualiser et capter les structures tourbillonnaires qui se développent au niveau du corps du nageur au cours de la phase de glissement et numériquement en utilisant la méthode de CFD. Cette dernière a été employée depuis ces dernières années par quelques équipes scientifiques [Bixler & Riewald (2002) ; Rouboua et al (2006), Gardano & Dabnichki (2006)]. Elle a été utilisée dans la majorité des cas pour étudier l'écoulement autour de la main et de l'avant bras d'un nageur. Les travaux numériques réalisés traitant l'écoulement autour du corps entier du nageur durant la phase de glissement sont très rares.

L'aspect thermique présenté a été abordé par deux études, l'une expérimentale et l'autre numérique. L'étude expérimentale a été réalisée à l'aide de la thermographie infrarouge dans le but d'étudier l'effet du style de la nage sur la distribution de la température cutanée. L'étude numérique a été effectuée en utilisant la méthode de simulation numérique CFD afin d'étudier l'effet du gradient thermique entre la peau d'un nageur et l'eau du bassin sur la force de résistance rencontrée.

La motivation principale de mon travail est de contribuer à l'amélioration de la performance hydrodynamique des nageurs de haut niveau durant la phase de coulée et de retour après un virage. On étudie plus particulièrement l'effet de la position de la tête sur les forces de résistances rencontrées afin de déterminer la position privilégiée de la tête offrant le moins de résistance. Trois positions de la tête sont étudiées ; la tête relevée, alignée et baissée par rapport à l'axe du corps. Le but est de prescrire aux entraîneurs des nouvelles techniques d'entraînement basées sur un raisonnement scientifique.

Le présent mémoire de thèse s'articule autour de cinq chapitres :

Le Chapitre 1 est consacré à une synthèse bibliographique destinée à faire le point sur les différents travaux effectués, expérimentaux ou numériques, dans le domaine de la natation humaine. Nous détaillons plus particulièrement les études portant sur la détermination des différentes composantes de la force de résistance à l'avancement rencontrées par les nageurs, ainsi que les techniques de minimisation de cette dernière.

Le Chapitre 2 est subdivisé en quatre parties. La première est consacrée à la présentation de la construction géométrique du modèle du nageur pour le cas bidimensionnel et tridimensionnel ainsi qu'à la génération du maillage nécessaire pour réaliser la simulation numérique. Ensuite, on présente en détail les formulations mathématiques utilisées pour modéliser l'écoulement fluide. Enfin, on décrit la méthode des volumes finis utilisée par le logiciel Fluent[®] pour résoudre les équations de conservation régissant l'écoulement fluide autour du nageur.

Le chapitre 3 est consacré en premier lieu à présenter la procédure de simulation numérique de l'écoulement autour du nageur. Ensuite, une validation de cette procédure est proposée en se basant sur le travail expérimental réalisé par Daube et al. (1985) relatif à l'étude numérique de l'écoulement autour d'un NACA0012 pour un angle d'incidence égal à 34° et un nombre de Reynolds égal à 1000. Enfin, on présente l'étude du choix de quelques paramètres, tels le choix des dimensions du domaine fluide construit autour du nageur et le choix du maillage, sur la fidélité des résultats numériques.

Le Chapitre 4 s'attache à présenter les principaux résultats numériques dans les cas bidimensionnel et tridimensionnel pendant la phase de coulée. La validation qualitative est effectuée en comparant les résultats numériques obtenus par Fluent[®] avec les résultats expérimentaux obtenus lors des expériences réalisées à l'INSEP avec les nageurs de l'équipe de France de natation. Le but de l'expérience de l'INSEP est de visualiser la structure de l'écoulement fluide autour des nageurs en utilisant la technique des fils de laine. La comparaison qualitative entre les résultats numériques et expérimentaux est basée sur les structures tourbillonnaires se développant au niveau du corps des nageurs. La validation quantitative est effectuée en comparant les forces de résistances obtenues numériquement en utilisant Fluent[®] avec ceux obtenus expérimentalement mesurées par Bixler et al. (2007).

Le Chapitre 5 s'intéresse à l'aspect thermique de la natation, il comporte deux parties. La première expérimentale, consiste à étudier l'effet de style de la nage sur la distribution de température corporelle en utilisant la thermographie infrarouge. La seconde numérique, consiste à utiliser la simulation numérique afin d'étudier l'effet du gradient thermique entre la peau du nageur et l'eau du bassin, sur la performance des nageurs.

Enfin, ce travail se termine par une conclusion tirée des différentes études effectuées, cette dernière incluant plusieurs perspectives.

Après avoir présenté la démarche globale, nous allons commencer par la synthèse bibliographique dans lequel nous exposons les travaux expérimentaux et numériques réalisés dans le domaine de la natation humaine.

CHAPITRE I : SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE

I.1. Introduction

La natation, sport de masse, compte parmi les activités sportives principales les plus importantes. C'est pourquoi la littérature fait mention de nombreux travaux expérimentaux et numériques ayant trait à l'étude de ce sport, en l'abordant de différents points de vue: hydrodynamique, biomécanique, physiologique etc. Dans le cadre de la présente étude nous nous intéressons à la fois aux aspects hydrodynamique et biomécanique dans le but d'améliorer la performance des nageurs. D'un point de vue hydrodynamique, la performance est liée essentiellement à la minimisation des forces de résistances qui s'opposent au déplacement du nageur dans le milieu aquatique.

Dans ce chapitre, nous allons décrire les composantes de la force de résistance qui freine l'avancement du nageur dans le milieu fluide. Ensuite, nous montrerons les principales méthodes de mesure de résistance passive que l'on rencontre en phase de coulée et en phase de retour après un virage (durant lesquelles le nageur est considéré comme un objet solide non déformable) et de résistance active qui correspond au reste du cycle de nage où tous les segments du corps changent de position à chaque instant. Enfin, nous présenterons d'une manière détaillée la mécanique des fluides numérique CFD (Computational Fluid Dynamics) introduite récemment dans le domaine de la natation ainsi que les travaux numériques utilisant la "CFD". Cette dernière sera utilisée dans le cadre de notre travail pour simuler les écoulements autour de nageurs dans les cas bidimensionnel et tridimensionnel.

I.2. La résistance totale

La force de résistance, également appelée la traînée, est une force qui s'oppose au déplacement d'un corps dans un milieu fluide et cause la diminution de sa vitesse d'avancement. Cette résistance est le résultat de la combinaison de plusieurs facteurs complexes. La relation entre ces facteurs peut être exprimée par la relation suivante [Cappaert & Gordon (1998), Sheehan & Laughrin (1992), Ungerechts (1983)] :

$$F_t = \frac{1}{2} c_t \rho S V^2 \quad (\text{I- 1})$$

où :

F_t est la force de résistance totale (N)

ρ est la masse volumique (kg/m^3)

S est la superficie du maître couple¹ (m^2)

V est la vitesse relative du corps par rapport au fluide (m/s)

c_t est le coefficient de traînée ; c 'est une constante empirique

En natation, le coefficient c_t est considéré comme un indicateur de la qualité de la technique de nage [Cappaert & Gordon (1998), Kolmogorov & Duplishcheva (1992)]. Il dépend de la forme du corps, de la rugosité de la surface corporelle du nageur ainsi que de la nature de l'écoulement fluide laminaire ou turbulente [Ungerechts (1983), Sheehan & Laughrin (1992)].

¹ : Le maître couple est la surface représentée par la projection orthogonale du corps sur un plan perpendiculaire à l'axe du déplacement.

La nature de l'écoulement fluide autour d'un objet quelconque est caractérisée par le nombre de Reynolds. C'est un nombre adimensionnel qui présente le rapport entre les forces d'inertie et les forces de viscosité. Il est exprimé sous la forme suivante :

$$R_e = \frac{V L_c}{\nu} \quad (\text{I- 2})$$

où :

V est la vitesse du nageur (m/s)

L_c est la longueur caractéristique du nageur (m)

ν est la viscosité cinématique du fluide (m^2/s)

En natation, le nombre de Reynolds a été évalué par plusieurs auteurs [Clarys (1979), Ungerechts (1983), Toussaint & Truijens (2005), Polidori et al. (2006)]. Le choix de la longueur caractéristique L_c (cf figure I-1) est un paramètre très important pour déterminer la nature du régime d'écoulement. Ungerechts (1983) a choisi cette longueur égale à la longueur du dauphin dans son étude portant sur la relation entre le régime d'écoulement et le nombre de Reynolds pour un corps rigide. Il explique son choix par le fait que l'écoulement est perturbé tout au long du corps. Clarys (1979) a précisé que ce nombre est compris entre les valeurs 2.10^5 et 2.10^6 , sans avoir mentionné le choix de la longueur caractéristique. Toussaint & Truijens (2005) ont choisi une longueur caractéristique égale à celle du corps du nageur sans avoir mentionné sa position. Ils trouvent une valeur du nombre de Reynolds critique de l'ordre de $4,5.10^6$ pour un nageur de longueur $L = 2m$ se déplaçant à la vitesse $V = 2m/s$.

Polidori et al. (2006) ont choisi une longueur caractéristique égale à la longueur du nageur avec les bras et les mains tendus (figure I-1) correspondant à la position du nageur en phase de coulée. En effectuant l'hypothèse que le nageur puisse être assimilé à un corps profilé ; on peut estimer que la transition laminaire turbulente se trouve vers $R_e=5.10^5$. Cela implique que l'écoulement autour du nageur est majoritairement de nature turbulente [Polidori et al. (2006)].



Figure I- 1 : Longueur caractéristique L_c de nageur de niveau national

De nombreuses études expérimentales ont été effectuées avec des obstacles de formes différentes. Elles montrent que le coefficient de traînée c_t varie en fonction de la géométrie utilisée et du nombre de Reynolds [Ungerechts (1983)]. La figure I-2 montre la variation du coefficient de traînée c_t en fonction du nombre de Reynolds d'après l'étude expérimentale réalisée par Clarys (1979). Cette étude a été réalisée avec un nageur tracté en surface et à $60cm$ de profondeur en position de glisse ventrale pour des vitesses de $1,5$ à $2 m/s$.

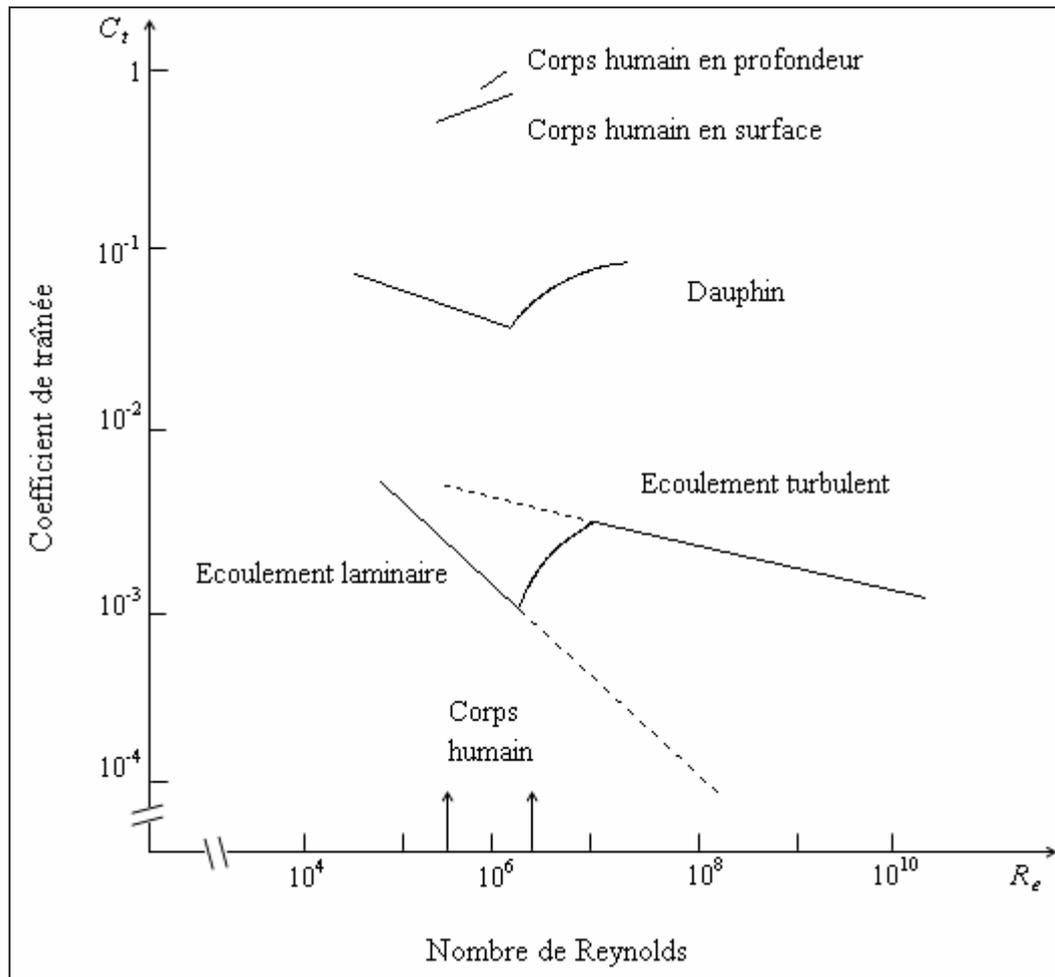


Figure I- 2 : Régions d'écoulement laminaire et turbulent en fonction du nombre du Reynolds d'après Clarys (1979).

Très récemment, la relation entre le nombre de Reynolds et le coefficient de traînée a été étudiée expérimentalement par Taïar et al. (2005) pour des nageurs de différents niveaux. L'étude a été effectuée dans le cas de la nage papillon pour trois positions différentes du cycle de nage (début de cycle, milieu de cycle et fin de cycle). La figure I-3 montre l'évolution du coefficient de traînée en fonction du nombre de Reynolds pour un nageur de haut niveau et pour d'autres nageurs de plus faible niveau.

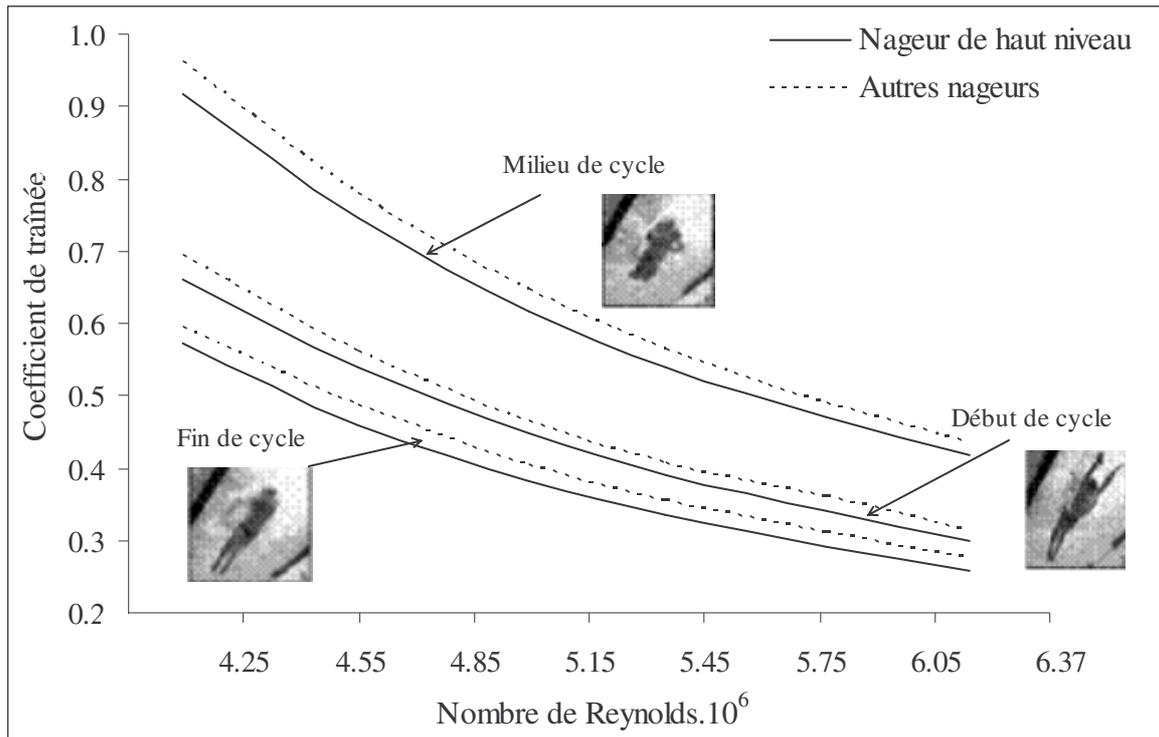


Figure I- 3 : Relation entre le coefficient de traînée et le nombre de Reynolds pour des nageurs de différents niveaux d'après Taïar et al. (2005).

I.3. Composantes de la force de résistance

En natation, la résistance totale, dite aussi traînée totale, est la somme de trois composantes principales : F_f la traînée visqueuse ou de frottement due à la viscosité du milieu fluide, F_p la traînée de pression, dite aussi traînée de forme, due principalement à la forme complexe du corps humain, et enfin F_w la traînée de vague causée par le champ de vague qui accompagne le corps en déplacement et qui s'étend progressivement sur une zone considérable de la surface libre [Polidori et al. (2006), Vennell et al. (2006), Sheehan & Laughrin (1992), Barthels (1977), Rushall et al. (1994)].

$$F_t = F_f + F_p + F_w \quad (I-3)$$

I.3.1. Traînée visqueuse

Le glissement de deux surfaces l'une sur l'autre engendre une force qui limite leurs mouvements, cette force est appelée traînée de frottement ou traînée visqueuse [Clothier (2004)]. En natation, le passage du nageur dans le milieu fluide avec une vitesse quelconque produit une force qui freine son avancement et cause une diminution de sa vitesse. Cette force est causée par les particules d'eau qui sont en contact direct avec la surface du nageur. Ce phénomène est lié à la viscosité et à la nature de l'écoulement fluide [Clarys (1979)], ainsi qu'à la nature de la surface corporelle du nageur [Rushall et al. (1994)].

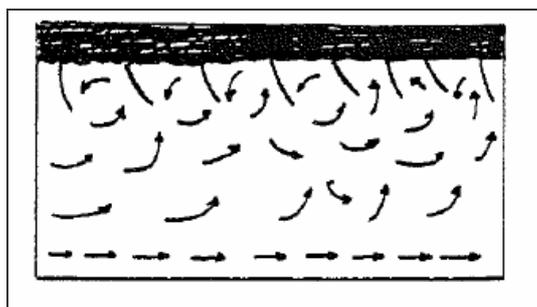
La traînée de frottement est fonction:

- de la viscosité de fluide
- de la surface mouillée [Lyttle et al. (2000)]

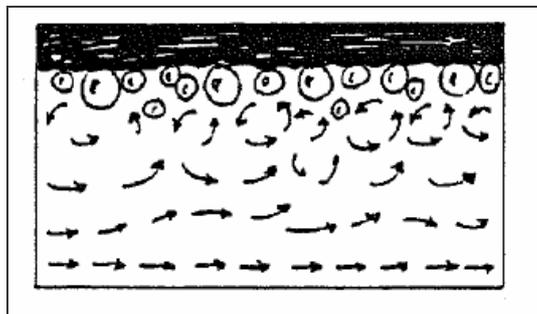
- du régime d'écoulement du fluide autour du corps, qui peut se caractériser par son nombre de Reynolds.
- de la rugosité de la surface corporelle du nageur.

La rugosité de la peau, les cheveux, les maillots de bain peuvent créer des frottements supplémentaires pendant le déplacement du nageur. Aussi, pour réduire la traînée de frottement et afin d'améliorer la performance hydrodynamique, plusieurs techniques et méthodes ont été introduites, parmi lesquelles l'utilisation de bonnets qui fournissent une surface plus lisse qu'une tête avec des cheveux ainsi que l'utilisation de combinaisons spéciales qui sont plus lisses que la peau du nageur [Rushall et al. (1994)].

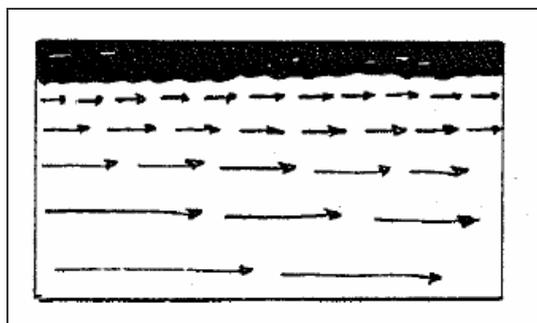
Rushall et al. (1994) proposent de maintenir un régime d'écoulement laminaire pour que le nageur puisse glisser facilement à travers le milieu fluide, de se raser le corps et de porter des bonnets de bain. Le facteur majeur qui affecte la résistance de frottement est la nature lisse de la surface corporelle du nageur. Selon Clothier (2004), si la surface est uniforme et lisse, l'écoulement dans la couche limite sera laminaire mais si la rugosité n'est pas uniforme, l'écoulement devient turbulent. La figure I-4 montre les trois types de surfaces cutanées du nageur en contact avec le fluide.



a) *Peau avec poils (bras) ;
Combinaison rugueuse*



b) *Peau lisse mais avec surface
hydrophobe (huilée)*



c) *surface lisse grenue (peau
rasée)*

Figure I- 4 : Résistance de frottement selon la nature de la surface corporelle d'après Rushall et al. (1994).

Les combinaisons de natation jouent un rôle prépondérant dans la minimisation de la traînée visqueuse ou de frottement. Benjanuvatra et al. (2002) ont montré expérimentalement, à partir de mannequins, que lorsque les nageurs portent des combinaisons couvrant la totalité du corps, la résistance totale diminue d'une façon significative par comparaison avec des combinaisons normales, ceci pour des vitesses de remorquage comprises entre 1,6 et 2,8 m/s. Van Manen et Rijken (1975) ont démontré qu'une combinaison typique de natation portée dans les années 70 a causé une diminution de 9% de la traînée totale, cette valeur ayant été estimée à partir de tests effectués avec et sans combinaison. La figure I-5 montre l'évolution de la résistance totale en fonction de la vitesse avec et sans combinaison.

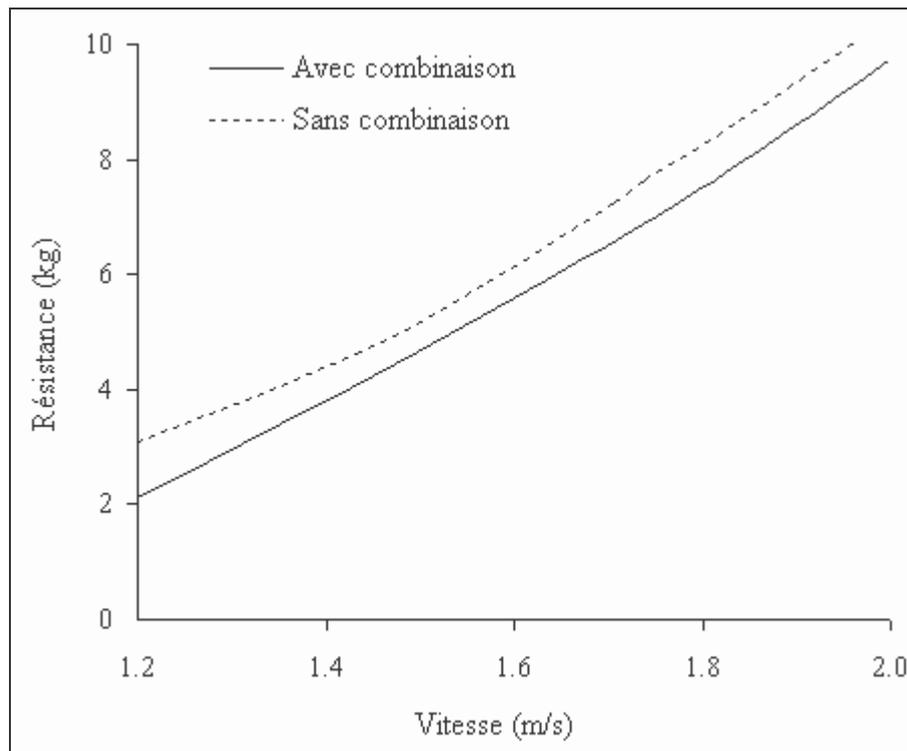


Figure I- 5 : Effet du port de la combinaison sur la traînée totale d'après Van Manen et Rijken (1975).

Les combinaisons de natation ont beaucoup évolué pendant ces dernières années dans le but d'améliorer la performance hydrodynamique des nageurs de haut niveau par la minimisation de la traînée de frottement. Actuellement sur le marché, plusieurs marques sportives, comme Aréna et Speedo, proposent leurs combinaisons très performantes. En 2004, grâce aux travaux du professeur Taïar, Aréna a conçu « La powerskin xtreme » en coopération avec l'université polytechnique de Milan. La combinaison est composée de trois matériaux différents, représentés par trois couleurs différentes : le bleu, l'argent et le jaune, chaque couleur présente une matière. Cette combinaison permet un gain de 3% de la vitesse et une réduction de 8% à 9% de la traînée de frottement. Elle a été également portée par les nageurs de haut niveau tels: Alexandre Popov et Laure Manaudou pendant les jeux olympiques d'Athènes en 2004. La figure I-6 montre la « La powerskin xtreme ».



Figure I- 6: Combinaison « La powerskin xtreme » d’Arena

En ce qui concerne la variation de la traînée de frottement avec la vitesse, Rushall et al. (1994) ont mentionné que la traînée de frottement varie linéairement en fonction de la vitesse de nage. La figure I-7 montre une relation linéaire entre la résistance de frottement et la vitesse de la nage.

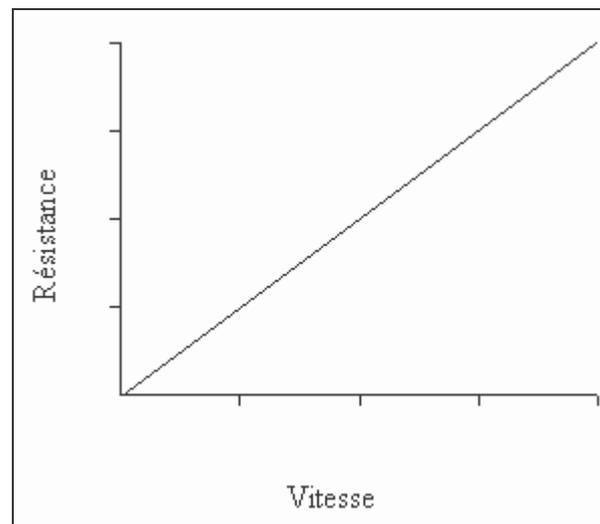


Figure I- 7 : Allure de la relation linéaire entre la traînée de frottement et la vitesse de nage d’après Rushall et al. (1994).

En général, la traînée visqueuse a un effet mineur sur la performance [Sheehan & Laughrin (1992)].

I.3.2. Traînée de forme

Comme son nom l’indique, la traînée de forme est la composante de la traînée liée à la forme de l’objet [Costill et al. (1992)]. Elle résulte de la répartition des forces normales à la surface d’un corps durant son déplacement dans le milieu fluide [Hoerner (1965)]. Elle est appelée également traînée de pression puisqu’elle est causée par la différence de pression créée entre

les parties amont et aval de l'objet. La figure I-8 montre les zones de haute et de basse pression créées lors du déplacement d'un objet de forme circulaire dans un milieu fluide [Barthels (1997)].

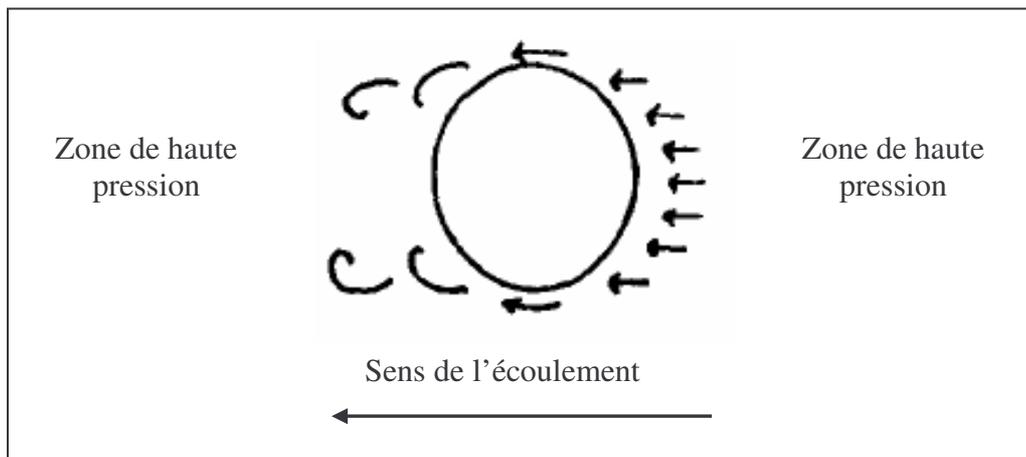


Figure I- 8 : Traînée de pression causée par la différence de pression d'après Barthels (1997)

En natation, la traînée de forme varie en fonction de l'espace occupé par le nageur, de la forme de son corps et de sa vitesse [Costill et al. (1992), Barthels (1977)]. Elle est considérée comme la composante la plus significative de la résistance [Barthels (1977)]. La figure I-9 montre les forces de résistances dues à la traînée de forme qui freine l'avancement d'un nageur durant son déplacement dans le milieu fluide.

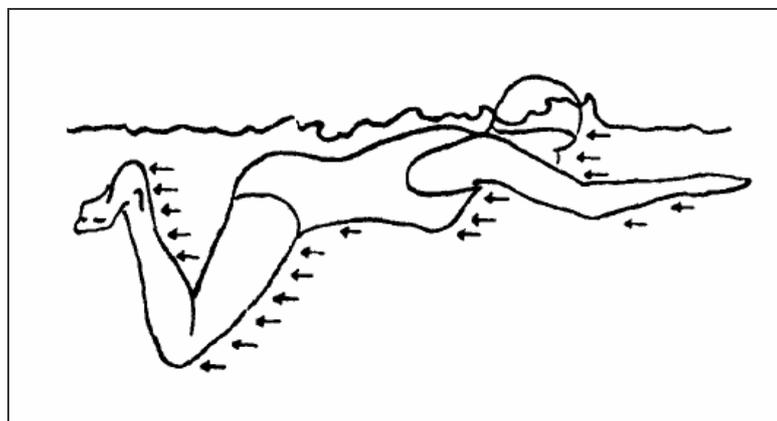
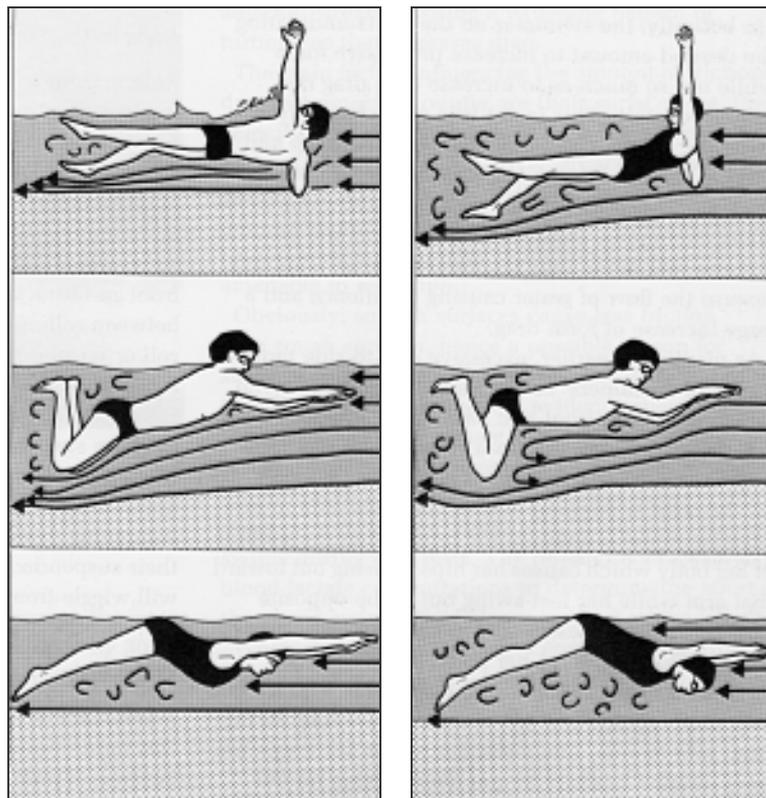


Figure I- 9 : Traînée de forme s'opposant à l'avancement du nageur d'après Barthels (1977)

Lors du déplacement d'un nageur dans le milieu aquatique, les couches de l'écoulement fluide suivent la forme de la surface du corps du nageur jusqu'à ce que l'écoulement soit ralenti à cause d'une augmentation de la pression ou s'accélère à cause d'une diminution de la pression [Clothier (2004)]. Cela peut impliquer un phénomène de décollement de la couche limite du corps du nageur. Le gradient de pression entre les différentes parties du corps du nageur génère une force de résistance qui agit perpendiculairement à la surface du nageur. Cette résistance freine l'avancement de ce dernier [Rushall et al. (1994)].

A cause de la non uniformité et de la complexité du corps humain, des gradients de pression et des zones de turbulence sont générés autour du corps du nageur [Lyttle (1999)], tout particulièrement dans les régions où le corps change soudainement de forme comme la tête, les épaules, les coudes, les hanches, les genoux et les pieds [Clarys (1979)].

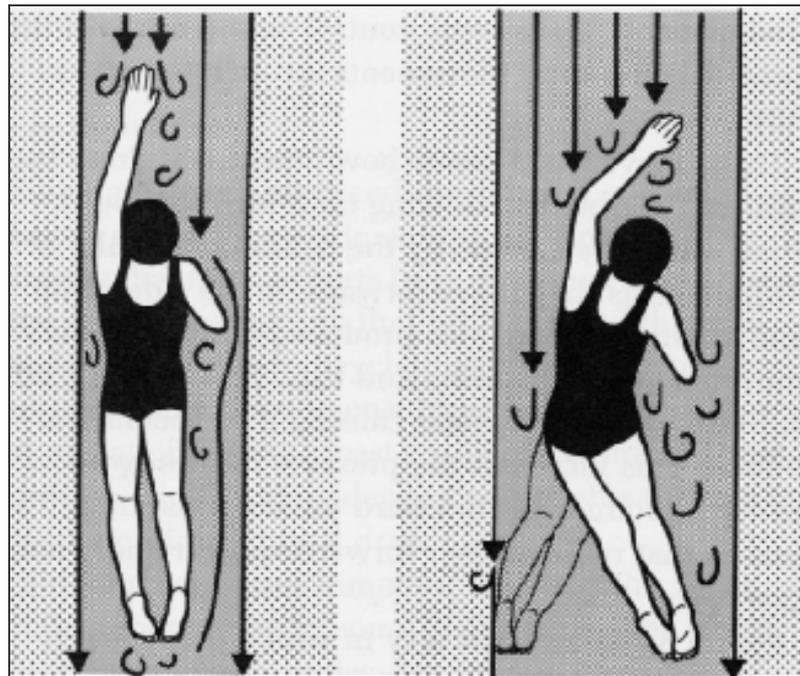
Par conséquent, dans le but de réduire la résistance de forme, le nageur doit maintenir une position du corps la plus horizontale possible en adoptant une position avec un minimum d'inclinaison [Costill et al. (1992)], et essayer de corriger sa position à chaque opportunité [Rushall et al. (1994)]. Selon Barthels (1977), l'horizontalité du corps diminue la perturbation de l'écoulement. En natation, une bonne horizontalité minimise les mouvements verticaux et latéraux et par conséquent réduit la section exposée à l'écoulement fluide. Clarys et al. (1973) trouvent que l'inclinaison du corps augmente la section frontale exposée à l'écoulement fluide (maître couple). Ainsi, elle contribue à l'augmentation de la résistance à l'avancement, cela durant le remorquage passif du corps. Rushall et al. (1994) ont montré que si la position du nageur cause l'augmentation de la section frontale exposée à l'écoulement ce dernier est freiné et sa vitesse diminue. Les résultats des différents auteurs suggèrent que le bon alignement et le positionnement du corps humain peuvent améliorer significativement la performance en augmentant la vitesse et en diminuant la résistance. Les figures I-10 et I-11 montrent une comparaison entre une bonne position (a) et une mauvaise position (b) pour différentes phases de nage.



a) : Bonne position

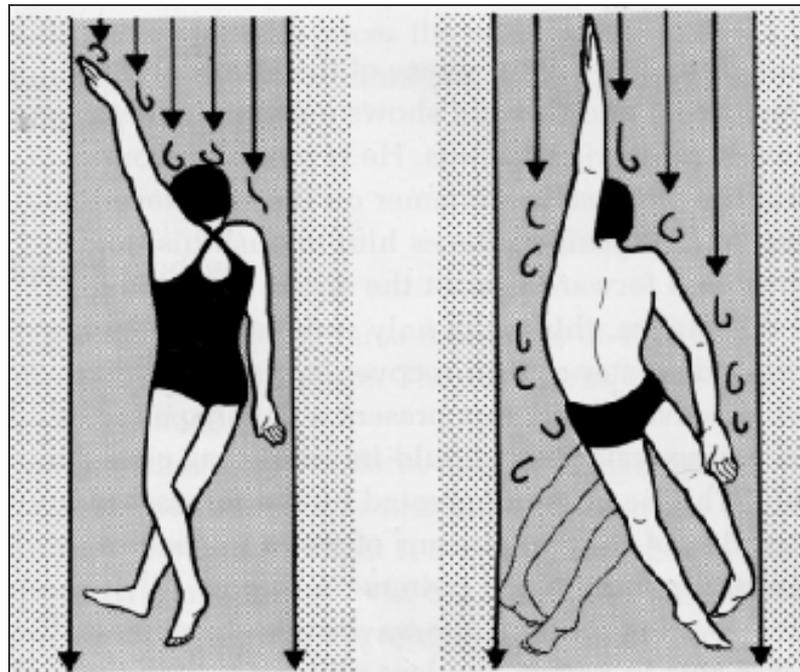
b) : Mauvaise position

Figure I- 10 : Comparaison entre une bonne et une mauvaise position hydrodynamique d'après Costill et al (1992).



(a) Bonne position

(b) Mauvaise position



(a) Bonne position

(b) Mauvaise position

Figure I- 11 : Comparaison entre deux positions correspondent à deux mouvements latéraux des membres inférieurs du nageur d'après Costill et al (1992).

Selon Rushall et al. (1994), la traînée de forme varie avec le carré de la vitesse, elle est plus importante pour les nageurs nageant à grande vitesse. La figure I-12 représente la variation de la traînée de forme en fonction de la vitesse du nageur.

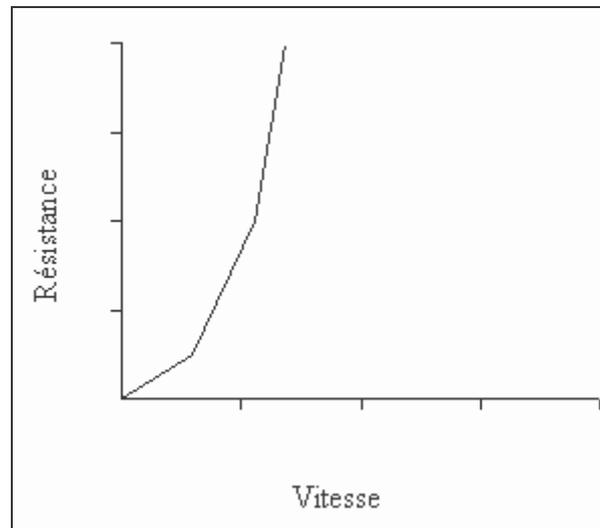


Figure I- 12 : Allure de la relation entre la traînée de pression et la vitesse de nage d'après Rushall et al. (1994).

I.3.3. Traînée de vague

C'est la dernière composante de la résistance totale causée principalement par la turbulence produite au niveau de la surface libre [Costill et al. (1992)] ainsi que par les vagues créées lors du déplacement du nageur dans le milieu fluide [Rushall et al. (1994)]. La vague frontale crée une zone de haute pression devant le nageur et la vague arrière crée une zone de basse pression. Ces vagues correspondent à la masse d'eau soulevée vers le haut contre la force de pesanteur et résultent de la perturbation de la surface libre [Clarys (1979)]. La figure I-13 montre un nageur se déplaçant au niveau de la surface libre, il subit dans ce cas une traînée de vague importante.



Figure I- 13 : Résistance de vague rencontrée lors du déplacement du nageur à la surface de bassin; λ est la longueur d'onde d'après Toussaint et Truijens (2005.)

D'après la littérature, la traînée de vague varie en fonction du mouvement à proximité de la surface libre ou de la profondeur, de la vitesse du nageur, de la forme de son corps ainsi que de ses mouvements latéraux et verticaux [Clothier (2004), Rushall et al. (1994)]. La résistance de vague devient moins importante avec l'augmentation de la profondeur [Lyttle et al. (1998), Toussaint & Truijens (2005), Barthels (1977), Vennell et al. (2006)]. Les études récentes montrent que la traînée de vague varie en fonction du cube de la vitesse [Rushall et al. (1994), Sheehan & Laughrin (1992)] comme le montre la figure I-14. La traînée de vague est considérée comme la composante la plus mauvaise de la traînée puisque sa contribution dans la traînée totale augmente d'une façon très rapide avec la vitesse du nageur [Rushall et al. (1994)].

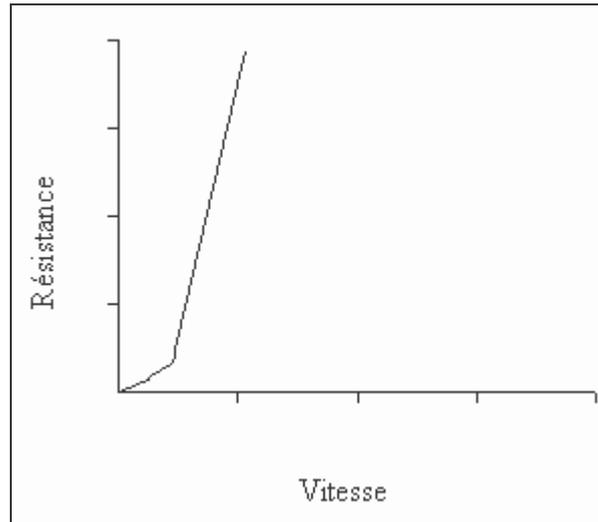


Figure I- 14: Allure de la relation entre la traînée de vague et la vitesse de nage d'après Rushall et al. (1994).

La traînée de vague se caractérise par le nombre de Froude ; ce dernier représente le rapport entre les forces d'inertie et les forces de gravité [Toussaint & Truijens (2005), Larsen et al. (1981)]. Ce nombre s'écrit sous la forme suivante :

$$F_r = \frac{V}{\sqrt{g L}} \quad (\text{I- 4})$$

Où :

F_r : Nombre de Froude

g : Accélération de la gravité (m/s^2)

L : Longueur de l'objet (m)

En natation, la valeur maximale du nombre de Froude varie approximativement entre 0,42 selon Larsen (1981) et 0,45 selon Videler (1993) cité par Clothier (2004).

La relation entre le nombre de Froude et la traînée de vague montre que les nageurs les plus grands produiront moins de résistance de vague. Selon Larsen et al. (1981), les nageurs doivent maintenir une position du corps étirée au cours de la nage pour avoir la longueur la plus grande possible de leur corps; cela assure une diminution du nombre de Froude et par conséquent de la résistance de vague. L'élimination des mouvements dans les directions latérales et verticales est considérée comme essentielle pour minimiser la résistance de vague

[Rushall et al. (1994)]. La figure I-15 montre la variation de la traînée de vague en fonction du nombre de Froude.

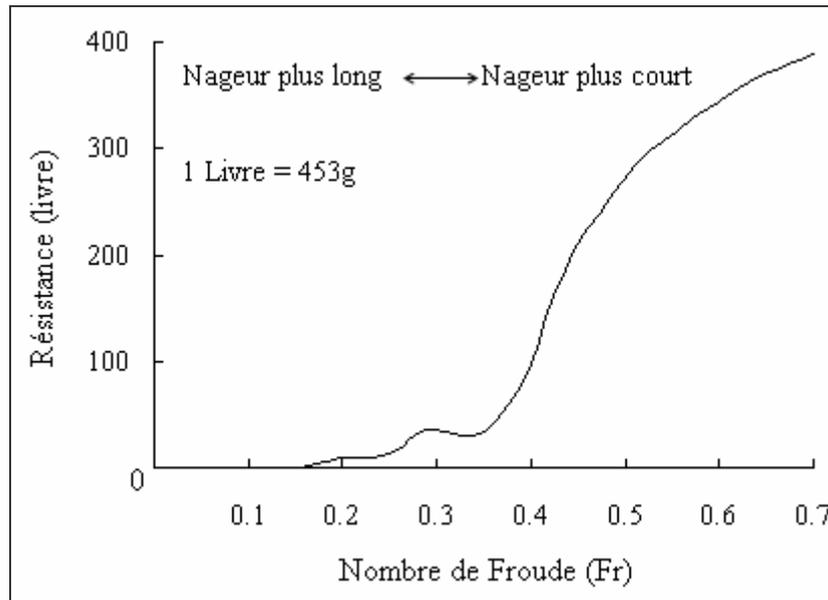


Figure I- 15 : Traînée de vague en fonction du nombre de Froude d'après Larsen et al. (1981).

Une tentative pour quantifier la relation entre la profondeur du mouvement et la perte d'énergie due à la résistance de vague a été réalisée par Hertel (1966) citée par Clothier (2004). Il a étudié la variation du coefficient de traînée pour un objet de forme allongée et profilée. Pour ce faire, l'objet a été remorqué à différentes profondeurs. L'absence de l'effet de la traînée de vague a été constatée lorsque la profondeur de l'immersion² est égale à trois fois le diamètre de l'objet. La valeur maximale a été observée lorsque l'objet se situe directement sous la surface de l'eau, plus exactement à une profondeur égale à la moitié du diamètre de l'objet comme il est montré sur la figure I-16.

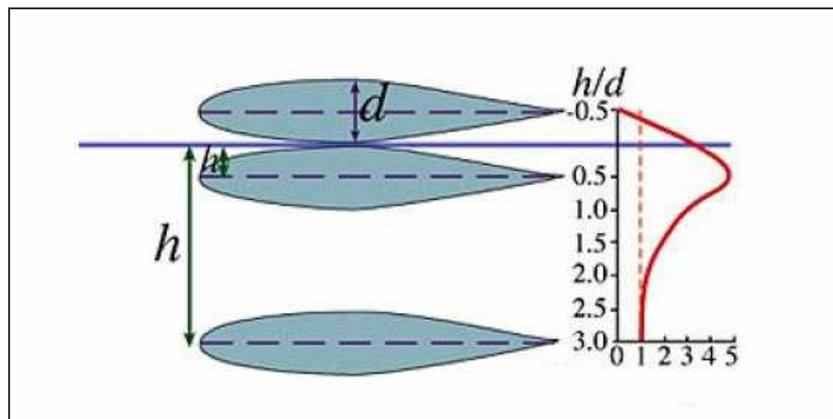


Figure I- 16 : Résistance de vague en fonction de la profondeur d'immersion de l'objet d'après Hertel (1966).

² La profondeur de l'immersion est repérée par rapport à l'axe de l'objet étudié.

Webb et al. (1991) ont démontré que la distance traversée augmente avec l'augmentation de la profondeur chez la truite arc-en-ciel. Ils ont postulé qu'approximativement 70% de l'énergie mécanique utilisée pour propulser le poisson à une profondeur quelconque est dispersée pour vaincre la traînée de vague lorsque le poisson est à la surface de l'eau. Leurs calculs montrent que la résistance de vague devient négligeable lorsque l'objet (poisson) est immergé à une profondeur égale à trois fois l'épaisseur maximale verticale de l'objet. En revanche, la traînée de vague semble être maximisée lorsque l'objet est immergé directement sous la surface libre [Webb et al. (1991)].

D'après les travaux réalisés par Larsen et al (1981) dans le domaine de la natation, il a été montré que la contribution de la traînée de vague dans la traînée totale devient négligeable à partir d'une profondeur pour laquelle le rapport profondeur/ longueur est compris entre 0,2 et 0,4. Donc, pour minimiser par exemple la traînée de vague pendant la phase de coulée, il faut que la profondeur de glissement soit égale à 0,2 fois ou plus la longueur du nageur. D'après Lyttle (1999) et Vennell et al. (2006) un nageur de 2,5m glissant en gardant les bras tendus à une profondeur de 0,5m a une traînée de vague négligeable, voire nulle.

Larsen et al. (1981) ont indiqué aussi que la profondeur d'eau du bassin limite la vitesse maximale du nageur. La vitesse maximale qui peut être atteinte par un corps se déplaçant à une profondeur donnée est calculée à partir de la relation suivante :

$$V_{\max} = \sqrt{g H} \quad (I- 5)$$

Où :

V_{\max} : Vitesse maximale (m/s)

g : Accélération de la gravité (m/s²)

H : Profondeur de la surface vers le fond du bassin (m)

Le tableau I-1 montre les vitesses théoriques atteintes en fonction de la profondeur du bassin.

Vitesse maximale (m/s)	2,99	3,44	3,87	4,24	5,46	7,74
Profondeur (m)	0,91	1,22	1,52	1,83	3,05	6,10

Tableau I- 1 : Vitesse maximale pour différentes profondeurs d'après Larsen et al. (1981).

D'après Lyttle et al. (1999), la vitesse maximale théorique d'un nageur dans un bassin de 1m de profondeur serait légèrement au-dessus de 3m/s et pour un bassin de 2m de profondeur elle serait approximativement de 4,5 m/s. Larsen et al. (1981) indiquent que la vitesse du nageur en phase de coulée et à l'amorce d'un virage est 50% à 60% plus grande que la vitesse de nage, et limitée aussi par la profondeur du bassin. Pour diminuer le temps de nage, Larsen et al. (1981) proposent de construire des bassins avec des profondeurs de 4,57m à 6,09m.

I.3.4. Contribution des différentes formes de traînée sur la traînée totale

La contribution des trois composantes de traînée dans la traînée totale varie selon plusieurs facteurs. Dans le cas des corps flottants comme les bateaux, Larsen et al. (1981) ont trouvé que la traînée de vague est la composante principale et qu'elle représente jusqu'à 82% de la traînée totale. Cependant, pour le corps humain, une bonne compréhension et connaissance

des contributions des différentes composantes de la traînée est exigée afin d'améliorer la performance en natation humaine [Lyttle (1999)].

La contribution de ces trois formes de traînées en natation varie en fonction de la vitesse de nage [Rushall et al. (1994), Toussaint et al. (2002)] et de la profondeur [Vennell et al. (2006)]. D'après Rushall et al. (1994), un doublement de la vitesse de nage entraîne une augmentation de deux fois la traînée de frottement, quatre fois la traînée de forme et huit fois la traînée de vague. Vennell et al. (2006) indiquent que la traînée rencontrée en tractant un mannequin au niveau de la surface libre est 2,4 fois plus grande que lorsque le mannequin est immergé dans l'eau. Ils indiquent également que la traînée de vague peut atteindre 60% de la traînée totale pour une vitesse de 1,7m/s lorsque le mannequin est remorqué au niveau de la surface libre. Toussaint et al. (2002) supposent qu'à une vitesse de nage constante de l'ordre de 1m/s les contributions relatives des trois composantes de traînée dans la traînée totale sont 3% pour la traînée de frottement, 95% pour la traînée de forme et 2% pour la traînée de vague. Ces valeurs deviennent respectivement 3%, 77% et 20% pour une vitesse de 2m/s. Ils indiquent également que la contribution de la traînée de frottement ne dépasse pas 5% de la traînée totale.

Les deux traînées de forme et de vague sont liées, une augmentation de la traînée de vague entraîne une augmentation de la traînée de forme [Rushall et al. (1994)] tandis que la traînée de frottement est considérée indépendante des deux premières [Larsen et al. (1981)].

I.4. Mesure de la résistance du nageur

Lors du déplacement du nageur dans le milieu aquatique, le fluide oppose toujours une résistance à son avancement. Depuis l'étude de Du Bois (1905), plusieurs études expérimentales ont été réalisées afin de mesurer les résistances à l'avancement en remorquant un nageur par un canot. Alley (1952) suggère que la résistance du nageur se déplaçant ne peut pas être assimilée à la résistance mesurée par la méthode de remorquage passif. Depuis lors, les diverses études réalisées en natation afin de mesurer les résistances à l'avancement peuvent être divisées en deux catégories :

- Mesure de la résistance passive
- Mesure de la résistance active

I.4.1. Résistance passive

La résistance passive correspond à la résistance mesurée au cours du remorquage d'un corps placé dans une position fixe et définie [Rushall et al. (1994)]. En natation, cette situation se produit lors de la phase de coulée ou à l'amorce d'un virage, ces deux phases sont très importantes puisqu'elles représentent selon Chatard et al. (1990a) de 10% à 25% de la distance de la course ainsi que 44% du temps de course dans le cas de la brasse. Pendant la phase de coulée et la phase de retour après un virage, le corps humain est considéré comme un objet solide indéformable.

I.4.1.a. Mesure de la résistance passive

La méthode principale utilisée pour mesurer la résistance passive est celle du remorquage. Cette technique a été employée pour la première fois en 1912 par Houssay sur des poissons. Le poisson est attaché à un poids par l'intermédiaire d'un système de poulies. Ce poids va remorquer le poisson quand il sera lâché. Le temps nécessaire pour que le poids arrive au sol

est donc calculé. Des poissons de différents poids ont été testés, de 25g à 3kg. La figure I-17 montre le dispositif expérimental utilisé pour mesurer la résistance passive rencontrée par les poissons.

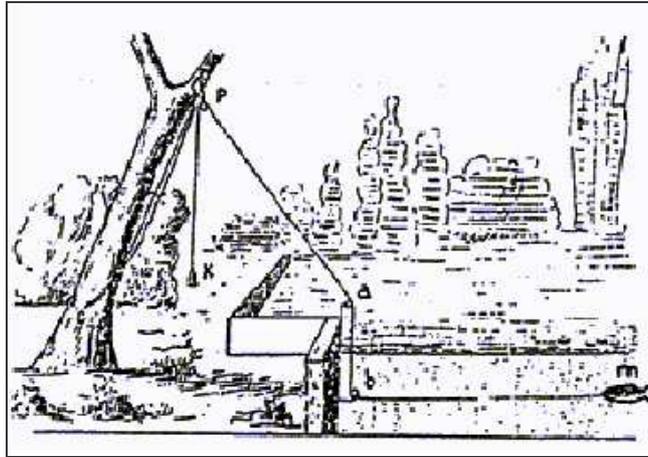


Figure I- 17 : Appareillage pour le calcul de la résistance passive par la méthode de remorquage cité par Taïar (2000).

Cette technique a été utilisée en natation pour mesurer la résistance passive rencontrée par le corps du nageur en position allongée et fixe comme cela est schématisé sur la figure I-18.

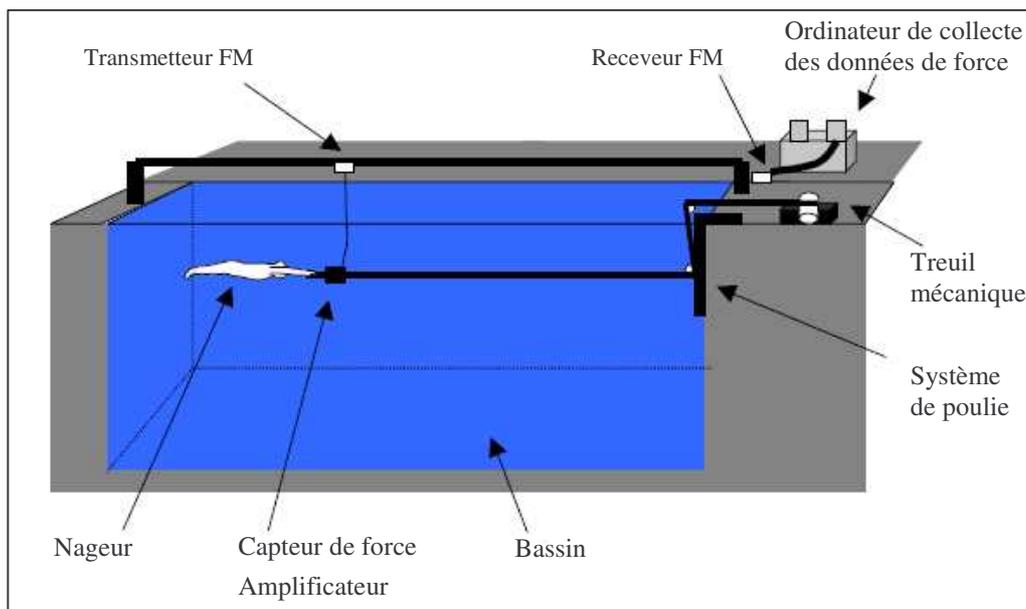


Figure I- 18 : Technique de remorquage utilisée pour mesurer la résistance passive du nageur d'après Lyttle et al. (2000).

Cette étude a été complétée par d'autres qui s'intéressaient aux aspects hydrodynamiques de la natation tels la variation de la résistance en fonction de la profondeur, de la vitesse, des caractéristiques anthropométriques ainsi que la position du corps du nageur.

I.4.1.b. Quelques résultats

La minimisation de la résistance passive pendant la phase de coulée et de retour après un virage revêt une grande importance puisqu'elle permet de réduire le temps de nage et donc

d'améliorer la performance hydrodynamique. A cause de la difficulté de quantifier l'écoulement fluide autour du corps humain et de la difficulté rencontrée lors de l'estimation de l'effet de la vitesse et de la profondeur sur la résistance passive à partir de la théorie de l'hydrodynamique, des études expérimentales sont nécessaires pour déterminer la résistance passive [Lyttle et al. (1998), (1999)]. De nombreux travaux expérimentaux ont été effectués dans le but d'étudier la résistance passive à différentes profondeurs, pour plusieurs vitesses et pour différentes positions du corps du nageur.

- ***Relation entre la résistance passive et la vitesse de la nage***

Si on s'intéresse à la relation entre la résistance passive et la vitesse de nage, toutes les études effectuées montrent que la résistance passive augmente avec l'augmentation de la vitesse de glissement³, en gardant les autres paramètres constants tels la profondeur de la nage et la position du corps du nageur [Benjanuvatra et al (2002), Clarys & Jiskoot (1975), Di Prampiro et al (1974), Jiskoot & Clarys (1975), Lyttle et al. (2000), van Manen & Rijken (1975)].

Clarys (1979) a trouvé que la résistance passive d'un nageur allongé sur le ventre augmentait avec le carré de la vitesse à laquelle le corps était remorqué. En revanche, Lyttle et al. (1998) observent une relation linéaire plutôt qu'exponentielle entre la vitesse et la résistance sur la gamme de vitesses étudiée de 1,6 m/s jusqu'à 3,1m/s. D'autres études ont été effectuées sur des formes humaines non profilées [Clarys (1979), Jiskoot & Clarys (1975)]. Ces études n'étaient pas assez concluantes puisqu'elles montraient que la relation entre la vitesse et la résistance était soit linéaire, soit exponentielle [Clothier (2004)].

- ***Relation entre la résistance passive et la position du corps du nageur***

D'autres travaux ont trait à l'étude de la résistance passive en fonction de la position du corps du nageur en phase de coulée ou à l'amorce d'un virage. Parmi les auteurs s'intéressant à cet aspect on cite: Du Bois (1905) qui, en remorquant le nageur passivement à la vitesse de 0,9m/s, relève une résistance de 70N et de 40N lorsque le sujet est remorqué sur le dos. Il observe aussi une résistance de 40N en remorquant un enfant de douze ans à la même vitesse. Ce travail est très intéressant, il montre que la résistance du corps varie en fonction de la position du nageur ventrale ou dorsale et aussi en fonction des caractéristiques du corps (adulte ou enfant). Du Bois (1905) a trouvé que la position dorsale offre moins de résistance qu'une position ventrale alors que Karpovich (1933) trouve l'inverse. Clarys & Jiskoot (1975), Karpovich (1933) et Alley (1952) ont indiqué que la résistance augmente avec l'augmentation de l'angle d'inclinaison du corps par rapport à la surface de l'eau [Clarys & Jiskoot (1975)].

Clarys & Jiskoot (1975) ont étudié la résistance rencontrée chez 43 nageurs de haut niveau en fonction de la position du corps ventrale et latérale. Ils montrent que, pour les faibles vitesses de 1,5m/s à 1,6m/s, la résistance rencontrée en position ventrale est plus grande que celle rencontrée en position latérale, cette position n'ayant pas d'influence sur la résistance pour des vitesses de remorquage supérieures à 1,8m/s. La figure I-19 montre l'évolution de la résistance passive en fonction de la vitesse pour deux positions différentes du corps : l'une ventrale et l'autre latérale.

³ La vitesse de glissement correspond à la vitesse du nageur en phase de coulée ou en phase de retour après un virage en gardant le corps en une position fixe.

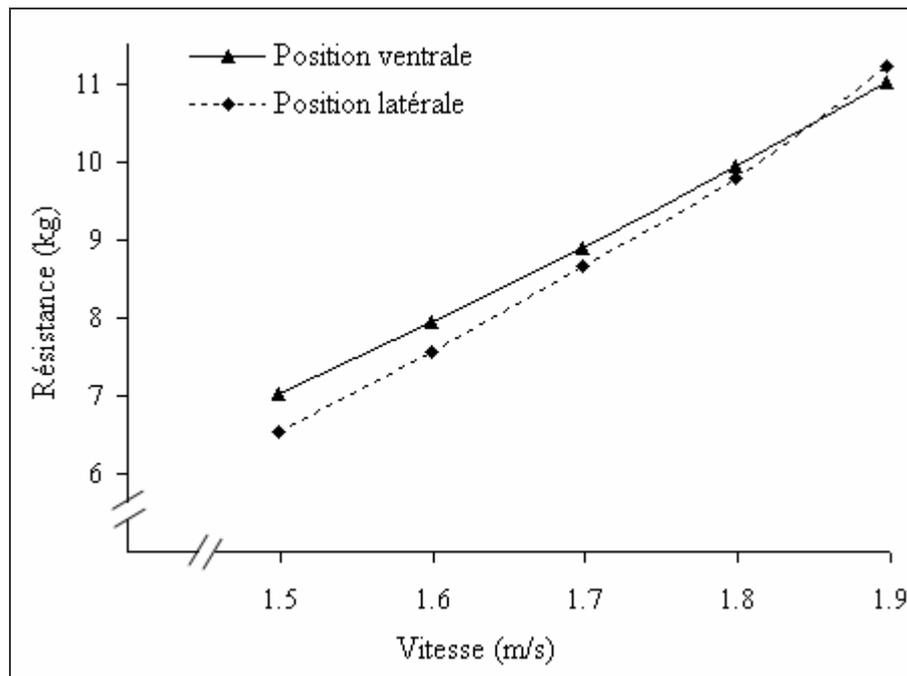


Figure I- 19 : Résistance passive pour une coulée ventrale et une coulée latérale d'après Clarys & Jiskoot (1975)

Les résultats de cette étude sont contradictoires avec ceux obtenus par Counsilman (1955). Ce dernier montre que la résistance rencontrée par le nageur remorqué sur le côté est supérieure par comparaison avec une position ventrale [Clarys & Jiskoot (1975)]. La figure I-20 montre une comparaison entre les résultats de Counsilman (1955) et ceux de Clarys & Jiskoot (1975) pour les positions ventrale et latérale.

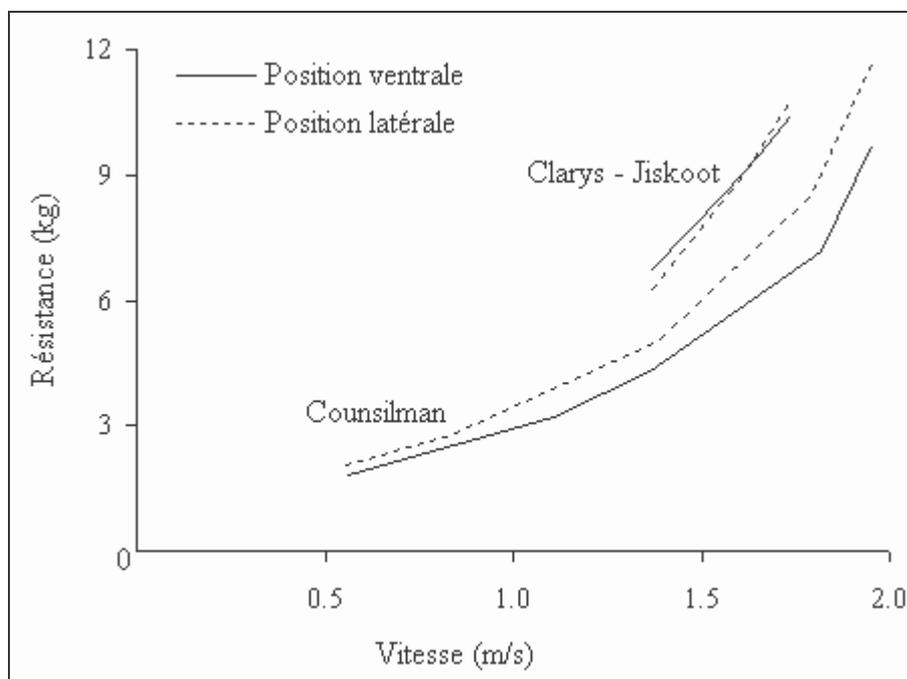


Figure I- 20 : Comparaison entre les résultats Counsilman et Clarys & Jiskoot d'après Clarys et Jiskoot (1975).

Dans leur étude, Clarys & Jiskoot (1975) ont mentionné que Counsilman a testé seulement un seul nageur alors qu'eux ont testé 43 nageurs, parmi ces nageurs 7% présentent les mêmes résultats obtenus par Counsilman (1955).

Clarys & Jiskoot (1975) ont comparé leurs résultats avec ceux de la littérature dans le cas de la position ventrale. Ils ne trouvent pas une différence significative entre leurs résultats et ceux de Karpovich (1955), Alley (1952), Schramm (1958-1959) et Clarys et al. (1974). Les valeurs trouvées par Counsilman (1955) sont significativement petites par rapport aux résultats des autres auteurs. La figure I-21 montre l'évolution de la résistance passive en fonction de la vitesse dans le cas de la position ventrale pour les différents auteurs.

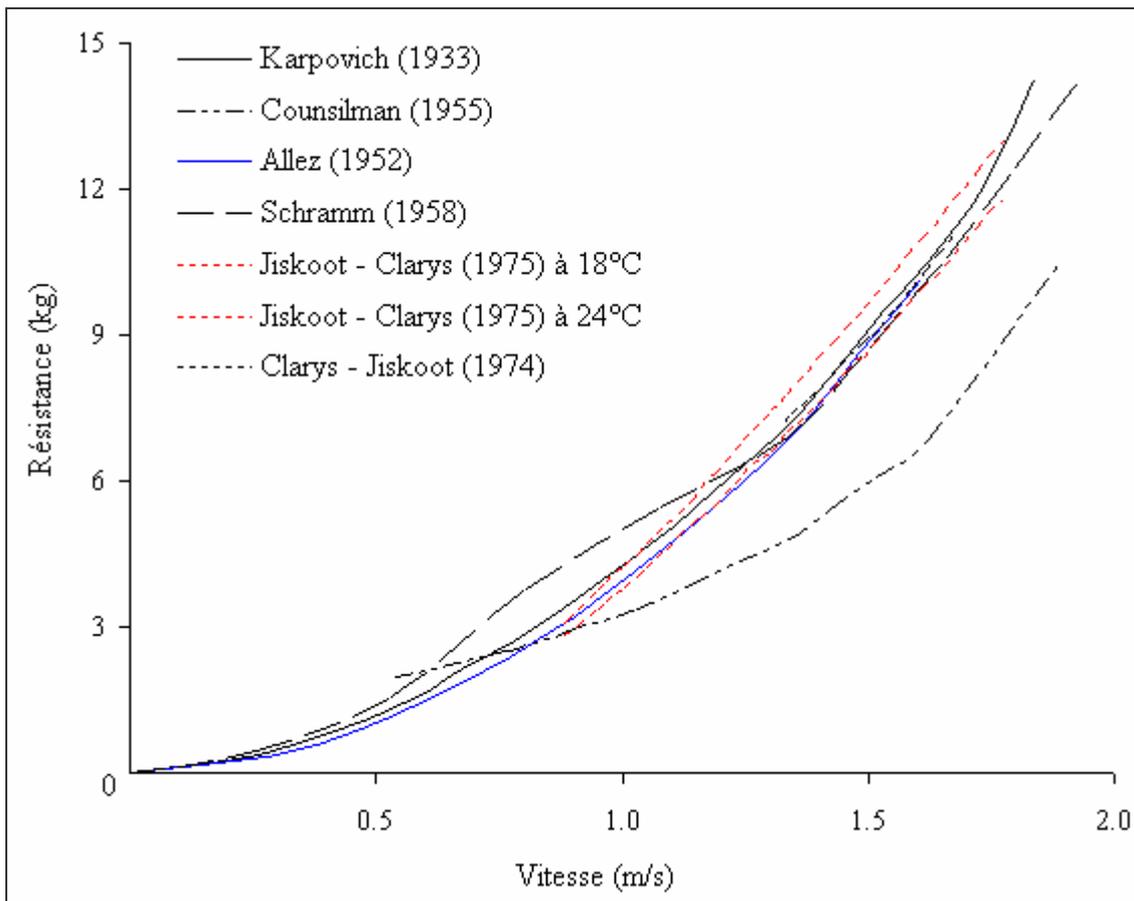


Figure I- 21 : Résistance rencontrée en fonction de la vitesse pour les différents auteurs dans le cas de position ventrale d'après Clarys et Jiskoot (1975).

Une autre étude a été réalisée par Lyttle et al. (2000) qui ont étudié la résistance passive pour seize nageurs ayant une même forme du corps, à des vitesses de 1,6 m/s, 1,9 m/s, 2,2 m/s, 2,5 m/s et 3,1 m/s. Pour chaque vitesse, le nageur effectue une coulée ventrale, une coulée latérale, une coulée ventrale avec un mouvement de coup de pied et une coulée latérale avec un mouvement de coup de pied. Les résultats de cette étude ne montrent pas une différence significative entre les différents mouvements et positions étudiés durant la phase de glissement.

- **Relation entre la résistance passive et la profondeur de la nage**

Concernant la sensibilité de la résistance passive à la profondeur de nage, les mesures effectuées à différentes profondeurs montrent que cette résistance diminue avec l'augmentation de la profondeur et qu'elle est maximale au niveau de la surface. Cela est dû à la disparition de l'effet de la traînée de vague en s'éloignant de la surface libre du bassin [Larsen et al. (1981), Blake (1983), Lyttle et al. (2000), Vennell et al. (2006)].

Maiello et al. (1998) ont étudié la résistance passive au niveau de la surface et à 0,5m de profondeur pour deux vitesses différentes de 1,76m/s et 1,91m/s, dans un bassin de natation. Onze nageuses ont effectué des coulées ventrales sous cinq positions pour chaque vitesse et chaque profondeur. Les résultats trouvés indiquent que la résistance minimale est observée lorsque les nageuses effectuent leur coulée en profondeur, cela pour toutes les positions et pour les deux vitesses étudiées. Cette étude a permis de constater que la résistance passive diminue avec l'augmentation de la profondeur. Lyttle et al. (1998) et Benjanuvattra et al. (2002) ont confirmé les résultats précédents et suggèrent que l'augmentation de la traînée visqueuse et de la traînée de forme due à l'immersion complète du corps s'accompagne par une grande diminution de la traînée de vague. Cependant, les descriptions insuffisantes des méthodologies et la procédure statistique limitent l'interprétation et la validité des résultats. Pour limiter cette disparité, Lyttle et al. (1998) ont mesuré la résistance passive du nageur aux vitesses de remorquage qui correspondent le plus aux phases de coulée et à l'amorce d'un virage. Ils ont étudié la résistance passive en tractant quarante nageurs possédant des formes de corps, poids et tailles semblables, cela pour des profondeurs et vitesses prédéterminées. La résistance passive a été mesurée pour des profondeurs de 0,2m, 0,4m et 0,6m pour chaque vitesse choisie dans la gamme 1,6m/s à 3,1m/s.

Durant le remorquage, les nageurs portent des bonnets de bain et maintiennent une position ventrale profilée, la tête entre les bras allongés et les pieds groupés. Le niveau de profondeur et le degré d'horizontalité ont été pris puis évalués par l'intermédiaire d'images prises à partir de vidéos sous l'eau. Les tests ont été répétés dans chaque cas où le réglage nécessaire ne satisfaisait pas les conditions de l'expérience, si le nageur par exemple n'était pas à $\pm 0,05m$ par rapport à la profondeur définie ou n'était pas en position horizontale. La température de l'eau est maintenue à 28°C ($\pm 0,6^\circ C$). Les résultats trouvés montrent que les valeurs maximales de la résistance passive ont été obtenues lorsque les nageurs sont tractés au niveau de la surface libre et diminuent avec l'accroissement de la profondeur et cela pour toutes les vitesses de remorquage [Lyttle et al. (1998)]. Pour les vitesses comprises entre 2,2 et 3,1m/s, la résistance à 0,2m est significativement plus grande que celle à 0,4m et 0,6m, tandis qu'entre les deux profondeurs 0,4m et 0,6m, aucune différence n'a été observée. La figure I-22 montre l'évolution de la résistance passive en fonction de la vitesse au niveau de la surface libre et à 60cm de profondeur.

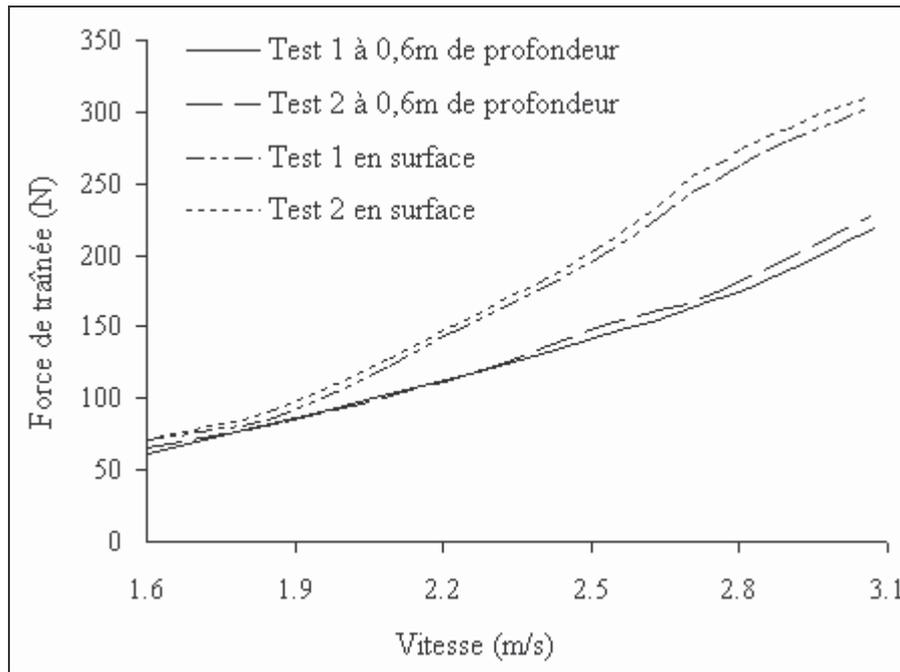


Figure I- 22 : Evolution de la résistance passive en fonction de la vitesse au niveau de la surface et à 60cm profondeur d'après Lyttle et al. (1999)

Dans le même esprit, Venelle et al (2006) ont étudié la résistance rencontrée en remorquant un mannequin au niveau de la surface et en profondeur pour différentes vitesses. Ils trouvent que cette dernière est 2,4 fois plus grande en surface qu'en profondeur. Ils expliquent leurs résultats par la diminution considérable de la résistance de vague en s'éloignant de la surface libre. Au niveau de la surface libre, la traînée de vague présente de 50% à 60% de la traînée totale pour une vitesse de nage de 1,7 m/s. Alors qu'elle ne dépasse pas 5% lorsque le mannequin est remorqué à 0,5m pour la vitesse 1m/s ou à 0,7m pour la vitesse 2m/s. la figure I-23 montre la position du mannequin pour les deux profondeurs de remorquage.

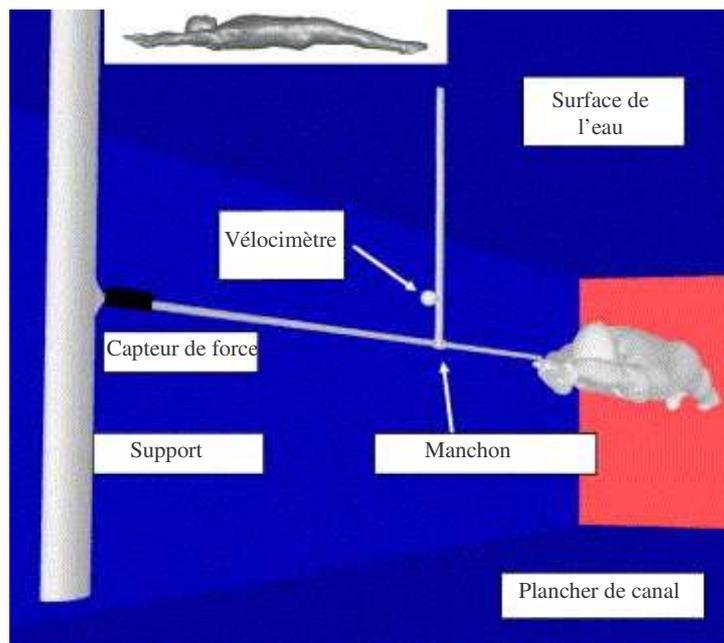


Figure I- 23 : Mannequin remorqué au niveau de la surface et en profondeur d'après Vennell et al. (2006).

Ces résultats sont en accord avec de précédentes études hydrodynamiques qui ont montré que la plus grande résistance à l'avancement d'un corps de forme cylindrique profilé est enregistrée juste au-dessous de la surface de l'eau [Clothier (2004)] et que le coefficient de traînée diminue rapidement en augmentant la profondeur d'immersion du corps [Larsen et al. (1998)].

Cependant, d'autres études, comme celle de Jiskoot & Clarys (1975), obtiennent des résultats contradictoires avec les précédentes. Jiskoot & Clarys (1975) ont étudié la résistance passive au niveau de la surface libre et à 60cm de profondeur pour un groupe de 43 nageurs et pour des vitesses allant de 1,5 m/s à 1,9m/s. Deux tests ont été effectués : le premier à une température de l'eau de 18°C et le deuxième à une température de 24°C. Durant les deux tests, les nageurs maintiennent la même position hydrodynamique en gardant le corps en extension avec la tête entre les bras. Les résultats de cette étude montrent que la résistance passive augmente avec l'augmentation de la profondeur. Pour le premier test, avec une température de 18°C, elle augmente de 21% et pour le deuxième test, avec une température de 24°C, elle augmente de 20% par rapport à la résistance rencontrée au niveau de la surface libre. Essayant d'expliquer ces résultats, Jiskoot & Clarys (1975) ont suggéré que la résistance rencontrée lorsque le corps est complètement immergé est plus grande que la résistance de vague lorsque le corps est immergé partiellement. La figure I-24 montre l'évolution de la résistance passive en fonction de la vitesse au niveau de la surface et à 60cm de profondeur pour les deux températures étudiées (18°C et 24°C).

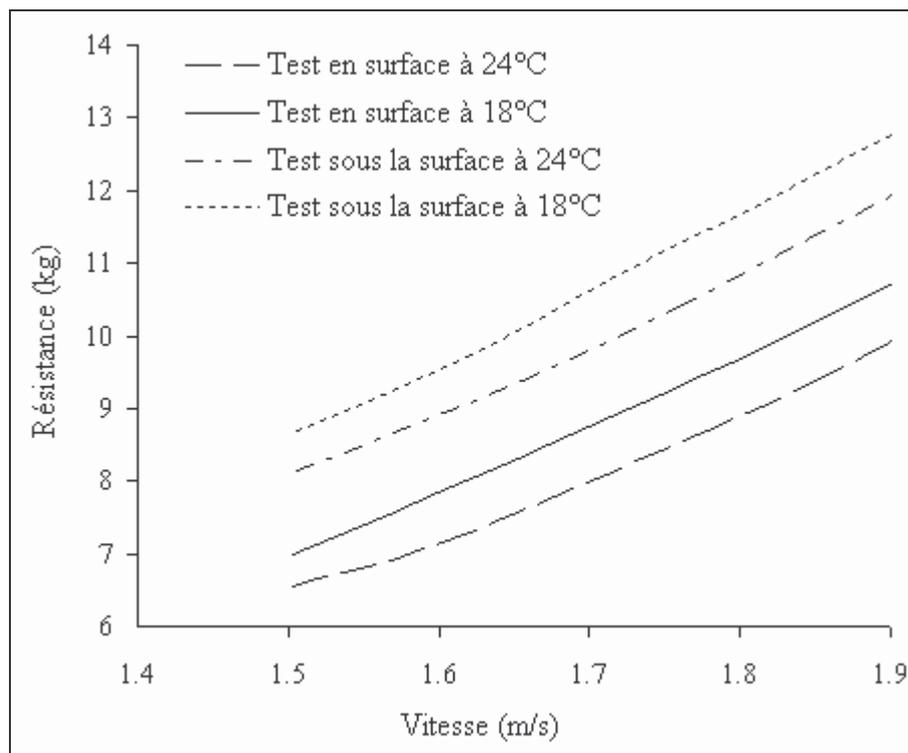


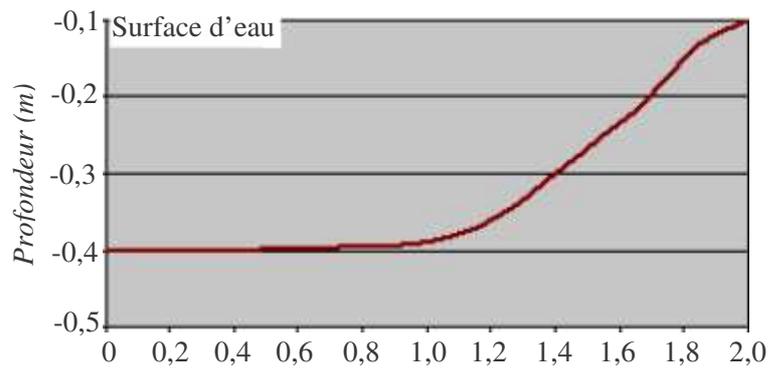
Figure I- 24 : Variation de la résistance passive en fonction de la vitesse au niveau de la surface et à 60cm de profondeur pour des températures de 18°C et 24°C d'après Jiskoot et Clarys (1975).

Cette étude a permis aussi de constater que la résistance passive varie avec le changement de la température. L'augmentation de cette dernière entraîne une diminution de la viscosité du fluide, donc la diminution de la résistance rencontrée. C'est la raison pour laquelle la

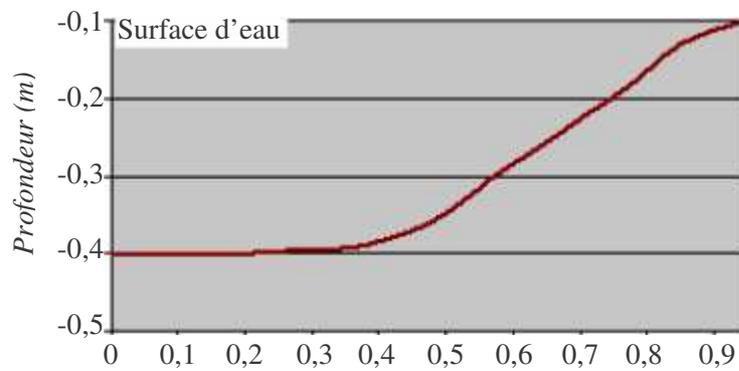
température de l'eau doit être constante durant toutes les expériences pour assurer la validité des résultats trouvés dans le cas des travaux s'intéressant à l'influence d'autres paramètres que la température.

Les différentes méthodes utilisées dans ces études sont douteuses puisqu'elles ne rapportent pas le même résultat, surtout en ce qui concerne la relation entre la vitesse et la résistance linéaire ou exponentielle. Néanmoins, pour les gammes de vitesses présentant la phase de coulée et l'amorce après un virage, Lyttle et al. (1998) ont observé que la relation entre la résistance passive et la vitesse était linéaire. A l'exception de l'étude réalisée par Lyttle et al. (1998), la majorité des études antérieures sur la phase de glissement et l'amorce d'un virage sont effectuées au niveau de la surface de l'eau ou pour des vitesses plus petites que celles qui correspondent à la phase de glissement.

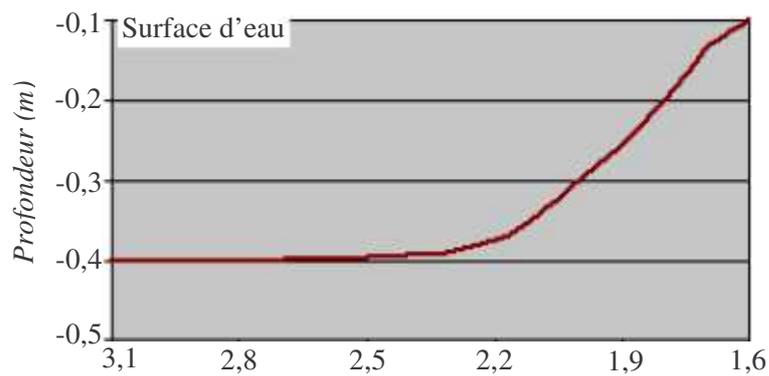
Lyttle et al. (1998) ont modélisé mathématiquement un chemin de glissement optimal pour maximiser la vitesse d'un nageur après le retour d'un virage. Ce chemin est calculé à partir des temps de décélérations et des distances théoriques de glissement pour un nageur qui pousse le mur à une vitesse de $3,1\text{m/s}$ et pour une profondeur de $0,4\text{m}$ approximativement, cette profondeur maintenue constante pour une distance de glissement de 1m pendant approximativement $0,4\text{s}$. Ensuite, le nageur monte progressivement vers la surface de l'eau en traversant une distance de 1m avec une variation de $0,1\text{m}$ chaque $0,2\text{s}$. Finalement, le nageur arrive à la surface avec une vitesse de $1,6\text{m/s}$ [Lyttle et al. (1999)]. La figure I-25 montre la distance, le temps et la vitesse de glissement en fonction de la profondeur.



a) : Distance de glissement horizontale (m)



b) : Temps de glissement (s)



c) : Vitesse de glissement (m/s)

Figure I- 25 a) ; b) ; c): Profondeur de glissement optimale. Distance de glissement, temps et vitesse résultant d'après Lyttle (1999).

I.4.1.c. Relation entre la résistance passive et la morphologie humaine

Des expériences réalisées sur les mammifères ont examiné la relation entre les caractéristiques morphologiques du corps et l'efficacité du mouvement à travers l'eau [Clarys (1979)]. De même, la théorie fondamentale de l'hydrodynamique indique qu'une partie de la résistance passive est déterminée à partir de la forme du corps [Larsen et al. (1981)]. Selon Clarys (1979), la forme du corps humain est certainement un élément essentiel de l'étude de la résistance passive dans l'eau. Plusieurs études ont été effectuées pour examiner l'influence de la forme du corps du nageur sur la résistance passive [Benjanuvattra et al. (2002); Chatard et al. (1990a, b); Clarys (1979); Lyttle et al. (1998); Ria et al. (1987); van Manen & Rijken (1975)]. A partir de ces travaux, de nombreux paramètres de la forme du corps qui influencent la résistance passive ont été déterminés.

Ces paramètres de forme sont notamment le maître couple, la longueur et la largeur du nageur [Chatard et al. (1990a, b), Clarys (1979)]. Cependant, les études effectuées présentent des résultats contradictoires. À titre d'exemple, selon Clarys (1979), la résistance passive n'est pas influencée par la surface du corps. Au contraire, d'autres travaux ont rapporté une forte relation entre la résistance passive et la surface du corps [Chatard et al. (1990), Ria et al. (1987)].

Le principe hydrodynamique fondamental indique que, pour un corps profilé, l'augmentation de la résistance de frottement est directement liée à la surface du corps mouillé [Gadd (1963)]. L'étude réalisée par Lyttle (1998) montre que la surface du corps du nageur n'a pas d'influence sur la résistance passive lorsque le corps est tracté soit en surface, soit en profondeur à 0,2m, 0,4m et 0,6m. En outre, le maître couple, la taille et le poids ont été significativement reliés à la résistance passive [Benjanuvattra et al. (2001); Chatard et al. (1990); Ria et al. (1987)]. Les valeurs les plus petites de la résistance passive ont été observées chez les nageurs souples. Plus récemment, Chatard et al. (1990a, b) indiquent que le meilleur nageur est capable d'adapter sa position pour réaliser une meilleure horizontalité et donc diminuer considérablement la résistance en essayant de garder une position profilée du corps. Cependant, la relation entre la résistance passive et la morphologie humaine n'est pas assez claire et demande plus de tests empiriques [Clothier (2004)].

I.4.1.d. Limites

Avant 1952, les auteurs ont déterminé la résistance hydrodynamique par la méthode de remorquage, d'une façon passive. Cette force a été considérée comme la force de résistance qui s'oppose au déplacement du nageur. Dès 1952, Alley (1952), cité par Clarys (1979) et Jiskoot & Clarys (1975), a mentionné que la résistance passive ne présente pas la résistance rencontrée par le nageur en situation de nage. Ce dernier a mis en évidence la différence entre deux types de résistance : passive et active. Les changements de la vitesse et de la position des segments du nageur au cours du cycle de nage vont entraîner des modifications de leur résistance et donc de la résistance totale du corps. En outre, la résistance passive obtenue pour un nageur donné ne permet pas d'extrapoler la résistance active qu'il rencontrera en situation de nage, les paramètres intervenant dans le calcul de la résistance étant modifiés tout au long du cycle de nage. Bien que facile à mettre en œuvre, la résistance passive du nageur a été rarement mesurée ces dernières années. Parmi les rares auteurs étudiant encore ce paramètre, Chatard et al. (1990a, b) soulignent l'utilité de ce critère pour l'évaluation du niveau de "glisse" d'un nageur.

I.4.2. Résistance active

La résistance active correspond à la résistance d'un corps mesurée en situation de nage [Rushall et al. (1994)]. Elle résulte du mouvement produit par le nageur en vue d'augmenter la propulsion de son corps. Contrairement à la résistance passive mesurée par une seule méthode dite de remorquage, il existe plusieurs techniques pour mesurer la résistance active du nageur, soit directes, soit indirectes. Ces méthodes sont basées sur le coût énergétique, ou sur le calcul des forces d'un nageur placé en situation expérimentale. Ce sont toutes des méthodes très différentes. Dans ce qui suit, nous allons décrire chacune d'elles avec les principaux résultats obtenus et les limites essentielles.

I.4.2.a. Estimation de la résistance active par mesure du coût énergétique

C'est une méthode de mesure indirecte, elle a été utilisée pour la première fois par Di Prampero et al. (1974) pour déterminer la résistance active. Cette méthode suppose que, pour une vitesse constante, les changements du coût énergétique d'un nageur donné résultent des changements de la résistance. La consommation d'oxygène nette ($\dot{V}O_2$) est mesurée pour un nageur se déplaçant à une vitesse constante tout en étant soumis à des charges additionnelles positives ou négatives par un système de poulies. La figure I-26 montre le dispositif expérimental utilisé pour mesurer la résistance active.

Une relation linéaire entre la charge et le $\dot{V}O_2$ net est obtenue pour une vitesse donnée comme cela est schématisé sur la figure I-27. La résistance active est extrapolée à partir de la droite ($\dot{V}O_2$ net / charges) comme étant la résistance correspondant à une vitesse nulle de la consommation d'oxygène nette. Les résultats trouvés montrent que la résistance active est deux fois plus grande que la résistance passive à la même vitesse.

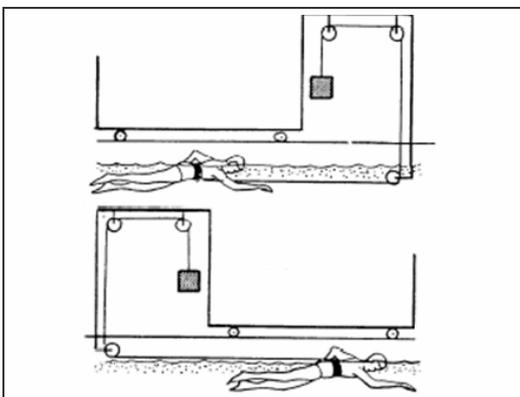


Figure I- 26 : Appareillage permettant au nageur de se déplacer contre ou avec l'aide de charges supportées par un chariot poussé à la même vitesse que celle du nageur. Di Prampero et al. (1974).

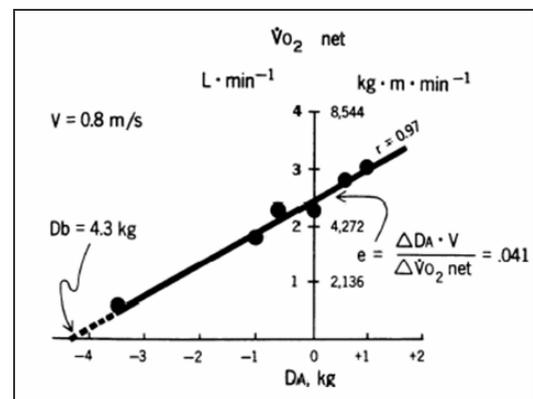


Figure I- 27 : Augmentation linéaire des $\dot{V}O_2$ en fonction des charges à tracter (DA) chez un nageur se déplaçant à vitesse constante. Par extrapolation, il est possible d'obtenir la valeur de la traînée active ici : 4,3kg. Di Prampero et al. (1974).

La limite principale de cette méthode réside dans l'hypothèse de départ qui considère la relation charge- $\dot{V}O_2$ net comme linéaire.

I.4.2.b. Méthode de Schleihauf

Cette méthode est basée sur l'analyse dimensionnelle du mouvement de la main. Schleihauf (1979) a établi un modèle de calcul des forces de portance et de traînée exercées par la main incluant l'angle d'attaque, l'angle de balayage et la vitesse de ce segment à partir d'une étude réalisée en soufflerie. La figure I-28 montre la main utilisée afin de calculer les forces à l'intérieur de la soufflerie.

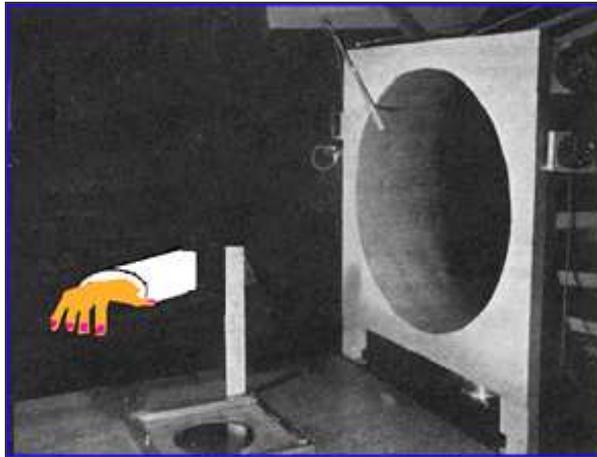


Figure I- 28 : Etude en soufflerie réalisée par Schleihauf (1979)

L'analyse du mouvement de la main en 3D lui permet de retrouver les différents paramètres (angles et vitesse) et de calculer les forces exercées par la main au cours du cycle de nage comme le montre la figure I-29.

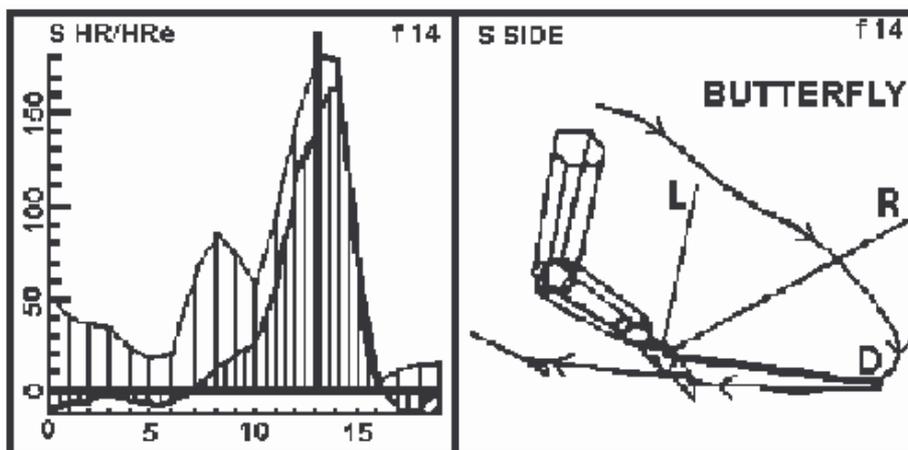


Figure I- 29 : Forces exercées par la main au cours d'un cycle de nage en papillon d'après Schleihauf (1979)

Cette technique de mesure donne des valeurs de résistance active très proches de la résistance passive. La limite principale de cette méthode réside dans la résistance du corps. Celle-ci ne peut pas être assimilée à la force de traînée exercée au niveau de la main. Ces travaux ont été confirmés par Hollander et al. (1986) et Van-der-Vaert et al. (1987).

I.4.2.c. Utilisation du système MAD

Cette technique a été développée par Hollander et al. (1986). C'est la première méthode qui a permis de mesurer directement la résistance active durant la nage. Le système MAD⁴ (Measure Active Drag) est composé d'un long rail sur lequel sont fixés des blocs, montés à égale distance, à une profondeur de 0,8m. Ce système utilise une approche dynamométrique où les sujets nagent en prenant appui sur un bloc à chaque cycle de bras. A l'extrémité du rail, un capteur de force enregistre la force produite lors de chaque mouvement de poussée du nageur. La figure I-30 montre le dispositif expérimental utilisé pour mesurer la résistance active par une méthode directe.

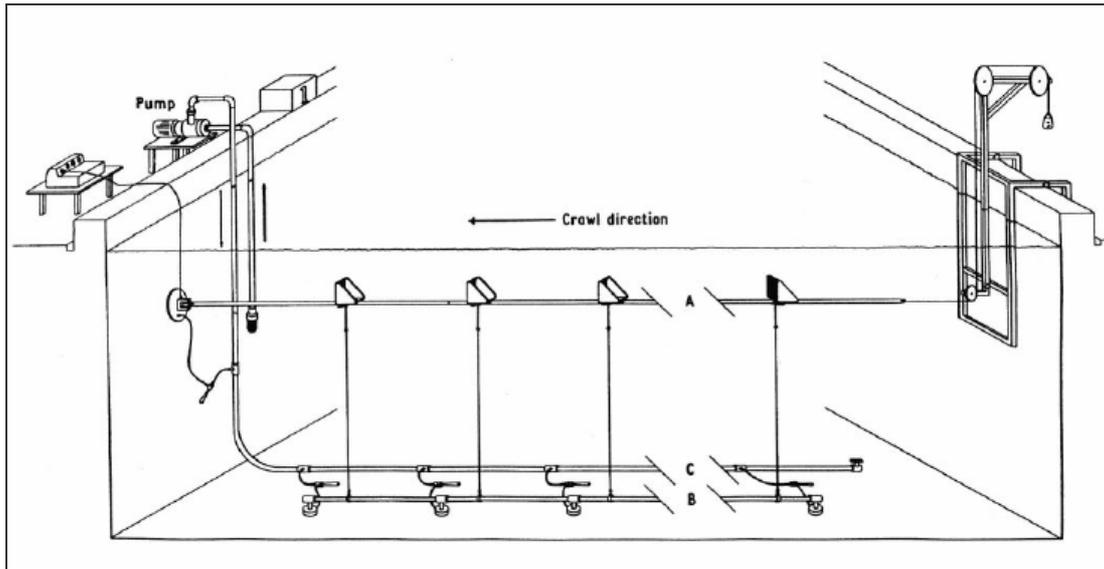


Figure I- 30 : Vue d'ensemble du MAD System d'après Hollander et al. (1986).

A une vitesse constante, la force de poussée enregistrée au niveau du capteur de force est égale à la résistance active du corps. Les vitesses maximales et les fréquences de mouvement des bras atteintes avec le système MAD sont plus élevées qu'en nage libre malgré un effort musculaire similaire [Hollander et al. (1988)].

Dans le cas de la nage libre, une partie de l'énergie cinétique de la main est transmise à la colonne d'eau sur laquelle elle prend appui, donc la masse d'eau va se mettre en mouvement et offrir une moindre résistance à la force d'appui de la main du nageur. La réaction à cette force d'appui de la main sera donc diminuée. En utilisant le système MAD, la fixité d'appui ne permet aucune transmission d'énergie cinétique de la main vers la colonne d'eau, donc la force d'appui de la main est utilisée totalement pour propulser le corps du nageur. Cela explique le fait que la vitesse maximale avec le système MAD est plus grande que dans le cas de la nage libre.

⁴ Le MAD System mesure la force propulsive des membres supérieurs à chacun de leur cycle locomoteur par l'intermédiaire de capteurs de forces montés sur des appuis fixes situés en série sur la trajectoire du nageur. La force propulsive ainsi mesurée serait égale à la traînée active selon Hollander et al. (1988).

Hollander et al. (1985, 1986) trouvent des résultats équivalents pour les deux types de résistances passive et active. Van der Vaart et al. (1987) trouvent que la résistance active est plus grande que la résistance passive. Cela est dû à la plus grande résistance de vague lorsque le sujet nage que lorsqu'il est remorqué. Il en déduit une surestimation de la résistance active comparée à la résistance passive.

I.4.2.d. Méthode de Komolgorov et Duplisheva

C'est la méthode la plus récente élaborée par Kolmogorov et Duplisheva (1992) pour mesurer la résistance active. Dans cette méthode, la vitesse maximale réalisée par le nageur lorsqu'il nage avec un objet attaché de résistance connue est comparée à la vitesse réalisée en nageant librement. La force de résistance active est calculée à partir de ces vitesses et sous l'hypothèse que le nageur est capable de délivrer la même énergie mécanique dans les deux situations.

Le coefficient de traînée est estimé comme suit :

$$F_{t1} \times V_1 = (F_{t2} + F_{obj}) \times V_2 \quad (I-6)$$

Sachant que

$$F_t = 0,5 \cdot C_t \cdot \rho \cdot S \cdot V^2 \quad (I-7)$$

On obtient en remplaçant (I-7) dans (I-6):

$$0,5 \cdot C_t \cdot \rho \cdot S \cdot V_1^3 = 0,5 \cdot C_t \cdot \rho \cdot S \cdot V_2^3 + F_{obj} \cdot V_2 \quad (I-8)$$

En développant l'égalité (I-7) on obtient:

$$C_t = \frac{(F_{obj} \times V_2)}{0,5 \times \rho \times S \times (V_1^3 - V_2^3)} \quad (I-9)$$

Où :

- F_t est la traînée (N)
- V est la vitesse maximale de nage (m/s)
- ρ est la masse volumique de l'eau (kg/m^3)
- S est le maître couple (m^2)

En utilisant cette technique, Kolmogorov et al. (1997) ont étudié la relation entre le coefficient de traînée et la vitesse dans les quatre styles de nage. Ils n'ont trouvé aucune différence significative entre les hommes et les femmes. Ils observent également des valeurs importantes du coefficient de traînée (ou de la traînée), en brasse suivie, du dos, du papillon et enfin du crawl.

$$F_t = \frac{F_{obj} \times V_2 \times V_1^2}{V_1^3 - V_2^3} \quad (I-10)$$

Dans cette méthode, l'erreur estimée est de l'ordre de 6% à 8%. Malgré cela, cette méthode a permis l'étude de la résistance active pour des nageurs de haut niveau pour différentes techniques de nage [Kolmogorov et al. (1992)]. Cette méthode suppose une surface du maître couple constante tout le long du cycle de nage, et reste limitée de ce fait.

I.5. Utilisation de la mécanique des fluides numérique en natation

En raison du coût élevé des expériences et de leur complexité lors de l'utilisation des différentes techniques de mesure expérimentales, les chercheurs se sont orientés vers la simulation numérique en utilisant les codes de mécanique des fluides numérique couramment appelés CFD (Computational Fluid Dynamics). La CFD est une méthode qui a été développée pour résoudre numériquement les écoulements fluides dans des géométries plus au moins complexes. Elle a été utilisée dans plusieurs domaines sportifs tels le ski olympique et la navigation. Elle est introduite comme une nouvelle méthode, dans le domaine de la natation, pour étudier l'écoulement autour du corps ou les extrémités du nageur. Elle a été également appliquée à l'étude de combinaisons de natation.

Dans ce qui suit, nous allons détailler les travaux réalisés en natation en utilisant cette nouvelle méthode. Dans la majorité des cas, la CFD a été appliquée pour étudier l'écoulement fluide autour de la main et de l'avant-bras [Bixler & Riewald (2002) ; Rouboua et al (2006), Sato & Hino (2002)] ou autour du bras entier [Gardano & Dabnichki (2006)]. En ce qui concerne l'étude de l'écoulement autour du corps entier peu de travaux ont été réalisés. On peut citer ceux de Lyttle & Keys (2004) qui ont étudié l'écoulement autour du corps entier d'un nageur afin d'optimiser la technique de coup de pieds lors de la phase de retour après un virage. Un deuxième travail a été réalisé par Bixler et al. (2007) afin de calculer la force de résistance passive lors de la phase de coulée pour différentes valeurs de vitesses. La CFD peut répondre aux questions auxquelles les études expérimentales n'ont pas pu répondre.

Avant d'être appliquée sur un modèle réel, cette méthode a été utilisée pour la première fois par Bixler & Schloder (1996) en utilisant le logiciel Fluent[®] dans le but de simuler l'écoulement autour d'un disque qui a la même surface que la main d'un nageur. La simulation a été effectuée dans le cas stationnaire et instationnaire, les valeurs de vitesses et d'accélération ont été choisies dans la même gamme des vitesses et d'accélération de la main que celles observées dans le cas réel de la nage libre. La force de traînée déterminée à partir de cette méthode montre que l'accélération de la main peut augmenter la force de propulsion jusqu'à 40% par rapport à une main à vitesse constante. C'est une valeur approximative étant donné que le calcul a été fait avec un disque et non pas avec une main réelle. Les résultats trouvés montrent que, pour améliorer la performance pendant la nage libre, le nageur doit accélérer sa main dès le début et jusqu'à la fin de la phase de propulsion au lieu de garder une vitesse constante. Ces résultats initiaux montrent la nécessité d'étudier l'écoulement autour d'un modèle réel de la main et de l'avant-bras en prenant en considération d'autres variables tels le nombre de Reynolds et l'angle d'attaque. Cette étude peut fournir une évaluation plus précise sur l'effet de l'accélération de la main sur la force de propulsion et sur la traînée.

En natation, la première étude qui a employé la méthode CFD sur un modèle réel est celle de Bixler & Riewald (2002). Ces derniers ont utilisé la CFD pour approcher l'écoulement autour de la main et de l'avant bras d'un nageur. Cette modélisation numérique avait pour objectif le calcul des forces et des coefficients hydrodynamiques pour plusieurs angles d'attaque. La figure I-31 présente le modèle géométrique et le maillage réalisés à partir de la main et de l'avant-bras droit d'un adulte. Le maillage utilisé est constitué de cellules de forme triangulaire, le nombre de mailles est de 215 000.

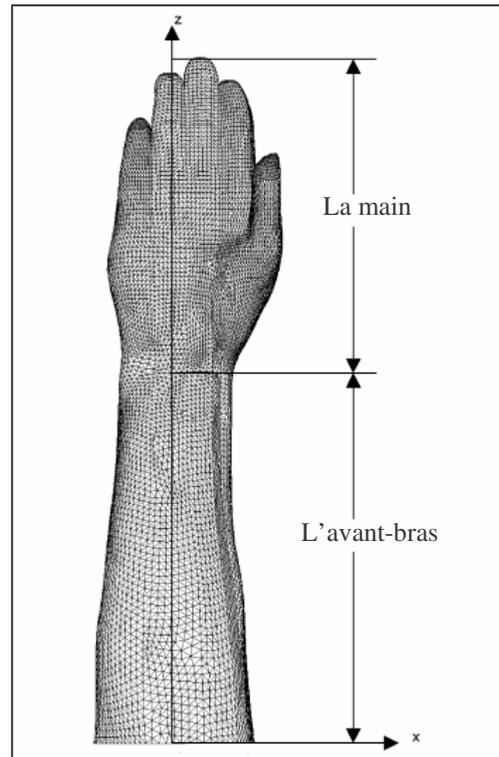


Figure I- 31 : Géométrie et maillage de la main et de l'avant-bras
après Bixler & Riewald (2002)

Les simulations numériques des écoulements ont été effectuées dans le cas stationnaire pour plusieurs angles d'attaque⁵ (figure I-32), qui varient entre -15° et 195° avec un incrément de 15° et pour des vitesses variant de 0,4 à 3m/s. Le code Fluent[®] basé sur la méthode des volumes finis a été utilisé pour résoudre le système d'équations régissant l'écoulement. Tous les schémas numériques utilisés sont du second ordre. Le modèle de turbulence $k-\varepsilon$ standard a été choisi avec la loi de paroi "Non Equilibrium Wall Function". La peau du nageur est considérée lisse (rugosité égale à 0) et l'intensité de la turbulence prise à 1%.

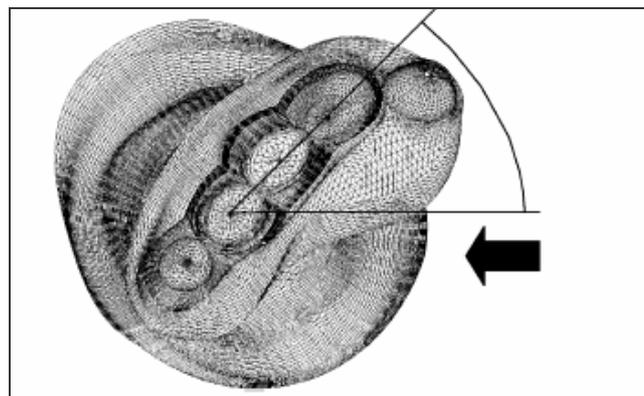


Figure I- 32 : Angle d'attaque entre l'axe x et la direction de l'écoulement d'après Bixler & Riewald (2002)

⁵ L'angle d'attaque est l'angle entre l'axe de la main et la direction de l'écoulement.

Les résultats de cette étude montrent que les coefficients des forces de traînée et de portance calculés numériquement sont en accord avec ceux calculés expérimentalement. Ils montrent aussi que les coefficients sont fonction de l'angle d'attaque pour les vitesses comprises entre 0,4 et 1m/s et sont constants pour les vitesses comprises entre 1 et 3,1m/s. La figure I-33 montre le décollement de l'écoulement autour de la main et de l'avant-bras pour tous les angles d'attaque et toutes les valeurs de vitesses étudiées.

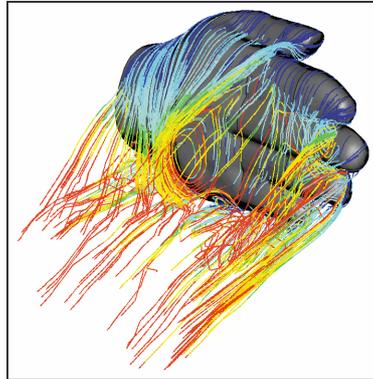


Figure I- 33 : Décollement de l'écoulement autour de la main d'après Bixler & Riewald (2002)

Très récemment, Rouboa et al. (2006) ont utilisé la CFD dans le but de calculer les coefficients de traînée et de portance, pour la main et l'avant bras d'un nageur dans les cas stationnaire et instationnaire, ainsi que d'évaluer l'effet de l'accélération de la main et de l'avant-bras sur la génération de la force de propulsion. Le modèle de la main et de l'avant-bras utilisé lors de la simulation numérique est construit en utilisant un logiciel de CAO (Conception Assistée par Ordinateur) basé sur les dimensions d'un modèle de la main et de l'avant-bras d'un sujet réel masculin. Le modèle géométrique a été divisé en trois segments, la main avec 190mm, l'avant-bras avec 210mm et la base avec 85mm. Les figures I-34 et I-35 montrent les trois différentes orientations du modèle réalisé, un modèle frontal ($\theta = 90, \Phi = 0$) et deux modèles latéraux ($\theta = 0, \Phi = 0$) et ($\theta = 180, \Phi = 0$), pour lesquels les simulations ont été effectuées.

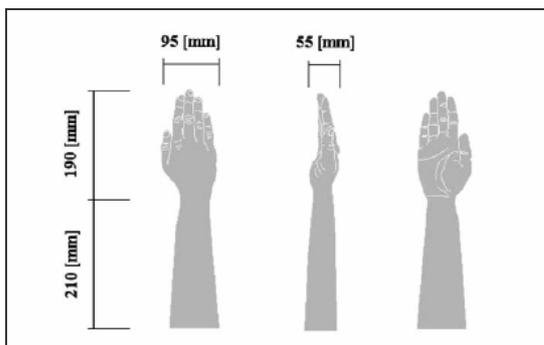


Figure I- 34 : Dimensions du modèle d'après Rouboa et al. (2006)

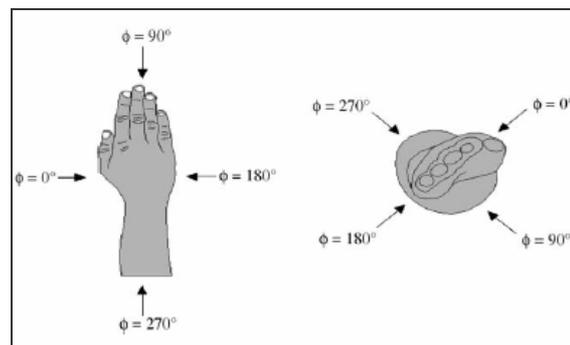


Figure I- 35 : Orientations étudiées de la main et de l'avant-bras d'après Rouboa et al. (2006)

Le modèle de la main et de l'avant-bras a été placé dans une ellipse de larges dimensions pour éviter la perturbation de l'écoulement par les conditions aux limites imposées. Le maillage a été défini en utilisant le logiciel Gambit[®]. Ensuite, ce dernier a été exporté vers le logiciel Fluent[®] afin d'effectuer les simulations numériques. Le domaine de calcul contient 400 000 cellules.

Les conditions aux limites imposées dans cette étude sont les suivantes :

- Sur le côté droit du domaine fluide : la composante horizontale de la vitesse est imposée de $0,5\text{ m/s}$ jusqu'à 4 m/s par incrément de $0,5\text{ m/s}$. La composante verticale est prise égale à 0 .
- Sur le côté gauche du domaine fluide : la pression est égale à 1 atm .
- Autour du modèle, sur la surface de la main et de l'avant-bras, les deux composantes de vitesse sont égales à 0 (la condition de non glissement a été supposée).

La figure I-36 montre le domaine fluide construit autour de la main et de l'avant-bras ainsi que les conditions aux limites imposées.

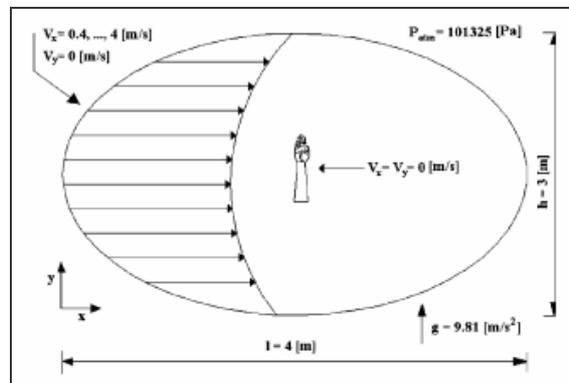


Figure I- 36 : Domaine fluide autour du modèle étudié; conditions aux limites d'après Rouboa et al. (2006)

La simulation numérique a été effectuée dans le cas d'un écoulement stationnaire et instationnaire en utilisant le logiciel Fluent[®]. Ce dernier résout les équations régissant l'écoulement fluide turbulent. Les principaux résultats reportés dans cette étude montrent que, sous les conditions stationnaires, le coefficient de traînée est celui qui contribue le plus à la force de propulsion, il est presque constant dans la gamme de vitesse étudiée. La force de propulsion générée dans les conditions instationnaires est plus grande que celle générée dans les conditions stationnaires. Ainsi, l'accélération de la main et de l'avant bras apporte plus de propulsion au nageur. Rouboa et al. (2006) ont conclu, d'après cette étude, que la CFD peut être considérée comme une nouvelle approche intéressante pour calculer les forces en natation.

L'écoulement autour de la main et de l'avant-bras a aussi été étudié par Sato & Hino (2002) en utilisant la CFD. Le but de ce travail est d'établir une méthode pour prédire la force de poussée et optimiser le mouvement du nageur pendant la nage. La figure I-37 montre le parcours d'un point fixe sur la main du nageur durant son mouvement.

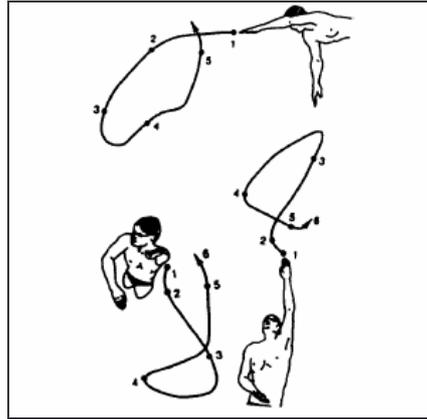


Figure I- 37 : Cheminement d'un point fixe sur la main du nageur d'après Yohei & Takanori (2002)

La simulation numérique a été effectuée dans un premier temps dans le cas stationnaire puis dans le cas instationnaire. Le maillage du domaine fluide, montré sur la figure I-38, est construit sur la base de cellules triangulaires, le nombre de cellules est de 180 000.

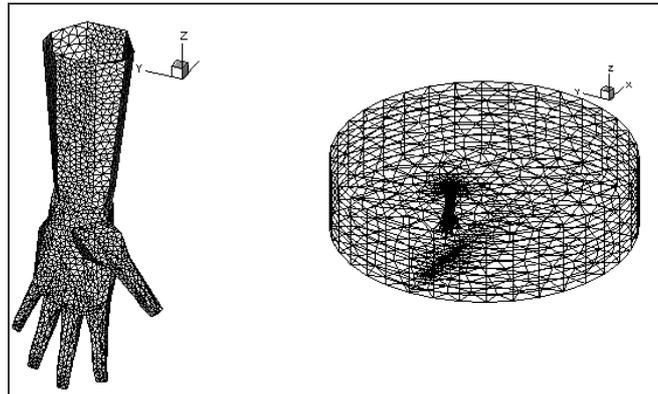


Figure I- 38 : Maillage surfacique de la main et volumique du domaine fluide autour de la main d'après Yohei & Takanori (2002)

Dans le cas instationnaire, le calcul de l'écoulement autour de la main a été effectué pour la même direction de déplacement qui correspond à un angle d'attaque de 90° et pour cinq accélérations différentes qui varient de 1 à $5m/s^2$ avec un incrément de $1m/s^2$. La figure I-39 montre le domaine et le maillage utilisés pour réaliser les simulations.

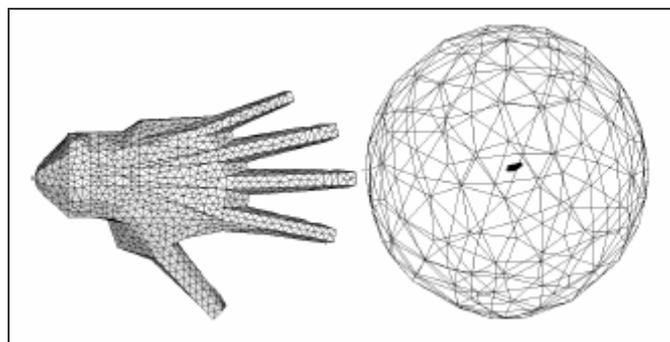


Figure I- 39 : Géométrie et maillage du domaine fluide utilisé d'après Yohei & Takanori (2002)

Les résultats de cette étude montrent que la traînée dans le cas du calcul instationnaire est beaucoup plus élevée que dans celui du cas stationnaire. La traînée augmente avec l'augmentation de l'accélération.

Un autre travail a été effectué par Gardano & Dabnichki (2006) dans le but de mettre en valeur l'importance de l'analyse de l'écoulement autour du bras entier d'un nageur afin de calculer les valeurs exactes des forces de propulsion et de résistance. Ces forces ont été mesurées expérimentalement en utilisant un canal aéraulique et numériquement en utilisant la CFD avec le logiciel Fluent[®]. Dans cette étude, en plus de l'angle d'attaque, un nouveau paramètre a été pris en considération, c'est l'angle de rotation du bras. Ce dernier change à chaque position du bras, ce qui influe sur la génération de la force de propulsion.

Pour ce faire deux études parallèles ont été effectuées:

- *L'étude expérimentale*

Cette étude a permis de mesurer les forces de traînée et de portance qui agissent sur le bras en utilisant une soufflerie (figure I-40).

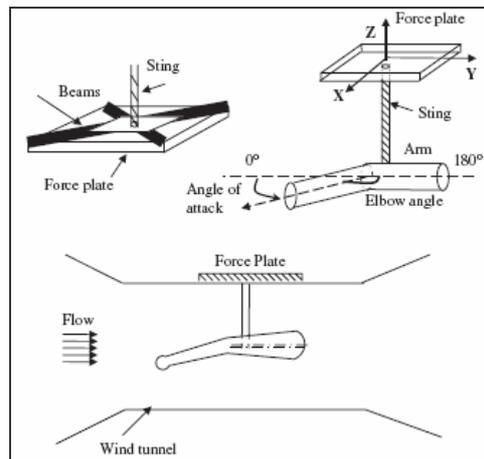


Figure I- 40: Dispositif expérimental utilisé pour mesurer les forces qui agissent sur le bras entier d'après Gardano & Dabnichki (2006)

Les forces de traînée et de portance ont été mesurées directement, pour les différentes configurations étudiées, en utilisant le logiciel Bioware (Kistler Ltd).

- *L'étude numérique*

Cette étude a été réalisée en utilisant le logiciel Fluent[®] qui permet de calculer numériquement les forces de traînée et de portance. La géométrie a été construite pour trois différents angles de rotation du bras de 135° , 160° et 180° correspondant aux conditions de mesure expérimentales. Le maillage est réalisé en utilisant le logiciel Gambit[®]. Le régime d'écoulement autour du bras est turbulent. Le bras est considéré rigide et lisse (rugosité nulle) et l'intensité de la turbulence est de 1%. L'angle d'attaque varie de 0 à 140° avec un incrément de 10° . Les résultats des simulations numériques obtenus à partir du logiciel Fluent[®] montrent des coefficients de force variant en fonction de l'angle d'attaque. Ces résultats sont en bon accord avec ceux obtenus expérimentalement [Gardano & Dabnichki (2006)].

En ce concerne l'étude de l'écoulement autour du corps entier, d'après la littérature, peu de travaux ont été effectués. Le premier travail a été réalisé par Lyttle & Keys (2004). Le but est de prescrire aux nageurs de haut niveau une technique de coup de pieds optimale en phase de départ "coulée" et en phase de retour après virage pour améliorer la poussée. Pour ce faire, un nageur de haut niveau a servi de modèle pour réaliser cette étude. La construction du modèle du nageur a été effectuée à l'aide d'un scanner 3D "Cyberware WBX" de résolution élevée, la géométrie a été construite en une seule fois pour une position qui correspond à la phase de glissement avec un corps profilé et les bras tendus. La figure I-41 montre la position adoptée par le nageur durant la phase de scanner.



Figure I- 41 : Position adoptée par le nageur pendant le scanner d'après Lyttle & Keys (2004)

La figure I-42 montre la géométrie construite du nageur qui a été utilisée pour effectuer les simulations numériques.

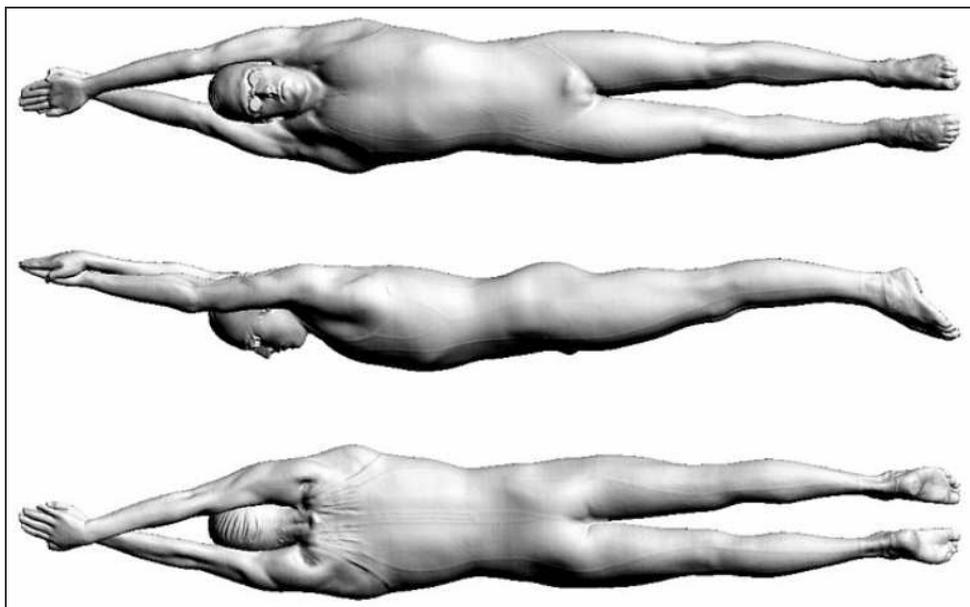
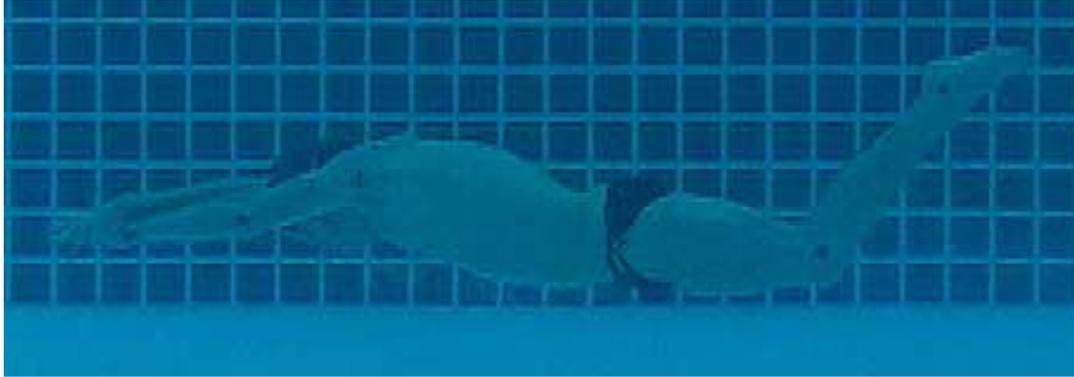


Figure I- 42 : Modèle du nageur réalisé à partir d'un scanner 3D d'après Lyttle & Keys (2004)

Le nageur a ensuite été filmé sous l'eau dans un plan sagittal en effectuant deux mouvements de pieds différents : le premier en utilisant des amplitudes élevées à basse fréquence et le deuxième en utilisant des amplitudes basses à haute fréquence. Les vitesses étudiées varient de $1,5\text{ m/s}$ à $2,4\text{ m/s}$. La figure I-43 montre les deux mouvements des pieds réalisés par le nageur.



a) : *Mouvement de coup du pied avec grande amplitude*



b) : *Mouvement de coup de pied avec petite amplitude*

Figure I- 43 a), b) : Mouvements de coups de pieds testés

La simulation numérique a été effectuée en utilisant le logiciel Fluent[®]. Elle a été réalisée en deux étapes. La première concerne le cas d'un glissement profilé en considérant le corps humain comme un objet solide, sans mouvement. L'intérêt de cette étape est d'effectuer des comparaisons avec la résistance passive obtenue lors des expériences effectuées au "Department of Human Movement and Exercise Science at the University of Western Australia". Le but de cette étape est de valider le calcul numérique. La deuxième étape est la réalisation de calculs en considérant le mouvement du nageur. Cette dernière a été effectuée pour deux mouvements différents de coup de pieds : avec des amplitudes importantes et avec des amplitudes faibles. Les résultats trouvés montrent que, pour la gamme de vitesses étudiée, le mouvement de coup de pied avec des amplitudes importantes est plus performant qu'avec les petites amplitudes. Pour la vitesse de $2,4\text{ m/s}$ aucune différence n'a été observée entre les deux modes du mouvement, c'est la position du corps profilé qui donne une meilleure performance en comparant avec les deux mouvements du coup de pieds puisqu'elle entraîne moins de dépense d'énergie.

Le deuxième travail numérique a été réalisé par Bixler et al. (2007) dans le but d'étudier l'écoulement du fluide autour du nageur et de calculer les forces rencontrées lors de son déplacement dans le milieu aquatique. Les forces de traînée ont été déterminées numériquement pour des vitesses de $1,5\text{m/s}$, $1,75\text{ m/s}$, 2 m/s et $2,25\text{m/s}$, puis comparées aux valeurs mesurées expérimentalement dans les mêmes conditions. La géométrie utilisée pour réaliser les simulations numériques a également été construite en utilisant un scanner 3D. La figure I-44 montre des vues dorsale, latérale et frontale de la géométrie du nageur.

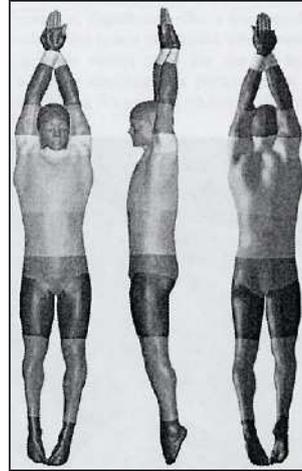


Figure I- 44 : Géométrie du nageur étudiée en phase de coulée d'après Bixler et al. (2007).

Le maillage du domaine fluide a été réalisé en utilisant le logiciel TGrid[®] sur la base de cellules de forme triangulaire, un exemple des maillages, de la tête, des mains et des pieds est présenté sur la figure I-45:

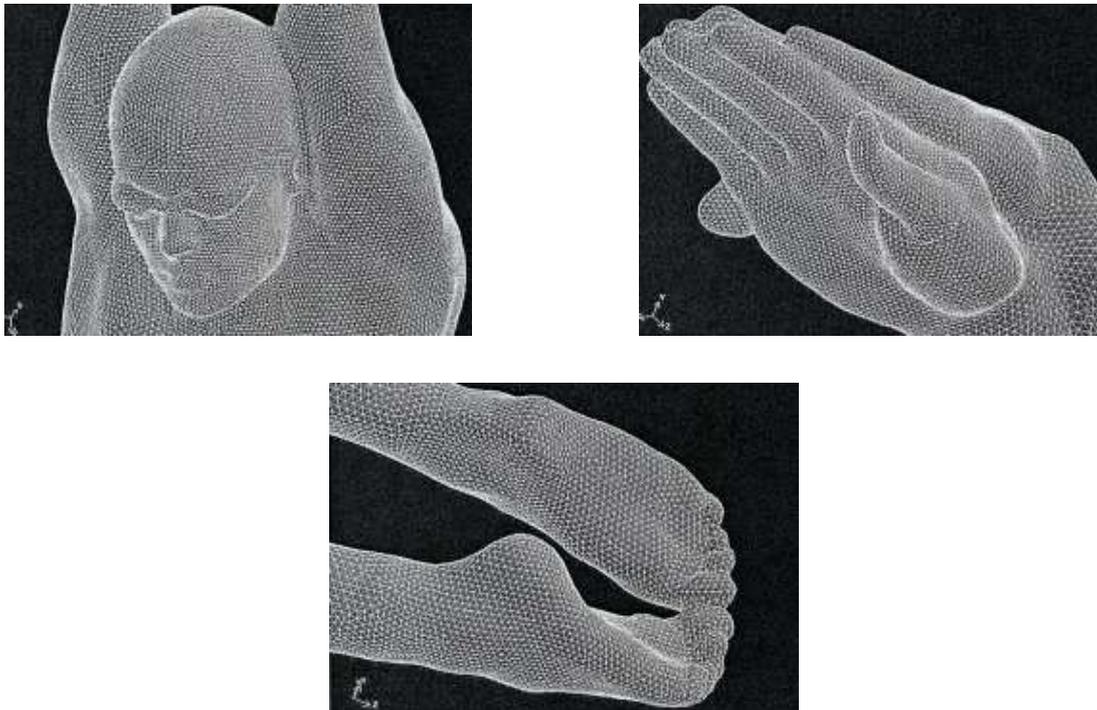


Figure I- 45 : Maillages de la tête, des mains et des pieds du nageur construits à base de cellules triangulaires d'après Bixler et al. (2007).

Dans ce travail, Bixler et al. (2007) ont étudié également l'effet du port de combinaison de natation sur la force de résistance rencontrée. Ils ont trouvé que le port de combinaison diminue la force de traînée de 6%. La figure I-46 montre l'évolution de la force de traînée en fonction de la vitesse avec et sans combinaison.

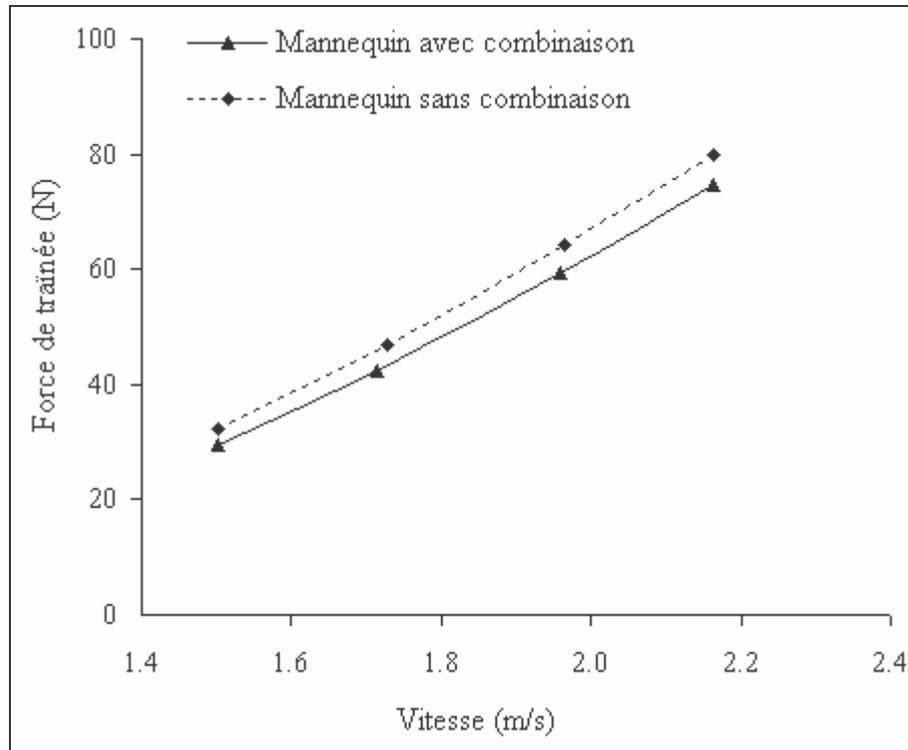


Figure I- 46 : Evolution de la force de traînée en fonction de la vitesse avec et sans combinaison de natation d'après Bixler et al. (2007)

Bixler et al. (2007) indiquent que la comparaison entre leurs résultats numériques et expérimentaux était satisfaisante et que cette étude a permis la validité de l'utilisation de la méthode CFD dans le domaine de la natation. Elle a aussi permis de connaître la distribution relative des différentes formes de traînée dans la traînée totale [Bixler et al. (2007)].

I.6. Conclusion

Dans ce premier chapitre, les trois composantes de la force de résistance, visqueuse, de forme et de vague, qui s'opposent au déplacement du nageur dans le milieu fluide ont été présentées et les techniques minimisant ces dernières ont été proposées par différents auteurs. Nous avons conclu que la résistance change avec plusieurs paramètres tels la vitesse, la profondeur et la position du corps du nageur durant son déplacement. Ce sont des paramètres importants à prendre en considération afin d'améliorer la performance.

Nous avons constaté que la plupart des travaux effectués étudiaient la résistance à l'avancement expérimentalement. Ces travaux montrent des résultats contradictoires, Ils s'intéressent surtout à la minimisation de la résistance de frottement et la résistance de vague. Dans le cadre de la présente thèse, on s'intéresse plus particulièrement à la résistance de forme liée à la position hydrodynamique du corps du nageur.

La nouvelle méthode par simulation numérique "CFD", utilisée depuis ces dernières années dans le but de calculer les forces de résistance et d'étudier les écoulements fluides autour des extrémités ou du corps entier du nageur, a été présentée. L'utilisation de cette méthode apparaît très encourageante en raison des résultats obtenus dans des études antérieures. Nous proposons donc dans ce travail de thèse d'utiliser cette méthode afin de calculer les forces de résistance rencontrées par le nageur dans différentes configurations dans le but d'améliorer la performance. Dans le chapitre suivant, on détaillera la modélisation géométrique du modèle du nageur ainsi que la simulation numérique de l'écoulement autour de celui-ci.

CHAPITRE II : MATERIELS & METHODES

Nous avons vu au premier chapitre de synthèse bibliographique que l'amélioration de la performance hydrodynamique nécessite la minimisation des forces de résistances rencontrées par le nageur. La force de résistance est la somme des trois composantes ; la traînée visqueuse, la traînée de forme et la traînée de vague. La plupart des études effectuées auparavant s'intéressent à améliorer la performance par la minimisation de la traînée visqueuse et de la traînée de vague. Les travaux s'intéressant à la traînée de forme sont très rares. Le but de ce travail est d'améliorer la performance hydrodynamique par la minimisation de la traînée de forme en utilisant la simulation numérique.

La traînée de forme est liée principalement à la position du corps du nageur. Cette traînée peut être minimisée en adoptant des positions hydrodynamiques du corps et en utilisant des techniques d'entraînement bien spécifiques pour chaque phase et chaque style de nage.

Les techniques d'entraînements ont beaucoup évolué au cours des années. Actuellement, les entraîneurs sont confrontés à un problème qu'ils ne savent pas encore résoudre. Quelle est la meilleure position de la tête à prescrire aux nageurs en phase de coulée et de retour après un virage; tête relevée, tête alignée ou tête baissée sachant que, de nos jours, la position la plus utilisée par les nageurs est celle de la tête baissée. La Figure II-1 montre les trois positions de la tête relevée, alignée et baissée. Le but de ce travail est d'étudier numériquement l'écoulement autour du nageur pour ces trois positions afin de déterminer la position la plus performante possible, c'est-à-dire qui offre le moins de résistance à l'avancement du nageur.



a) : Tête relevée

b) : Tête alignée

c) : Tête baissée

Figure II- 1 : Trois positions de la tête pendant la phase de coulée et de retour après un virage

Dans ce qui suit, nous allons décrire les méthodes de construction du modèle géométrique du nageur ainsi que la génération du maillage nécessaire pour la simulation numérique. Ensuite, nous écrirons les équations de conservation régissant l'écoulement fluide autour du nageur. Enfin, nous présenterons la méthode des volumes finis utilisée par le logiciel Fluent[®] pour résoudre le système d'équations obtenu.

II.1. Modélisation géométrique du modèle du nageur

Avant d'entreprendre la simulation numérique de l'écoulement autour du nageur, la première étape consiste à construire un modèle géométrique représentant le corps du nageur. La construction a été effectuée en utilisant deux méthodes différentes :

- Construction du modèle en utilisant un scanner 3D avec le logiciel RapidForm[®].
- Construction du modèle en utilisant des photos numériques avec le logiciel CATIA V5[®]. Ce travail a été réalisé au sein du Laboratoire d'Analyse des Contraintes Mécaniques [LACM] de l'URCA par des stagiaires de l'Université de Technologie de

Troyes dans le cadre d'un projet de fin d'études. Ce logiciel a été utilisé pour construire le modèle du nageur dans les cas bidimensionnel et tridimensionnel.

II.1.1. Utilisation du scanner et du logiciel RapidForm®

II.1.1.a. Le scanner

Le matériel utilisé est un scanner 3D qui fonctionne par balayage laser. Le nageur a été scanné en position allongée correspondant à sa position en phase de glissement. Le traitement de ces acquisitions numériques permet d'obtenir un fichier global 3D de la géométrie du nageur. La figure II-2 montre le scanner utilisé.



Figure II- 2: Scanner 3D KONICA MINOLTA utilisé pour la construction du modèle du nageur.

Cependant, le scanner utilisé pour construire le modèle géométrique du nageur ne permet pas de scanner le corps entier en une seule fois, donc celui-ci a été scanné en plusieurs fois. Cette méthode posera des problèmes lors de l'assemblage des différentes parties du corps afin de construire la géométrie finale. Les acquisitions numériques du scanner sont traitées par le logiciel RapidForm®.

II.1.1.b. Utilisation du logiciel RapidForm®

C'est un logiciel de traitement des données issues du scanner 3D. Il dispose d'une multitude de fonctions lui permettant de construire, nettoyer, assembler et mailler les différentes parties de la géométrie. Ce logiciel est compatible avec l'ensemble des systèmes d'acquisitions 3D du marché.

Les nuages de points enregistrés pour chaque partie du corps sont utilisés pour construire les surfaces correspondantes. Ensuite, le logiciel construit la géométrie entière en assemblant toutes les surfaces réalisées individuellement dans l'étape précédente. La figure II-3 montre une visualisation d'un ensemble de nuages de points récupérés à partir du scanner.

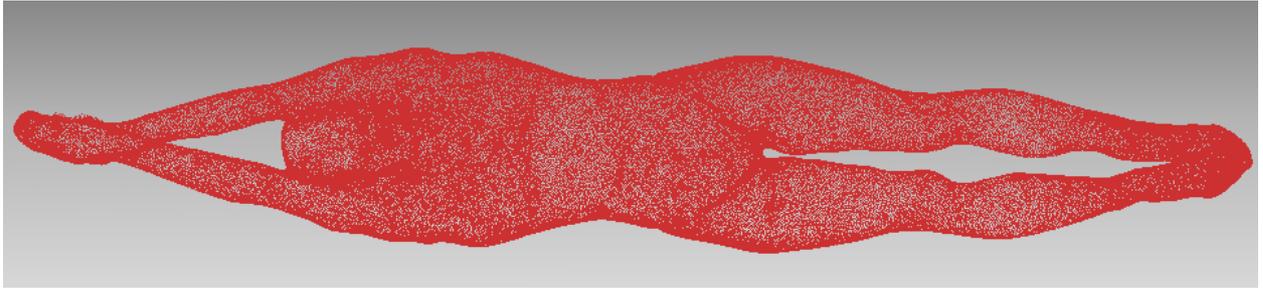
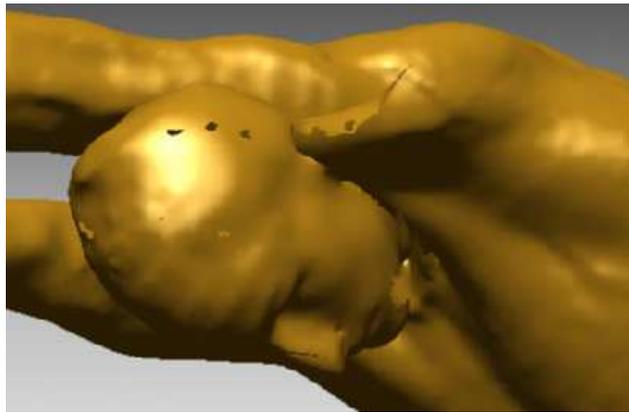
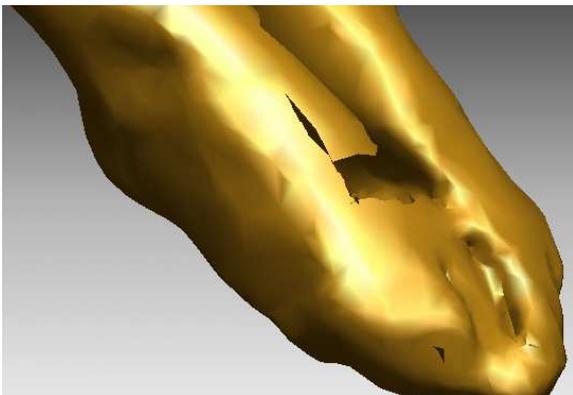


Figure II- 3: Nuage de points récupérés à partir du scanner et utilisés lors de la construction de la géométrie.

Après avoir construit toutes les surfaces nécessaires pour réaliser le modèle géométrique complet du nageur, l'étape suivante consiste à les rassembler (souder). Il s'agit de l'une des étapes les plus complexes de la modélisation géométrique du nageur. Ainsi, lors de l'assemblage de ces parties, plusieurs problèmes ont été rencontrés. Il a fallu corriger et nettoyer la géométrie, supprimer tous les trous qui peuvent causer des problèmes lors de l'importation ou lors du maillage de la géométrie. La figure II-4 montre quelques problèmes rencontrés dans la construction de la géométrie.



a) Problème d'intersection des bras avec la tête ; des trous au niveau de la tête



b) Grand trou au niveau des pieds



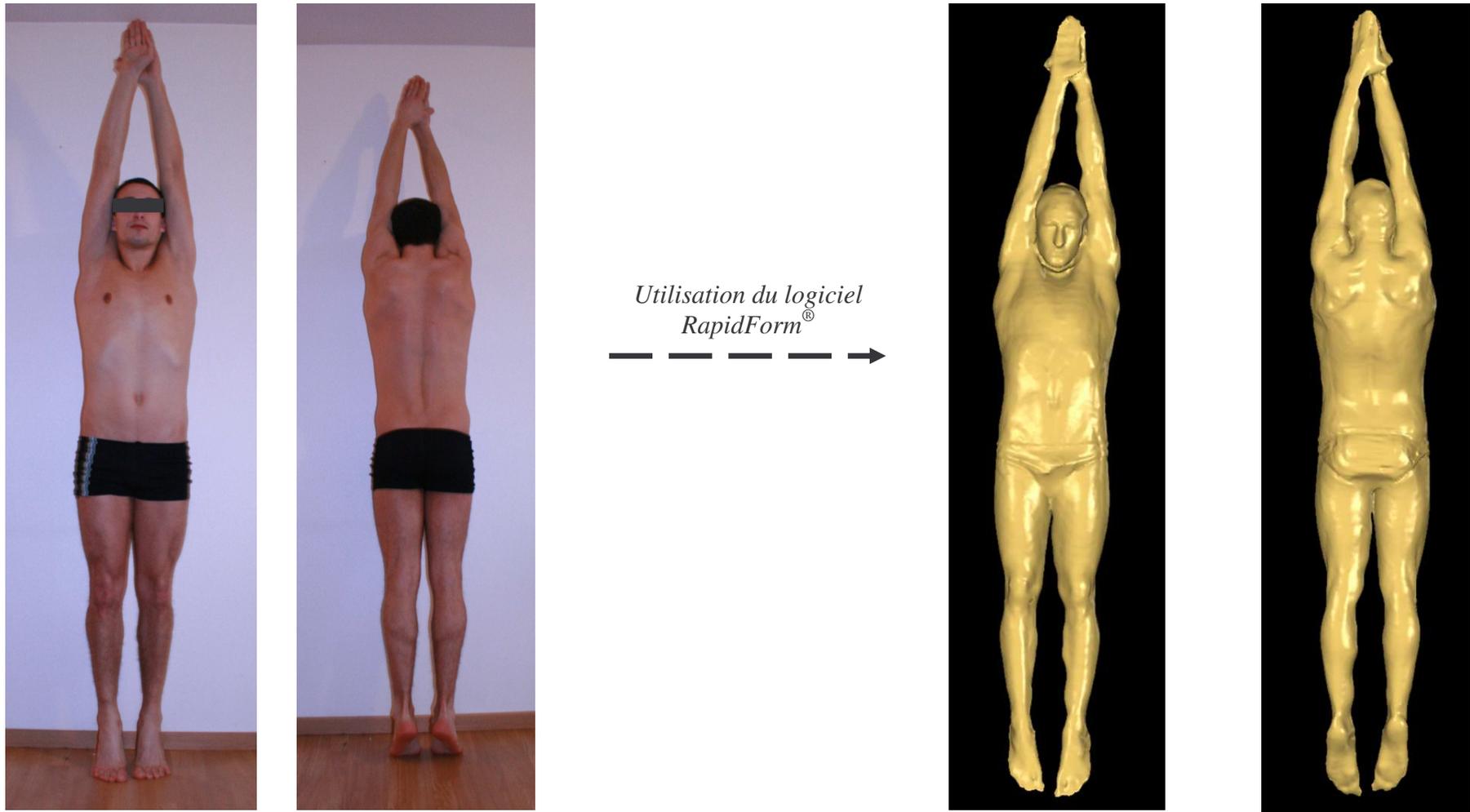
c) Fissure près de la tête

Figure II- 4 : Quelques problèmes rencontrés lors de la construction de la géométrie du nageur

Parmi les fonctions disponibles dans RapidForm[®] qui permettent de construire la géométrie et de remédier à tous les problèmes rencontrés, on trouve :

- L'assemblage des parties qui constituent la géométrie du nageur,
- Le nettoyage de la géométrie construite,
- La fermeture des trous et l'élimination des surfaces qui se superposent après l'assemblage,
- Le lissage de la géométrie afin de faciliter le maillage,
- L'analyse totale de la géométrie,
- L'exportation de la géométrie sous différents formats de fichiers tels "STEP", "IGES" et "STL".

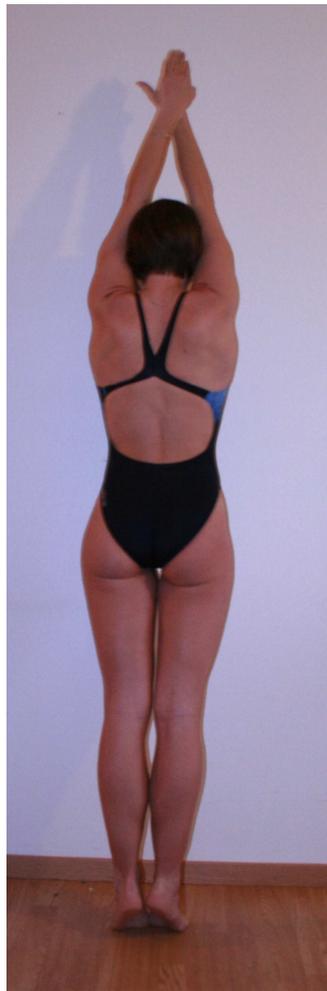
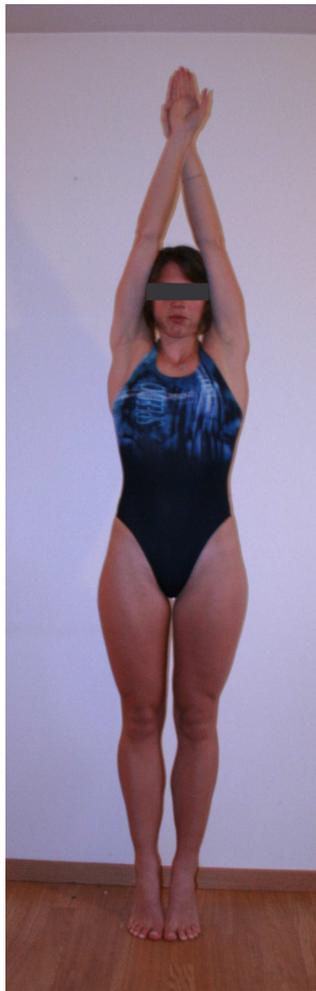
Les figures II-5 et II-6 montrent une vue de face et de dos du modèle de l'enveloppe finale, du nageur et de la nageuse, construite et corrigée avec le logiciel RapidForm[®].



Vue de face et de dos avant le scanner

Vue de face et de dos après le scanner

Figure II- 5 : Vue de face et du dos du nageur avant et après la construction géométrique



Utilisation du logiciel
RapidForm®



Vue de face et de dos avant le scanner

Vue de face et de dos et de face après le scanner

Figure II- 6 : Vue de face et de dos de la nageuse avant et après le scanner

II.1.2. Utilisation du logiciel CATIA V5[®] et des photos numériques

La complexité de la géométrie du nageur, les problèmes rencontrés lors de la construction et le maillage en utilisant le logiciel RapidForm[®], nous ont poussés à chercher un autre outil plus facile et moins coûteux en terme de ressources informatiques et financières. Notre choix s'est porté sur le logiciel CATIA V5[®]. C'est un outil qui facilite la création de la géométrie en la comparant avec celle obtenue à partir du scanner. Ce logiciel utilise des photos numériques pour la construction de la géométrie.

II.1.2.a. Présentation du logiciel CATIA V5[®]

CATIA V5[®] est un logiciel polyvalent grâce à la diversité et au nombre de modules disponibles. Il propose une très grande variété d'outils et de commandes. Ce logiciel est très utilisé dans le domaine de la construction des géométries complexes. L'un de ses avantages est de bénéficier d'une option permettant d'importer des photos numériques (option sketch tracer) en les plaçant de telle sorte qu'elles puissent servir de modèles pour tracer les différentes géométries. Il permet de construire des courbes à partir d'une série de points, de construire des surfaces à partir de courbes ou même des volumes à partir de surfaces. Il permet aussi de couper, assembler, déduire ou soustraire des éléments.

II.1.2.b. Construction du modèle 2D

Une nageuse a servi de modèle pour réaliser cette étude. Afin de construire la géométrie de la nageuse dans le cas bidimensionnel, le logiciel CATIA V5[®] utilise des photos numériques prises dans des positions qui reproduisent fidèlement celles prises en phase de coulée subaquatique. Dans cette phase, le corps du nageur a une position fixe. Dans le cas bidimensionnel, une seule photo est suffisante pour construire le modèle géométrique. La figure II-7 montre un exemple de photo numérique de la nageuse utilisée pour la construction du modèle géométrique.



Figure II- 7 : Photo numérique de la nageuse en position de coulée ventrale; vue de profil

La méthode des points a été utilisée pour construire la géométrie en 2D. Cette méthode consiste à produire le contour du nageur en créant une série de points suivant la forme du corps. Ensuite les points enregistrés ont été reliés pour former le contour à l'aide de l'option "spline" disponible sous CATIA V5[®]. Lors de la création des points et des courbes, qui sont irréguliers, il est toujours préférable de faire un zoom ou d'agrandir la zone de travail afin d'augmenter la possibilité d'avoir un profil qui produit le plus fidèlement possible celui du nageur. La figure II-8 montre un zoom sur une zone de travail.

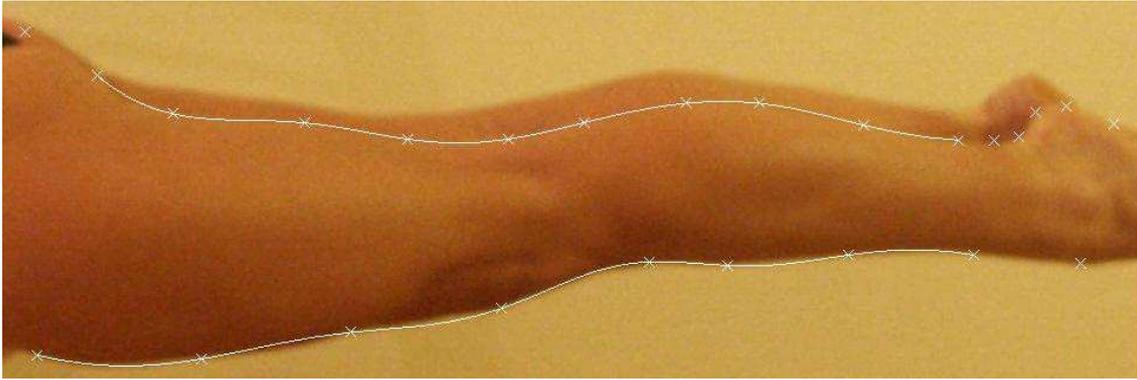


Figure II- 8: Série de points et une partie de la courbe utilisée pour construire la géométrie bidimensionnelle.

Les différentes courbes déjà tracées sont utilisées pour réaliser la surface de la nageuse. La figure II-9 montre un exemple de profil produit par CATIA V5[®] et importé dans le logiciel Gambit[®].

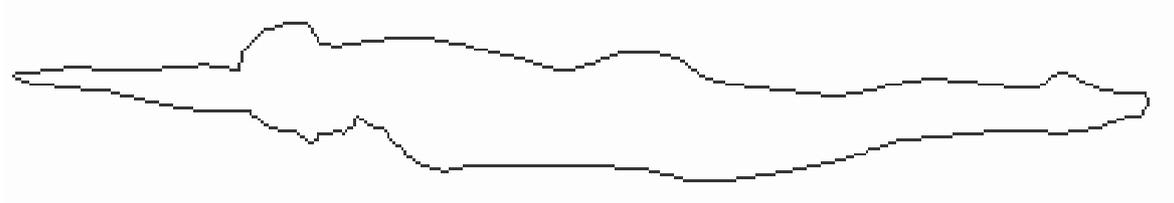


Figure II- 9 : Exemple du contour de la nageuse produit par le logiciel CATIA V5[®].

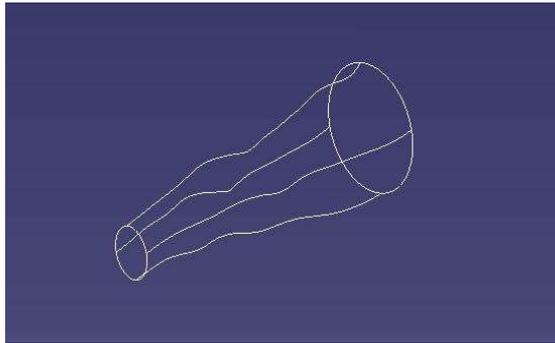
Toutes les informations concernant la géométrie produite en 2D sont organisées et stockées au sein d'un fichier d'extension "STEP" ou "IGES". Ces fichiers contiennent les coordonnées de tous les points définissant le contour de la nageuse.

II.1.2.c. Construction du modèle 3D

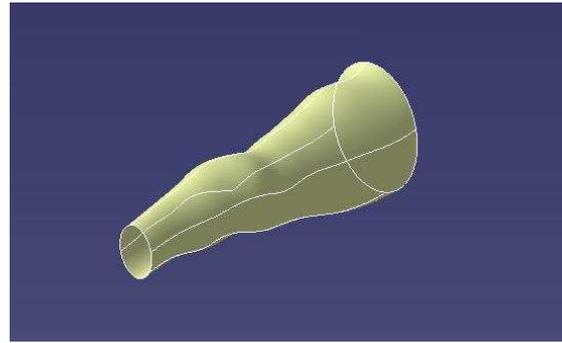
La modélisation du corps dans le cas tridimensionnel utilise le même principe que le cas bidimensionnel. Elle est basée sur des courbes "guide" afin de construire les surfaces. Les différentes parties du corps modélisées ont des formes qu'on peut qualifier de complexes. La construction géométrique dans le cas tridimensionnel utilise deux photos, au lieu d'une, prises dans deux plans différents.

La construction du modèle est effectuée en commençant par les parties les plus simples telles les jambes, les bras et le tronc et ensuite poursuivie par les parties les plus complexes telles la tête, les pieds, les mains et le bassin.

A titre d'exemple pour construire les jambes, il faut créer quatre courbes "guide" dans l'espace, les courbes guide étant obtenues en utilisant la même technique de récupération de profil grâce à des points et des courbes "guide". Ensuite, on dessine une section passant par les extrémités des courbes de chaque côté. À la fin, les surfaces correspondantes sont créées à partir des courbes en utilisant l'option "surface guidée" (Figure II-10).



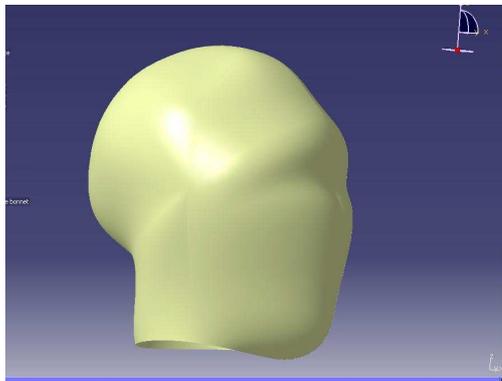
a) Courbes "guide"



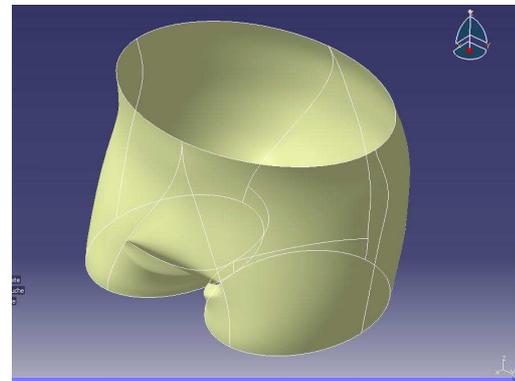
b) Surfaces "guide"

Figure II- 10 : Exemple de construction de la géométrie 3D

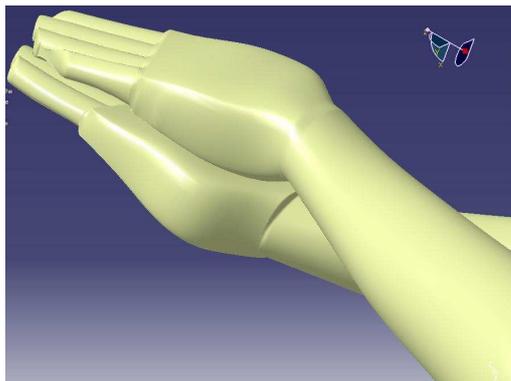
Le temps nécessaire pour réaliser la géométrie en utilisant le logiciel CATIA V5[®] est souvent très long, mais il présente plus de souplesse comparé au logiciel RapidForm[®] utilisé au début. La figure II-11 montre la construction de quelques parties du corps.



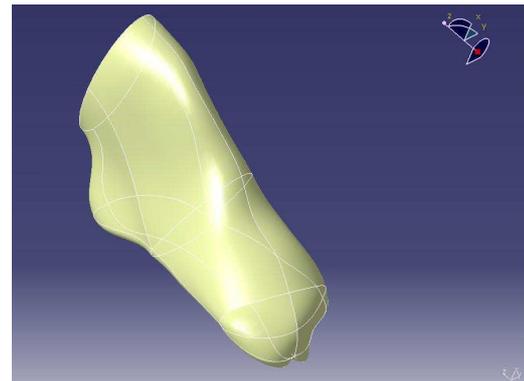
a) : Surface de la tête



b) : Surface du bassin



c) : Les mains



d) : Le pied

Figure II- 11 : Quelques parties du corps construites avec CATIA V5[®]

Après avoir construit toutes les parties du corps, l'étape suivante consiste à les assembler afin de construire l'enveloppe géométrique finale. La figure II-12 montre le modèle du nageur après l'assemblage.

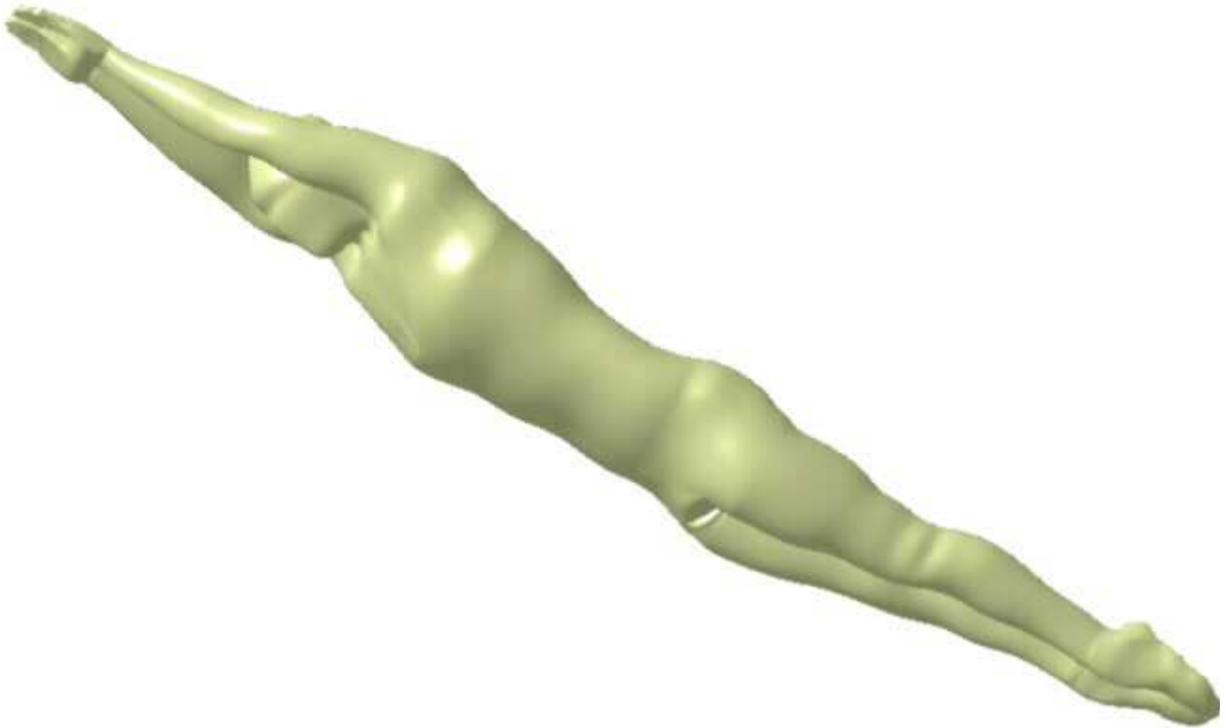


Figure II- 12 : Modèle du nageur construit par le logiciel CATIA V5[®]

II.2. Maillage du domaine fluide autour du nageur

Après avoir construit le modèle géométrique du nageur, l'étape suivante consiste à réaliser le maillage du domaine fluide nécessaire pour la simulation numérique. Il s'agit de l'étape la plus importante pour avoir des résultats précis. Le maillage est réalisé en utilisant le logiciel Gambit[®] dans le cas bidimensionnel et TGrid[®] dans le cas tridimensionnel. Nous allons présenter dans ce qui suit la procédure suivie afin de générer le maillage en utilisant le mailleur Gambit[®].

II.2.1. Présentation du logiciel Gambit[®]

Gambit[®] est un logiciel de construction de modèles physiques et de maillages. Il permet de créer la géométrie ou de l'importer à partir d'un autre logiciel de CAO (CATIA, IDEAS, ANSYS, etc.) sous différents formats de fichiers tels "STEP" et "IGES". Il dispose d'une boîte à outils complète pour réaliser ou importer une géométrie, effectuer des modifications géométriques, générer des maillages plus ou moins complexes conformément à la géométrie, de contrôler leur qualité ainsi que définir les conditions aux limites du domaine de calcul. Gambit[®] peut générer différents types de maillages structurés ou non structurés, surfaciques (quadrilatères, triangulaires) ou volumiques (hexaèdres, tétraèdres). Une combinaison géométrique d'éléments de différentes natures est également possible (hybride). La figure II-13 montre une représentation géométrique simple en deux dimensions de deux maillages, l'un structuré et l'autre non structuré, générés par le logiciel Gambit[®].

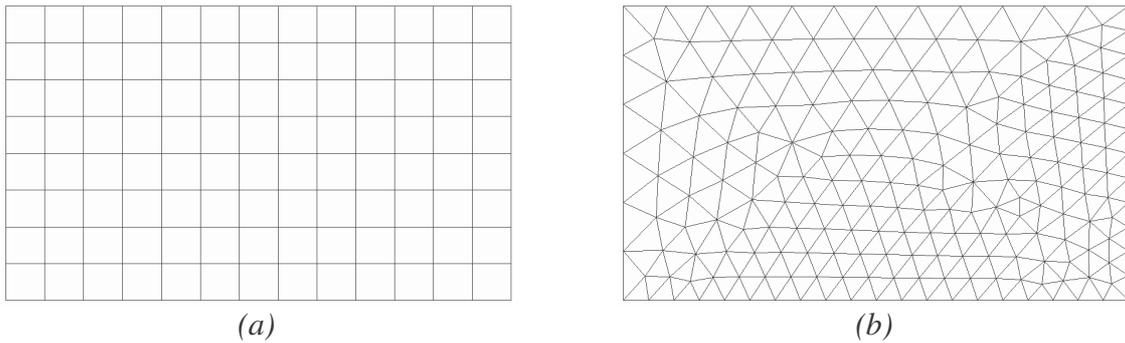


Figure II- 13 : Représentation graphique d'un maillage (a) structuré et (b) non structuré construit par le logiciel Gambit® en 2D

II.2.2. Procédure sous Gambit®.

Dans le but de construire le domaine de simulation numérique autour du nageur et de réaliser le maillage, les étapes principales effectuées dans le logiciel Gambit® sont les suivantes :

- Importation du contour de la nageuse réalisé avec le logiciel CATIA V5®.
- Création de la géométrie finale qui correspond au domaine fluide autour du nageur.
- Génération du maillage et contrôle de sa qualité.
- Choix des conditions aux limites au niveau de chaque frontière du domaine fluide.
- Exportation du maillage en format "*.msh" vers le logiciel Fluent® afin d'effectuer les simulations numériques.

II.2.2.a. Importation du contour du nageur dans Gambit®

La géométrie initiale correspondant au contour du nageur est une géométrie réelle. Elle est construite, comme nous l'avons vu au paragraphe précédent, à partir des photos numériques en utilisant le logiciel CATIA V5®.

Le contour du nageur a été réalisé pour trois positions différentes de la tête ; relevée, alignée et baissée par rapport à l'axe du corps. Pour les trois positions, le contour du nageur est identique et seule la tête modifie la posture générale (Figure II-14).

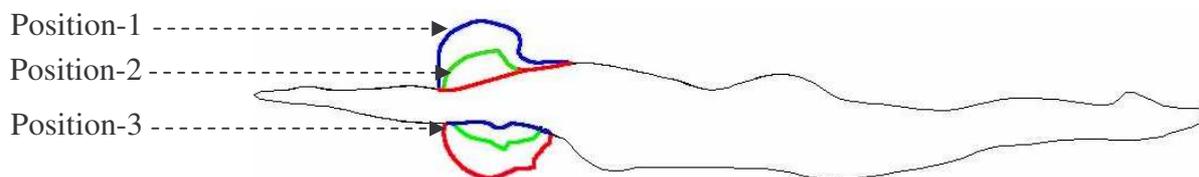


Figure II- 14 : Variation de la position de la tête pour les trois postures étudiées

Le fichier produit est importé dans le logiciel Gambit® sous le format "STEP" afin de compléter la géométrie. Ce dernier contient toutes les coordonnées des points définissant le contour du nageur. La figure II-15 montre les trois photos numériques utilisées afin de construire les trois contours du nageur pour chaque position de la tête.



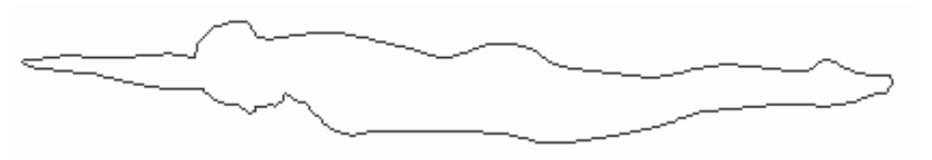
Position_1 tête relevée



Contour de la position 1



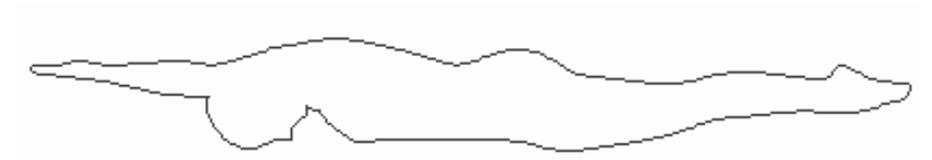
Position_2 tête alignée



Contour de la position 2



Position_3 basse



Contour de la position 2

Figure II- 15 : Schématisation des trois positions de la tête retenues pour l'étude

II.2.2.b. Création de la géométrie finale

Une fois la géométrie initiale importée dans le logiciel Gambit[®], on procède à la création de la géométrie finale qui intègre le domaine fluide autour du nageur (Figure II-16). Cette géométrie finale est assez simple et sa réalisation sous Gambit[®] est facile. Elle correspond à la création d'un bloc rectangulaire qui englobe toute la géométrie initiale (contour du nageur). Il suffit juste d'entrer les coordonnées des points (x, y) constituant les sommets du rectangle modélisant la partie de la piscine en phase de coulée, de créer les bords puis à la fin de créer la surface qui sera limitée par les bords. La figure II-16 schématise le domaine de calcul numérique.

Les dimensions du domaine fluide autour du nageur sont choisies de façon à assurer l'indépendance des résultats numériques. Nous verrons ultérieurement qu'un domaine fluide un peu étroit produit des résultats erronés. Une étude plus approfondie pour le choix de la taille du domaine fluide se fera dans le chapitre suivant de validation numérique.

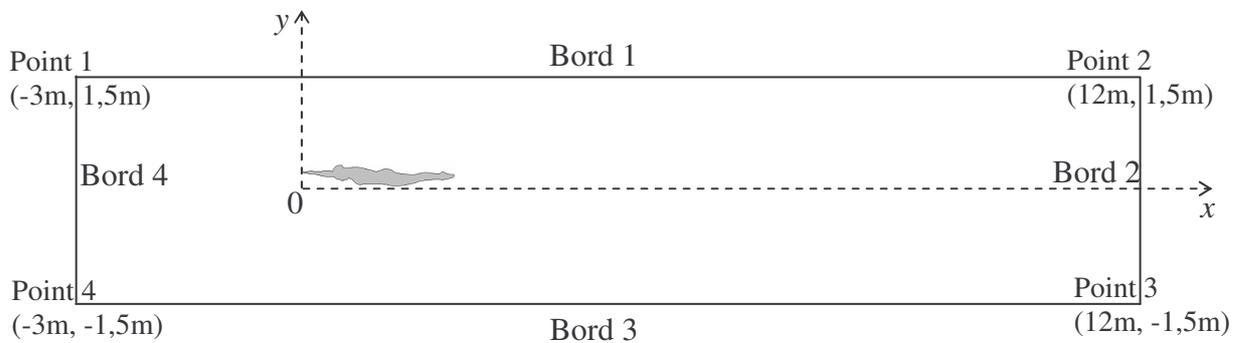


Figure II- 16 : Détail du domaine fluide utilisé lors de la simulation numérique.

La taille du domaine de calcul correspond à 15m en longueur et 3m de profondeur. Le nageur est placé à 3m en amont, ce qui correspond à 10D (Figure II-17) par rapport à l'entrée du domaine et 9,6m en aval qui correspond à 32D par rapport à la sortie du domaine fluide, et cela en prenant comme origine l'extrémité des doigts. D présente le diamètre hydraulique de la nageuse, sa valeur est de l'ordre de 30cm.

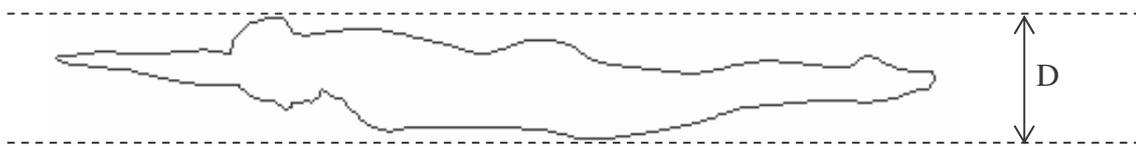


Figure II- 17 : Diamètre de la nageuse

II.2.2.c. Maillage

Une fois le domaine fluide autour du nageur défini, on procède à la réalisation du maillage. Le maillage sera utilisé pour discrétiser les équations de conservation pour simuler l'écoulement autour du nageur. La génération du maillage se fait sous le logiciel Gambit[®] 2.2.30. Ce maillieur propose des solutions étendues pour différentes géométries. Le maillage constitue l'étape la plus délicate et la plus conséquente au niveau des résultats. Le choix du maillage dépend fortement de la géométrie. Or, la géométrie du nageur est assez complexe. Il est donc

nécessaire d'utiliser un maillage de type non structuré, composé d'éléments triangulaires en 2D tels que présentés sur les figures II-18 et II-19. Ce type de maillage, constitué des cellules triangulaires, a déjà été utilisé par Bixler & Riewald (2002) pour étudier l'écoulement autour de la main et de l'avant bras d'un nageur, ainsi que par Bixler et al. (2007) pour calculer la force de résistance rencontrée par le nageur en phase de glissement.

Le maillage réalisé est un maillage progressif. Il est bien raffiné au voisinage du contour de la nageuse afin de capter les forts gradients des grandeurs physiques recherchées et relâché loin de la surface de la nageuse où les gradients sont moins importants. Néanmoins, on ne peut pas diminuer arbitrairement la différence de densité de mailles entre la surface du nageur et les bords du domaine fluide. Si cette différence est importante, le logiciel n'est pas en mesure de réaliser le maillage ou peut produire un maillage qui comprend des cellules tordues.

Le but du maillage progressif est d'éviter l'allongement du temps de calcul. Nous allons voir dans le chapitre III que quelques paramètres de calcul numérique nécessitent ce type de maillage. Le schéma de discrétisation du second ordre choisi pour effectuer la simulation de l'écoulement autour du nageur nécessite l'utilisation d'un maillage à forte densité de nœuds ou raffiné dans les endroits à forts gradients.

Il existe deux méthodes pour réaliser le maillage sous Gambit[®] :

- La première méthode consiste en l'utilisation d'un maillage automatique, dans ce cas c'est le logiciel qui définit le nombre de nœuds sur chaque segment de la géométrie puis maille automatiquement les surfaces et les volumes dans le cas tridimensionnel.
- La deuxième méthode est le maillage de la géométrie "partie par partie" c'est-à-dire qu'on maille déjà les arêtes puis les surfaces et à la fin les volumes dans le cas tridimensionnel. C'est ce type de maillage que nous avons choisi pour discrétiser le domaine fluide puisqu'on souhaite définir de fortes densités de nœuds dans les zones près du corps de la nageuse.

Ce type de maillage est réalisé en passant par les étapes suivantes:

1. Maillage du contour de la nageuse en utilisant de fortes densités de nœuds.
2. Maillage des bords du domaine fluide en utilisant de faibles densités de nœuds.
3. Maillage progressif du domaine fluide qui entoure la nageuse, commençant à la surface de la nageuse et s'étendant jusqu'aux bords du domaine de calcul.

Le choix des densités du maillage sur chaque partie du domaine fluide (l'entrée et la sortie du domaine, les deux frontières supérieure et inférieure et la surface de la nageuse) s'est fait après une étude d'indépendance du maillage que nous détaillerons dans la partie 3 du chapitre III. Les figures II-18, II-19 et II-20 montrent un exemple du maillage progressif construit pour nos simulations numériques avec le détail des zones près du corps et de la tête de la nageuse.

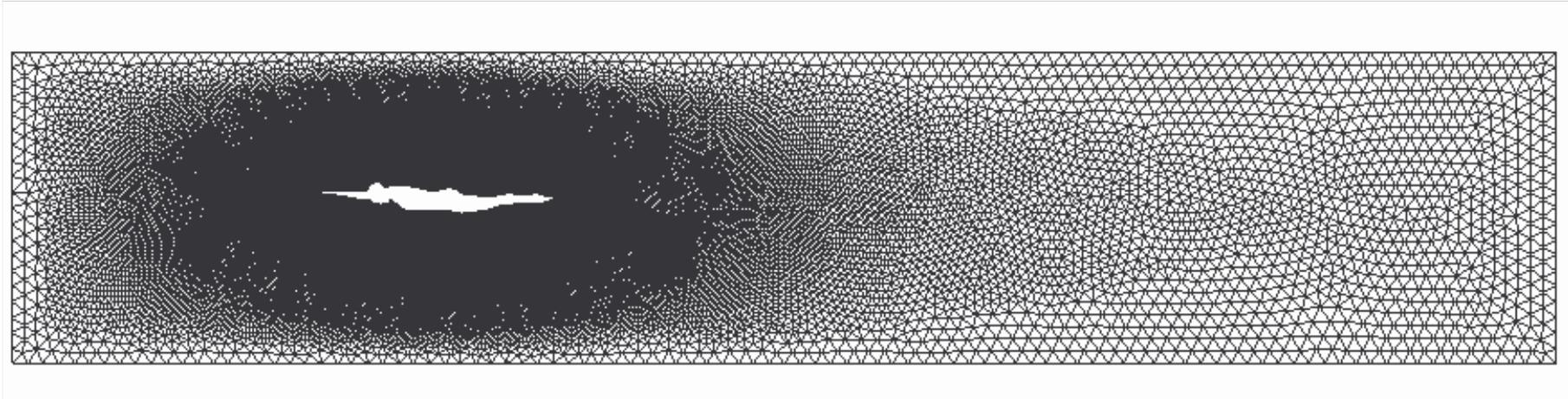
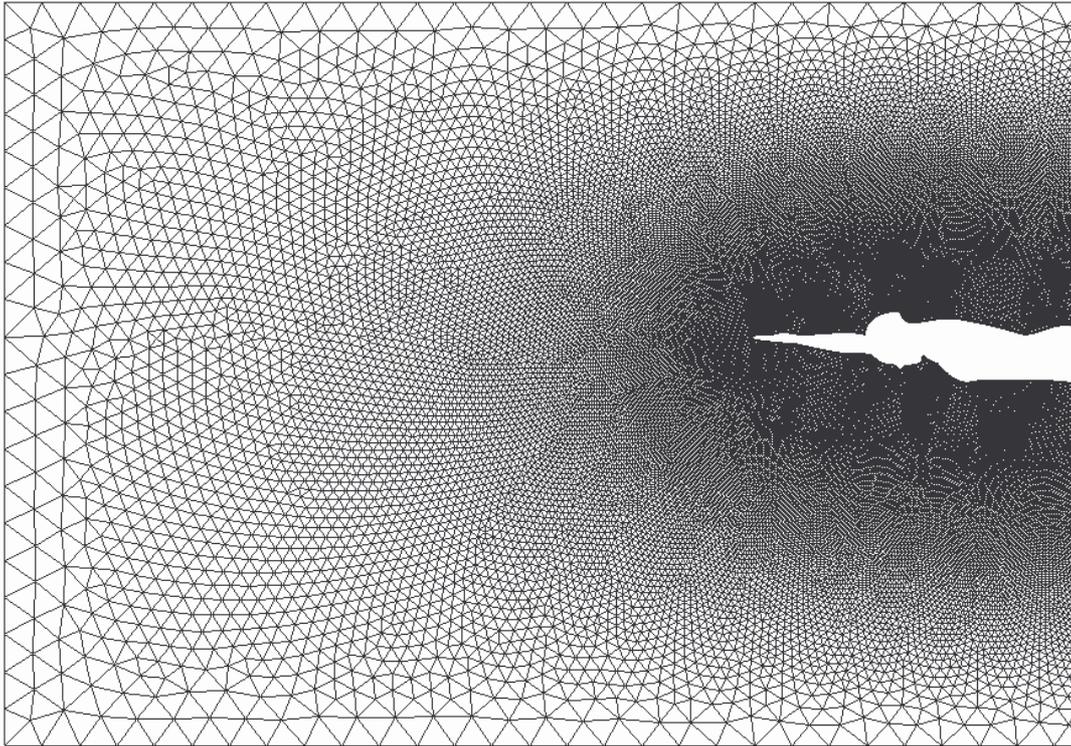
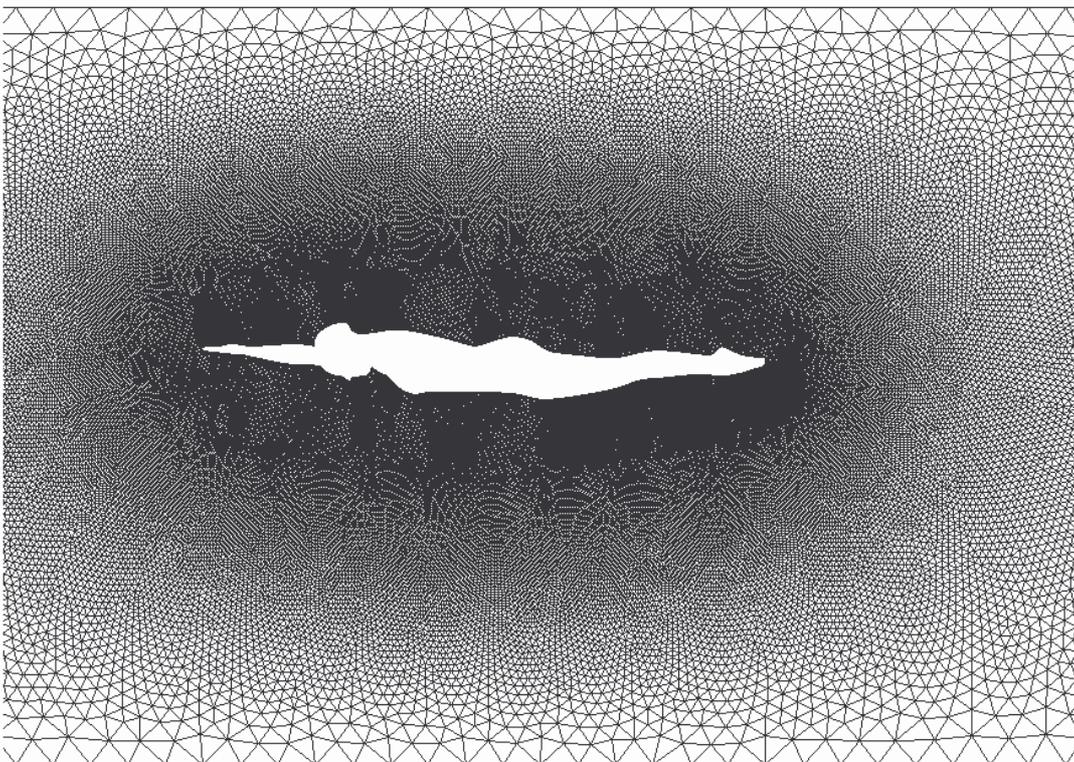


Figure II- 18 : Maillage du domaine de fluide avec des densités de nœuds plus élevées à proximité de la surface du nageur.

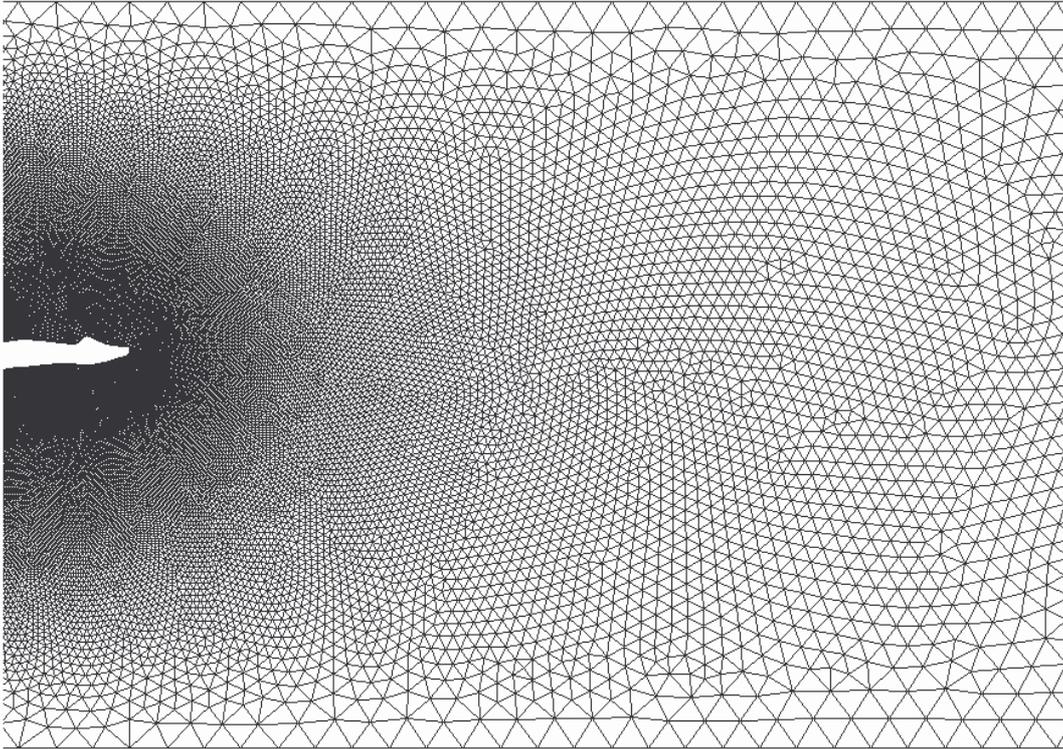


a) Zoom sur la zone du maillage devant le nageur

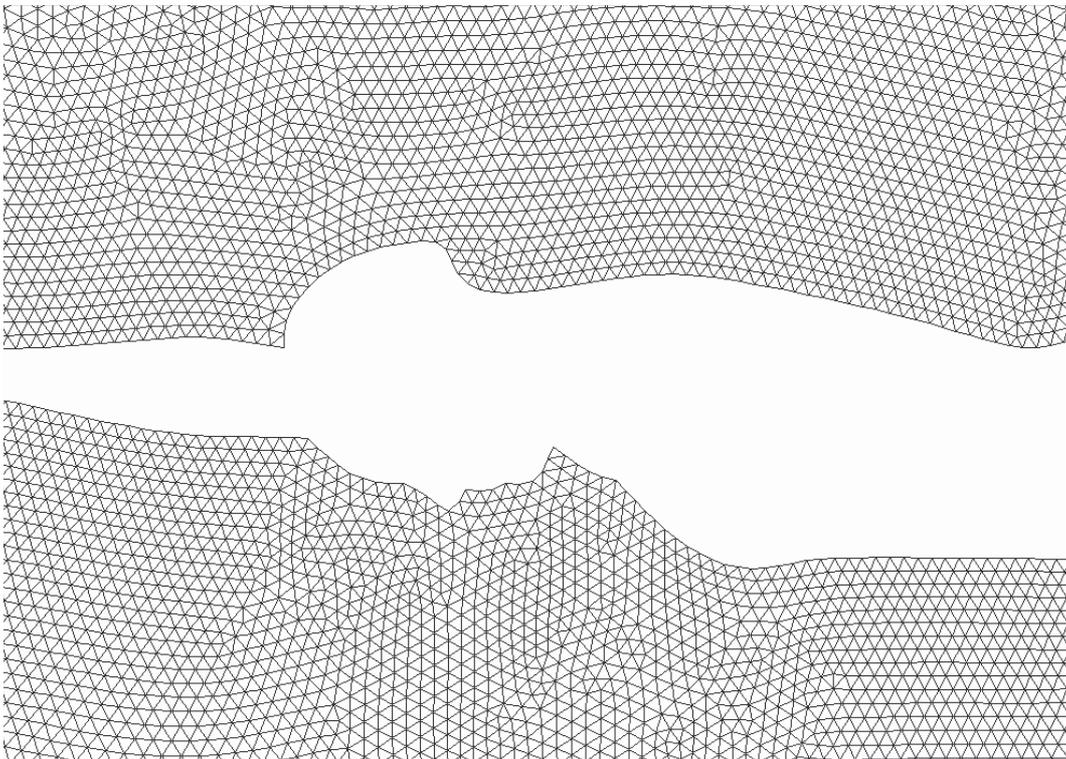


b) Zoom sur la zone autour du nageur

Figure II- 19 : Détails du maillage du domaine fluide en amont et autour du nageur.



c) Zoom sur la zone du maillage derrière la nageuse



d) Agrandissement du maillage près de la tête de la nageuse

Figure II- 20 : Détails du maillage en aval et autour de la tête de la nageuse.

II.2.2.d. Qualité de maillage

La phase de maillage est une étape très importante dans l'élaboration du modèle de calcul, la qualité du maillage jouant un rôle principal et significatif sur la stabilité et la précision du calcul numérique. Donc, il doit être choisi avec discernement.

Les caractéristiques du maillage telles que la distribution des nœuds, la nature lisse et l'obliquité des cellules sont des facteurs très importants. Le changement rapide de la taille de deux cellules adjacentes peut produire des erreurs de troncature importantes.

Il est donc nécessaire de vérifier le maillage généré par le logiciel Gambit[®] avant de l'exporter vers le logiciel Fluent[®]. Sous Gambit[®], la qualité du maillage est contrôlée à partir des valeurs de Skewness correspondant à la mesure de l'obliquité équiangle.

Le "skewness" est calculée comme suit [Gambit[®] 2.2.30 User's Guide (2006)]:

$$Q_{EAS} = \max \left\{ \frac{\theta_{\max} - \theta_{eq}}{180 - \theta_{eq}}, \frac{\theta_{eq} - \theta_{\min}}{\theta_{eq}} \right\} \quad (\text{II- 1})$$

Où

θ_{\max} et θ_{\min} sont respectivement les angles maximal et minimal (en degrés) entre les côtés de l'élément (figure II-21).

θ_{eq} est l'angle caractéristique correspondant à une cellule équilatérale de forme similaire. Pour un élément triangulaire ou tétraédrique $\theta_{eq} = 60^\circ$ et pour un élément quadrilatéral ou hexaédrique $\theta_{eq} = 90^\circ$.

Par définition,

$$0 \leq Q_{EAS} \leq 1 \quad (\text{II- 2})$$

La figure II-21 montre deux éléments avec un nombre de Skewness 0 (élément idéal) et élevé (élément dégénéré).

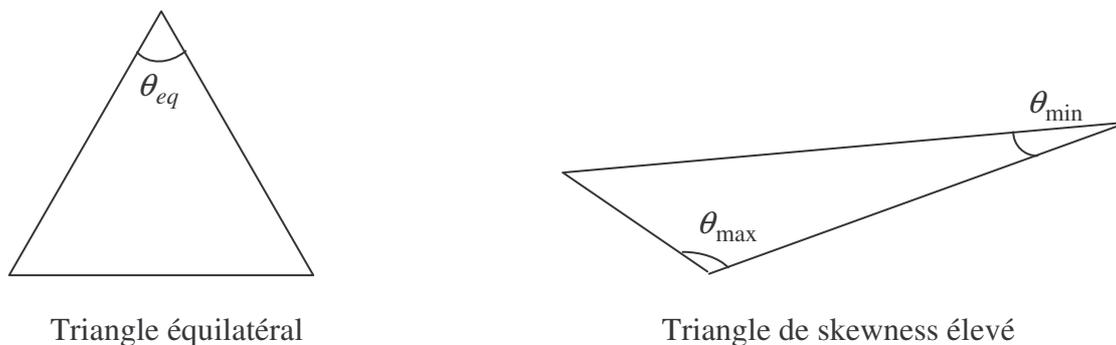


Figure II- 21 : Deux éléments pouvant être présents dans un maillage

Un maillage idéal est constitué de triangles équilatéraux. Le tableau II-1 montre la relation entre le paramètre de Skewness et la qualité de maillage :

Valeurs de Skewness Q_{EAS}	Qualité de maillage
$Q_{EAS} = 0$	Parfaite
$0 \leq Q_{EAS} \leq 0.25$	Excellente
$0.25 \leq Q_{EAS} \leq 0.5$	Bonne
$0.5 \leq Q_{EAS} \leq 0.75$	Correcte
$0.75 \leq Q_{EAS} \leq 0.9$	Pauvre
$0.9 \leq Q_{EAS} \leq 1$	Mauvaise
$Q_{EAS} = 1$	Dégénérée

Tableau II- 1: Qualité de maillage en fonction du nombre de Skewness
(Gambit[®] 2.2.30 User's Guide (2006))

Lors de la génération d'un maillage, il est conseillé de prendre en considération certaines recommandations [Regard (1996)] pour assurer la bonne qualité du maillage. Parmi ces recommandations, on cite :

- La limitation de l'allongement des cellules du maillage. Le rapport entre les dimensions d'une cellule ne doit pas dépasser 5/1 afin d'éviter l'instabilité et la divergence du calcul.
- L'augmentation ou la diminution de la taille entre deux cellules successives ne doit pas dépasser 30% pour une estimation correcte des termes de diffusion dans les équations de transport.

On peut même modifier ces rapports pour obtenir un maillage plus fin au voisinage de la paroi du profil.

L'analyse de la qualité du maillage généré autour de la nageuse, sous Gambit[®], montre que 98,95% des cellules ont un Skewness compris entre 0 et 0,25 et seulement 1,05% ont un Skewness compris entre 0,25 et 0,5. La valeur maximale de skewness pour l'élément le plus tordu du maillage est de 0,44. Ceci nous a permis de constater, selon le tableau II-1 que notre maillage est d'excellente qualité. Cela assure une meilleure convergence du calcul avec le logiciel Fluent[®].

II.2.2.e. Choix des conditions aux limites

Une fois la géométrie et le maillage de notre domaine fluide bien définis, il est nécessaire de choisir les zones géométriques sur lesquelles nous allons appliquer les conditions aux limites utilisées lors de la simulation avec le solveur Fluent[®]. Les conditions aux limites choisies sont les suivantes:

- La section qui se situe en amont du nageur est définie comme une entrée du domaine fluide en choisissant une vitesse d'entrée.
- La section qui se situe en aval du nageur est définie comme une sortie du domaine fluide, avec la condition Outflow.
- Les deux frontières, supérieure et inférieure, sont définies comme des plans de symétrie.
- La surface du nageur a été définie comme une paroi.

Une fois que le maillage désiré est obtenu et que les différentes conditions aux limites sont précisées, on procède à l'exportation du fichier en format ".msh" qui comporte le maillage du domaine fluide dans le logiciel Fluent[®] afin d'effectuer les simulations numériques. Toutes ces informations sont organisées au sein d'un fichier texte appelés « *.Jou » (fichier journal), ce dernier se crée d'une façon automatique à chaque utilisation de Gambit[®].

II.3. Formulation mathématique du problème

En général, comme nous l'avons mentionné dans la synthèse bibliographique, l'écoulement autour des nageurs est de nature turbulente [Clarys (1979), Toussaint & Truijens (2005), Polidori et al. (2006)]. Les relations nécessaires pour prédire les caractéristiques d'un écoulement turbulent autour d'une géométrie quelconque sont les équations moyennées de Navier-Stokes, dites RANS⁶. Ces dernières sont obtenues à partir des équations instantanées du mouvement. Dans cette partie, nous allons d'abord présenter en détail les équations instantanées, ainsi que les équations moyennées de continuité, de quantité de mouvement et d'énergie obtenues en introduisant la décomposition de Reynolds dans les équations instantanées. Pour plus de détail sur les différentes étapes de construction de ces équations, il est conseillé de se référer à Cousteix (1989). Ensuite, les différents modèles de turbulence utilisés pour modéliser le problème seront présentés avec la décomposition de l'écoulement dans la région de proche paroi.

II.3.1. Rappel des équations instantanées

Les équations instantanées régissant l'écoulement d'un fluide avec transfert de chaleur au sein d'une géométrie quelconque sont l'équation de continuité ou de conservation de la masse, l'équation de conservation de la quantité de mouvement et celle de conservation de l'énergie. Elles s'écrivent, dans un repère cartésien et pour un fluide incompressible, sous la forme suivante [Cousteix (1989)]:

- Equation de continuité :

$$\frac{\partial u_j}{\partial x_j} = 0 \quad (\text{II- 3})$$

- Equation de quantité de mouvement :

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (u_i u_j) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\nu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right) + g_i \quad (\text{II- 4})$$

- Equation de l'énergie :

⁶ REYNOLDS Averaged NAVIER STOKES.

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} + \frac{\partial \theta u_j}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(a \frac{\partial \theta}{\partial x_j} \right) + h_s \quad (\text{II- 5})$$

Où :

- x_i Cordonnées cartésiennes ($i \in \{1, 2, 3\}$) (m)
- u_i Composante de la vitesse instantanée dans la direction x_i (m/s)
- p Pression statique instantanée (Pa)
- ρ Masse volumique du fluide (kg/m^3)
- ν Viscosité cinématique du fluide (m^2/s)
- g_i Accélération de gravité dans la direction x_i (m/s^2)
- θ Température instantanée ($^\circ\text{C}$)
- a Diffusivité thermique (m^2/s)
- h_s Source volumique de chaleur (W/m^3)
- t Temps (s)

Les équations moyennées du mouvement pour un écoulement turbulent sont obtenues en introduisant la décomposition de Reynolds dans les équations instantanées. Cette dernière consiste à séparer le champ de variable instantané ϕ en deux parties ; une valeur moyenne $\Phi = \bar{\phi}$ et une valeur fluctuante ϕ' .

$$\phi(\vec{x}, t) = \Phi(\vec{x}, t) + \phi'(\vec{x}, t) \quad (\text{II- 6})$$

ϕ est une variable généralisée ($u, v, p, \theta \dots$), et la moyenne temporelle de ϕ sur la période ΔT est définie par :

$$\Phi = \frac{1}{\Delta T} \int_t^{t+\Delta T} \phi(t) dt \quad (\text{II- 7})$$

Par définition, la moyenne des fluctuations est nulle ($\bar{\phi}' = 0$).

L'application de la décomposition de Reynolds, sur les variables qui nous intéressent, donne les relations suivantes :

$$\left\{ \begin{array}{l} u = U + u' \\ v = V + v' \\ w = W + w' \\ p = P + p' \\ \theta = \Theta + \theta' \end{array} \right\} \quad \text{Avec} \quad \left\{ \begin{array}{l} U = \bar{u} \\ V = \bar{v} \\ W = \bar{w} \\ P = \bar{p} \\ \Theta = \bar{\theta} \end{array} \right\}$$

Où :

- U, V, W, P, Θ sont les composantes moyennes,
- u', v', w', p', θ' sont les composantes fluctuantes.

II.3.2. Les équations de conservation

En moyennant les équations obtenues après introduction de la décomposition de Reynolds, on obtient le système d'équations, en coordonnées cartésiennes, suivant :

- Equation de continuité

$$\frac{\partial U_j}{\partial x_j} = 0 \quad (\text{II- 8})$$

- Equation de quantité de mouvement

$$\frac{\partial U_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (U_i U_j) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial x_j} (\overline{\tau_{ij}} + R_{ij}) + g_i \quad (\text{II- 9})$$

Où :

$$\overline{\tau_{ij}} = \mu \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \quad (\text{II- 10})$$

$$R_{ij} = -\overline{\rho u'_i u'_j} \quad (\text{II- 11})$$

- Equation de l'énergie

$$\frac{\partial \Theta}{\partial t} + U_j \frac{\partial \Theta}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(a \frac{\partial \Theta}{\partial x_j} - \overline{\theta' u'_j} \right) + H_s \quad (\text{II- 12})$$

Les équations pour les variables moyennes obtenues pour le régime turbulent sont différentes des équations pour les variables instantanées en régime laminaire à cause de l'apparition d'un nouveau terme lié à l'effet du champ fluctuant qui est le terme de "contraintes de Reynolds" ou de double corrélation $(-\overline{\rho u'_i u'_j})$; ce terme traduit l'effet de la turbulence sur le mouvement moyen. De même, l'équation de l'énergie aussi fait apparaître un terme supplémentaire de corrélation appelé flux de chaleur turbulent $(-\overline{\rho C_p \theta' u'_j})$ entre les variables fluctuantes.

II.3.3. Les modèles de turbulence

Les termes qui apparaissent dans les équations moyennées présentent l'interaction du mouvement moyen et de l'agitation turbulente. Ce sont des termes supplémentaires qui posent un problème de fermeture du système d'équations. Le nombre d'inconnues devenant plus grand que le nombre d'équations, nous avons donc besoin de modèles de turbulence qui permettent d'estimer les contraintes de Reynolds afin de fermer le système d'équations à résoudre.

L'objectif des différents modèles de turbulence est d'introduire des modèles pour les inconnues supplémentaires afin de fermer le système d'équations à résoudre. Il existe plusieurs modèles de turbulence plus ou moins complexes. Ils sont caractérisés entre autres

par leur ordre et leur nombre d'équations de fermeture. En général, on distingue deux grandes classes de modèles de turbulence:

- a. Les modèles de turbulence du premier ordre ou à viscosité turbulente: ces modèles reposent sur l'hypothèse de Boussinesq et consistent à relier directement les corrélations avec le mouvement moyen en introduisant le concept de viscosité turbulente. Ces modèles sont divisés en trois catégories selon le nombre d'équations d'évolution supplémentaire du modèle :
 - Modèles à zéro équation [Prandtl, 1926]
 - Modèles à une équation [Kolmogorov, 1942]
 - Modèles à deux équations [Launder & Spalding (1972)] : ce sont les modèles les plus couramment utilisés pour étudier les écoulements en natation humaine.
- b. Les modèles de turbulence du second ordre : dans ce cas, les tensions de Reynolds sont calculées directement en modélisant les termes inconnus d'ordres supérieurs.

II.3.4. Modèles de turbulence du premier ordre

Dans ce qui suit, nous allons présenter les différents modèles de turbulence du premier ordre utilisés pour simuler l'écoulement autour du nageur. Ensuite, nous mettrons en évidence les capacités de chaque modèle en détaillant ses avantages et ses inconvénients. Ces modèles sont incorporés dans le logiciel Fluent[®] utilisé dans le cadre de la présente étude pour effectuer les simulations numériques.

- L'hypothèse de Boussinesq

Afin de fermer le système d'équations II-8, II-9 et II-12, Boussinesq (1897) a proposé une relation qui permet de lier les contraintes de Reynolds ($-\rho \overline{u'_i u'_j}$) au champ de vitesse moyen. Cette relation s'écrit comme suit :

$$R_{ij} = -\rho \overline{u'_i u'_j} = \mu_t \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \rho k \delta_{ij} \quad (\text{II-13})$$

Où:

$k = \frac{1}{2} \overline{u'_j u'_j}$: Energie cinétique massique turbulente (m^2/s^2),

μ_t : Viscosité dynamique turbulente ($Kg/m s$),

δ_{ij} : Delta de Kronecker

II.3.4.a. Le modèle k-ε standard

C'est un modèle semi-empirique, faisant partie des modèles dits à deux équations. Il a été proposé initialement par Launder & Spalding (1972). Il propose deux équations de transport pour déterminer la viscosité turbulente, une pour l'énergie cinétique k et l'autre pour son taux de dissipation ε . L'équation de transport pour l'énergie cinétique turbulente k est dérivée d'une équation exacte, tandis que celle pour le taux de dissipation turbulente ε est obtenue sur la base de raisonnements physiques. Lors de la dérivation des équations des deux modèles, on suppose que l'écoulement est pleinement turbulent et que la viscosité moléculaire est négligeable.

- Les équations de transport du modèle k - ε standard

1. Equation de l'énergie cinétique

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho k U_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k - \rho \varepsilon \quad (\text{II- 14})$$

2. Equation du taux de dissipation

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho \varepsilon U_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} G_k - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (\text{II- 15})$$

Où :

G_k représente la production de l'énergie cinétique turbulente due au gradient de vitesse moyenne,

$C_{1\varepsilon}$, $C_{2\varepsilon}$ sont des constantes,

σ_k et σ_ε sont les nombres de Prandtl turbulents pour k et ε .

- Modélisation de la viscosité turbulente

La viscosité turbulente est calculée à partir de k et ε en utilisant la relation suivante :

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (\text{II- 16})$$

Où C_μ est une constante

Les constantes du modèle k - ε standard ont été déterminées à partir d'expériences ; ces valeurs sont récapitulées dans le tableau suivant :

$C_{1\varepsilon}$	$C_{2\varepsilon}$	C_μ	σ_k	σ_ε
1,44	1,92	0,09	1,0	1,3

Tableau II- 2 : Constantes du modèle de turbulence k - ε standard

- Caractéristique du modèle k - ε standard

C'est le modèle le plus simple, le plus connu et le plus utilisé. Sa popularité pour les simulations du transfert de chaleur et surtout pour la modélisation des écoulements industriels s'explique par sa robustesse, son économie en temps de calcul et sa précision raisonnable. Il présente des points de faiblesse en ce qui concerne les couches limites courbées et les écoulements tournants et tourbillonnaires. C'est pratiquement le seul modèle utilisé à ce jour pour simuler les écoulements en natation humaine.

II.3.4.b. Le modèle RNG $k-\varepsilon$

Ce modèle a été dérivé à partir des équations instationnaires de Navier Stokes en utilisant une technique mathématique statistique appelée " ReNormalization Group" [Choudhury (1993)]. Un nouveau terme est rajouté au niveau de l'équation de dissipation ε .

- Les équations de transport du modèle RNG $k-\varepsilon$ sont :

1. Equation de l'énergie cinétique

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho k U_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\alpha_k \mu_{eff} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + G_k - \rho \varepsilon \quad (\text{II- 17})$$

2. Equation du taux de dissipation

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho \varepsilon U_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\alpha_\varepsilon \mu_{eff} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} G_k - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} - R_\varepsilon \quad (\text{II- 18})$$

α_k et α_ε sont les inverses des nombres effectifs de Prandtl pour k et ε respectivement.

- Modélisation de la viscosité turbulente μ_{eff}

La viscosité turbulente est calculée à partir de la relation suivante :

$$d \left(\frac{\rho^2 k}{\sqrt{\varepsilon \mu}} \right) = 1,72 \frac{\hat{v}}{\sqrt{\hat{v}^3 - 1 + C_v}} d\hat{v} \quad (\text{II- 19})$$

Où

$$\begin{cases} \hat{v} = \frac{\mu_{eff}}{\mu} \text{ et } \mu_{eff} = \mu + \mu_t \\ C_v \approx 100 \end{cases} \quad (\text{II- 20})$$

La viscosité effective $\tilde{\nu}$ permet la modélisation de l'écoulement pour les bas nombres de Reynolds et près de la paroi. Pour des grands nombres de Reynolds, l'équation de la turbulence effective est la même que celle du modèle $k-\varepsilon$ standard.

- Caractéristique du modèle RNG $k-\varepsilon$

Le modèle *RNG* est similaire au modèle standard mais il inclut les améliorations suivantes :

- a. Il contient un nouveau terme additionnel dans l'équation de la dissipation qui apporte une amélioration significative de la précision pour la prédiction des écoulements avec des changements brutaux de direction, les écoulements fortement cisillés et les écoulements tournants. Il répond mieux aux effets de déformation rapide de l'écoulement que le modèle classique et peut expliquer son efficacité pour certains types d'écoulements.

- b. Il prend en compte les effets des bas nombres de Reynolds à l'inverse du modèle standard qui est plus adapté pour les écoulements à grand nombre de Reynolds.
- c. Il prend en compte l'effet du tourbillonnement sur la turbulence afin d'améliorer la précision dans le cas des écoulements tourbillonnaires.

II.3.4.c. Le modèle Réalisable $k-\varepsilon$

Le terme "réalisable" signifie que le modèle satisfait certaines contraintes mathématiques sur les contraintes de Reynolds, logiques avec la physique des écoulements de nature turbulente [Shih et al. (1995)]. Dans ce modèle, l'équation de l'énergie cinétique est la même que celle du modèle $k-\varepsilon$ standard à l'exception des constantes. En revanche, l'équation du taux de dissipation diffère.

L'équation du taux de dissipation est :

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho\varepsilon U_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] - \rho C_2 \frac{\varepsilon^2}{k + \sqrt{\nu \varepsilon}} \quad (\text{II- 21})$$

Où

C_2 est une constante

- Modélisation de la viscosité turbulente

La viscosité est calculée en utilisant la même formule que pour le modèle $k-\varepsilon$ standard sauf que le coefficient C_μ n'est plus constant. Il est fonction de la déformation moyenne, des taux de rotation, de la vitesse angulaire, de la rotation du système et des champs de la turbulence k et ε .

- Caractéristiques du modèle réalisable $k-\varepsilon$

Ce modèle apporte les améliorations suivantes :

- a. Il fournit des performances supérieures dans les écoulements impliquant la rotation, les couches limites sous de forts gradients de pression adverses, les zones de recirculation et le décollement de la couche limite.
- b. Il prédit avec une meilleure précision le taux de propagation des jets.

II.3.4.d. Le modèle $k-\omega$ standard

C'est un modèle empirique basé sur deux équations de transport comme le modèle $k-\varepsilon$ standard; une pour l'énergie cinétique k et l'autre pour la fréquence caractéristique de la turbulence ω [Wilcox (1998)].

- Les équations de transport du modèle $k-\omega$ standard sont :

1. L'équation de l'énergie cinétique:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho k U_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma_k \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + G_k - Y_k \quad (\text{II- 22})$$

2. L'équation du taux de dissipation ω :

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \omega) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho \omega U_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma_\omega \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right) + G_\omega - Y_\omega \quad (\text{II- 23})$$

G_k représente la génération de l'énergie cinétique turbulente due aux gradients moyens de vitesse

G_ω représente la génération de ω

Γ_k et Γ_ω représentent les diffusivités effectives de k et ω respectivement

Y_k et Y_ω représentent la dissipation de k et ω due à la turbulence

- Calcul de la viscosité turbulente

Dans ce modèle, la viscosité turbulente est calculée à partir de la relation suivante :

$$\mu_t = \alpha^* \frac{\rho k}{\omega} \quad (\text{II- 24})$$

Où α^* est un coefficient d'atténuation qui apporte une correction à la viscosité turbulente pour les bas nombres de Reynolds.

- Caractéristiques du modèle k - ω standard

Après de nombreuses améliorations, ce modèle est adapté pour prédire les écoulements cisailés libres ; il prend en considération les effets des faibles nombres de Reynolds, de la compressibilité, des jets plans ou radiaux.

II.3.4.e. Le modèle Spalart -Allmaras

Ce modèle a été proposé par Spalart & Allmaras (1992). Contrairement aux autres modèles de turbulence qui expriment la viscosité turbulente comme une inconnue secondaire, ce modèle résout directement une seule équation de transport pour la viscosité cinématique turbulente modifiée $\tilde{\nu}$. Cette dernière prend en considération l'effet de la paroi en vue de calculer μ_t .

- L'équation de transport est :

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \tilde{\nu}) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho \tilde{\nu} U_j) = G_\nu + \frac{1}{\sigma_{\tilde{\nu}}} \left[\frac{\partial}{\partial x_j} \left\{ (\mu + \rho \tilde{\nu}) \frac{\partial \tilde{\nu}}{\partial x_j} \right\} + C_{b2} \rho \left(\frac{\partial \tilde{\nu}}{\partial x_j} \right)^2 \right] - Y_\nu \quad (\text{II- 25})$$

G_v représente la production de la viscosité turbulente,

Y_v représente la destruction de la viscosité turbulente qui se produit dans la région proche de la paroi,

$\sigma_{\tilde{v}}$, C_{b2} sont des constantes,

ν est la viscosité cinématique moléculaire.

- Formulation de la viscosité turbulente

La viscosité dynamique turbulente est calculée en utilisant la relation suivante :

$$\mu_t = \rho \tilde{\nu} f_{v1} \quad (\text{II- 26})$$

Où f_{v1} est le terme d'amortissement visqueux de $\tilde{\nu}$

- Caractéristiques du modèle Spalart-Allmaras

Ce modèle a été conçu spécifiquement dans les applications aérospatiales impliquant des écoulements limités par des parois. Il a été prouvé que ce dernier donnait de très bons résultats pour les couches limites soumises à des gradients de pression adverses.

II.3.5. Traitement de l'écoulement près de la paroi

Les écoulements turbulents sont affectés d'une manière significative par la présence des parois où la viscosité moléculaire joue un rôle très important. Dans la région près de la paroi, les fluctuations de vitesse sont réduites par l'effet de la viscosité. La couche limite turbulente a été divisée en une région proche de la paroi appelée couche interne et une région loin de la paroi appelée couche externe [Cousteix (1989)]. La figure II-22 montre la décomposition de la région en proche paroi.

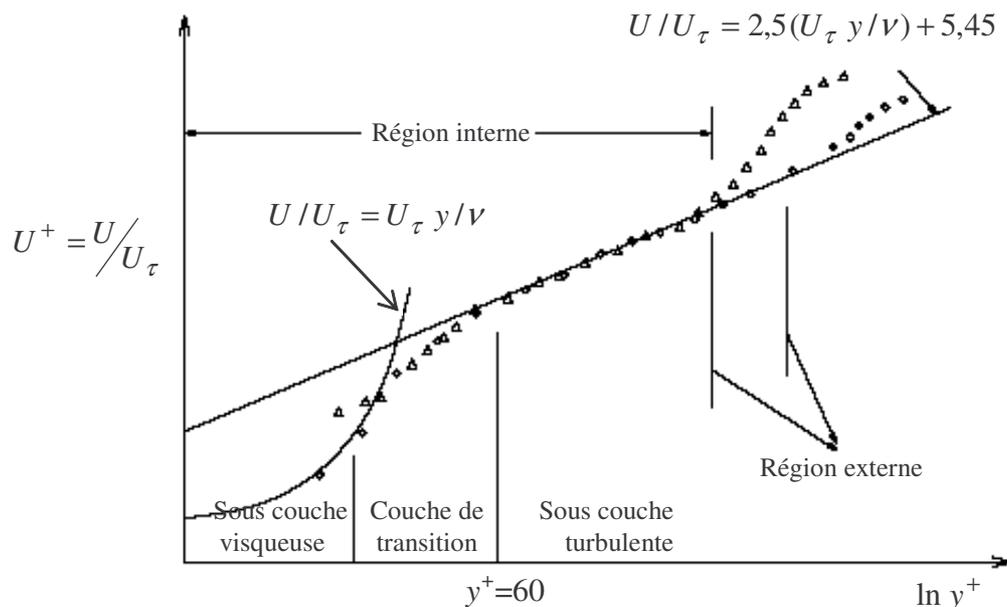


Figure II- 22 : Décomposition de la région proche de la paroi

II.3.5.a. Région interne

Il a été trouvé que cette région peut être décomposée en trois sous-couches : la sous-couche visqueuse, la couche tampon et la couche logarithmique [Cousteix (1989)]. Dans cette région les termes convectifs sont négligés par rapport à ceux de diffusion.

Dans cette région l'écoulement est laminaire et les contraintes de cisaillement visqueuses dominent. On peut supposer que le frottement total reste approximativement égal au frottement à la paroi τ_p , soit :

$$\tau = \tau_p = -\rho \overline{u'v'} + \mu \frac{\partial U}{\partial y} \quad (\text{II- 27})$$

τ_p : Contrainte pariétale

Dans ces conditions, on admet que le profil de vitesse est déterminé par la valeur de τ_p et par les caractéristiques du fluide c'est-à-dire :

$$U = f(y, \tau_p, \rho, \mu) \quad (\text{II- 28})$$

La loi de paroi est déduite en utilisant l'analyse dimensionnelle, en choisissant :

$$U^+ = \frac{U}{U_\tau}, \quad y^+ = y \frac{U_\tau}{\nu} \quad (\text{II- 29})$$

Où

U^+, y^+ sont appelées variables internes ou variables de la paroi.

U_τ est la vitesse de frottement :

$$U_\tau = \sqrt{\frac{\tau_p}{\rho}} \quad (\text{II- 30})$$

• **Sous-couche visqueuse**

Dans la région très près de la paroi, la fonction f est expliquée facilement, pour y tendant vers zéro on a :

$$\mu \frac{\partial U}{\partial y} = \tau_p \quad (\text{II- 31})$$

Le profil de vitesse est linéaire :

$$U = \tau_p \frac{y}{\mu} \quad (\text{II- 32})$$

Cette relation est écrite en fonction de U^+, y^+ comme suit :

$$U^+ = y^+ \quad (\text{II- 33})$$

Cette couche est appelée "*sous-couche linéaire*" puisque la relation entre la vitesse de l'écoulement et y^+ est linéaire. Sous Fluent[®] elle est valable pour les valeurs de " y^+ " comprises entre 1 et 5.

• **Couche tampon**

C'est une couche intermédiaire où se mélangent la sous-couche visqueuse et la couche entièrement turbulente. Dans cette région, les contraintes visqueuses et turbulentes ont le même ordre de grandeur (il n'y a pas domination d'un terme par rapport à l'autre).

• **Couche de la loi Log**

Dans cette région l'écoulement est pleinement turbulent, la diffusion visqueuse est négligée devant la diffusion turbulente. Cette zone est nommée aussi "zone logarithmique" à cause de la forme de la loi suivie par le profil de vitesse de l'écoulement :

$$U^+ = \frac{1}{K} \ln y^+ + B \quad (\text{II- 34})$$

Pour une paroi lisse la constante de von Karman $K = 0,41$ et $B = 5,5$ (ces deux constantes universelles sont déterminées expérimentalement). Cette loi est valable dans la région interne loin de la paroi et sous Fluent[®] pour les valeurs suivantes : $11,225 < y^+ < 300$.

II.3.5.b. Région externe

Dans la région externe loin de la paroi, l'écoulement ne dépend plus directement de la viscosité moléculaire du fluide. C'est la région de la turbulence développée où les termes convectifs ne sont plus négligeables. Dans cette région, la turbulence augmente rapidement à cause de la production de l'énergie cinétique turbulente due aux forts gradients des vitesses moyennes. C'est aussi dans cette région que les modèles de turbulence sont pleinement applicables.

II.4. Simulation numérique de l'écoulement autour du nageur par Fluent[®]

Dans cette partie, nous allons présenter la méthode des volumes finis utilisée par le logiciel Fluent[®] pour résoudre le système d'équations régissant l'écoulement fluide autour du nageur.

II.4.1. Présentation du logiciel Fluent[®]

Le logiciel Fluent[®] est utilisé pour la simulation numérique des écoulements. Il permet la prédiction des écoulements fluides par résolution des équations de conservation en se basant sur la méthode des volumes finis, que nous décrirons ultérieurement. Ce logiciel est capable de simuler une large gamme d'écoulements de fluides dans des configurations très diverses (écoulement laminaire ou turbulent, écoulement newtonien ou non newtonien, régimes permanents ou variables, écoulements incompressibles et compressibles, écoulements internes et externes et transfert de chaleur.. etc.). Ce code dispose de plusieurs modèles mathématiques, de schémas numériques ainsi que de différents modèles de turbulence. Il est

adapté aux traitements des différents problèmes physiques dans des géométries plus ou moins complexes.

Le code Fluent[®] traite plusieurs formes de cellules de maillages triangulaires ou quadrilatères en 2D, tétraédriques/hexaédriques/pyramidaux en 3D et même des cellules hybrides (mêlées). Le maillage utilisé par Fluent[®] est généré par d'autres logiciels spécifiques appelés préprocesseurs tels Gambit[®], Tgrid[®],...etc. La figure II-23 présente les formes de cellules traitées par le logiciel Fluent[®].

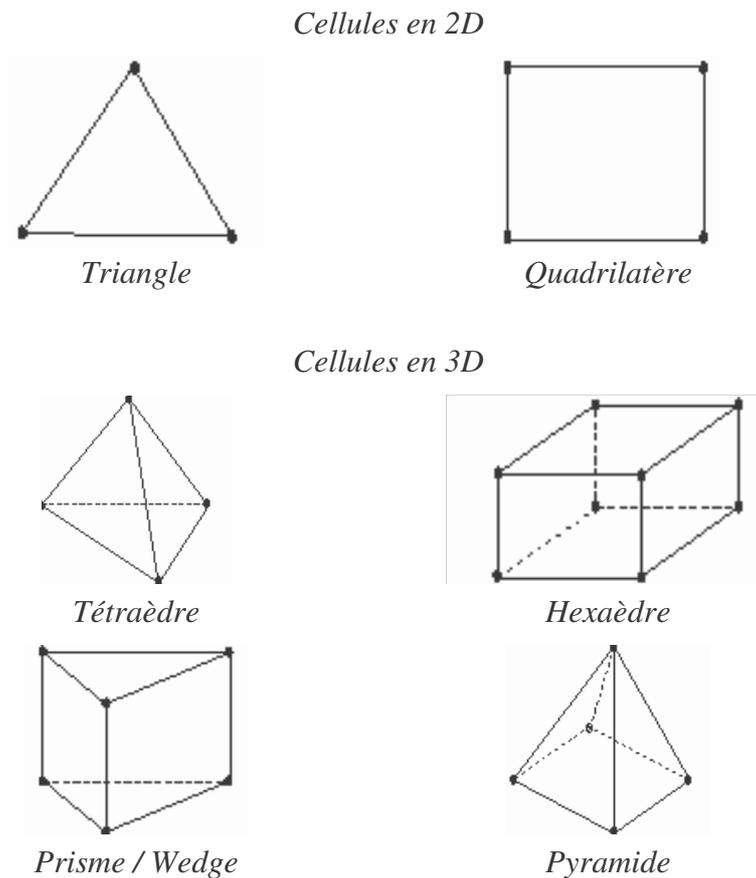


Figure II- 23 : Les formes de cellules traitées par le logiciel Fluent[®] en bidimensionnel et tridimensionnel.

II.4.2. Description générale de la méthode des volumes finis

La méthode des volumes finis est l'une des méthodes numériques les plus utilisées dans la résolution des problèmes liés aux phénomènes de transport dans des géométries de différentes formes. Actuellement et avec le développement de la technologie des moyens de calcul, plusieurs codes de modélisation utilisent cette méthode.

La méthode des volumes finis a été décrite par Patankar (1980); elle consiste à discrétiser le domaine d'étude en une multitude de volumes de contrôle (en 3D, en 2D des surfaces ou en 1D des segments) dont la réunion forme le domaine d'étude. Ensuite, elle consiste à effectuer des bilans de masse et de quantité de mouvement sur ces petits volumes. Cette technique convertit les équations de conservation aux dérivées partielles en équations algébriques qui peuvent être résolues numériquement.

Il existe deux techniques de stockage des variables lorsqu'on utilise la méthode des volumes finis. Dans la première, les variables scalaires comme la pression, la température, la densité, etc., sont calculées aux nœuds ordinaires des volumes de contrôle c'est-à-dire au centre des cellules du maillage, tandis que les variables vectorielles telles les composantes de la vitesse sont calculées sur les faces des volumes de contrôle. Cette technique de stockage des variables est désignée dans la littérature par l'appellation "maillage décalé". Dans la seconde technique, celle utilisée par Fluent[®], toutes les variables sont stockées au centre des cellules. Cette méthode est dite "collocalisée".

II.4.3. Avantages de la méthode des volumes finis

On peut citer les avantages suivants [Patankar (1980)]: cette méthode

- a. satisfait le bilan global de chaque variable exactement sur chaque volume fini et donc sur tout le domaine même si un maillage grossier est utilisé,
- b. facilite la linéarisation des termes non linéaires dans les équations de conservation,
- c. est applicable à tout type de géométrie simple ou complexe,
- d. génère un temps de calcul et de stockage en mémoire raisonnable.

II.4.4. Les étapes de résolution par la méthode des volumes finis

Afin de déterminer le champ de la variable dépendante ϕ dans un domaine d'étude par la méthode des volumes finis, les étapes à suivre sont essentiellement [Patankar (1980)] :

- a. La définition du domaine d'étude et la décomposition en un nombre de points (les nœuds du maillage), autour desquels on définit des volumes élémentaires appelés volumes de contrôle. Cette étape s'appelle le maillage.
- b. L'intégration des équations de conservation sur chaque petit volume de contrôle dans tout le domaine.
- c. La discrétisation des différents termes de la forme intégrée de l'équation de transport afin de construire le système d'équations algébriques.
- d. L'incorporation des conditions initiales et aux limites appropriées.
- e. La linéarisation des équations discrétisées.
- f. La résolution du système algébrique final par une méthode de résolution (itérative ou semi-itérative ou directe) pour obtenir un champ approché de ϕ dans des points discrets du domaine considéré.

II.4.5. Discrétisation

II.4.5.a. Principe de discrétisation de l'équation de transport

En intégrant l'équation de transport stationnaire sur un volume de contrôle dV et en appliquant le théorème d'Ostrogradsky, on obtient l'équation II-35 écrite sous la forme intégrale suivante :

$$\oint \rho \phi \vec{v} \cdot d\vec{A} = \oint \Gamma_{\phi} \nabla \phi \cdot d\vec{A} + \int_V S_{\phi} dV \quad (\text{II- 35})$$

Où :

- ρ : Masse volumique;
- \vec{v} : Vecteur vitesse ($\vec{v} = u \vec{i} + v \vec{j}$) en 2D

- \vec{A} : Vecteur d'aire de la surface (surface orientée)
- Γ_ϕ : Coefficient de diffusion de la grandeur ϕ
- $\nabla\phi$: Gradient de ϕ $\left[\vec{\nabla}\phi = \frac{\partial\phi}{\partial x}\vec{i} + \frac{\partial\phi}{\partial y}\vec{j} \right]$ en 2D ;
- S_ϕ : Terme source (la source de ϕ par unité de volume)

La figure II-24 montre un exemple de maillage non structuré bidimensionnel qui contient des cellules de formes triangulaires. C'est le même type d'éléments utilisés pour réaliser le maillage lors de l'étude bidimensionnelle de l'écoulement autour des nageurs.

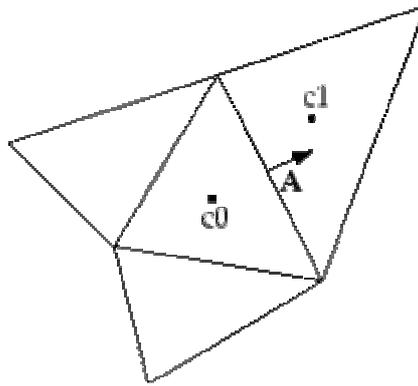


Figure II- 24: Exemple de volume de contrôle utilisé pour la discrétisation de l'équation de transport d'un scalaire

L'équation II-35 est appliquée à chaque volume de contrôle, ou à chaque cellule du maillage dans tout le domaine de calcul. La discrétisation de cette équation sur chaque volume de contrôle donne la forme suivante dans le cas stationnaire (Eq-II-36) :

$$\sum_f^{N_{faces}} \rho_f \vec{v}_f \phi_f \vec{A}_f = \sum_f^{N_{faces}} \Gamma_\phi (\nabla\phi)_n \cdot \vec{A}_f + S_\phi V \quad (\text{II- 36})$$

Avec :

- N_{faces} Nombre de faces qui entourent la cellule,
- ϕ_f Valeur de ϕ transférée par convection à travers la face f ,
- \vec{A}_f Aire de la face f , $\left(|\vec{A}| = |A_x\vec{i} + A_y\vec{j}| \right)$ en 2D,
- $\rho_f \vec{v}_f \cdot \vec{A}_f$ Flux massique à travers la face f ,
- $(\nabla\phi)_n$ Valeur de $(\nabla\phi)$ perpendiculaire à la face f ,
- V Volume du volume de contrôle.

Les équations résolues par Fluent[©] prennent la même forme générale que l'équation (II-36) qui est appliquée sur des maillages tridimensionnels et non structurés composés d'éléments triangulaires ou polyèdres arbitraires.

Par défaut, Fluent[®] stocke les valeurs discrètes de la variable ϕ au centre des cellules (C_0 et C_1 sur la figure II-24). Cependant, les valeurs aux faces ϕ_f sont nécessaires pour le calcul du terme de convection (Equation II-36). Ces valeurs sont calculées par interpolation à partir des valeurs de ϕ au centre des cellules.

Les termes de l'équation (II-36) ne sont pas tous discrétisés de la même manière. Pour les termes convectifs Fluent[®] permet de choisir entre différents schémas de discrétisation, tandis que les termes diffusifs sont automatiquement discrétisés en utilisant un schéma centré du second ordre (discrétisation du terme en considérant les deux cellules amont et aval).

II.4.5.b. Discrétisation du terme convectif

Le terme de convection est beaucoup plus compliqué à traiter que le terme de diffusion, la manière de discrétiser ce terme agissant sur la précision du calcul. Parmi les schémas de discrétisation incorporés dans le logiciel Fluent[®], nous avons :

- Le schéma du premier ordre amont

Dans ce schéma, la valeur stockée au centre d'une cellule est égale à la moyenne de toutes les valeurs de la même cellule. Les valeurs au niveau des faces sont égales à celles des cellules qui se situent en amont. Ce schéma est très simple à utiliser mais peut présenter une diffusion numérique importante lorsque la direction de l'écoulement ne correspond pas exactement à celle des lignes de la grille. Donc pour pouvoir l'utiliser, il faut bien raffiner le maillage. Il est choisi comme schéma par défaut dans le logiciel Fluent[®].

- Le schéma du second ordre amont

L'utilisation de ce schéma permet d'avoir un degré de précision plus élevé lors du calcul de la valeur de la variable ϕ aux faces des cellules. Dans cette approche un développement en série de Taylor est effectué sur les valeurs au centre des cellules afin de calculer les valeurs aux faces en utilisant la formule suivante:

$$\phi_f = \phi + \nabla \phi \cdot \Delta \vec{s} \quad (\text{II- 37})$$

ϕ et $\nabla \phi$ sont les valeurs du scalaire ϕ au centre de la cellule et de son gradient dans la cellule amont.

$\Delta \vec{s}$ est le vecteur de déplacement de la cellule centrale en amont vers la face centrale.

- Le schéma QUICK

Pour un maillage structuré de type quadrilatéral ou hexaédrique, ce schéma repose sur les deux mailles en amont et une maille en aval pour donner une discrétisation encore plus précise. Ce schéma est typiquement plus précis dans le cas d'un maillage structuré aligné avec le sens de l'écoulement. Cependant, il peut être utilisé dans le cas des maillages non structurés ou hybrides, bien raffinés, en particulier dans les zones à forts gradients.

II.4.5.c. Linéarisation des équations discrétisées

L'équation de transport discrétisée (II-36) qui contient la variable inconnue ϕ , est une équation non linéaire en général. La linéarisation de cette équation peut être exprimée sous la forme suivante :

$$a_p \phi = \sum_{nb} a_{nb} \phi_{nb} + b \quad (\text{II- 38})$$

a_p et a_{nb} sont les coefficients de linéarisation pour ϕ et ϕ_{nb} , l'indice nb indique les cellules voisines. Le nombre de cellules voisines varie en fonction de la structure du maillage. En général il est égal au nombre de faces qui entourent le volume de contrôle à l'exception des cellules qui se situent aux limites du domaine de calcul. Cette équation est écrite pour chaque cellule du maillage, cela produit un système d'équations algébriques avec une matrice des coefficients dispersée. Fluent[®] résout ce système d'équations linéaires en utilisant la méthode itérative de Gauss-Seidel.

II.4.6. Etapes de résolution

Dans ce paragraphe, on montre la méthode de résolution des équations régissant l'écoulement, à savoir l'équation de continuité et celle de quantité de mouvement. Ces équations s'écrivent dans le cas d'un écoulement stationnaire sous la forme intégrale suivante :

$$\oint \rho \vec{v} \cdot d\vec{A} = 0 \quad (\text{II- 39})$$

$$\oint \rho \vec{v} \cdot \vec{v} \cdot d\vec{A} = -\oint p I \cdot d\vec{A} + \oint \bar{\tau} \cdot d\vec{A} + \oint \vec{F} \cdot d\vec{V} \quad (\text{II- 40})$$

Où :

$-\oint p I \cdot d\vec{A}$: Force totale de la pression sur les N faces du polyèdre,

I : Matrice identité,

$\bar{\tau}$: Tenseur de contraintes,

\vec{F} : Vecteur de force volumique.

II.4.6.a. Discrétisation de l'équation de quantité de mouvement

En utilisant l'un des schémas de discrétisation décrits dans le paragraphe précédent, l'équation (II-40) peut être écrite, pour la composante u de la vitesse, sous la forme suivante :

$$a_p u = \sum_{nb} a_{nb} u_{nb} + \sum p_f A \cdot \hat{i} + S \quad (\text{II- 41})$$

Où :

a et a_{nb} sont les coefficients de linéarisation et S désigne le terme source.

Fluent[®] utilise la méthode collocalisée où les valeurs de la vitesse et de la pression sont stockées toutes les deux aux centres des volumes de contrôle. Afin de résoudre l'équation II-41, la pression doit être calculée aux faces des volumes de contrôle. Pour ce faire, Fluent[®] dispose de plusieurs schémas d'interpolation de pression :

- *Schéma standard* : c'est le schéma défini par défaut dans Fluent[®], l'interpolation s'effectue en utilisant les coefficients de l'équation de quantité de mouvement (II-41). Ce schéma fonctionne bien pour de petites variations de pression entre les centres des

cellules. De forts gradients de pression entre les cellules produisent une sous ou surestimation de la vitesse au niveau des faces. Dans ce cas, il faut soit raffiner le maillage, soit utiliser d'autres schémas d'interpolation disponibles dans Fluent[®].

- *Schéma linéaire* : ce schéma calcule la pression à la face de la cellule comme la moyenne des valeurs de pression dans la cellule adjacente.
- *Schéma de deuxième ordre* : ce schéma utilise le même principe que pour l'équation de la quantité de mouvement. Il assure plus de précision et apporte des améliorations en comparant avec le schéma standard et le schéma linéaire, mais il peut causer des problèmes d'instabilités numériques si un maillage de mauvaise qualité est utilisé ou s'il est choisi au début du calcul.
- *Schéma Presto* : ce schéma est inspiré de l'idée de la grille décalée valable dans le cas d'un maillage structuré. Proposé par Patankar (1980), il utilise le bilan de masse dans un volume de contrôle décalé pour la face où est calculée la pression décalée.

II.4.6.b. Discrétisation de l'équation de continuité

L'intégration de l'équation de continuité (II-39) sur le volume de contrôle illustré par la Figure II-23 donne la forme discrétisée suivante :

$$\sum_f^{N_{\text{faces}}} J_f A_f = 0 \quad (\text{II- 42})$$

Où

J_f est le flux massique (ρv_n) qui traverse la face f .

A_f est l'aire de l'une des N faces qui entourent le volume de contrôle.

Pour un fluide incompressible, la pression n'apparaît pas explicitement dans l'équation de continuité puisque la densité n'est pas liée directement à la pression. Des algorithmes de la famille SIMPLE [Patankar (1980)] sont utilisés afin d'introduire la pression dans l'équation de la continuité et obtenir une équation pour la pression. Fluent[®] dispose de trois algorithmes de couplage pression vitesse; SIMPLE, SIMPLEC et PISO. Le but de ces algorithmes est d'améliorer l'estimation de la pression pour que le champ de vitesse obtenu s'améliore progressivement jusqu'à satisfaire l'équation de continuité. Les algorithmes proposés par Fluent[®] sont :

- *L'algorithme SIMPLE*

L'algorithme SIMPLE (**S**emi-**I**mplicit **M**ethod for **P**ressure-**L**inked **E**quations) a été mis en place et développé par Patankar & Spalding (1972) cité par Popa (2002). C'est l'algorithme par défaut dans Fluent[®], il utilise une méthode itérative pour calculer les pressions. Cet algorithme utilise une relation de correction entre la vitesse et la correction de la pression pour imposer la conservation de débit, puis obtenir le champ de pression.

Les étapes essentielles constituant l'algorithme SIMPLE sont les suivantes :

1. Supposer un champ de pression initial p^*

2. Résoudre les équations de quantité de mouvement pour obtenir le champ de vitesse
3. Résoudre l'équation de la correction de pression p'
4. Corriger la pression $p = p^* + p'$
5. Corriger les vitesses
6. Résoudre les équations des autres variables dépendantes,
7. Considérer la pression corrigée comme la nouvelle valeur estimée de la pression, retourner à l'étape 2 et répéter toute la procédure complète jusqu'à atteindre la convergence de la solution.

- *L'algorithme SIMPLEC*

L'algorithme SIMPLEC (**SIMPLE** Consistant) est le deuxième type d'algorithme disponible dans Fluent[®] après l'algorithme SIMPLE. Les étapes de cet algorithme sont presque les mêmes que celles de l'algorithme SIMPLE [Popa (2002)]. La différence réside dans l'expression utilisée pour corriger le flux J_f à travers la surface f . L'utilisation de cet algorithme accélère la convergence par rapport à l'algorithme SIMPLE.

- *L'algorithme PISO*

L'algorithme **PISO** (**P**ressure **I**mplicit with **S**plitting of **O**perators) a été mis au point par Issa en 1986 cité par [Popa (2002)]. C'est une extension de l'algorithme SIMPLE ayant une étape de correction de plus. Il est basé sur une relation de degré élevé entre la correction de la vitesse et la correction de la pression. La méthode de résolution est la même que celle utilisée par l'algorithme SIMPLE.

II.4.7. Facteurs de sous-relaxation

En général, les facteurs de sous-relaxation sont utilisés dans le cas de problèmes non linéaires. Le but est de contrôler et de réduire le changement des paramètres d'écoulement d'une itération à l'autre afin d'éviter la divergence du calcul numérique.

Comme nous l'avons vu dans le paragraphe précédent, toutes les équations de transport peuvent être mises sous la forme suivante :

$$a_p \phi_p = \sum_{nb} a_{nb} \phi_{nb} + b \quad (\text{II- 43})$$

Si on suppose ϕ_p^* et ϕ_p deux solutions de l'équation pour deux itérations successives, on peut écrire [Buil (1999)]:

$$\phi_p = \phi_p^* + \left(\frac{\sum_{nb} a_{nb} \phi_{nb} + b}{a_p} - \phi_p^* \right) \quad (\text{II- 44})$$

Le deuxième terme de l'équation présente la variation de la valeur de ϕ_p^* durant une itération. Cependant, Fluent[®] permet de diminuer cette variation par l'introduction d'un nouveau facteur de sous-relaxation α assigné à un nombre de variables de la manière suivante:

$$\phi_p = \phi_p^* + \alpha \left(\frac{\sum_{nb} a_{nb} \phi_{nb} + b}{a_p} - \phi_p^* \right) \quad (\text{II- 45})$$

Où α est le facteur de sous-relaxation. Il est appliqué à toutes les variables de l'écoulement, mais concerne surtout la pression afin de satisfaire l'équation de continuité. Dans le logiciel de simulation numérique Fluent[®], les meilleures valeurs des facteurs de sous relaxation sont fournies pour une large gamme d'écoulements fluides. Les valeurs de ces facteurs doivent être comprises entre 0 et 1.

Il n'existe pas une règle générale pour choisir les valeurs de ces facteurs, donc le choix varie selon la nature du problème, la structure du maillage et le nombre de cellules qui le constituent. Par exemple, au cours d'une simulation, si on observe une convergence très lente mais sûre on peut les augmenter soigneusement ; mais dans le cas contraire, il faut les diminuer. Enfin, on conclut que le bon choix de ces facteurs est très important pour le bon déroulement de la procédure de simulation numérique.

Par défaut, les valeurs de sous-relaxation utilisées par le logiciel Fluent[®] sont données dans le tableau II-3.

	Pression	Quantité de mouvement	Energie cinétique turbulente k	Taux de dissipation de l'énergie cinétique
Modèle k- ϵ	0,3	0,7	0,8	0,8

Tableau II- 3: Valeurs par défaut des facteurs de sous relaxation

II.4.8. Critère de convergence

Plusieurs paramètres peuvent jouer un rôle important dans la convergence du calcul numérique tels que le nombre de cellules, la structure du maillage, les facteurs de sous relaxation et la complexité des écoulements étudiés. Sous Fluent[®], il existe plusieurs manières de contrôler la convergence de la solution numérique telles que la limitation des résidus et les coefficients des forces.

Cependant, pour la plupart des problèmes, le critère de convergence basé sur les résidus des différents paramètres de l'écoulement est suffisant. Le résidu correspond à la somme, sur toutes les cellules, des erreurs sur chaque équation discrétisée. Donc, pour chaque équation il faut fixer une condition de convergence. A chaque itération le résidu est calculé pour chaque équation, le logiciel arrêtera le calcul dès que chaque résidu calculé est en dessous de la valeur fixée auparavant par l'utilisateur.

Par définition :

$$R = \frac{\sum_{mailles} \left| \frac{\sum_{nb} a_{nb} \phi_{nb} + b - a_p \phi_p}{\sum_{mailles} a_p \phi_p} \right|}{\sum_{mailles} a_p \phi_p} < \epsilon$$

Par défaut, pour le logiciel Fluent[®], la condition de convergence est fixée à $\varepsilon < 10^{-3}$ pour l'équation de conservation de la masse et de conservation de la quantité de mouvement. Pour l'équation d'énergie, la valeur de résidu est fixée à $\varepsilon < 10^{-6}$.

II.5. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons commencé par montrer les méthodes employées dans la construction du modèle géométrique du nageur dans le cas bidimensionnel et tridimensionnel. La construction est effectuée à partir d'un modèle réel. Ensuite nous avons présenté la génération du maillage et l'analyse de sa qualité dans le cas bidimensionnel en utilisant le logiciel Gambit[®]. À la fin, nous avons écrit les formules mathématiques régissant l'écoulement fluide et nous avons montré leur mode de résolution en utilisant la méthode des volumes finis.

CHAPITRE III : CHOIX ET VALIDATION DE LA PROCEDURE NUMERIQUE

Ce chapitre se décompose en trois parties. La première s'intéresse à montrer la procédure de simulation numérique de l'écoulement autour du nageur en détaillant le choix des différents paramètres de calcul numérique (choix du solveur, choix du schéma de discrétisation, choix du schéma d'interpolation de la pression, etc.). La deuxième partie concerne la validation qualitative et quantitative de cette procédure en utilisant le travail expérimental réalisé par Daube et al. (1985) concernant l'écoulement autour d'un profil NACA0012 pour un angle d'incidence de 34° et un nombre de Reynolds de 1000. La dernière partie s'intéresse à l'étude de l'effet de la taille du domaine fluide, de l'indépendance du maillage et du choix du critère de convergence sur la fidélité des résultats numériques.

III.1. Procédure de simulation numérique de l'écoulement autour du nageur

Les étapes principales à effectuer sous le logiciel Fluent[®] durant la simulation numérique sont détaillées ci-après.

III.1.1. Définition de l'échelle

Avant d'entreprendre les simulations, il est indispensable de changer l'échelle de la géométrie pour que les dimensions du domaine de calcul correspondent aux dimensions du domaine réel, en mètres dans notre cas (Figure III-1).

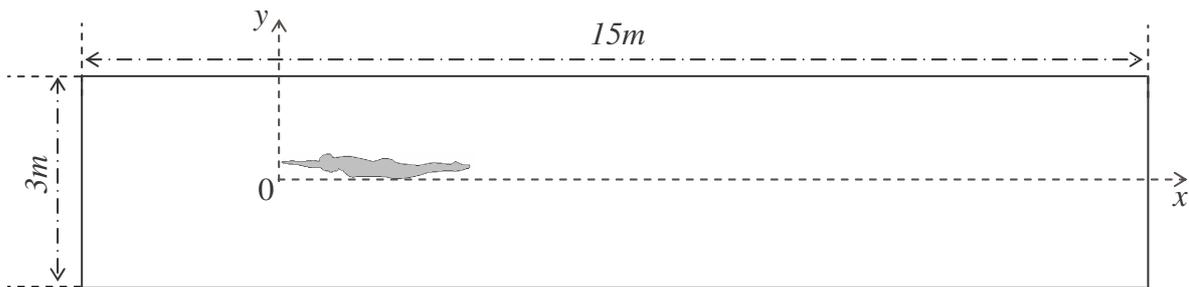


Figure III- 1 : Dimension du domaine fluide

III.1.2. Choix de la formulation du solveur

Deux formulations de solveur peuvent être utilisées dans le logiciel Fluent[®], à savoir un solveur découplé ou un solveur couplé implicite ou explicite. Ces deux derniers donnent de meilleurs résultats pour une large gamme d'écoulements. Le choix de l'un des deux est basé sur la nature du problème traité. Un solveur valable pour étudier un type d'écoulement n'est pas forcément le mieux adapté pour étudier un autre type. La différence principale entre ces deux types de solveur réside dans la manière de résoudre les équations régissant l'écoulement et le domaine d'utilisation de chacun d'entre eux;

- a. Le solveur découplé (segregated) est le solveur sélectionné par défaut dans Fluent[®]. Il résout les équations de continuité, de quantité de mouvement et si nécessaire celle de l'énergie, séquentiellement, autrement dit les unes isolées des autres. Le solveur couplé (coupled) résout, quant à lui, les équations simultanément ou couplées les unes aux autres. Cependant, pour les deux formulations, les équations des autres scalaires tels que les quantités de la turbulence ou des radiations sont traitées séparément.
- b. Le solveur découplé est traditionnellement utilisé pour étudier les écoulements incompressibles et modérément compressibles, tandis que le solveur couplé a été conçu, à l'origine, pour étudier les écoulements compressibles à grande vitesse, les

écoulements hautement couplés avec de grandes forces de volume (flottabilité ou les forces de rotation) et pour les domaines ayant des maillages trop fins.

Il est à noter que le solveur couplé implicite requiert plus de mémoire (de 1,5 jusqu'à 2 fois le temps de calcul) comparé au solveur découplé. Le solveur couplé explicite requiert moins de mémoire que le solveur couplé implicite mais demande plus de temps pour la convergence et n'est conseillé que pour les écoulements instationnaires.

D'après les argumentations ci-dessus, le solveur découplé est choisi pour effectuer les simulations numériques des écoulements autour des nageurs.

III.1.3. Définition du fluide et de ses propriétés

La désignation du fluide et de ses propriétés se fait à partir de la banque de données dans le logiciel Fluent[®] ; il suffit juste de sélectionner le fluide utilisé.

Cependant, les valeurs des propriétés du fluide telles la masse volumique et la viscosité cinématique doivent correspondre aux conditions expérimentales, c'est-à-dire à une température de 29°C.

Le fluide est considéré incompressible de masse volumique $996,2 \text{ kg/m}^3$, de viscosité dynamique de $8,17 \cdot 10^{-4} \text{ kg/ms}$.

III.1.4. Spécification des conditions aux limites

Dans le cadre de la présente étude, notre but est de simuler l'écoulement autour de nageurs de haut niveau. Les caractéristiques de l'écoulement du fluide sont les mêmes si on considère un corps se déplaçant dans un fluide au repos ou un fluide s'écoulant autour d'un corps fixe. Ce qui est important, c'est le mouvement relatif entre le corps et le fluide. Cependant, pour étudier la nature et les caractéristiques d'écoulement autour du nageur, on considère que le nageur est immobile et le fluide est en mouvement.

Un premier choix du type de conditions aux limites a été fait dans le logiciel Gambit[®]. Ces conditions doivent être précisées dans le solveur Fluent[®]. Les conditions aux limites imposées dans la présente étude sont les suivantes (figure III-2) :

- La condition d'entrée : vitesse imposée uniforme
Elle simule l'entrée de l'écoulement dans le domaine de calcul considéré, vitesse uniforme longitudinale imposée comprise entre $1,4 \text{ m/s}$ et $3,1 \text{ m/s}$ car pendant la phase de coulée la vitesse verticale est nulle (fluide inerte). Ces données ont été choisies à partir de données expérimentales obtenues lors de compétitions internationales. D'autres paramètres aussi doivent être définis telles l'intensité de la turbulence et le diamètre hydraulique. L'intensité de la turbulence a été prise égale à 1%. Cette valeur a été fixée en se basant sur le travail réalisé par Bixler et al. (2007), Bixler & Riewald (2002) et Rouboa et al. (2006).
- La condition de sortie : conservation du débit
Tous les gradients sont nuls.
- La condition de symétrie : sur les deux limites supérieure et inférieure du domaine fluide.
Cette condition considère que le gradient d'une variable quelconque ϕ suivant la direction perpendiculaire à l'axe de symétrie est nul. Elle permet de modéliser les cas où un écoulement d'un côté du plan de symétrie est l'image en miroir de l'écoulement de l'autre côté du plan de symétrie. Cette condition nous permet de mieux simuler le cas réel.

- La condition de paroi solide à la surface du nageur
Elle permet de modéliser le fluide en contact avec le solide.
 1. Les vitesses normale et tangentielle sont imposées nulles, la condition de non glissement est supposée $V_x = V_y = 0 \text{ m/s}$.
 2. La surface du nageur est considérée lisse (pas de combinaison de natation).

On présente sur la figure III-2 les différentes conditions aux limites imposées dans le domaine de calcul.

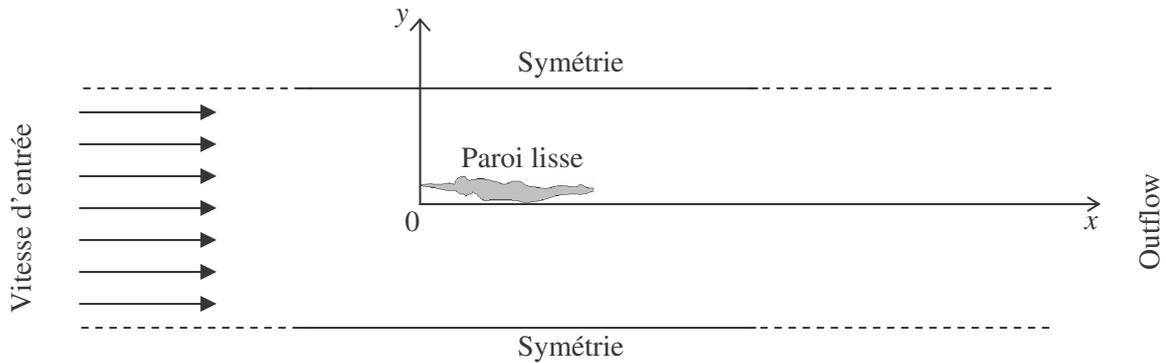


Figure III- 2 : Conditions aux limites imposées

III.1.5. Choix de la loi de paroi

Pour le traitement de la région de proche paroi, Fluent[®] dispose de trois lois : la loi "Standard", la loi "Non-Equilibrium Wall Functions" et la loi "Enhanced Wall Treatment". Chaque loi correspond à une région précise de la couche limite. Le choix de la loi de paroi dépend du problème étudié. Dans l'étude des écoulements autour du nageur, le choix est porté sur la loi "Non Equilibrium Wall Function", car cette dernière donne de meilleurs résultats en présence des zones de décollement et de gradient de pression adverses. Elle a déjà été utilisée par Bixler & Riewald (2002) et Bixler et al. (2007) afin d'assurer le bon traitement de la sous couche limite turbulente lors de la simulation numérique. Dans cette région, il est très important que le maillage soit bien choisi pour que la première cellule se situe dans la sous-couche limite logarithmique. En effet, un maillage grossier ne permet pas de résoudre l'écoulement près de la paroi.

III.1.6. Choix du schéma de discrétisation :

Par défaut, si un solveur découplé est choisi, toutes les équations sont résolues en utilisant le schéma de premier ordre. Si l'un des solveurs couplés est choisi, les équations sont résolues en utilisant le schéma de deuxième ordre. L'utilisation du schéma varie selon le problème étudié. Lorsque l'écoulement est aligné avec les cellules du maillage, un schéma de premier ordre donne des résultats acceptables et l'utilisation d'un schéma de deuxième ordre ne change pas significativement les résultats. Mais lorsque l'écoulement n'est pas aligné avec les cellules du maillage, l'emploi de ce schéma augmente les erreurs (diffusion) numériques, d'où le besoin d'utiliser un schéma de discrétisation d'ordre supérieur qui améliore la précision du calcul. Dans la plupart des cas, le calcul peut être effectué directement en utilisant le schéma du second ordre. Par contre, pour certains cas, le calcul doit commencer avec un schéma de premier ordre en effectuant quelques itérations, puis on passe à un autre schéma d'ordre supérieur pour le reste du calcul. Le schéma de premier ordre converge plus vite mais donne

des résultats moins précis. Le schéma QUICK peut fournir une meilleure précision que le schéma de deuxième ordre pour les écoulements rotationnels et tourbillonnaires résolus sur maillages structurés de type quadrilatère ou hexaédrique. Cependant il ne s'applique pas à un maillage non structuré ou constitué de cellules triangulaires. Sur la base des critères cités ci-dessus et vu le maillage non structuré utilisé dans cette étude, notre choix s'est porté sur le schéma du second ordre lors de la discrétisation des termes convectifs pour toutes les équations. Ce choix est appliqué dans les deux cas : bidimensionnel et tridimensionnel. Ce choix s'explique par le désir d'obtenir une bonne précision de résultats par rapport à un schéma au premier ordre.

III.1.7. Choix de la méthode d'interpolation de la pression

Le choix du schéma d'interpolation de la pression est disponible uniquement lorsque le solveur découplé est choisi. Pour la plupart des cas, le schéma standard est acceptable, mais pour des écoulements spécifiques, d'autres schémas sont plus recommandés, par exemple :

- Le schéma PRESTO est plus adapté aux problèmes de convection naturelle à grand nombre de Rayleigh, les écoulements hautement tourbillonnaires à grande vitesse de rotation, les écoulements impliquant les milieux poreux ou les écoulements dans des domaines fortement courbés.
- Le schéma de deuxième ordre est à utiliser dans les écoulements compressibles. Ce schéma n'est pas applicable pour les fluides avec un gradient de pression discontinue imposé par la présence de milieux poreux ou dans le cas d'utilisation de modèle VOF ou modèle de mélange pour les écoulements multiphasiques.

Le schéma de deuxième ordre a prouvé sa puissance et son degré de précision lorsque les autres schémas ne sont pas applicables. Il est utilisé aussi pour améliorer la précision des écoulements incompressibles. C'est le schéma choisi pour effectuer nos simulations numériques.

III.1.8. Choix de l'algorithme de couplage pression-vitesse

Les deux algorithmes SIMPLE et SIMPLEC sont utilisés dans le cas de simulations en régime stationnaire. Ils sont très similaires, la différence majeure entre eux est qu'on peut assigner à l'algorithme SIMPLEC un facteur de sous-relaxation proche de 1. L'utilisation de l'algorithme SIMPLEC augmente la rapidité de la convergence de calcul dans la plupart des cas mais elle peut entraîner aussi des problèmes d'instabilités de la solution numérique. Dans ce cas il faut, soit diminuer le facteur de sous-relaxation et relancer de nouveau les calculs, soit utiliser l'algorithme SIMPLE qui assure la convergence de calcul. L'algorithme PISO est fortement recommandé dans le cas des écoulements instationnaires ou pour les écoulements stationnaires avec un maillage qui contient des cellules très obliques. En comparaison avec l'algorithme SIMPLE, cet algorithme implique une capacité de stockage mémoire considérable à cause des deux corrections effectuées. Il n'est pas clair dans quelles conditions les algorithmes ont de meilleures performances. La performance de chaque algorithme dépend des conditions d'écoulement et du degré de couplage entre les équations de conservation de la quantité de mouvement et l'équation de transport de la variable ϕ . Par exemple dans l'algorithme PISO, on ajoute une correction supplémentaire sur chaque itération pour améliorer la performance [Popa (2002)]. Cependant dans le cadre de notre étude et pour des raisons de sécurité, l'algorithme SIMPLE, qui est le plus robuste et qui assure la convergence de calcul, est choisi pour effectuer les simulations numériques.

III.1.9. Initialisation du calcul

Nous avons vu que le logiciel Fluent[®] utilise une méthode itérative pour résoudre les équations régissant l'écoulement fluide. Par conséquent, avant d'itérer les calculs, il faut fournir une solution initiale à partir de laquelle le logiciel commence les calculs. L'initialisation du calcul peut être réalisée à partir de l'entrée, de la sortie ou même à partir du domaine entier. Dans notre cas, nous avons choisi d'initialiser le calcul à partir des paramètres d'entrée du domaine car on connaît exactement les vitesses à l'entrée. Cette valeur sera fixée au cours des itérations. Mais pour des raisons de sécurité, il est préférable de vérifier que la valeur de vitesse après initialisation correspond à celle rentrée dans le panneau des conditions aux limites.

III.1.10. Convergence du calcul

De manière générale, la convergence du calcul est principalement surveillée suivant la valeur des résidus⁷ des différents paramètres de l'écoulement, fixée par défaut dans Fluent[®] à 10^{-3} . Le logiciel arrêtera les itérations dès lors que tous les résidus calculés sont inférieurs à la valeur du critère de convergence par défaut où à celle fixée par l'utilisateur. Cette valeur est fixée selon le degré de précision souhaité de la solution.

Le critère par défaut ne suffit pas systématiquement à assurer la convergence du calcul. Une étude de l'influence du critère de convergence sur la solution a été menée et nous a conduits à fixer une valeur de critère de convergence de 10^{-5} (cf §III.3 ci-après).

La figure III-3 représente l'évolution des résidus, au niveau des équations de continuité, de quantité de mouvement suivant x , y et z ainsi que les paramètres de turbulence (la production et la dissipation de l'énergie cinétique) au cours des itérations. L'allure de la courbe de convergence est identique pour toutes nos simulations numériques et pour toutes les géométries étudiées.

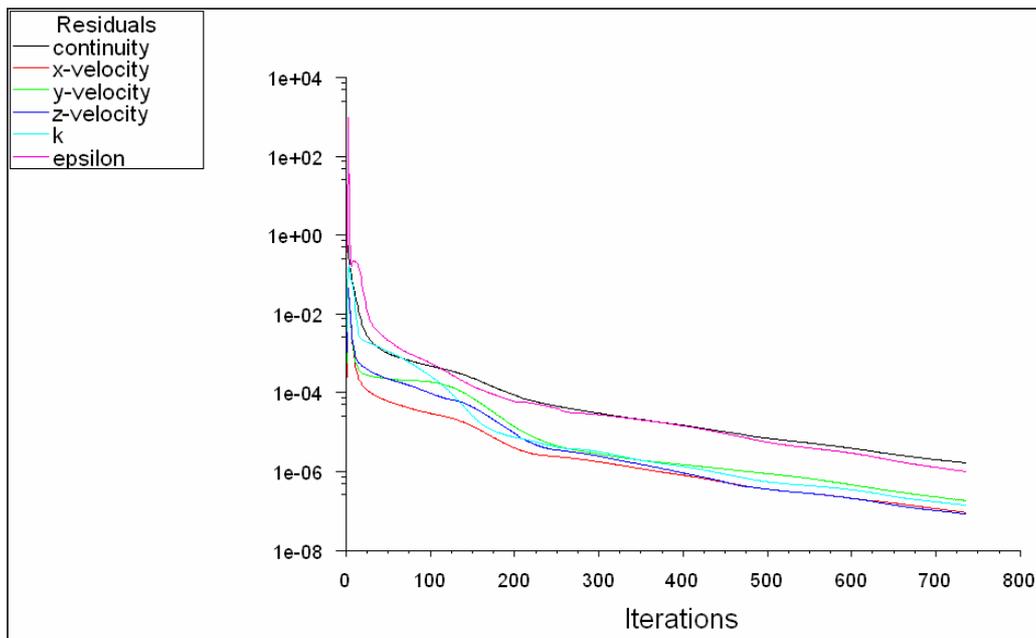


Figure III- 3 : Convergence du calcul dans le cas tridimensionnel

⁷ C'est la somme, sur toutes les cellules du maillage, des erreurs sur une équation quelconque.

Cette figure III-3 montre que le calcul converge facilement au bout d'environ 745 itérations. Il ne présente pas d'oscillation, nous n'avons pas besoin de changer les facteurs de sous relaxation. Cela indique la bonne qualité du maillage et la fiabilité des résultats de la simulation numérique. Un maillage de mauvaise qualité induit sûrement des fluctuations (oscillations) au niveau de cette courbe ainsi que des problèmes de divergence de calcul.

III.1.11. Traitement du maillage près de paroi

Il est important que le maillage près de la paroi soit choisi soigneusement afin d'assurer la bonne résolution de la sous-couche limite turbulente. Dans la simulation des écoulements autour des nageurs, le traitement près de la paroi est réalisé en utilisant la loi "*Non Equilibrium Wall Function*". L'utilisation de cette dernière n'est valable qu'à condition que le nœud voisin de la paroi se trouve dans la sous-couche limite turbulente. Sous Fluent[®], cette loi est utilisée seulement lorsque les valeurs de y^+ sont comprises entre 11,225 et 300 (Figure III-4).

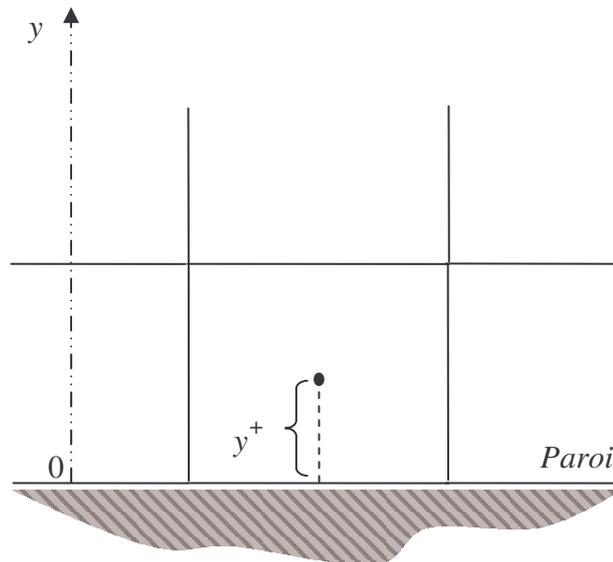
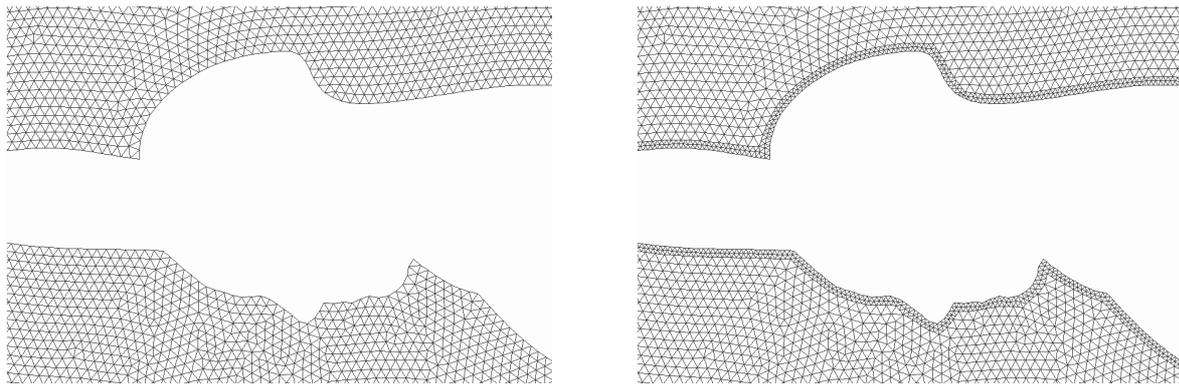


Figure III- 4: Distance y^+ entre la paroi et le centre de la première cellule du maillage

Le logiciel Fluent[®] dispose d'une option qui permet de vérifier les valeurs de la distance y^+ le long de la paroi. Il permet aussi d'adapter le maillage automatiquement si cela est nécessaire en sélectionnant les cellules qui ne satisfont pas la condition sur y^+ .

III.1.12. Adaptation du maillage autour de la géométrie du nageur

Si le maillage initial généré autour du nageur dans le logiciel Gambit[®] ne satisfait pas la condition sur y^+ , une adaptation du maillage près de la paroi est nécessaire. L'adaptation du maillage peut être réalisée soit avec le logiciel Gambit[®], en reprenant le maillage initial et en le modifiant dans les régions jugées nécessaires, soit avec le logiciel Fluent[®] en utilisant l'option d'adaptation du maillage. Dans ce cas, il suffit juste de spécifier la gamme à ne pas dépasser pour les valeurs de y^+ au sein des cellules qui se trouvent juste à côté de la paroi. La figure III-5 montre un exemple du maillage près de la surface du nageur avant et après l'adaptation.



(a) : Maillage avant l'adaptation

(b) : Maillage après l'adaptation

Figure III- 5 : Exemple d'adaptation du maillage près de la tête, diminution de la taille de la maille après adaptation

La figure III-6 montre que les valeurs de y^+ après l'adaptation du maillage sont comprises entre 11,225 et 300. On conclut que le maillage réalisé pour le traitement de la sous-couche limite turbulente près de la paroi est satisfaisant, et cela pour les trois configurations de la tête étudiées.

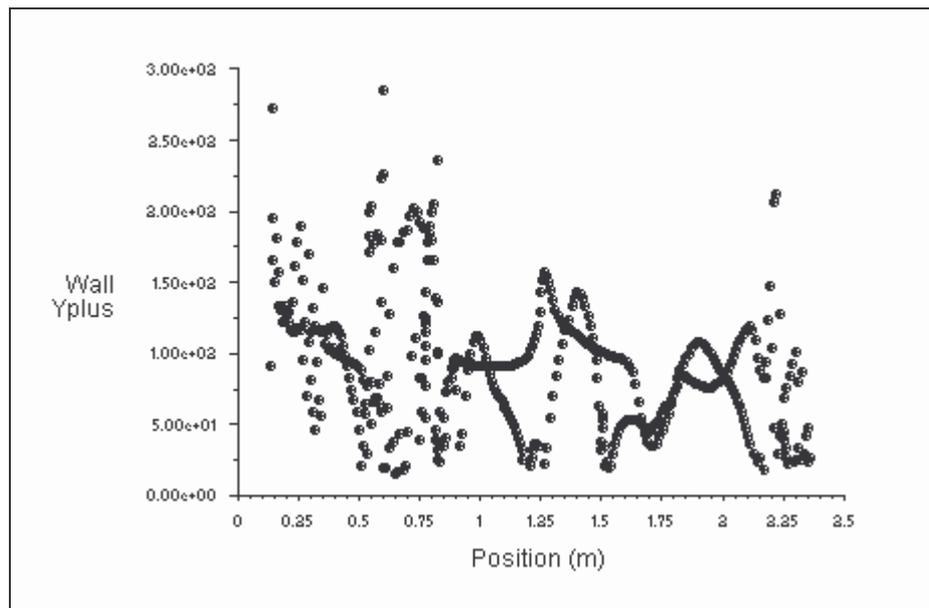


Figure III- 6 : Valeurs de y^+ près de la surface de la nageuse

La simulation numérique a été effectuée pour plusieurs types de maillage afin de définir celui pour lequel les valeurs de y^+ sont comprises entre 11,225 et 300.

III.2. Validation de la procédure de simulation numérique

Dans cette partie, nous allons estimer les capacités du code de calcul Fluent[®] et de notre procédure de simulation numérique en comparant les résultats numériques avec ceux issus de l'expérience. Pour ce faire, nous allons effectuer des simulations numériques d'un écoulement autour d'un profil NACA. Le choix s'est porté sur cette géométrie puisque c'est la plus proche profilée de la forme du corps du nageur.

L'écoulement fluide a été simulé autour d'un profil NACA0012 de corde C égale à 7cm pour un nombre de Reynolds de 1000 et pour un angle d'incidence égal à 34° . Ces conditions correspondent à l'étude expérimentale réalisée par Daube et al. (1985) afin de visualiser la structure de l'écoulement du fluide autour d'un profil NACA0012. Daube et al. (1985) ont utilisé la technique de visualisation par traceurs solides. Cette étude expérimentale a déjà servi à valider les propriétés de codes de calcul 2D et 3D dans le cadre de la thèse de Lardat (1996).

Afin de valider nos résultats numériques nous allons effectuer des comparaisons qualitatives et quantitatives entre les résultats de notre simulation numérique et ceux expérimentaux de Daube et al. (1985).

III.2.1. Domaine de simulation numérique

La géométrie utilisée pour la simulation est une géométrie bidimensionnelle correspondant à un profil NACA0012 (figure III-7).



Figure III- 7 : Allure du profil NACA0012 utilisé dans les simulations

Le logiciel Gambit® a été utilisé pour construire la géométrie du NACA0012 à partir d'une liste des coordonnées de points définissant le contour du NACA puis pour construire le domaine fluide autour de ce dernier. La taille de ce domaine reproduit fidèlement celle de la cuve utilisée dans la partie expérimentale ($150 \times 100\text{cm}^2$), ce qui correspond à $22C \times 12C$. La position du NACA0012 dans le domaine fluide par rapport à l'entrée a été choisie en se basant sur le travail de Mittal et al. (2001), ce qui correspond à $5C$ en amont, $17C$ en aval, $5C$ par rapport aux frontières supérieure et inférieure. Ce domaine est plus large que celui utilisé par Lardat (1996). La figure III-8 montre le domaine fluide construit autour du NACA0012.

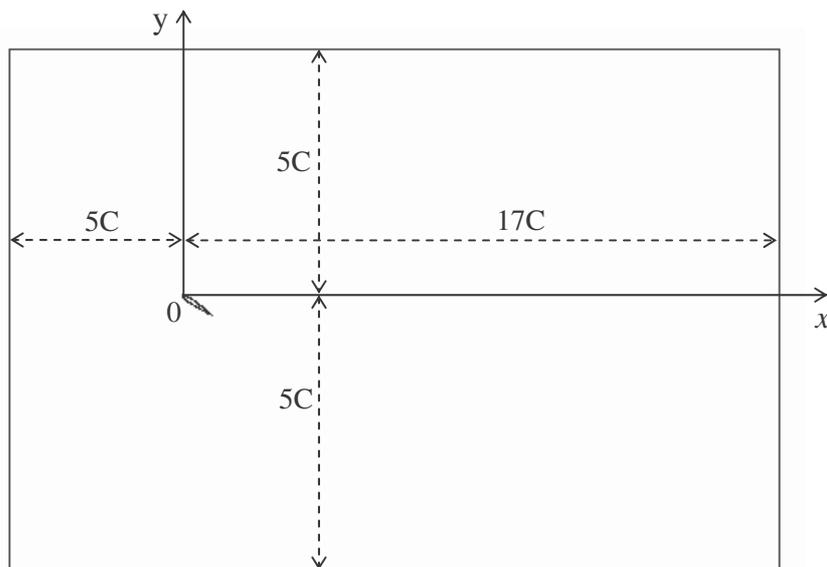


Figure III- 8 : Dimensions de domaine fluide autour du profil de NACA0012

III.2.2. Maillage du domaine fluide autour du profil NACA0012

Le maillage réalisé ressemble à celui utilisé pour le nageur. Le maillage constitué de cellules triangulaires, est raffiné près du profil NACA0012 afin de résoudre finement les structures tourbillonnaires et relâché au loin afin de ne pas alourdir le temps de calcul (Figure III-9). La figure III-10 présente un détail du maillage généré autour du profil. Le nombre de cellules utilisées dans notre étude est supérieur à celui utilisé par la méthode théorique utilisée par Daube et al. (1985) et Lardat (1996).

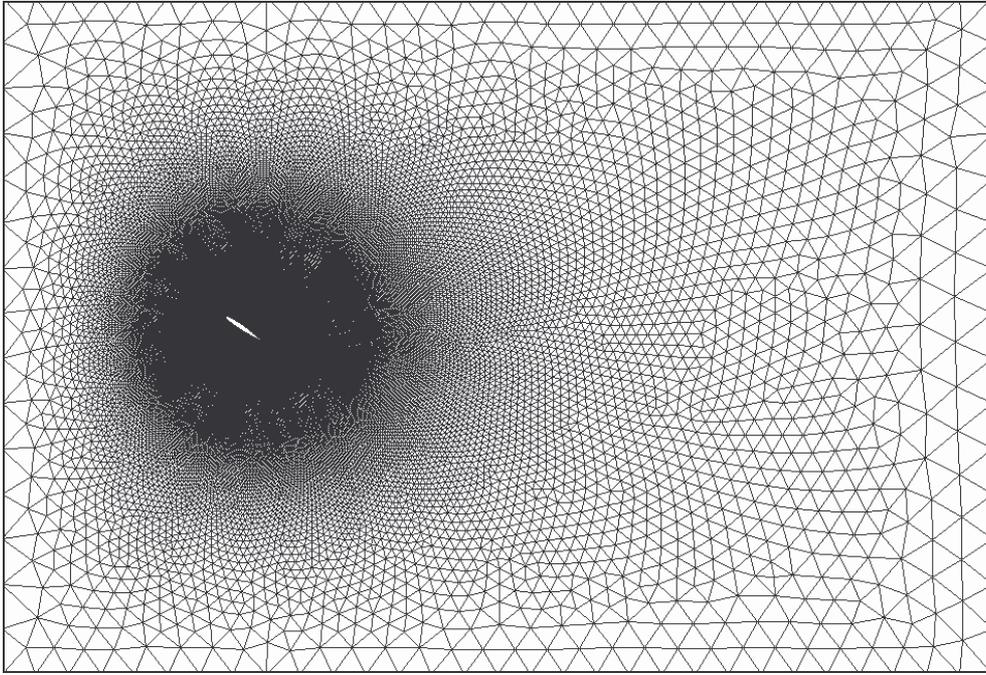


Figure III- 9 : Maillage du domaine fluide autour du NACA0012

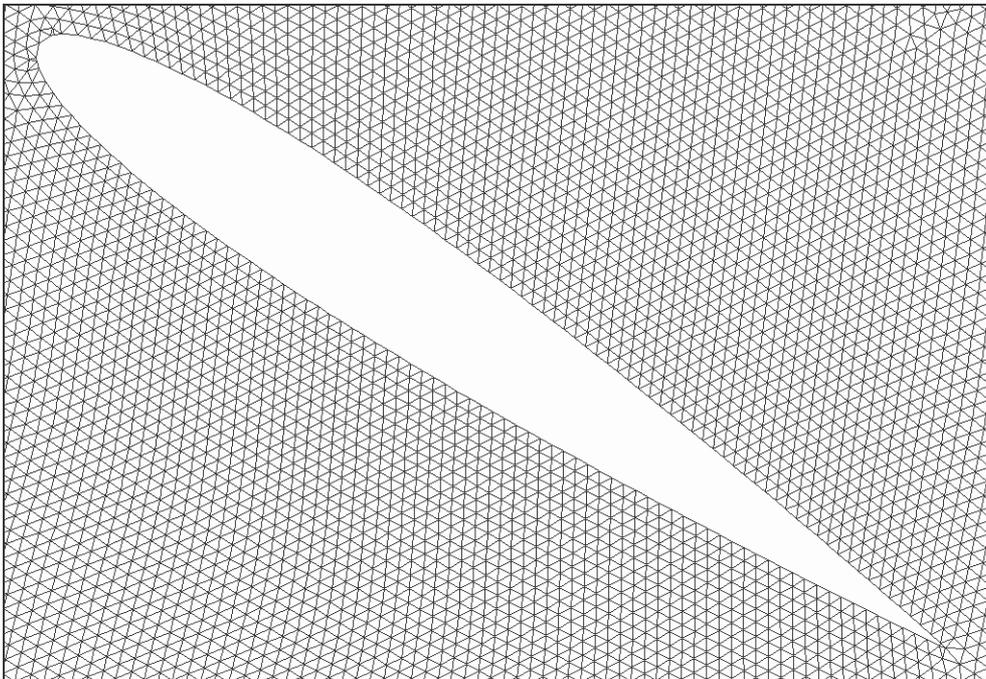


Figure III- 10 : Agrandissement du maillage près de la surface du NACA0012

III.2.3. Validation qualitative

Les simulations numériques effectuées nous ont permis d'observer le mécanisme de création des structures tourbillonnaires depuis les premiers instants de l'écoulement autour du NACA0012. Les figures III-11 et III-12 présentent une comparaison des résultats entre le calcul numérique et l'expérience réalisés à LMF de Poitiers. La comparaison entre les résultats des simulations numériques et les visualisations expérimentales réalisées par Daube et al. (1985) montre que l'apparition des structures tourbillonnaires est semblable et se fait aux mêmes instants t^* . t^* représente le temps adimensionnel, il est défini par la relation suivante :

$$t^* = \frac{t \cdot U_\infty}{C}$$

Où :

U_∞ : Vitesse à l'entrée du domaine fluide (m/s)

C : Corde (m)

t : Temps (s)

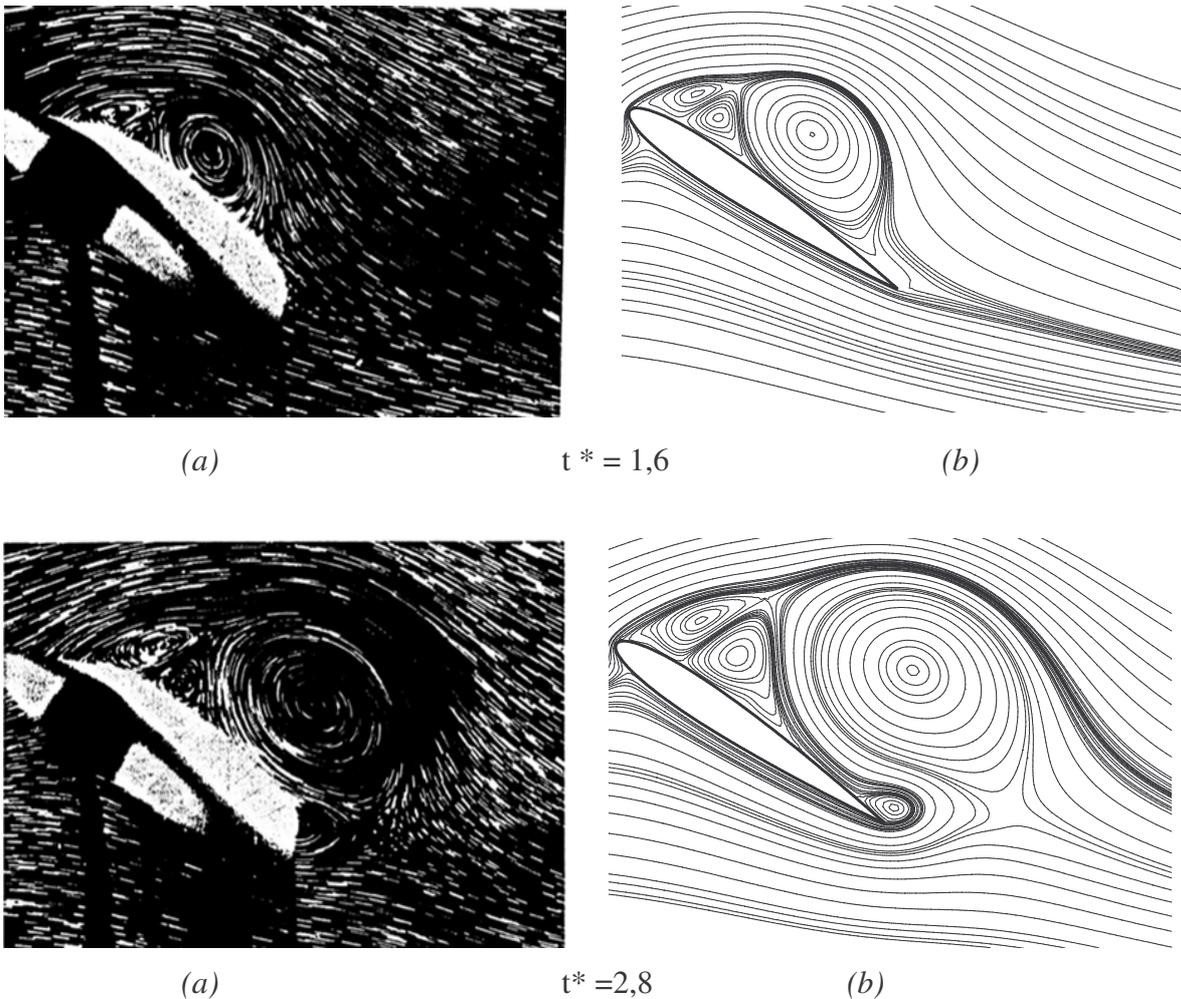


Figure III- 11 : Comparaison des structures tourbillonnaires autour de NACA0012
 (a) : Expérience (b) : Simulation avec Fluent[®]

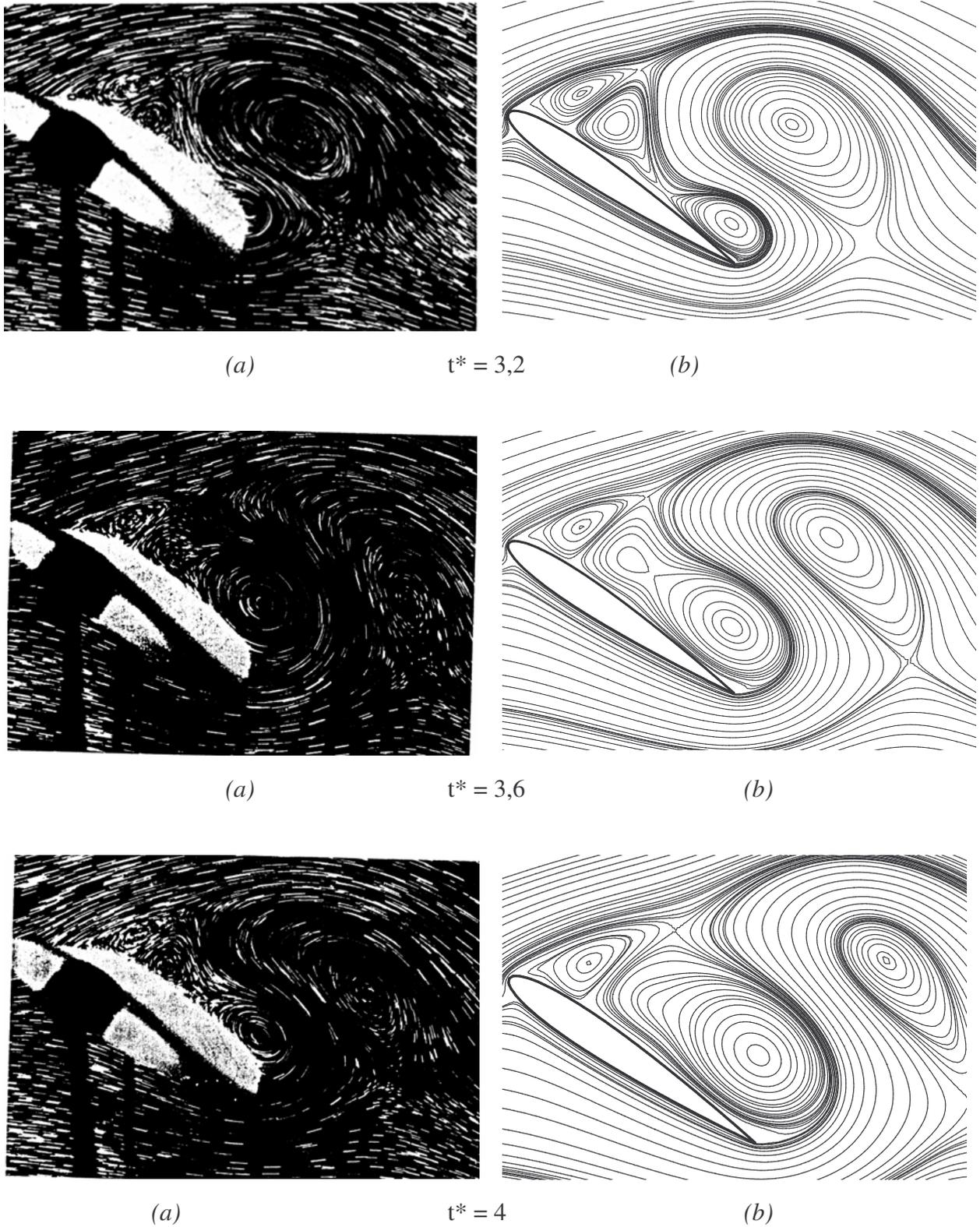


Figure III- 12 : Comparaison des structures tourbillonnaires autour de NACA0012
(a) : Expérience. (b) : Simulation avec Fluent[®]

III.2.4. Validation quantitative

Afin de valider quantitativement les résultats numériques, nous avons comparé le profil de vitesses obtenu le long d'une droite passant par le centre et perpendiculaire à l'axe du NACA0012 avec celui obtenu expérimentalement par Daube et al. (1985). La figure III-13 montre l'axe sur lequel un profil de vitesse a été tracé.

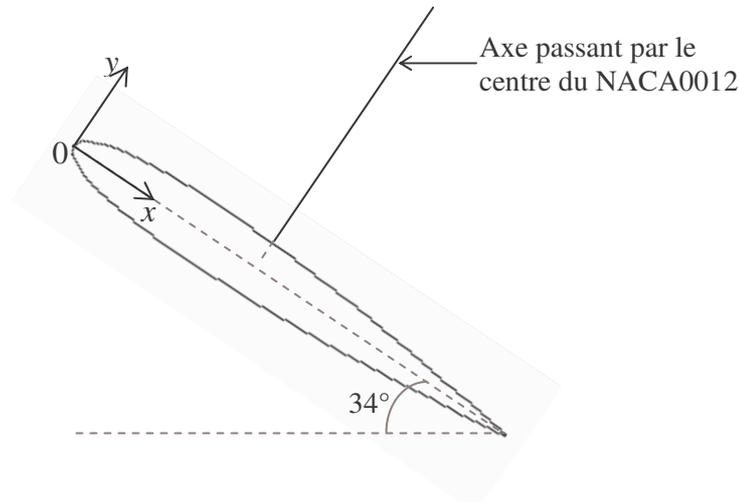


Figure III- 13: Axe sur lequel le profil de vitesse est tracé

Nous présentons, sur la figure III-14, le profil de la composante horizontale adimensionnelle de la vitesse pour $t^*=3$ et $t^*=5$ en fonction de la distance par rapport au centre du NACA0012.

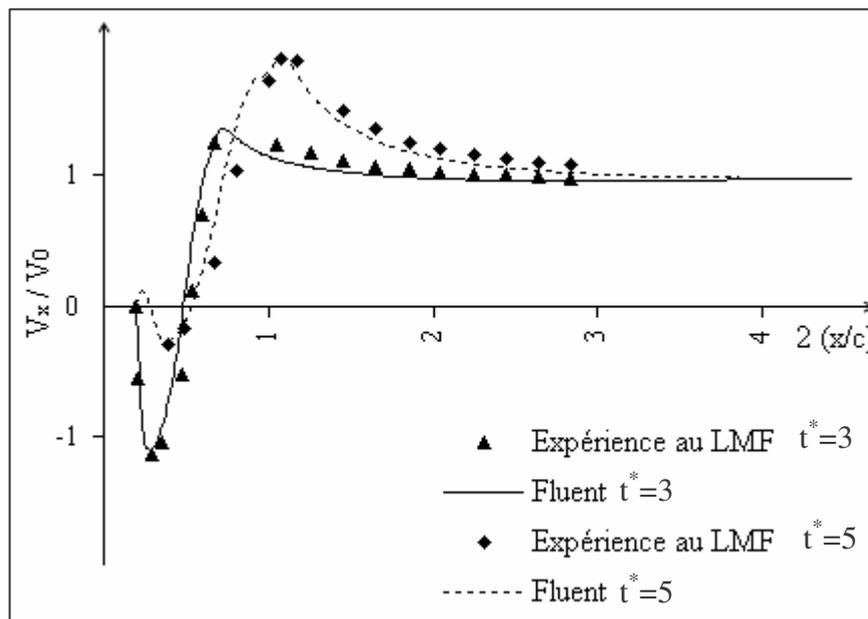


Figure III- 14 : Profils de vitesse adimensionnelle axiale
NACA0012 : $Re=1000$ et $\alpha=34^\circ$

La figure III-14 nous a permis de constater que les profils de vitesse trouvés par voie numérique pour les deux instants ($t^*=3$, $t^*=5$) sont pratiquement les mêmes que ceux trouvés expérimentalement par Daube et al. (1985). Donc les résultats numériques obtenus par le logiciel Fluent[®] sont en bon accord avec les résultats expérimentaux.

Après avoir validé la méthode numérique utilisée sur un profil NACA0012, nous allons étudier l'effet du choix de quelques paramètres sur la fidélité des résultats numériques.

III.3. Etude d'influence des paramètres du calcul numérique

Le but de cette partie est de fixer les différents paramètres du calcul numérique qui seront utilisés pour toutes les simulations dans les cas bidimensionnel et tridimensionnel tels que le choix de la taille du domaine de calcul, le choix de l'indépendance du maillage, le critère de convergence. Nous avons choisi comme géométrie de test la position du nageur lorsque la tête est alignée avec l'axe du corps (Figure III-15). Le calcul est effectué pour la vitesse qui correspond au plus grand nombre de Reynolds c'est-à-dire $3,1m/s$.



Figure III- 15 : Géométrie choisie pour le test

Pour juger l'indépendance des résultats vis-à-vis des différents paramètres numériques, il suffit de surveiller l'évolution d'une grandeur globale caractéristique de l'écoulement. Dans le cas de l'étude de l'écoulement autour des nageurs, nous avons choisi comme paramètre de comparaison le coefficient de traînée autour du corps de la nageuse.

III.3.1. Influence de la taille du domaine fluide autour du nageur

En simulation numérique, le choix de la taille du domaine de calcul joue un rôle très important sur la fidélité des résultats numériques [Korichi & Oufer (2005)]. Ce dernier doit être suffisamment large afin de s'affranchir de l'influence des frontières du domaine fluide sur l'écoulement. Le but de cette section est de trouver la taille du domaine fluide nécessaire pour assurer l'indépendance des résultats numériques de l'écoulement, c'est-à-dire de trouver la distance entre l'entrée du domaine fluide et le nageur en prenant comme origine l'extrémité des doigts et la distance entre les pieds et la sortie du domaine fluide. Si le nageur est placé très près de l'entrée, cela perturbe l'écoulement et impose un profil de vitesse irréal à la surface du nageur. S'il est placé très près de la sortie, cela empêche l'établissement de l'écoulement et détériore les résultats. Des simulations numériques sur des domaines de tailles différentes ont été menées afin de préciser la taille du domaine fluide nécessaire pour assurer l'indépendance des résultats numériques.

Les paramètres numériques utilisés sont les mêmes que ceux définis par Bixler & Riewald (2002) sauf en ce qui concerne le critère de convergence. Sa valeur est fixée à 10^{-5} , alors que Bixler & Riewald (2002) utilisaient 10^{-3} , valeur correspondant à celle fixée par défaut dans Fluent[®]. Nous détaillons plus loin le choix de ce critère.

III.3.1.a. Choix de la longueur de la sortie

Dans le but d'assurer l'indépendance des résultats par rapport à la longueur de sortie, nous avons choisi une longueur d'entrée assez grande ($8m$) afin d'éviter l'effet de cette dernière sur l'indépendance des résultats numériques, puis nous avons effectué des simulations pour plusieurs longueurs de sortie de $3,6m$, $6,6m$, $9,6m$ et $15,6m$ qui correspondent à $12D$, $22D$, $32D$ et $52D$. La Figure III-16 présente l'évolution du coefficient de traînée en fonction de la

longueur de sortie. On observe que le coefficient de traînée devient stable à partir d'une longueur de sortie de 9,6m.

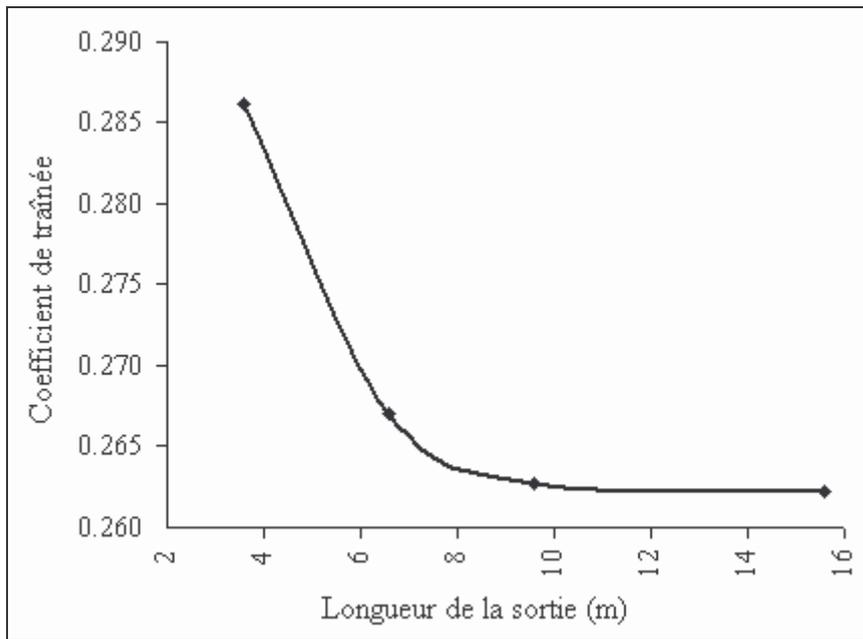


Figure III- 16 : Coefficient de traînée en fonction de la longueur de la sortie

III.3.1.b. Choix de la longueur d'entrée

Après avoir fixé la longueur de la sortie L_s , plusieurs simulations ont été menées pour la longueur d'entrée L_e à savoir 1m, 2m, 3m et 6m qui correspondent à 3D, 6D, 10D et 20D. La figure III-17 présente l'évolution du coefficient de traînée en fonction de la longueur d'entrée, la variation de cette dernière devenant négligeable au-delà de la valeur $L_e=3m$. Le choix d'une longueur de 8m pour l'étude de la longueur de sortie était donc suffisant.

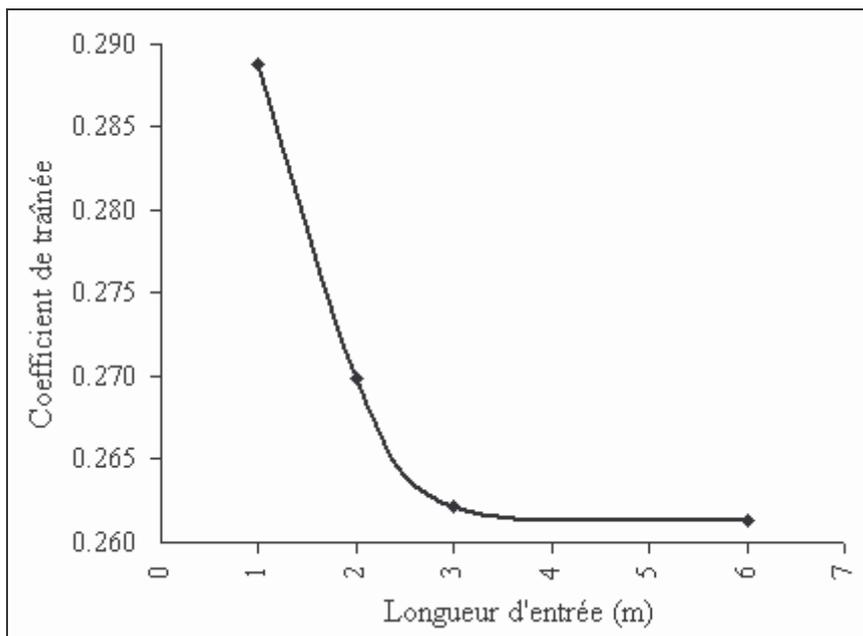


Figure III- 17 : Coefficient de traînée en fonction de la longueur de l'entrée

On peut remarquer sur les deux figures qu'à partir d'une longueur d'entrée de $3m$ et d'une longueur de sortie de $9,6m$, la solution devient presque indépendante de la taille du domaine fluide. Donc le domaine utilisé pour la simulation d'écoulement autour du nageur s'étend de $3m$ en amont jusqu'à $9,6 m$ en aval du nageur en prenant comme repère l'extrémité des doigts. La figure III-18 montre les dimensions du domaine fluide utilisé pour la simulation numérique.

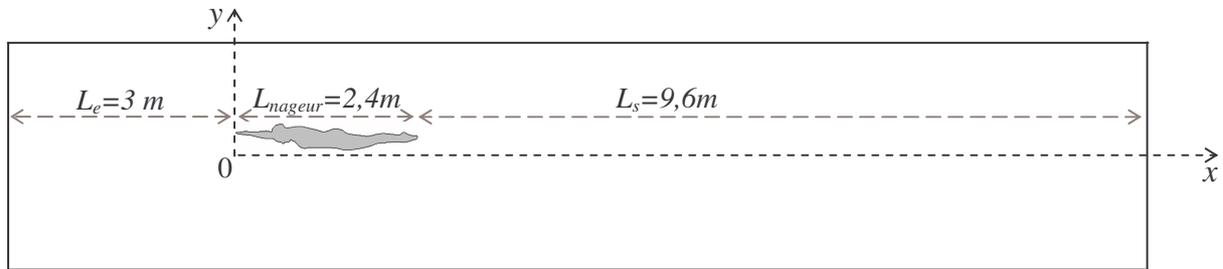


Figure III- 18 : Dimensions du domaine fluide créé autour du nageur et utilisé pour la simulation numérique

III.3.2. Etude d'indépendance du maillage

Dans le domaine du calcul numérique, le maillage joue un rôle prépondérant sur la fidélité des résultats. Le choix de celui-ci dépend de la précision attendue du calcul et des ressources informatiques disponibles. L'utilisation d'un maillage grossier donne des résultats erronés, tandis qu'un maillage fin alourdit le temps de calcul, occupe plus de mémoire sur les machines et demande beaucoup de capacité de stockage lors du traitement des résultats. Le but est de trouver un maillage qui occupe le moins d'espace, le moins de temps et assure des résultats indépendants. Pour évaluer l'influence de la finesse du maillage sur les résultats obtenus, des séries de calcul ont été menées pour des maillages de tailles différentes. Tous les maillages testés sont progressifs, c'est-à-dire raffinés près de la surface du nageur et relâchés loin de cette dernière. Les simulations ont été effectuées pour cinq maillages et cela, en allant du maillage le plus grossier au plus fin. Tous les maillages testés sont constitués des cellules triangulaires. Les caractéristiques de chaque maillage sont synthétisées dans le tableau III-1.

	Maillage 1	Maillage 2	Maillage 3	Maillage 4	Maillage 5
Nombre de nœuds	19081	33196	42962	65688	225623
Nombre de faces	53414	96557	127161	192646	672981
Nombre de mailles	34333	63361	84199	126958	447358

Tableau III- 1 : Caractéristiques des différents maillages testés

On peut considérer que le domaine physique a été discrétisé avec un nombre de cellules suffisant dès lors que la solution obtenue devient indépendante de l'augmentation du nombre des mailles. La figure III-19 montre l'évolution du coefficient de traînée en fonction du nombre de mailles utilisé.

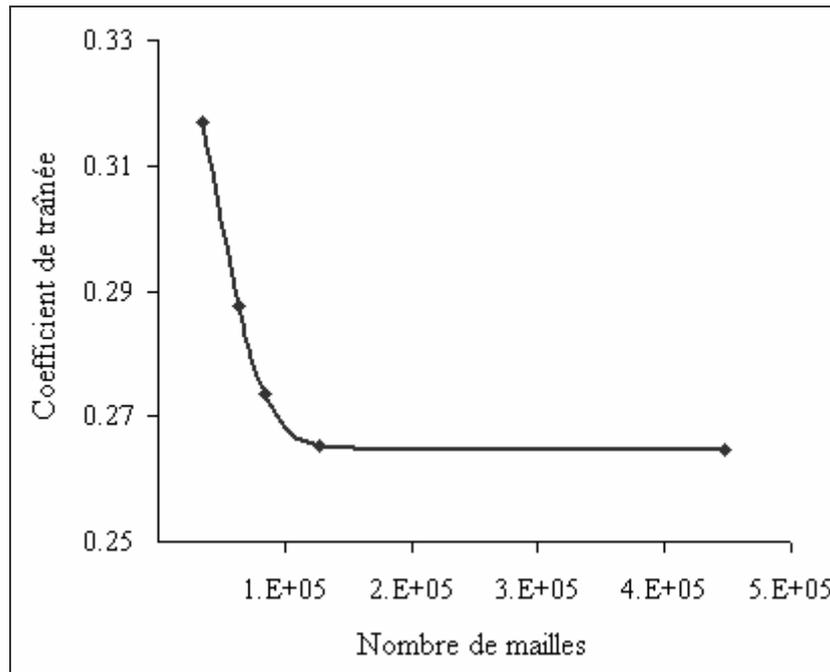


Figure III- 19 : Evolution du coefficient de traînée en fonction du nombre de mailles.

La figure III-19 montre clairement qu'un maillage grossier ne permettait pas de satisfaire les exigences de précision. On peut observer que plus le nombre de cellules du maillage est grand, plus le coefficient de traînée se stabilise ; cela est plus clair pour un nombre de mailles compris entre $1,2 \cdot 10^5$ et $4,5 \cdot 10^5$. Lorsque le nombre de mailles est compris entre $1,2 \cdot 10^5$ et $4,5 \cdot 10^5$, le résultat est pratiquement le même et l'écart sur le coefficient de traînée ne dépasse pas 0,2%. Cette étude montre qu'un raffinement plus poussé du maillage produit une augmentation du temps de calcul d'un facteur cinq et ne change pas significativement les résultats.

Le raffinement du maillage ne peut être poursuivi continuellement, pour deux raisons. D'une part, l'augmentation du nombre de cellules du maillage implique l'alourdissement du temps de calcul et la difficulté de traitement des résultats. D'autre part, l'accroissement de la densité du maillage implique la diminution de la taille des cellules au voisinage des parois. Donc, il faut vérifier pour chaque maillage testé que la distance entre la paroi et le centre de la première cellule y^+ assure le bon traitement de la région proche paroi selon la loi de paroi choisie lors de la simulation. D'après ces résultats, le choix du nombre de mailles 126958 semble suffisant pour toutes nos simulations bidimensionnelles à venir. Ce maillage offre un bon compromis entre la précision des résultats et le temps de calcul.

III.3.3. Influence du critère de convergence

Sous Fluent[®], la valeur par défaut du critère de convergence est égale à 10^{-3} . La convergence du calcul est surveillée principalement suivant la valeur des résidus des différents paramètres de l'écoulement. Dans la littérature la plupart des travaux numériques dans le domaine de la natation humaine utilisent directement le critère de convergence fixé par défaut dans Fluent[®], à savoir 10^{-3} [Bixler & Riewald (2002), Rouboa *et al.* (2002), Bixler *et al.* (2007)].

Le but de cette partie est de savoir si cette valeur est suffisante pour assurer l'indépendance des résultats ou s'il faut aller au-delà de cette dernière. Pour ce faire, le calcul a été effectué

avec plusieurs critères de convergence allant de 10^{-3} jusqu'à 10^{-7} en gardant les mêmes paramètres de calcul définis dans la première partie de ce chapitre. La figure III-20 représente la sensibilité de la solution calculée en fonction du critère de convergence.

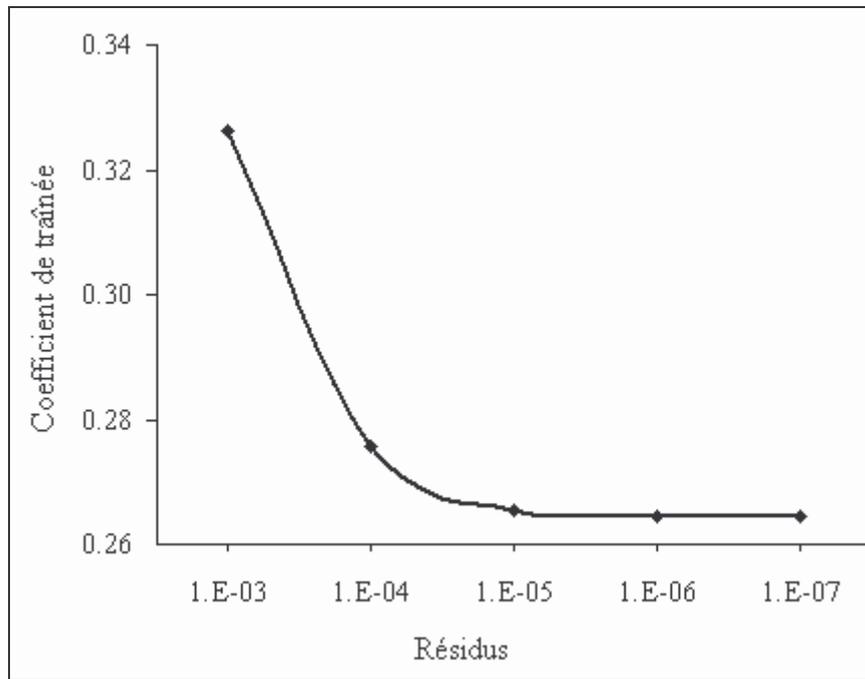


Figure III- 20 : Effet du critère de convergence sur le calcul numérique

Premièrement, on constate qu'une précision de 10^{-3} n'est pas suffisante et que le passage aux précisions plus fines améliore l'exactitude des résultats. La valeur du coefficient de traînée devient stable à partir du critère de convergence 10^{-5} .

Le calcul numérique dure 37 min avec le critère de convergence $R=10^{-5}$ et 100 min avec le critère 10^{-7} pour la majorité des cas. Le temps de calcul avec le critère 10^{-7} est trois fois plus grand qu'avec le critère 10^{-5} tandis que la différence sur la valeur du coefficient de traînée ne dépasse pas 0,2%. Donc, nos prochaines simulations se feront avec un critère de convergence 10^{-5} .

III.4. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons détaillé dans un premier temps la procédure et le choix des paramètres du calcul numérique de l'écoulement autour du nageur. Ensuite, nous avons testé l'aptitude du code Fluent[®] en étudiant l'écoulement autour d'un profil NACA0012 à une incidence 34° et à un nombre de Reynolds égal à 1000. Cette étude a permis de valider la procédure numérique ainsi que la capacité du logiciel Fluent[®] à prédire le comportement des écoulements fluides. Ensuite, nous avons mis en évidence la sensibilité de la solution numérique à la taille du domaine fluide, et montré l'importance de créer un domaine suffisamment large autour du nageur afin de s'affranchir de l'effet des conditions aux limites sur l'écoulement. L'étude d'indépendance du maillage a permis de fixer le choix de la densité des nœuds sur les frontières du domaine fluide. L'étude de la stabilité de la solution en fonction du critère de convergence a permis de constater que les critères définis par défaut dans Fluent[®] ne suffisent pas à assurer l'indépendance des résultats.

CHAPITRE IV : RESULTATS & DISCUSSIONS

Dans ce chapitre, nous nous consacrons dans un premier temps à présenter les principaux résultats de la simulation numérique de l'écoulement en utilisant le modèle de turbulence $k-\varepsilon$ standard dans le cas bidimensionnel. Ensuite, nous testerons l'effet du choix du modèle de turbulence sur les résultats numériques dans le but de trouver le modèle le plus adapté à l'étude de tels problèmes. Le choix du modèle de turbulence est effectué après comparaison des résultats numériques issus des simulations avec Fluent[®] aux résultats des expériences réalisées à l'INSEP avec l'équipe de France de natation. Enfin, nous présentons la simulation numérique de l'écoulement dans le cas tridimensionnel avec les principaux résultats obtenus.

IV.1. Résultats 2D avec le modèle de turbulence $k-\varepsilon$ standard

Après avoir défini les différents paramètres de calcul, nous avons procédé à la simulation numérique de l'écoulement autour du nageur en utilisant le modèle de turbulence $k-\varepsilon$ standard. Le choix s'est porté sur ce modèle car il est le plus couramment utilisé en natation humaine. Il a été employé pour la première fois par Bixler & Riewald (2002) pour étudier l'écoulement autour de la main et l'avant bras du nageur et par Rouboa et al. (2006) pour étudier l'effet de l'accélération de la main et de l'avant bras sur la génération de la force de propulsion. Le même modèle a été utilisé récemment par Bixler et al. (2007) pour calculer les forces de résistances rencontrées par le nageur durant la phase de glissement.

La simulation a été réalisée pour les trois postures différentes impliquant trois positions de la tête définies au chapitre II (figure II-14). Pour chacune de ces trois postures, cinq valeurs de vitesse à l'entrée du domaine fluide sont considérées, à savoir $1,4m/s$, $1,9m/s$, $2,2m/s$, $2,9m/s$ et $3,1m/s$ correspondant aux vitesses lors d'un départ, en phase de coulée, de nageurs de niveaux interrégional à international. Ces gammes de vitesses correspondent à des nombres de Reynolds allant de $4,5 \cdot 10^5$ jusqu'à 10^6 .

IV.1.1. Profils de vitesse

Dans un premier temps, l'effet de la position de la tête sur le profil de vitesse longitudinale est présenté au niveau de 11 plans transversaux différents (Figure IV-1). Le premier plan est situé en amont près du nageur, ceci correspond à une distance de $2,5m$ par rapport à l'entrée du domaine fluide. Les six plans suivants (de 2 et 7) sont situés respectivement avant la tête (plans 2 et 3), juste derrière la tête (plan 4), derrière le bassin (plan 5), derrière les fesses (plan 6) et à l'extrémité du corps du nageur (plan 7). Quant aux quatre derniers plans (8, 9, 10 et 11) ils sont situés derrière le corps du nageur dans la zone de sillage. La figure IV-1 montre les différents plans sur lesquels le profil de vitesse a été tracé.

En prenant comme origine l'extrémité des doigts, les onze plans (P_i avec $i= 1$ à 11) sont respectivement situés à $x_i = -0,5m, 0,1m, 0,3m, 0,65m, 1,1m, 1,4m, 2m, 2,3m, 4m, 7m, 11,5m$ par rapport à l'entrée du domaine fluide. Les profils de vitesses sont adimensionnés par rapport à la vitesse d'entrée du domaine fluide U_0 .

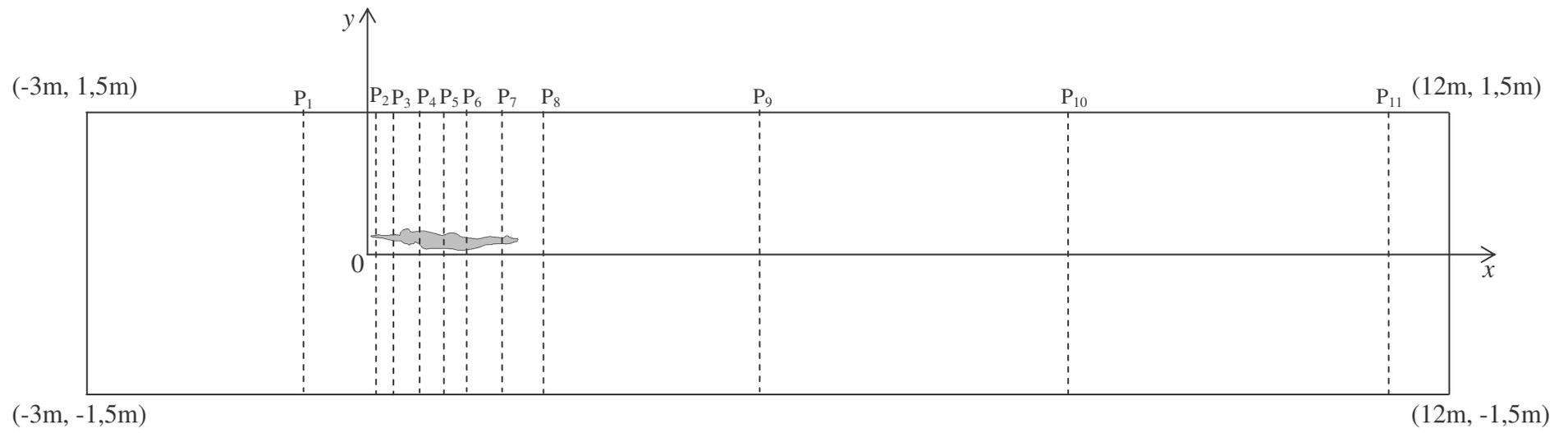


Figure IV- 1: Système de coordonnées et plans P_i utilisés pour le contrôle de l'écoulement.

On présente sur les figures IV-2 jusqu'à IV-7, les profils de vitesse longitudinale adimensionnelle au niveau des différents plans de I à II, pour une vitesse à l'entrée du domaine fluide $U_0 = 3,1m/s$ et pour les trois positions de la tête étudiées.

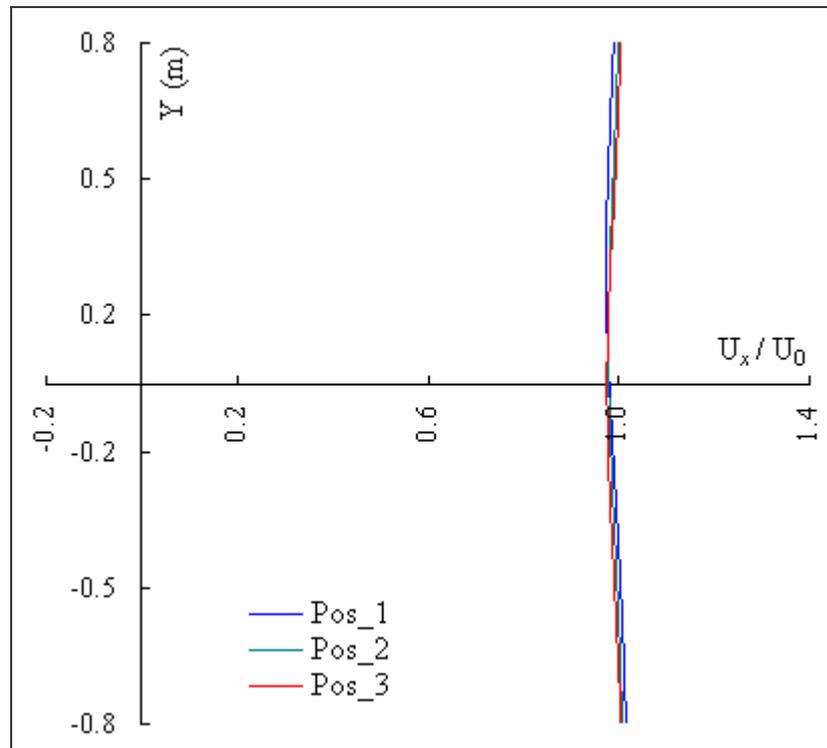
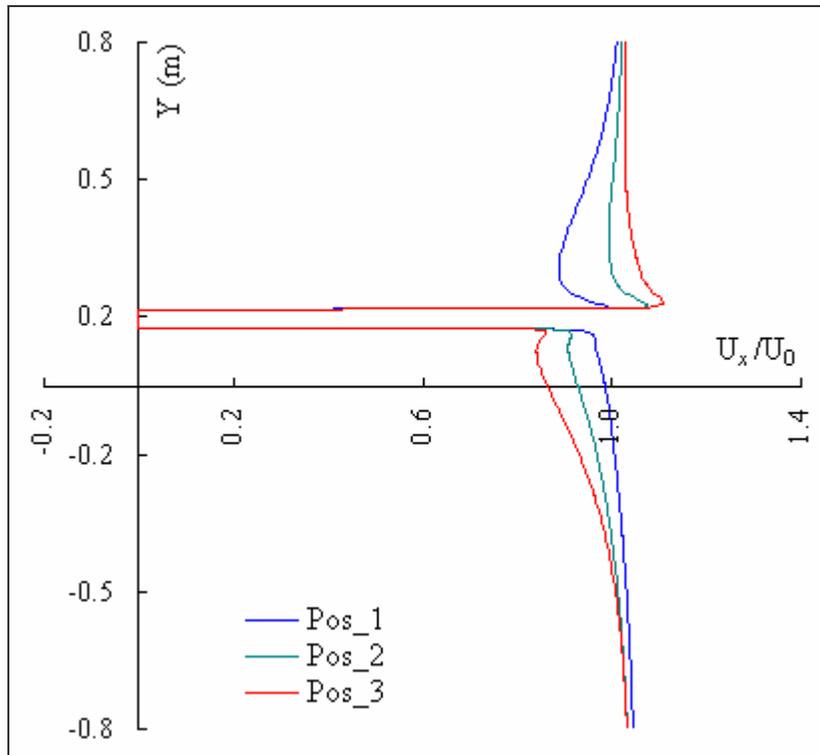
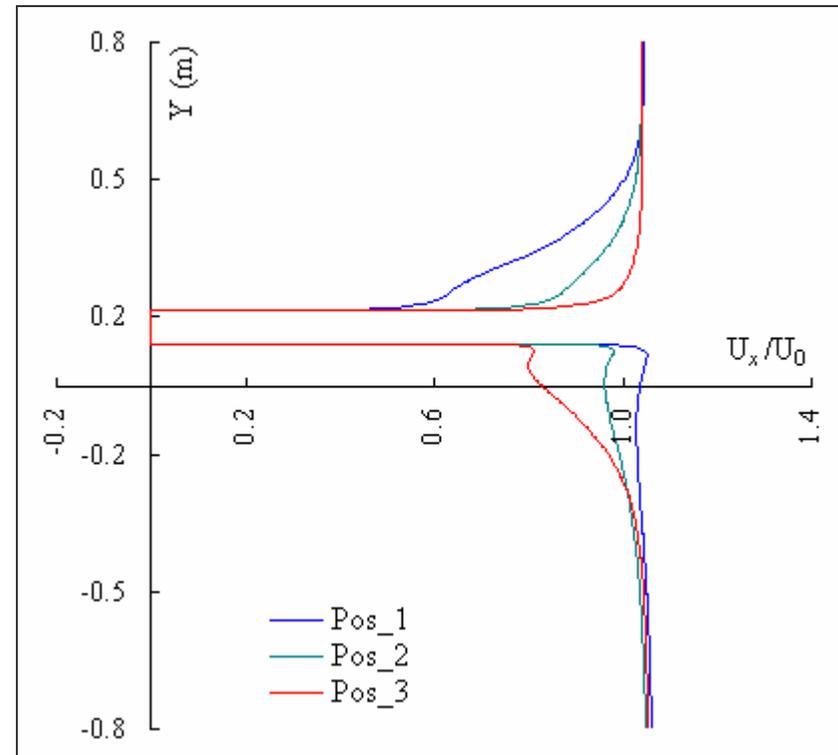


Figure IV- 2: Profils de la vitesse longitudinale pour les trois positions de la tête sur le plan P1 situé à $x=2,5m$ par rapport à l'entrée du domaine fluide

On remarque que les profils de vitesse au niveau du plan P1 sont presque uniformes. Cela nous permet de constater que le profil de vitesse reste uniforme à partir de l'entrée jusqu'à une distance de $2,5m$. Après cette distance, le profil commence à se déformer progressivement à cause de la présence du corps du nageur. Au niveau de cette section, la déformation est pratiquement identique pour les trois positions de la tête étudiées, quelle que soit la vitesse à l'entrée du domaine fluide. A cette distance, on peut dire que l'écoulement n'est quasiment pas perturbé ni par la présence de l'obstacle ni par le changement de la position de la tête.

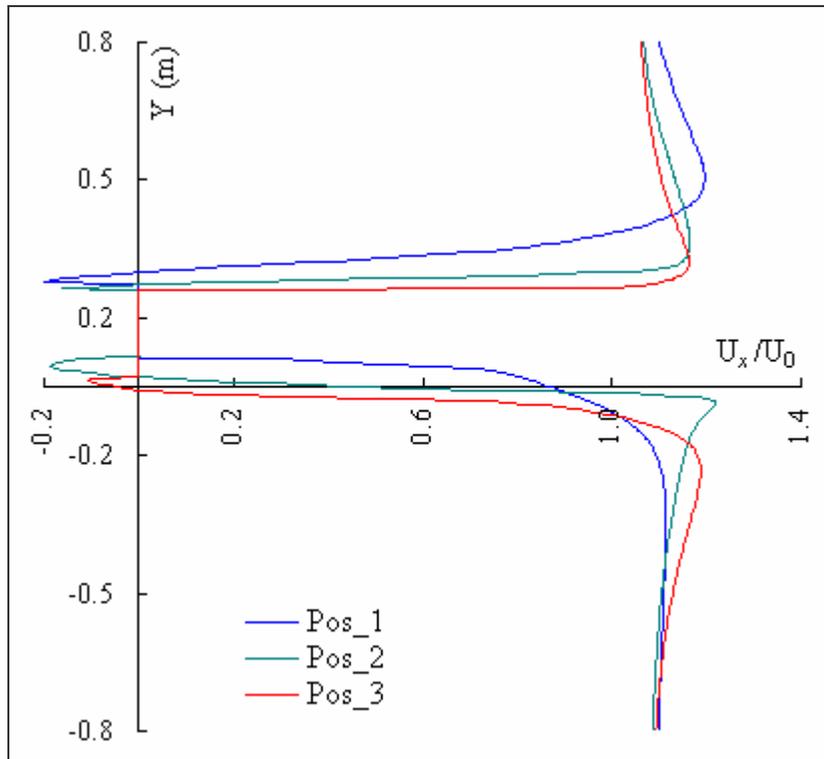


Plan P2

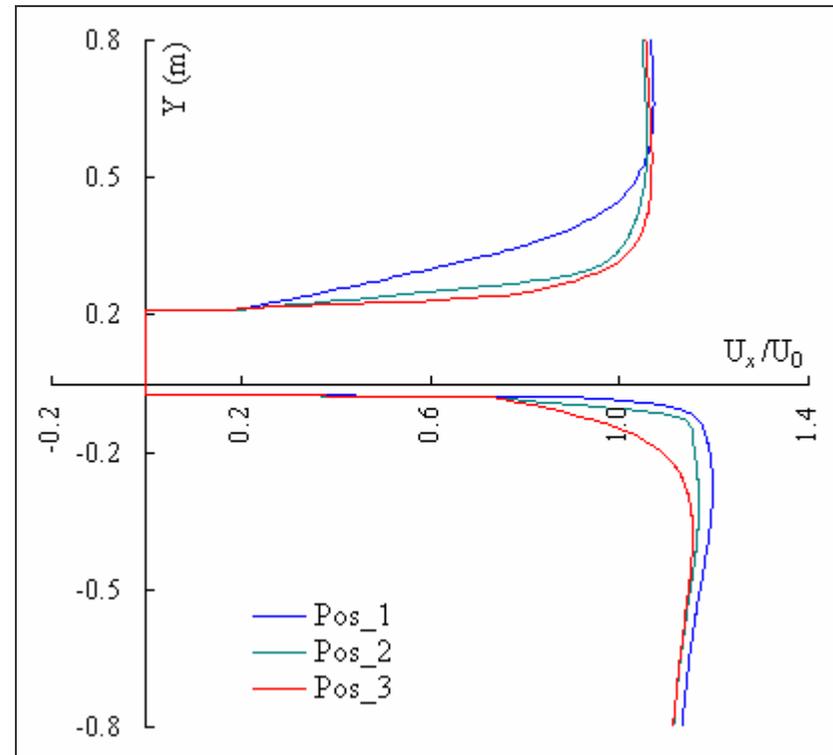


Plan P3

Figure IV- 3 : Profils de vitesse longitudinale au niveau des plans P2 et P3 situés juste en amont de la tête du nageur

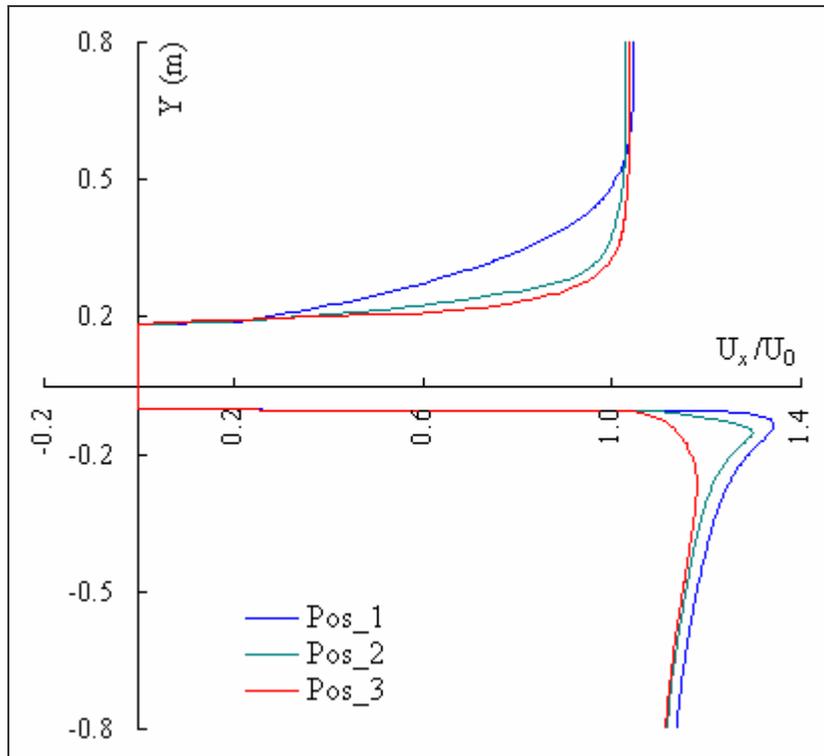


Plan P4

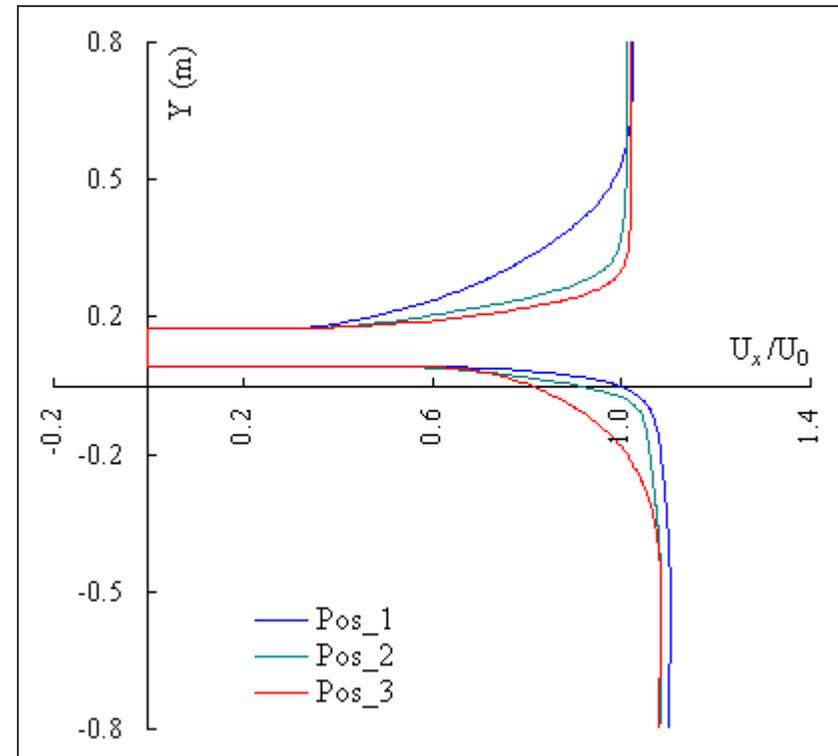


Plan P5

Figure IV- 4: Profils de vitesse longitudinale au niveau des plans 4 et 5 situés derrière la tête et au niveau du bassin du nageur

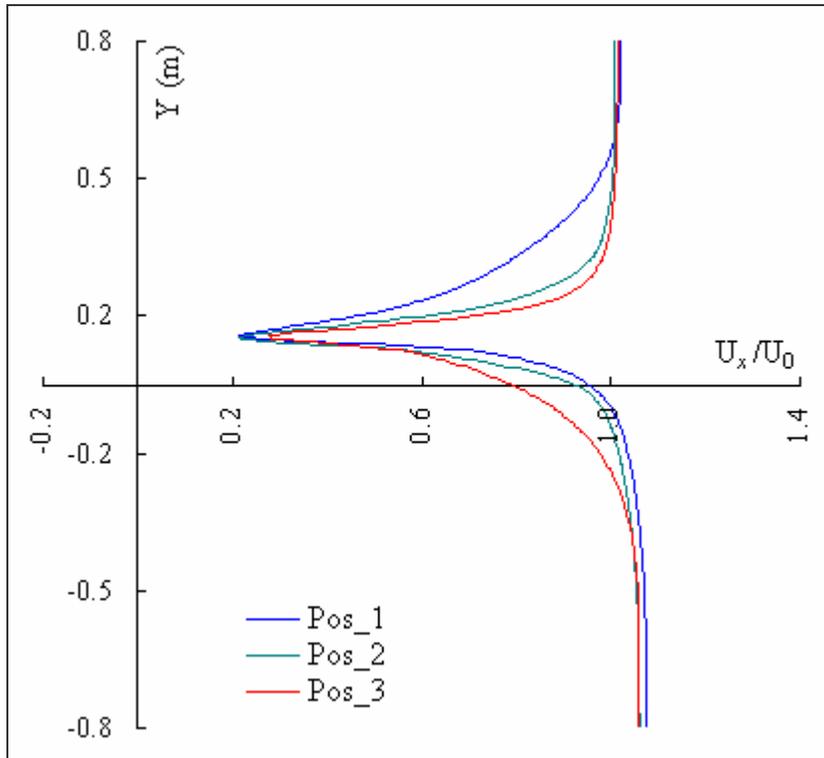


Plan P6

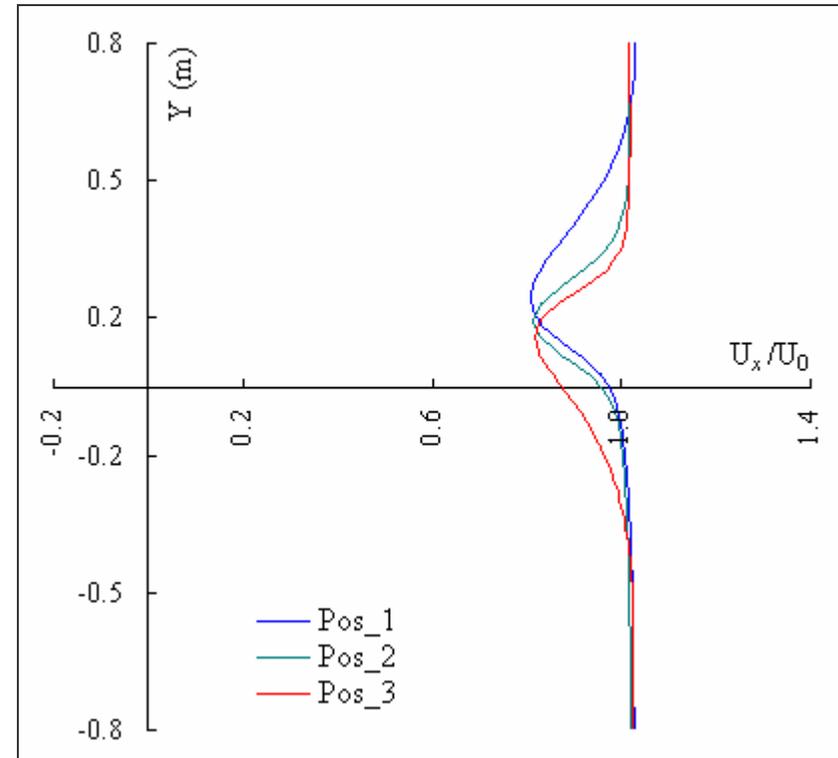


Plan P7

Figure IV- 5 : Profils de vitesse longitudinale situés au niveau des plans 6 et 7 situés derrière les fesses et l'extrémité du corps

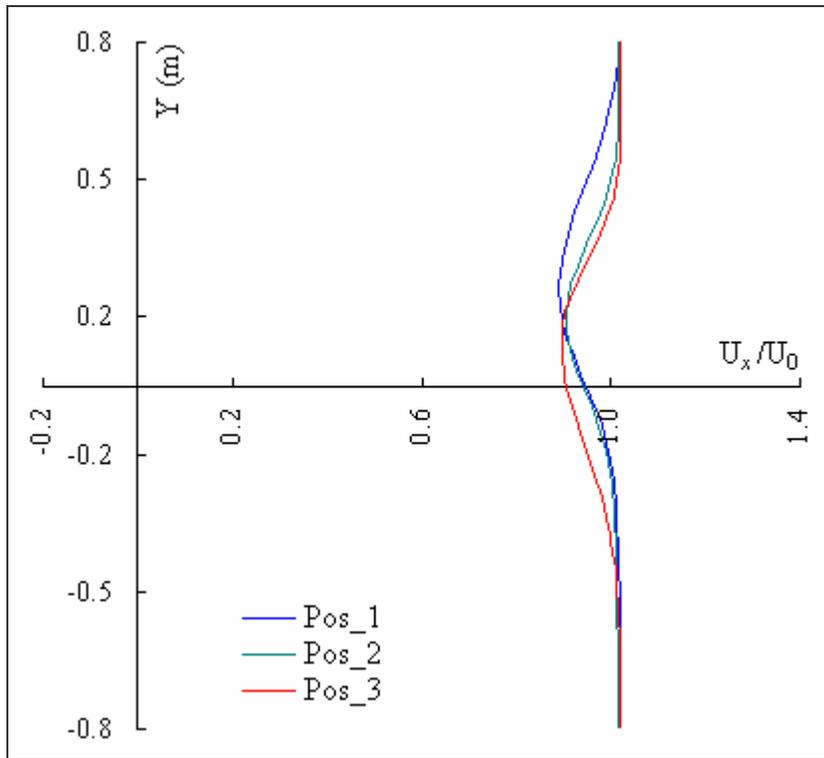


Plan P8

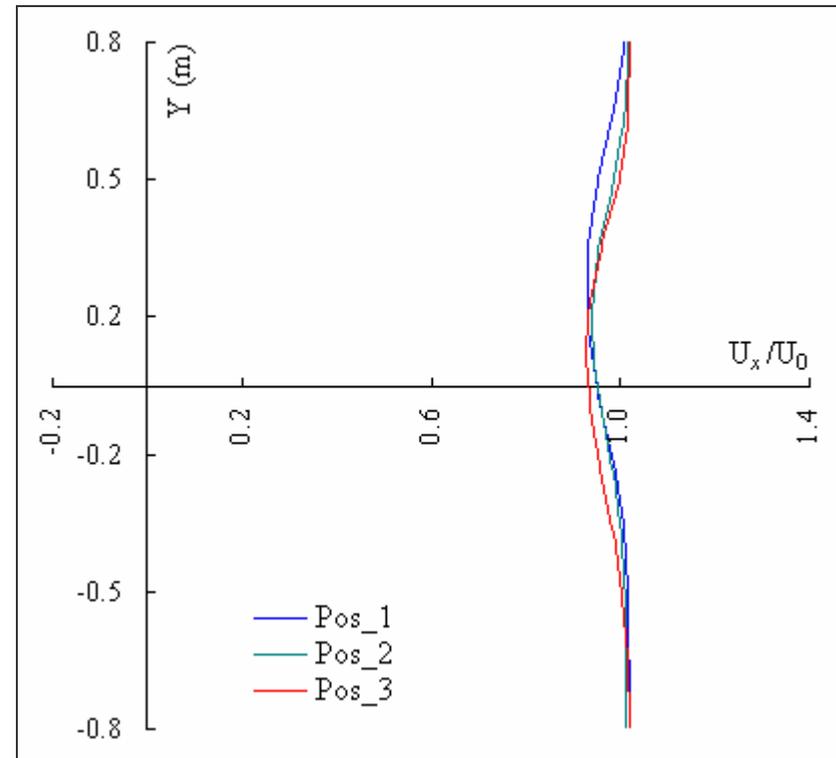


Plan P9

Figure IV- 6 : Profils de vitesse longitudinale dans la zone de sillage au niveau des plans 8 et 9



Plan P10



Plan P11

Figure IV- 7: Profils de vitesse longitudinale au niveau des plans 10 et 11

On observe que l'allure des profils de vitesse longitudinale au niveau des plans 2 à 7 est fortement affectée par le changement de la position de la tête. Pour le plan 2, au niveau de l'extrados de la nageuse, on observe une décélération de l'écoulement pour la position de la tête relevée dans la direction longitudinale. Ce phénomène est moins important dans le cas des positions de la tête alignée et baissée. Au niveau de l'intrados de la nageuse on observe l'inverse, une décélération de l'écoulement lorsque la tête est en position baissée. Les mêmes observations sont remarquées au niveau du plan 3 soit pour le coté extrados ou le côté intrados de la nageuse. Par contre, la décélération de l'écoulement au niveau de ce plan est plus marquée car il est plus proche de la tête que le plan 2.

Pour le plan 4 situé juste derrière la tête, on remarque des valeurs négatives de la composante longitudinale de la vitesse U_x . Cela signifie l'existence des zones de décollement ou des structures tourbillonnaires près de la tête. Dans ces zones, l'écoulement est inversé et les profils de vitesses sont dirigés dans le sens opposé de l'écoulement. La figure IV-4 (plan4) permet de constater l'existence de deux structures tourbillonnaires lorsque la tête est alignée avec l'axe du corps. La première structure située au niveau de l'extrados juste derrière la tête et la deuxième au niveau de l'intrados ; la deuxième structure s'étend du nez jusqu'au poitrine de la nageuse. Lorsque la tête est en position relevée, on observe également une structure tourbillonnaire sur l'extrados du corps, située juste à l'aval de la tête. En revanche, nous n'observons pas de cellule tourbillonnaire majeur à l'intrados pour cette position de tête. Enfin, lorsque la tête est baissée, c'est uniquement sur l'intrados, au niveau du cou, que une cellule principale est notée. A l'exception de ces structures tourbillonnaires autour de la tête, les profils de vitesses n'indiquent aucune structure au niveau du reste des différentes parties du corps.

Les profils de vitesse au niveau du plan 6 permettent d'observer une forte accélération du fluide dans la direction longitudinale du coté intrados de la nageuse pour la position de la tête relevée. L'accélération est moins importante pour la position de la tête alignée et beaucoup moins importante pour la position de la tête baissée. Dans le cas de la position de la tête relevée, l'accélération du fluide au niveau de l'intrados s'accompagne par une décélération du coté extrados. On conclut que l'accélération de l'écoulement se produit dans les zones présentant des fortes courbures.

Pour les plans 2 à 7, situés au niveau des sections passant par le corps du nageur, on constate que la vitesse est nettement supérieure à la vitesse d'entrée puisque le fluide est accéléré à cause du rétrécissement de la section de passage. A partir de ces courbes, on ne peut pas distinguer la position de la tête la plus performante, c'est-à-dire celle qui produit le moins de freinage de l'écoulement ou celle qui offre le moins de résistance, parmi les trois positions étudiées.

En général, au niveau des plans 2 à 7, on remarque que la composante de la vitesse longitudinale U_x diminue du côté bas ou haut où est orientée la tête. Le même phénomène a aussi été observé dans la zone de sillage au niveau des quatre plans situés derrière le corps de la nageuse.

Dans la zone de sillage, derrière le corps de la nageuse, on observe aussi qu'un changement de la position de la tête induit une modification du profil de vitesse. Ces modifications sont plus importantes dans la région près du corps de la nageuse ; elles deviennent moins importantes progressivement en s'éloignant de la nageuse.

On voit clairement sur la figure IV-6 (plan 9) que la position du minimum de vitesse, suivant l'axe y , est liée à la position de la tête. Le minimum de vitesse est légèrement décalé vers le haut pour la position de la tête relevée et vers le bas pour la position de la tête baissée. Pour la position de la tête alignée, il est situé approximativement au milieu entre les deux autres minimums. Le décalage du minimum de vitesse devient progressivement moins important en s'éloignant du corps de la nageuse (plan 10 et 11).

On constate également dans cette zone un ralentissement de l'écoulement du fluide et par conséquent une perte en matière d'énergie cinétique. La différence entre les profils de vitesse pour les trois positions de la tête, au niveau des plans 8, 9, 10 et 11 caractérise d'une manière explicite le déficit en vitesse. La comparaison entre ces profils nous permet de constater qu'il y a un déficit minimal pour la position 2 où le sillage est plus étroit quand la tête est alignée avec le corps. Cette comparaison nous permet de révéler l'importance de la position 2 dans l'optimisation de la coulée, suite à un départ et après un virage en natation de haut niveau. En s'éloignant du corps du nageur, l'intensité du sillage diminue progressivement.

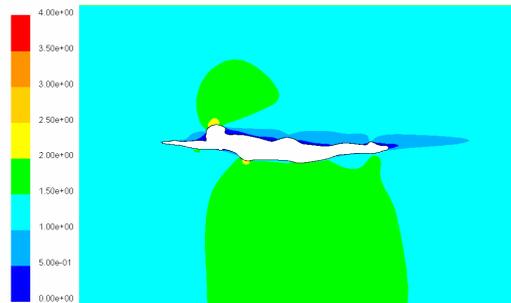
IV.1.2. Champs de vitesse

Les champs de l'amplitude de vitesse autour du corps du nageur sont présentés sur la figure IV-8, pour les trois positions de la tête étudiées et pour les trois valeurs de vitesses à l'entrée du domaine fluide $1,4m/s$, $2,2m/s$ et $3,1m/s$. D'après la figure IV-8, on observe qu'un changement de la position de la tête entraîne une modification remarquable au niveau du champ de vitesse surtout au voisinage de la tête du nageur, cela pour les trois valeurs de vitesse.

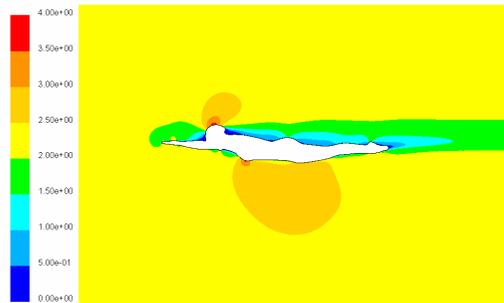
Pour la vitesse $3,1m/s$, on observe qu'il existe quelques zones de survitesses autour du corps du nageur pour les trois positions de la tête étudiées. Les zones rouges correspondent aux vitesses les plus fortes, et les zones bleues aux vitesses les plus faibles. La localisation de ces zones varie en fonction de la position de la tête relevée, alignée ou baissée.

Ainsi dans le cas de la position de la tête relevée, les zones de survitesse sont situées au niveau de la zone juste au-dessus de la tête et la zone qui s'étend de la poitrine jusqu'aux cuisses. Pour la position de la tête alignée avec l'axe du corps, une première zone est située juste au-dessus de la tête comme pour la position précédente mais avec une taille plus petite. La deuxième zone s'étend du nez jusqu'aux cuisses en passant par la poitrine ; elle est plus longue mais moins large en comparant avec la même zone visualisée dans le cas de la position de la tête relevée. Pour la position de la tête baissée trois zones de survitesses ont été observées : une première zone de taille moyenne au niveau des épaules, une deuxième zone de taille petite au niveau des fesses et une troisième zone de taille plus grande qui s'étend du front jusqu'aux cuisses. En général, on observe que l'écoulement est toujours accéléré dans les zones corporelles présentant une forte courbure.

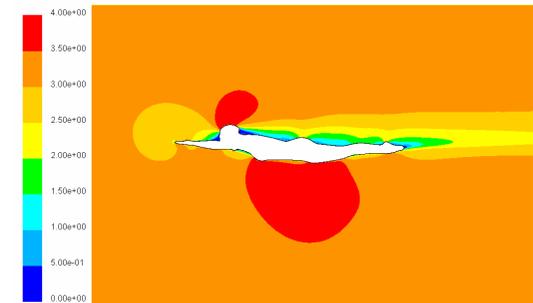
Résultats & Discussions



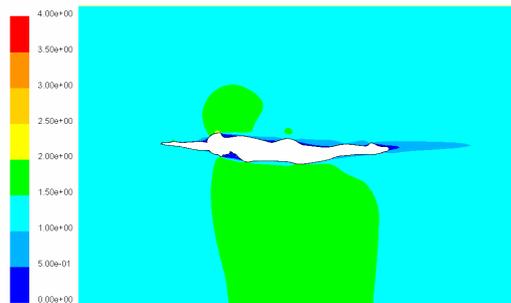
Position1 ; V=1,4m/s



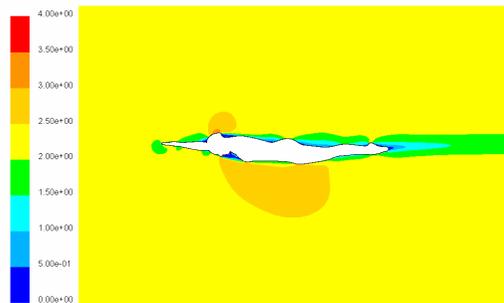
Position1; V=2,2m/s



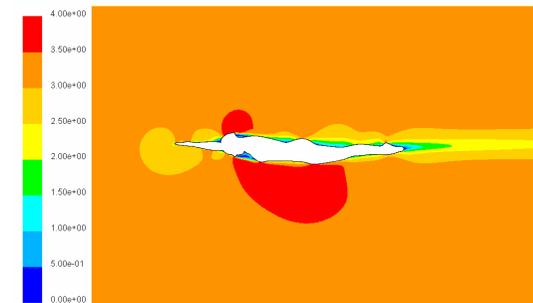
Position1; V=3,1m/s



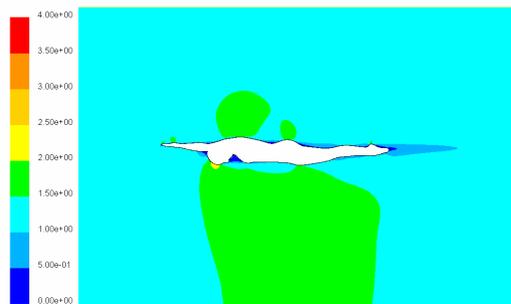
Position2 ; V=1,4m/s



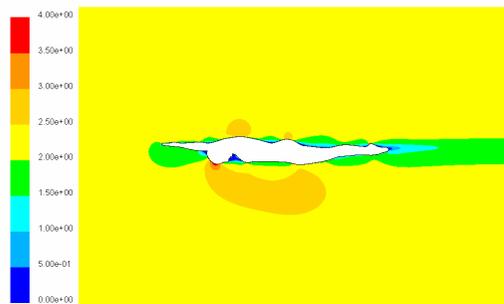
Position2; V=2,2m/s



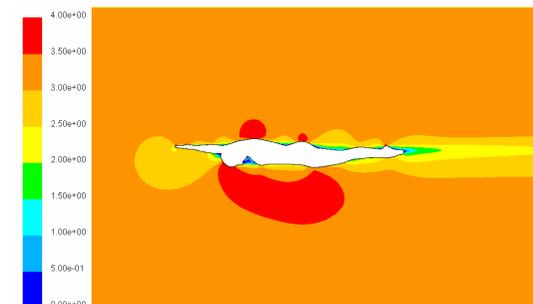
Position1; V=3,1m/s



Position3 ; V=1,4m/s



Position3; V=2,2m/s



Position1; V=3,1m/s

Figure IV- 8 : Champs de vitesses pour les trois positions de la tête pour les vitesses 1,4m/s ; 2,2m/s ; 3,1m/s

IV.1.3. Forces de traînée pour l'étude 2D

Dans le chapitre I de la synthèse bibliographique, nous avons vu qu'en mécanique de la natation, les forces qui s'opposent au mouvement des nageurs jouent un rôle très important dans l'amélioration des performances en natation. Dans cette optique, une analyse des paramètres de l'écoulement pour les différentes positions est nécessaire afin de déterminer la position optimale qui correspond aux forces de traînée minimales.

La force de traînée totale est la somme de trois forces ; la première est la traînée visqueuse, la deuxième est la traînée de pression et la troisième est la traînée de vague. La coulée s'effectuant loin de la surface libre puisque le nageur est placé à une profondeur de $1,5m$, la traînée de vague est négligée dans le cas présent [Lyttle (1999), Vennell et al. (2006)]. Le code Fluent[®] calcule la force de traînée en utilisant la formule suivante :

$$F_t = \vec{a} \cdot \vec{F}_p + \vec{a} \cdot \vec{F}_v \quad (IV- 1)$$

Où

F_t : Force de traînée totale (N)

$\vec{a} \cdot \vec{F}_v$: Composante de la force de viscosité (N)

$\vec{a} \cdot \vec{F}_p$: Composante de la force de pression (N)

\vec{a} : Vecteur selon lequel la force est calculé, dans notre cas pour calculer la force de traînée autour du corps du nageur : $\vec{a} = 1\vec{i} + 0\vec{j}$

Les figures IV-9 et IV-10 représentent les évolutions des forces de traînée de forme, visqueuse et totale pour les trois positions de la tête et pour une gamme de vitesses comprises entre $1,4$ et $3,1m/s$. Les deux traînées prises dans le cadre de la présente étude dépendent du nombre de Reynolds (corps complètement immergé) et correspondent à la phase propulsive de la coulée en natation de haut niveau.

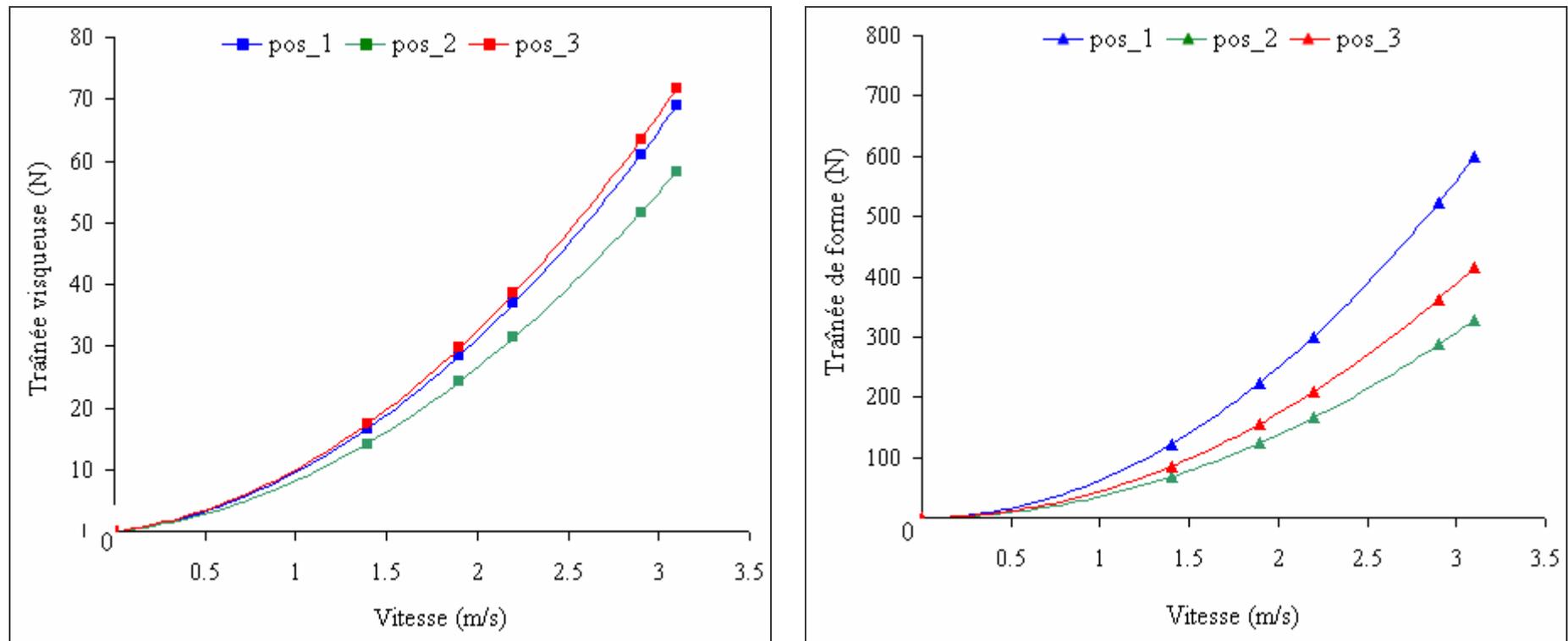


Figure IV- 9 : Evolution de la traînée visqueuse et de la traînée de forme en fonction de la vitesse pour les trois positions de la tête.

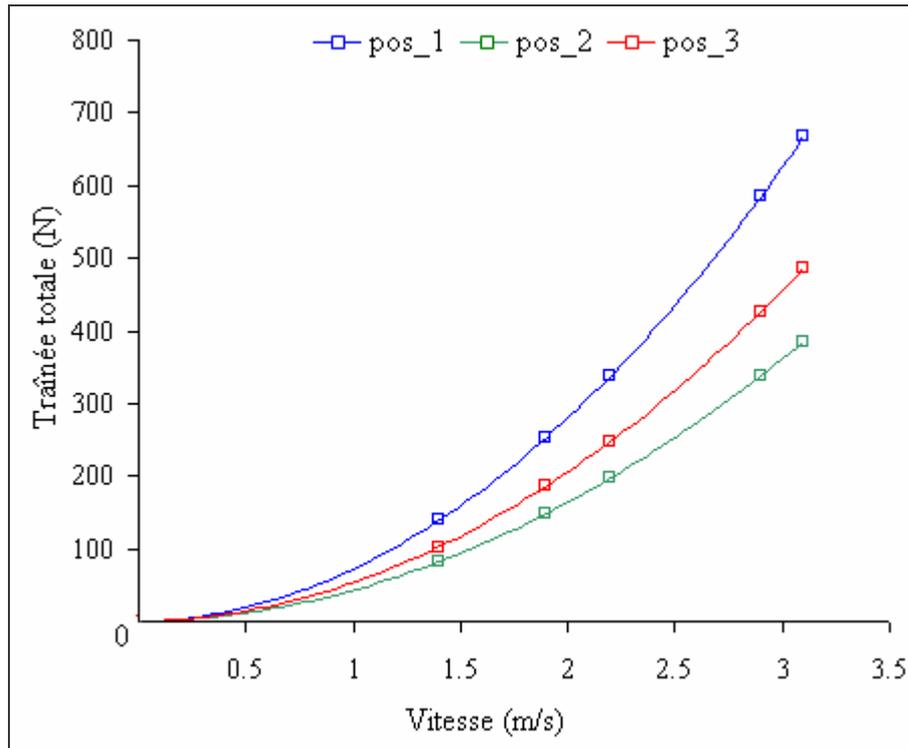


Figure IV- 10 : Evolution de la traînée totale en fonction de la vitesse pour les trois positions de la tête.

Au cours de la coulée, l'évolution de la traînée en fonction de la vitesse montre que la position 2 est celle qui offre le moins de résistance comparée aux positions 1 et 3 (Figure IV-10).

Dans le cas de la position 2 et pour une vitesse de $3,1\text{m/s}$ la traînée de forme représente 88% de la traînée totale, tandis que la traînée visqueuse ne représente que 12%. Les courbes montrent clairement qu'un changement au niveau de la position de la tête induit une modification importante au niveau de la traînée totale dans la plage de variation de vitesses correspondant à des niveaux de performance différents :

- Pour un niveau interrégional ($1,4\text{m/s}$) la traînée n'est que légèrement affectée par le changement de la position de la tête.
- Pour un niveau international (vitesse supérieure à $2,2\text{m/s}$) la traînée est affectée par le changement de la position de la tête ; on observe alors que les courbes s'écartent de manière significative. Dans cette gamme de vitesse, la position de la tête joue un rôle très important en termes de minimisation de la traînée.

D'après ces courbes, il apparaît que la traînée minimale est enregistrée pour la position de la tête alignée avec le corps (position 2). Une tête baissée au lieu d'être alignée dans l'axe du corps induit une augmentation de la force de traînée de l'ordre de 17% jusqu'à 21% pour une gamme de vitesses qui varie de 2,2 jusqu'à $3,1\text{m/s}$, ce qui est en accord avec les résultats obtenus à partir des profils de vitesse.

Intéressons nous aux composantes de force rencontrées par le nageur dans le cas de la position de la tête alignée avec l'axe du corps. Cette position correspond à la position 2 offrant moins

de résistance à l'avancement. La figure IV-11 présente l'évolution des composantes de force de traînée ; visqueuse, de forme et totale en fonction de la vitesse.

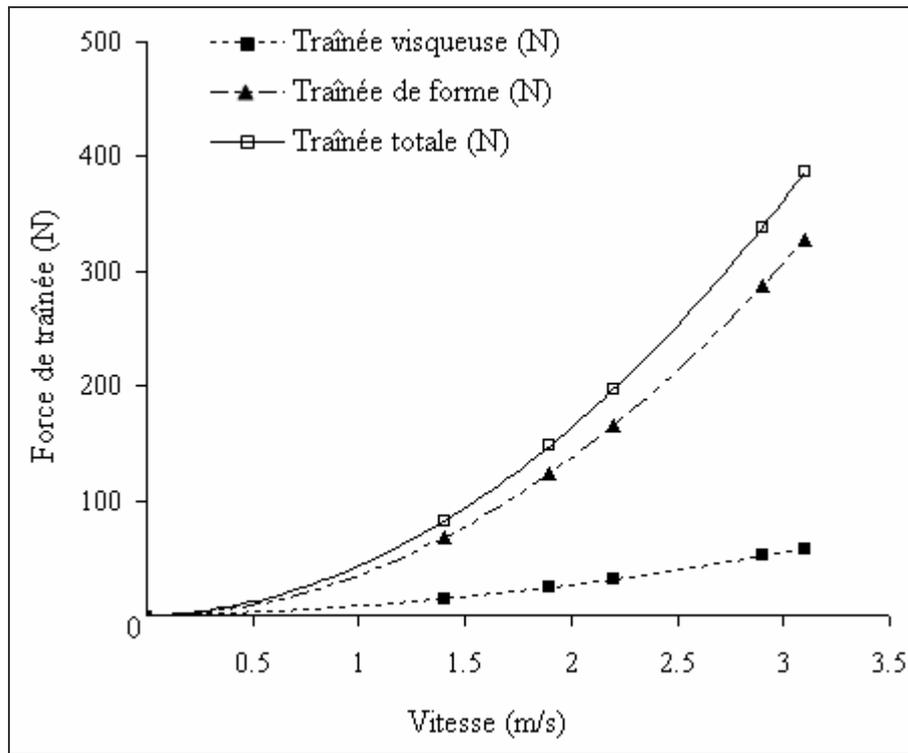


Figure IV- 11 : Evolutions de la force de traînée visqueuse, de forme et totale en fonction de la vitesse lorsque la tête est alignée avec l'axe du corps (position2).

On remarque que les deux composantes de la force de traînée augmentent avec la l'augmentation de la vitesse. On observe que la composante de traînée de forme est dominante en comparant avec celle de la traînée visqueuse. Elle présente 82,75% pour la vitesse 1,4m/s et 84,93% pour la vitesse de 3,1m/s. L'inverse se produit avec la traînée visqueuse, sa contribution diminue avec l'augmentation de la vitesse. Elle présente 17,25% pour la vitesse 1,4m/s et 17,07% pour la vitesse de 3,1m/s. La contribution de la traînée de forme augmente avec l'augmentation de la vitesse tandis que la contribution de la traînée visqueuse diminue avec l'augmentation de la vitesse. Cela est en accord avec les résultats de la littérature obtenus par Bixler et al. (2007).

IV.1.4. Coefficient de traînée pour l'étude 2D

Dans le premier chapitre de synthèse bibliographique, nous avons vu que le coefficient de traînée est un paramètre important en natation, il est considéré comme un indicateur de la bonne ou la mauvaise technique de nage [Cappaert & Gordon (1998)]. Le coefficient de traînée c_t est calculé à partir de la relation suivante [Taïar et al (2005)]:

$$c_t = \frac{F_t}{\frac{1}{2} \rho \cdot S \cdot V^2} \quad (\text{IV- 2})$$

Où :

V Vitesse de l'écoulement (m/s)

- F_t Force de traînée totale (N)
- ρ Masse volumique du fluide (kg/m^3)
- S Maître couple (m^2)

Le maître couple varie en fonction de la position de la tête. Le tableau IV-1 montre les valeurs du maître couple pour chaque position de la tête.

Position de la tête	Position 1	Position 2	Position 3
Maître couple (m^2)	0,376	0,307	0,277

Tableau IV- 1 : Maître couple pour chaque position de la tête.

En utilisant la relation IV-2, le coefficient de traînée a été calculé pour les trois positions de la tête et pour toutes les vitesses. La figure IV-12 montre l'évolution du coefficient de traînée en fonction de la vitesse pour les trois positions de la tête étudiées.

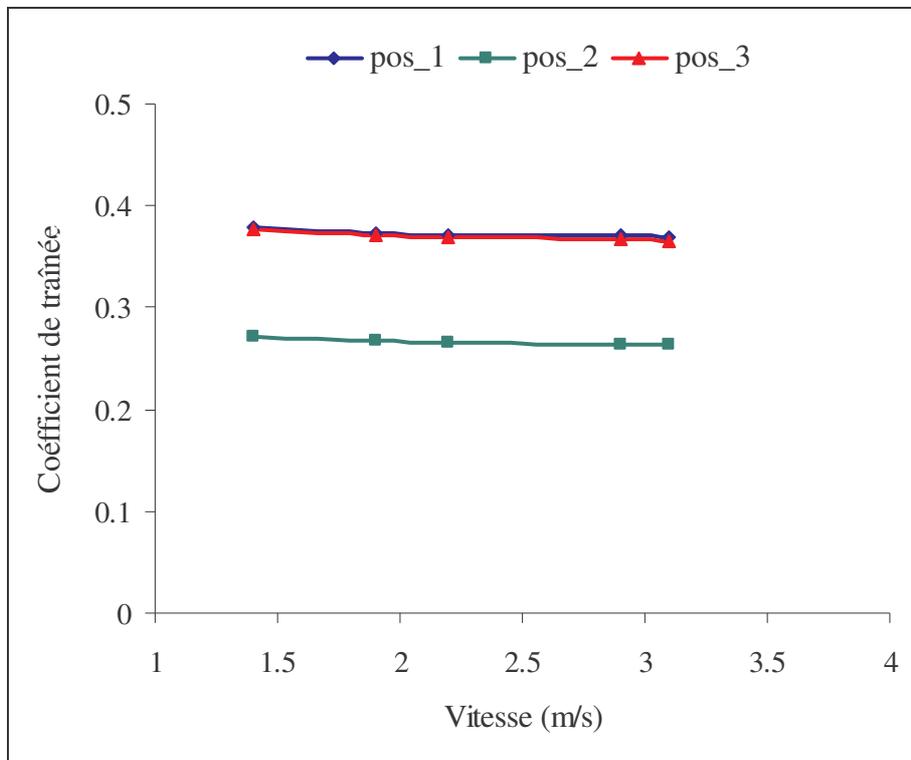


Figure IV- 12: Coefficient de traînée en fonction de la vitesse et de la position de la tête

Il apparaît que les valeurs les plus petites du coefficient de traînée sont observées pour la position 2 qui correspond à la tête alignée avec l'axe du corps, et ce pour l'étude de cas 2D. Cela est en accord avec les résultats des profils de vitesses et de force qui ont montré que la position 2 est celle qui offre moins de résistance en comparant avec les deux autres positions de la tête alignée et baissée.

IV.1.5. Lignes de courant pour l'étude 2D

La présentation des lignes de courant autour du corps de la nageuse, obtenues en utilisant le modèle $k-\varepsilon$ standard, permet d'observer quelques structures tourbillonnaires qui se développent derrière la tête de la nageuse. Pour mieux illustrer ces structures, nous présentons sur la figure IV-13, les lignes de courant pour les trois positions de la tête et pour une vitesse de $2,2 \text{ m/s}$. On constate que les dimensions et la localisation de ces zones tourbillonnaires varient en fonction de la position de la tête. On remarque bien évidemment, pour les trois cas situés, la présence d'un tourbillon à l'amont de la tête, caractéristique d'un écoulement de jonction [Polidori (1994)].

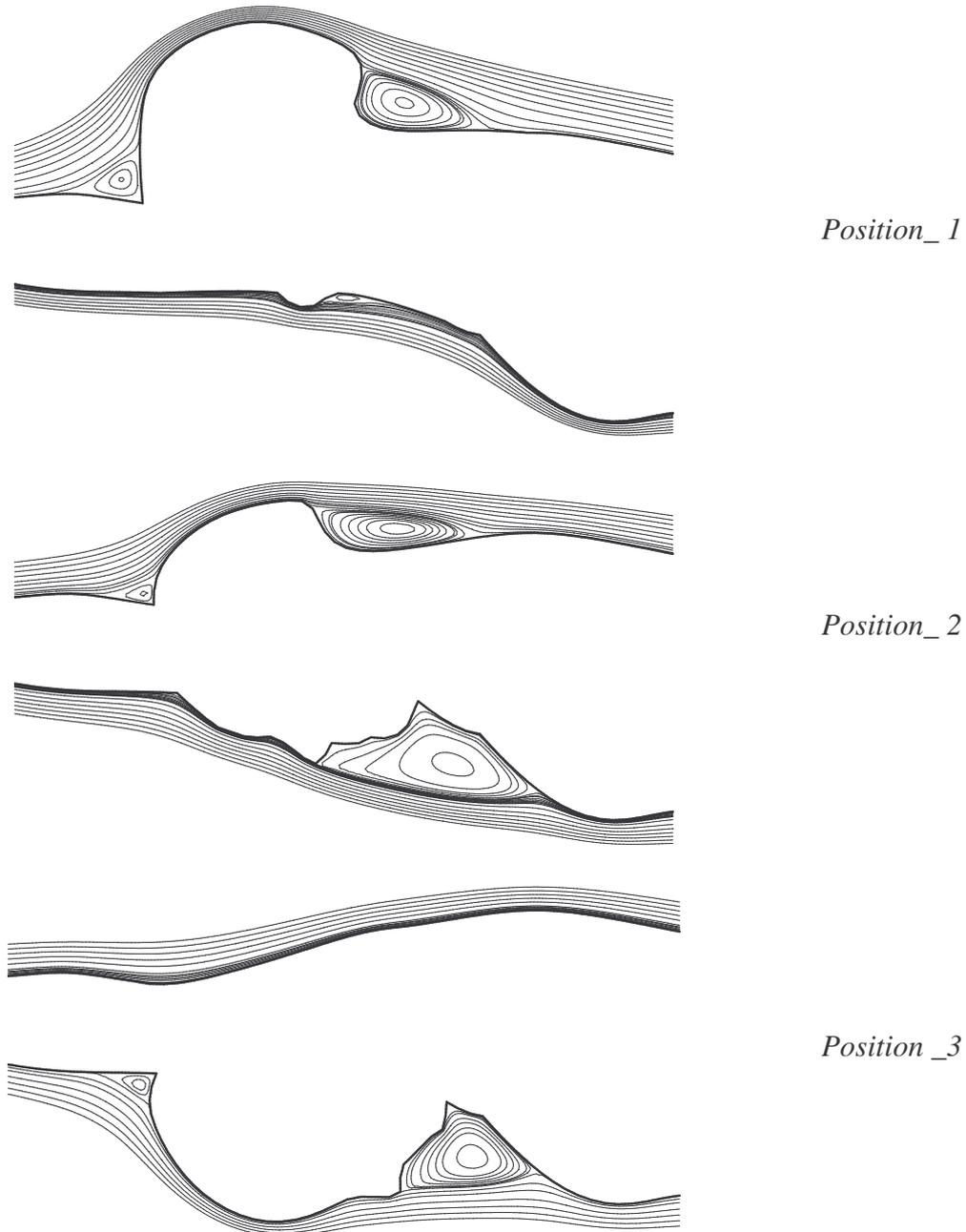


Figure IV- 13 : Lignes de courant autour de la tête de la nageuse pour les trois positions étudiées.

Un tracé des lignes de courant autour de l'ensemble du nageur permet d'observer que, à l'exception des structures tourbillonnaires qui se développent autour de la tête, l'écoulement reste collé à la surface du nageur quelle que soit la position de la tête étudiée. Pour exemple, la figure IV-14 montre les lignes de courant autour du corps du nageur dans le cas de la position de la tête alignée avec l'axe du corps et pour la vitesse $U_0=2,2m/s$ à l'entrée du domaine fluide.

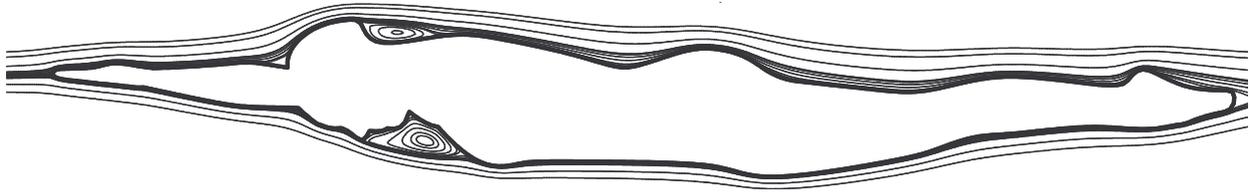


Figure IV- 14 : Lignes de courant autour du nageur pour la position de la tête 2 et pour $U_0=2,2m/s$.

Ces résultats sur les lignes de courant sont contradictoires avec ceux de la littérature. Clarys (1979) indique l'existence des structures tourbillonnaires autour du corps du nageur. Plus particulièrement, dans les zones qui changent soudainement de forme telles la tête, les hanches, les coudes, les épaules et les pieds.

Dans la littérature, la plupart des travaux numériques réalisés dans le domaine de la natation humaine utilisent le modèle $k-\varepsilon$ standard [Bixler et al. (2007), Rouboa et al. (2006), Bixler & Riewald (2002)]. Par conséquent, dans la première partie de ce travail, l'écoulement autour du nageur a été simulé en utilisant ce modèle de turbulence. La comparaison qualitative des résultats numérique obtenus par ce modèle avec ceux visualisés expérimentalement par Clarys (1979) montre que ce modèle s'est avéré incapable de prévoir toutes les structures tourbillonnaires se développant autour du nageur. C'est la raison pour laquelle, l'écoulement autour du nageur doit être simulé avec d'autres modèles de turbulences pour sélectionner le mieux adapté pour prédire les structures tourbillonnaires qui se développent autour du corps du nageur.

IV.2. Influence du modèle de turbulence

Le choix d'un modèle plutôt qu'un autre repose bien entendu très largement sur sa capacité à représenter correctement les différents phénomènes physiques mis en jeu lors de l'écoulement. Les modèles de turbulence de premier ordre à deux équations sont très répandus, puisqu'ils offrent un bon compromis entre l'effort numérique et l'exactitude des résultats.

Dans le but de trouver le modèle le mieux adapté pour prédire la structure de l'écoulement fluide lors du déplacement du nageur, nous avons effectué des simulations numériques avec d'autres modèles de turbulence. Afin de comparer les résultats issus des simulations numériques, une étude expérimentale a été effectuée avec l'équipe de France de natation à INSEP "Institut National du Sport et de l'Education Physique" à Paris en collaboration avec la Fédération Française de Natation (FFN). Le but de l'étude expérimentale est de visualiser la structure de l'écoulement autour du nageur lors de son déplacement pendant la phase de coulée.

Dans ce qui suit nous allons décrire l'étude expérimentale réalisée à l'INSEP et nous présenterons les principaux résultats issus de cette étude. Ensuite, nous effectuerons une comparaison entre ces résultats expérimentaux et les résultats numériques obtenus en utilisant différents modèles de turbulence. La comparaison est basée sur les structures tourbillonnaires qui se développent au niveau du corps du nageur.

IV.2.1. Etude expérimentale à l'INSEP

IV.2.1.a. Introduction

Cette étude expérimentale s'intéresse à la visualisation de la structure de l'écoulement du fluide autour des nageurs de haut niveau en utilisant la technique des fils de laine (tuft method) pendant la phase de coulée. Cette étude consiste à filmer le déplacement des nageurs en phase de coulée à l'aide de moyens vidéo et de prendre des vues à l'aide d'un appareil photo numérique. Le but de cette étude est de localiser les structures tourbillonnaires qui se développent autour du corps du nageur.

Généralement, au cours de la phase de coulée, le nageur n'effectue aucun mouvement. Il est donc assimilé à un objet solide non déformable dont tous les points ont la même vitesse. Dans ce qui suit, nous allons décrire cette étude expérimentale en présentant le lieu de l'expérimentation l'INSEP, le matériel et le protocole utilisés ainsi qu'une description de la technique de visualisation employée. Enfin, nous terminerons par une présentation des principaux résultats trouvés.

IV.2.1.b. Piscine de l'INSEP

L'INSEP dispose de deux bassins couverts ; le premier de grande taille, de dimension $50m$ sur $12,5m$ et le deuxième de taille moyenne de dimension $25m$ sur $12,5m$. Dans le cadre de notre travail, seul le premier bassin a été utilisé. Les deux Figures IV-15 et IV-16 montrent une vue de l'extérieur et une vue de l'intérieur du bassin utilisé durant les expériences.



Figure IV- 15 : Vue de l'extérieur de la piscine de l'INSEP utilisée durant l'étude expérimentale.

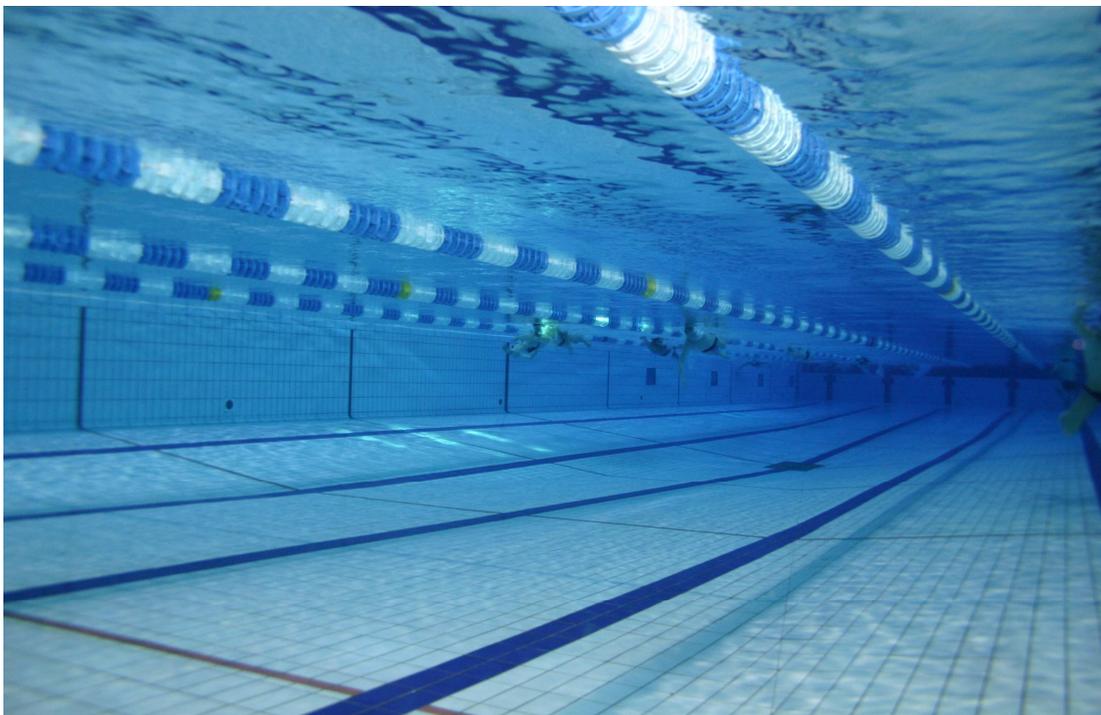


Figure IV- 16 : Vue de l'intérieur de la piscine utilisée durant les expériences.

Le mur du premier couloir de la piscine dispose de quatre hublots sous-marins ; ils sont situés sur les 25 premiers mètres. Ces hublots n'ont pas été utilisés pour réaliser nos expérimentations. Le matériel utilisé a été disposé directement dans la piscine nous assurer de filmer les nageurs d'une façon libre le long de la coulée.

IV.2.1.c. Matériels utilisés

Pour visualiser les écoulements autour des nageurs de haut niveau, une caméra pour filmer le déplacement des nageurs avec 25 images par seconde ainsi que un appareil photo numérique pour les prises de vues ont été utilisés. La caméra est de marque Sony DCR-TRVG0E et l'appareil photo numérique est de marque Canon type EOS 300D avec un objectif 18-30 EFS. La figure IV-17 montre l'appareil photo numérique et la caméra numérique utilisés durant l'expérience.



a) : Appareil photo numérique utilisé pour prendre des vues



b) : Caméra numérique utilisée pour filmer les nageurs

Figure IV- 17 : Appareil photo et caméra numérique utilisés durant les expériences

Les deux appareils sont disposés à l'intérieur de caissons étanches afin de pouvoir les utiliser sous l'eau comme le montre la figure IV-18:



Figure IV- 18 : Caisson IKELITE utilisé pour la caméra et l'appareil photo.

IV.2.1.d. Position du matériel dans la piscine

Les photos et les vidéos sont prises par deux expérimentateurs statiques dans l'eau, placés à une distance des nageurs qui assure à la fois une bonne qualité des images et le fait de filmer la totalité de la phase de coulée. Dans le but d'améliorer la qualité des vidéos obtenues, nous avons utilisé l'éclairage de la piscine orienté sur la zone de déplacement des nageurs.

La figure IV-19 montre une caméra utilisée lors des expériences pour filmer le déplacement des nageurs au cours de la phase de coulée ; elle est posée sur un pied dans un coin de la piscine.



Figure IV- 19 : Caméra utilisée pour filmer le déplacement des nageurs et des nageuses en phase de coulée

IV.2.1.e. Technique des fils utilisée pour la visualisation des écoulements

Il existe plusieurs techniques pour la visualisation des écoulements fluides. Cependant, en natation, la plupart de ces techniques sont interdites pour ne pas polluer le bassin. D'après l'étude bibliographique, la seule méthode qui a été utilisée en natation est celle des fils. Elle a été employée pour la première fois par Hay & Thayer (1989) pour visualiser l'écoulement autour du tronc et des différents membres du corps du nageur, puis par Toussaint et al. (2002) dans le but d'étudier la structure de l'écoulement autour de la main et de l'avant bras. Ce dernier a fixé directement les fils sur la peau du nageur.

Le protocole expérimental utilisé pour visualiser l'écoulement autour des nageurs de l'équipe de France de natation est similaire à celui déjà utilisé par Toussaint et al. (2002) sauf que dans le cadre de notre étude, les fils sont fixés directement sur la combinaison au lieu d'être attachés sur le corps du nageur. La figure IV-20 montre les fils fluorescents utilisés pour visualiser l'écoulement.



Figure IV- 20 : Fils fluorescents utilisés pour la visualisation des écoulements

Après avoir placé la combinaison sur une nageuse et schématisé un maillage, on procède à la fixation manuelle des fils sur la combinaison en utilisant des aiguilles. La longueur des fils est de l'ordre de 8cm et la distance entre deux fils adjacents est de 2cm. Les fils utilisés ont la même densité que l'eau, cela assure de récupérer les bonnes informations sur la direction de l'écoulement autour des nageurs. La figure IV-21 montre une combinaison portée par une nageuse avant et après la fixation des fils.



Schématisation du maillage avant l'équipement de la combinaison



Combinaison équipée par des fils portée par une nageuse

Figure IV- 21: Combinaison avant et après l'équipement par les fils

Deux combinaisons ont été équipées puis ont été portées par six nageurs et trois nageuses de l'équipe de France de natation. Dans cette étude, les sujets masculins et féminins ont effectué chacun des coulées ventrales et latérales. Les différentes positions de coulée sont montrées sur la figure IV-22.



a): Nageur effectuant une coulée ventrale



b) : Nageur effectuant une coulée latérale



c) : Nageuse effectuant une coulée ventrale



d) : Nageuse effectuant une coulée latérale

Figure IV- 22 : Coulées ventrales et latérales effectuées par une nageuse et un nageur à la piscine de l'INSEP à Paris.

IV.2.1.f. Résultats et discussion

Les séquences vidéo prises pour les sujets masculins et féminins sont analysées grâce au logiciel de traitement des vidéos et des images Pinnacle disponible au Laboratoire de Thermomécanique de l'Université de Reims. La figure IV-23 montre les structures tourbillonnaires qui se développent au niveau du corps du nageur en phase de coulée. On observe une orientation des fils vers le haut au niveau de quelques zones du corps du nageur indiquant l'existence de zones de décollement ou de structures tourbillonnaires. Ces zones ont été observées au niveau du dos et au niveau des fesses pour les sujets féminins et masculins.

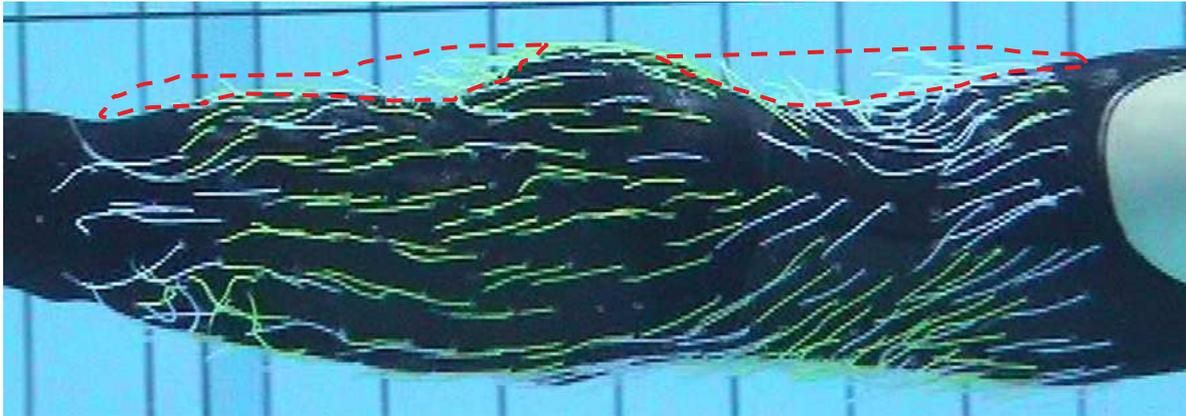
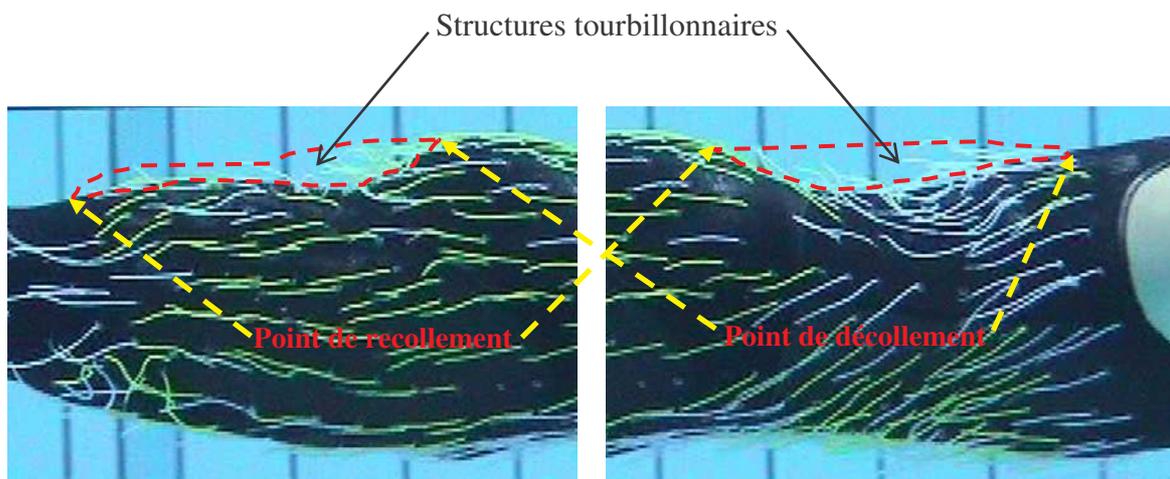


Figure IV- 23 : Structures tourbillonnaires au niveau du dos et des fesses pour un sujet masculin ($V=2,2\text{m/s}$)

D'un point de vue qualitatif il n'y a pas une différence significative entre les structures tourbillonnaires qui se développent autour des sujets masculins et féminins. Les points de décollement et de recollement de l'écoulement, au niveau du dos et des fesses, sont schématisés sur la figure IV-24.



a) : Structure tourbillonnaire (décollement) au niveau des fesses

b) : Structure tourbillonnaire (décollement) au niveau du dos

Figure IV- 24 : Points de décollement et de recollement des structures tourbillonnaires au niveau du dos et des fesses ($V=2,2\text{m/s}$).

D'après l'étude bibliographique du chapitre I, il a été montré que lors du déplacement du nageur dans le milieu aquatique et à cause de la géométrie complexe du corps humain, des zones tourbillonnaires sont produites au niveau des différentes parties du corps telles que la tête, les épaules, les hanches, les genoux et les pieds [Clarys (1979)]. Cependant, dans le cadre de cette étude expérimentale et en raison de la combinaison utilisée (celle-ci ne couvre pas la totalité du corps) les structures tourbillonnaires ont été visualisées seulement au niveau des fesses et du dos, que ce soit pour les nageurs ou les nageuses. Pour capter toutes les structures tourbillonnaires au niveau du corps entier il faut effectuer d'autres expériences de visualisation soit avec des combinaisons intégrales qui couvrent la totalité du corps, soit en fixant directement les fils sur la peau des nageurs comme la méthode utilisée par Toussaint et al. (2002).

Les résultats de simulation numérique en utilisant le modèle $k-\varepsilon$ standard, présentés dans la première partie de ce chapitre, montrent que l'écoulement reste collé à la surface du corps du nageur (Figure IV-14). Ce modèle ne permet donc pas de capter les structures tourbillonnaires observées expérimentalement à l'INSEP, qui se développent à la surface du nageur au niveau de dos et des fesses. D'après une analyse approfondie de la littérature sur les modèles de turbulence et leur utilisation, le modèle $k-\varepsilon$ standard n'est pas bien adapté pour prédire les écoulements turbulents en présence des zones de décollement. C'est la raison pour laquelle, dans le paragraphe suivant, nous allons examiner l'influence du choix du modèle de turbulence sur les résultats numériques afin de trouver le modèle le mieux adapté pour prédire la structure de l'écoulement autour du nageur.

IV.2.2. Confrontation des résultats numériques et expérimentaux

Des simulations d'écoulement autour du nageur ont été réalisées pour une vitesse de $2,2m/s$ en utilisant les modèles de turbulence suivants : RNG, Réalisable, $k-\omega$ standard et Spalart-Allmaras. Les paramètres numériques utilisés sont les mêmes que ceux utilisés dans l'étude de l'écoulement avec le modèle $k-\varepsilon$ standard. Les résultats obtenus seront comparés aux résultats expérimentaux réalisés à l'INSEP avec l'équipe de France de natation. La figure IV-25 montre les structures tourbillonnaires au niveau de la tête, de dos et des fesses en utilisant les différents modèles de turbulence.

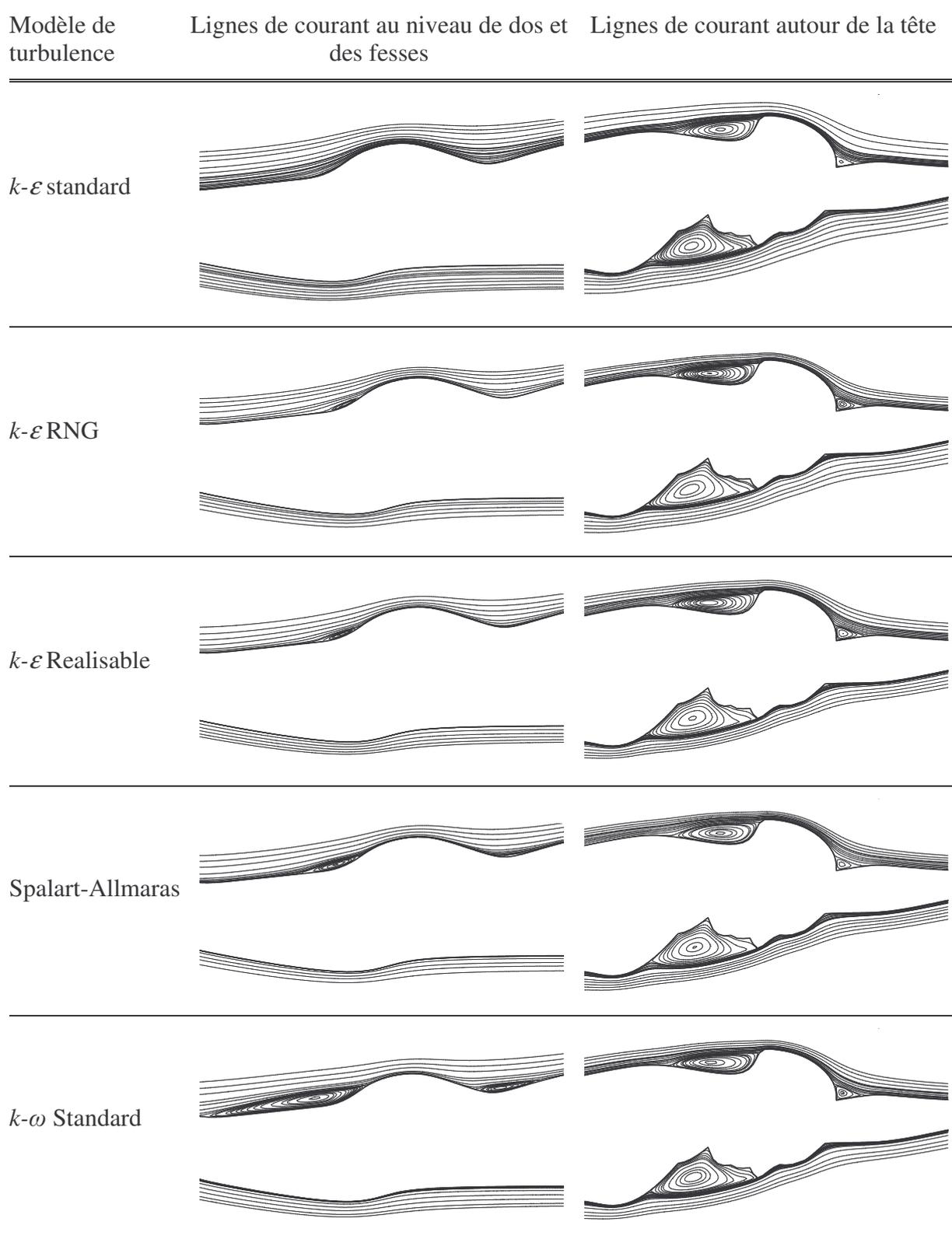


Figure IV- 25 : Lignes de courant autour de la tête, du dos et des fesses en utilisant les différents modèles de turbulence ($V=2,2m/s$).

IV.2.2.a. Résultats à proximité de la tête

En général, on observe que tous les modèles de turbulence captent trois zones tourbillonnaires autour de la tête du nageur. Une petite zone avant la tête, une zone juste derrière la tête et une zone au niveau du cou. La figure IV-26 montre les structures tourbillonnaires autour de la tête du nageur dans le cas du modèle $k-\omega$ standard.

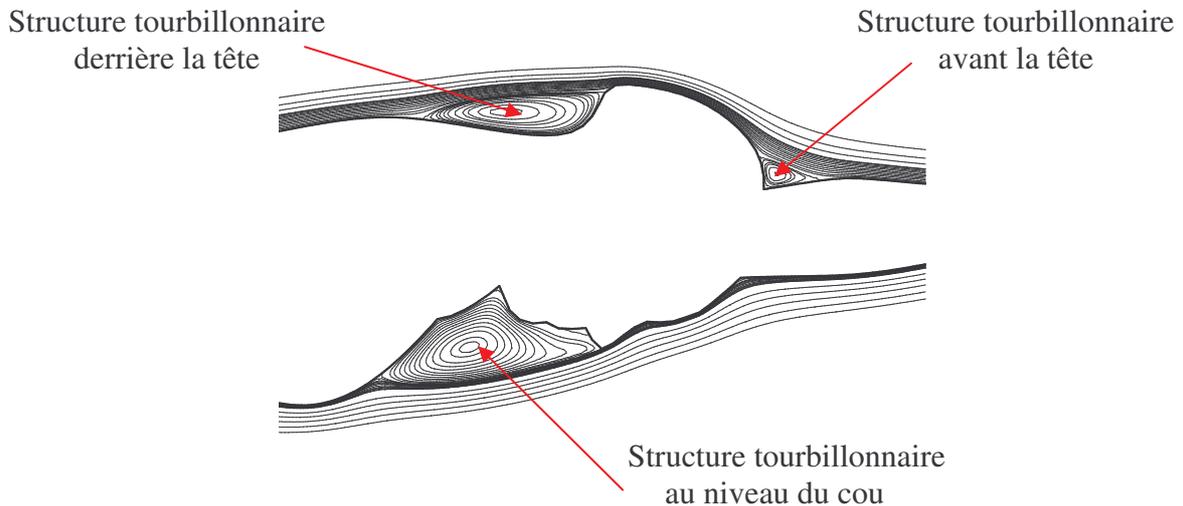


Figure IV- 26 : Zones tourbillonnaires au niveau de la tête obtenues par le modèle $k-\omega$ standard ($V=2,2m/s$)

IV.2.2.b. Résultats autour du dos et des fesses

En ce qui concerne les structures tourbillonnaires au niveau du dos et des fesses, on constate une grande différence entre les résultats de simulation numérique obtenus par les différents modèles de turbulence utilisés. Nous avons vu dans la première partie de ce chapitre que lors de l'utilisation du modèle de turbulence $k-\varepsilon$ standard, l'écoulement reste collé au corps du nageur. La figure IV-27 montre qu'en utilisant ce modèle, l'écoulement suit parfaitement la forme du corps du nageur.

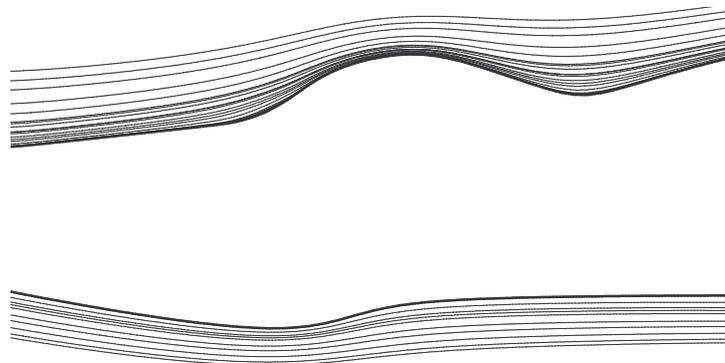


Figure IV- 27 : Lignes de courant autour du nageur en utilisant le modèle $k-\varepsilon$ standard ($V=2,2m/s$)

On observe que les structures tourbillonnaires au niveau des fesses captées par les modèles de turbulence RNG, Réalisable et Spalart-Allmaras, sont de taille réduites. Ces structures montrent une petite zone de décollement en comparant avec celle visualisée expérimentalement à l'INSEP. Au niveau du dos aucune zone n'a été captée par ces trois modèles. La figure IV-28 montre les trois structures tourbillonnaires captées par les trois modèles de turbulence RNG, Réalisable et Spalart-Allmaras.

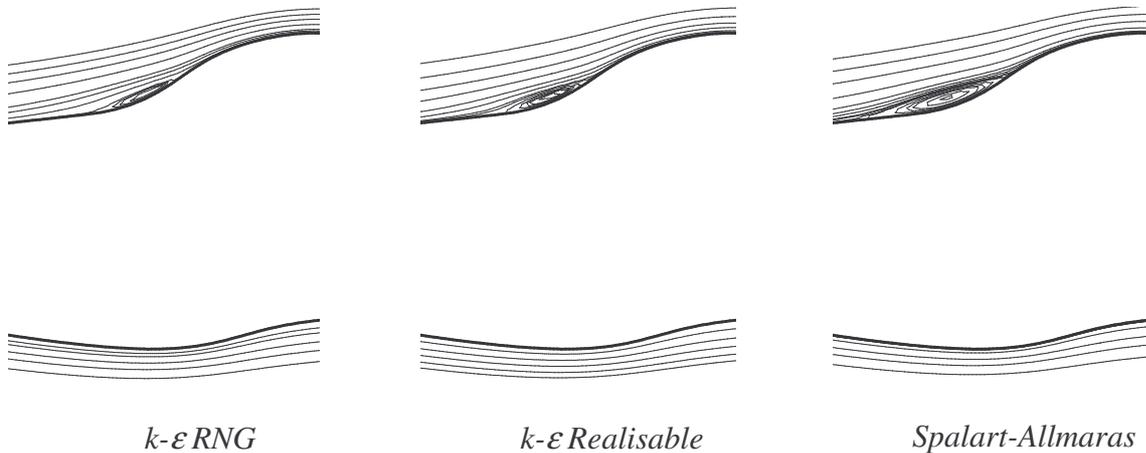


Figure IV- 28 : Structures tourbillonnaires au niveau des fesses captées par les modèles de turbulence RNG, Réalisable et Spalart-Allmaras ($V=2,2\text{m/s}$)

On observe aussi que la taille de la zone de décollement au niveau des fesses varie d'un modèle à un autre. La taille de cette zone est plus importante avec le modèle Spalart-Allmaras qu'avec le modèle RNG ou le modèle Réalisable.

Le modèle $k-\omega$ standard est le seul qui ait capté les structures tourbillonnaires au niveau du dos et au niveau des fesses. La figure IV-29 montre une comparaison entre les résultats expérimentaux de l'INSEP et numériques obtenus avec le modèle $k-\omega$ standard.

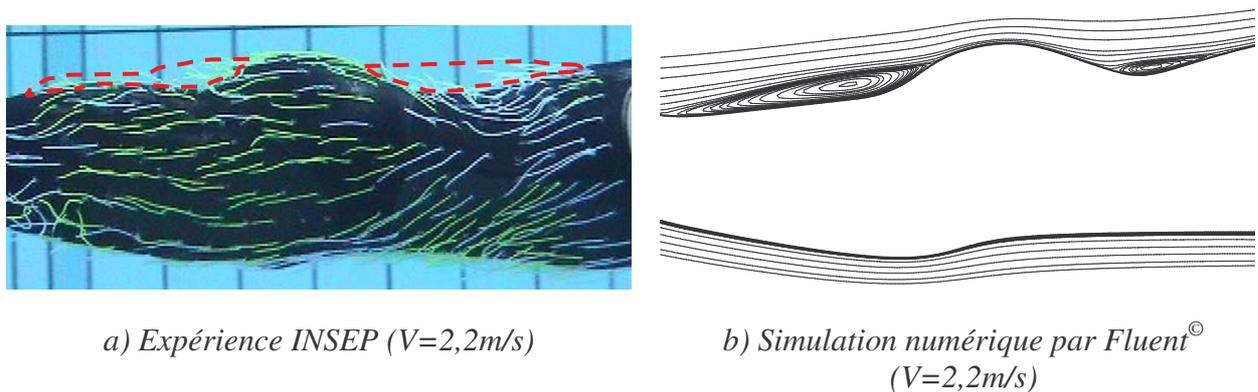


Figure IV- 29 : Comparaisons des structures tourbillonnaires expérimentales et numériques en utilisant le modèle de turbulence $k-\omega$ standard ($V=2,2\text{m/s}$)

La taille de la zone de décollement au niveau des fesses correspond approximativement à celle visualisée expérimentalement à l'INSEP. Les points de décollement et recollement de l'écoulement se situent approximativement dans les mêmes positions. Le modèle $k-\omega$ standard

sous-estime la taille de la zone de décollement au niveau de dos. Donc, le modèle de turbulence $k-\omega$ standard semble être le meilleur modèle à utiliser pour prédire les structures tourbillonnaires se développant au niveau du corps du nageur au cours de la phase de coulée ou de retour après un virage.

IV.2.3. Comparaison entre les résultats des modèle $k-\varepsilon$ et $k-\omega$ standard

Les simulations de l'écoulement autour du nageur ont été reprises pour les cinq valeurs de vitesse et pour les trois positions de la tête en utilisant le modèle $k-\omega$ standard. La figure IV-30 montre l'évolution de la force de traînée totale en fonction de la vitesse pour les trois positions de la tête en utilisant les deux modèles de turbulences $k-\varepsilon$ et $k-\omega$ standard.

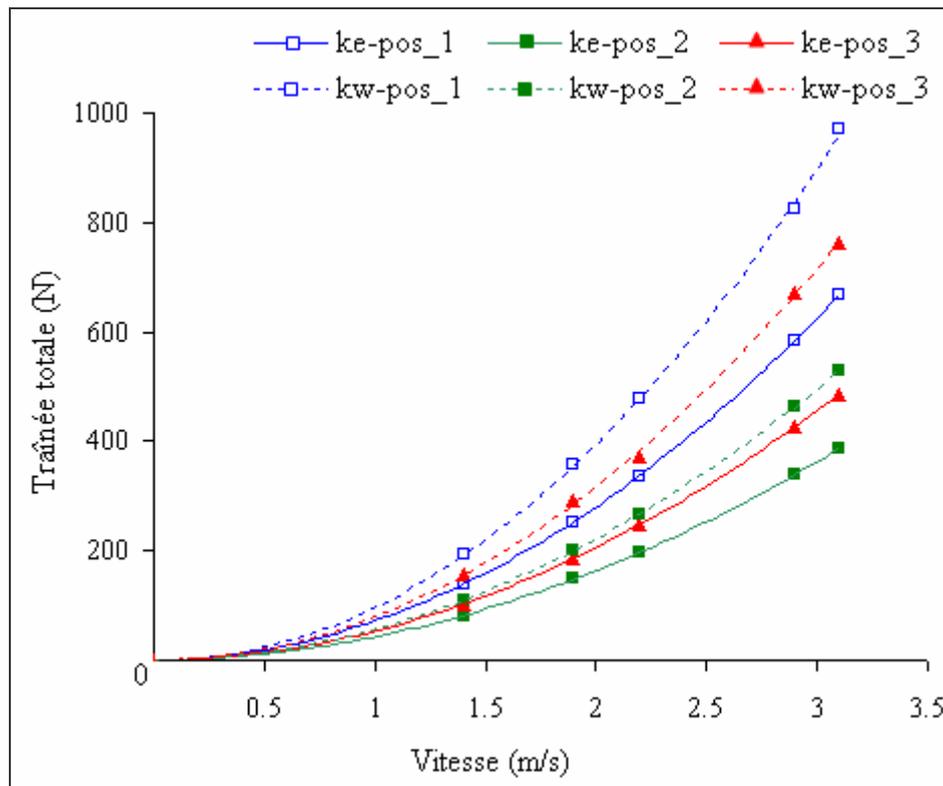


Figure IV- 30: Evolution de la traînée totale en fonction de la vitesse pour les trois positions de la tête en utilisant les deux modèles de turbulence $k-\varepsilon$ et $k-\omega$ standard.

L'évolution de la traînée totale en fonction de la vitesse pour les trois positions de la tête montre que, pour les deux modèles de turbulence utilisés, la position de la tête alignée est celle qui offre le moins de résistance. La comparaison entre les résultats obtenus par les deux modèles de turbulence montre que les valeurs de la force de traînée sont beaucoup plus élevées avec le modèle $k-\omega$ standard qu'avec le modèle $k-\varepsilon$ standard.

Les valeurs de cette force dans le cas de simulation 2D restent beaucoup plus élevées que ceux de la littérature [Bixler et al. (2007), Vennell et al. (2006)]. De ce fait on conclue que l'étude 2D reste limitée et des simulations en 3D sont nécessaires pour évaluer les forces de résistance.

IV.3. Etude de l'écoulement autour du nageur 3D

IV.3.1. Introduction

Dans ce chapitre, nous prolongeons l'étude numérique de l'écoulement autour du nageur au cas tridimensionnel. Nous présenterons dans ce qui suit le maillage réalisé. Ensuite nous définirons les conditions aux limites correspondantes. Enfin nous discuterons les principaux résultats trouvés en les comparant avec ceux disponibles dans la littérature et ceux issus des expériences réalisées à l'INSEP avec l'équipe de France de natation.

Nous avons vu, dans l'étude bidimensionnelle que la position de la tête alignée avec l'axe du corps est la meilleure pour améliorer la performance. Cette position est donc choisie pour réaliser la simulation tridimensionnelle. La figure IV-31 montre la position de la tête utilisée dans le cas tridimensionnel.

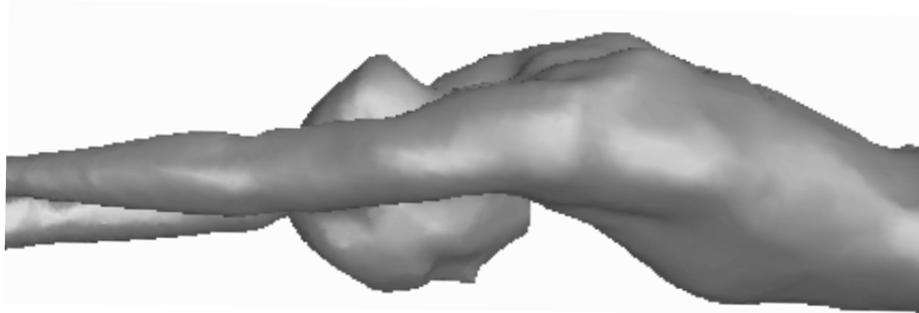


Figure IV- 31 : Position de la tête choisie pour la simulation en 3D

IV.3.2. Construction de la géométrie et le maillage du nageur

La construction de la géométrie du nageur a été réalisée, comme nous l'avons vu dans le chapitre II, à partir des nuages des points obtenus par le scanner 3D en utilisant le logiciel RapidForm[®].

En raison de la difficulté rencontrée lors de la génération du maillage 3D en utilisant le mailleur Gambit[®] et de la non disponibilité des logiciels adaptés pour générer le maillage des modèles géométriques complexes tels que celui du corps humain, l'enveloppe surfacique du nageur a été confiée à la société Fluent[®] afin de générer le maillage 3D en utilisant le logiciel TGrid[®] édité par la même société. C'est le logiciel le plus utilisé actuellement et le plus répandu, car il permet de générer facilement des maillages pour les géométries complexes.

La taille du domaine fluide autour de la nageuse correspond aux dimensions définies lors de l'étude 2D (3m en amont et 9,6m en aval du nageur), la largeur et la profondeur ont été prises égales à 3m. La figure IV-32 montre le domaine fluide construit autour du nageur.

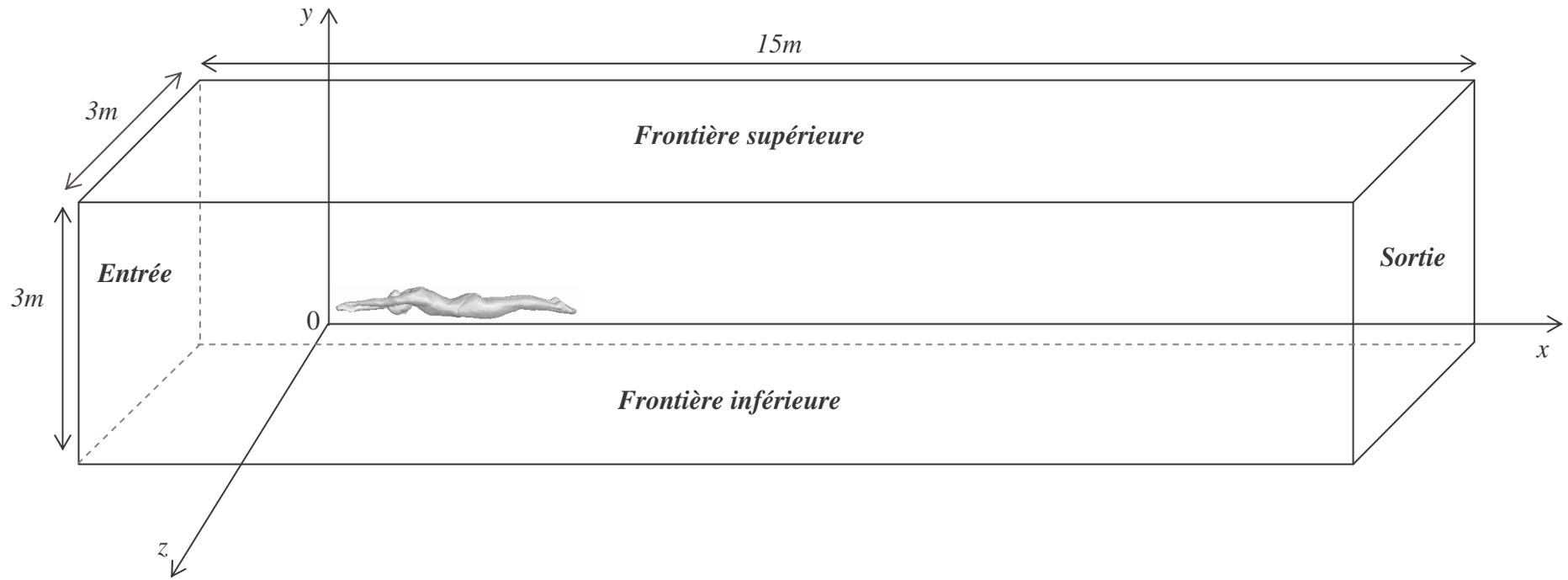


Figure IV- 32 : Domaine fluide créé autour du nageur

IV.3.3. Génération du maillage du domaine fluide autour du nageur

Le maillage généré dans le cas tridimensionnel est un maillage progressif, raffiné près du corps du nageur et relâché loin de ce dernier pour ne pas alourdir le temps de calcul. La surface du corps du nageur et toutes les surfaces limitant le domaine fluide sont maillées en utilisant des cellules triangulaires. Pour le domaine fluide, des cellules de type tétraédriques sont utilisées. Les figures IV-33 à IV-36 montrent respectivement le maillage surfacique des frontières limitant le domaine fluide, le maillage surfacique du nageur et le maillage de quelques plans, dans le domaine fluide, passant par le corps du nageur.

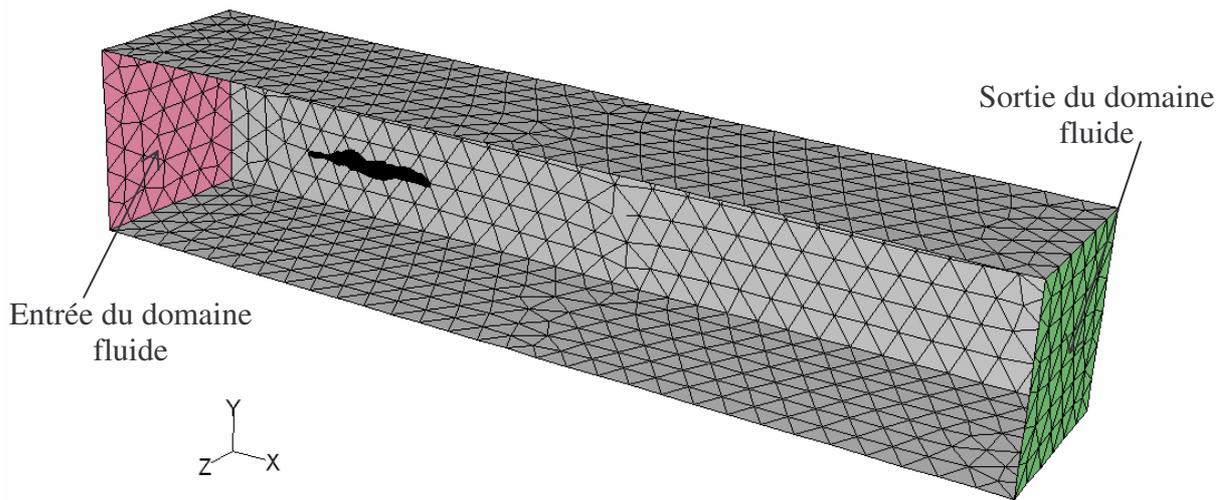


Figure IV- 33 : Vue globale du maillage surfacique des frontières du domaine fluide autour du nageur

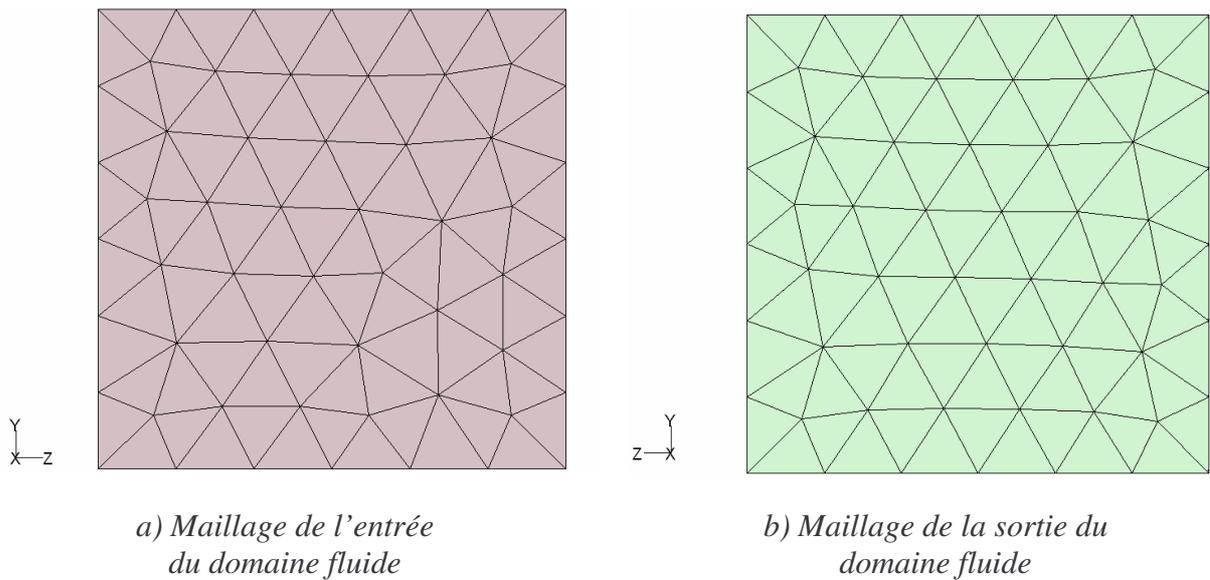
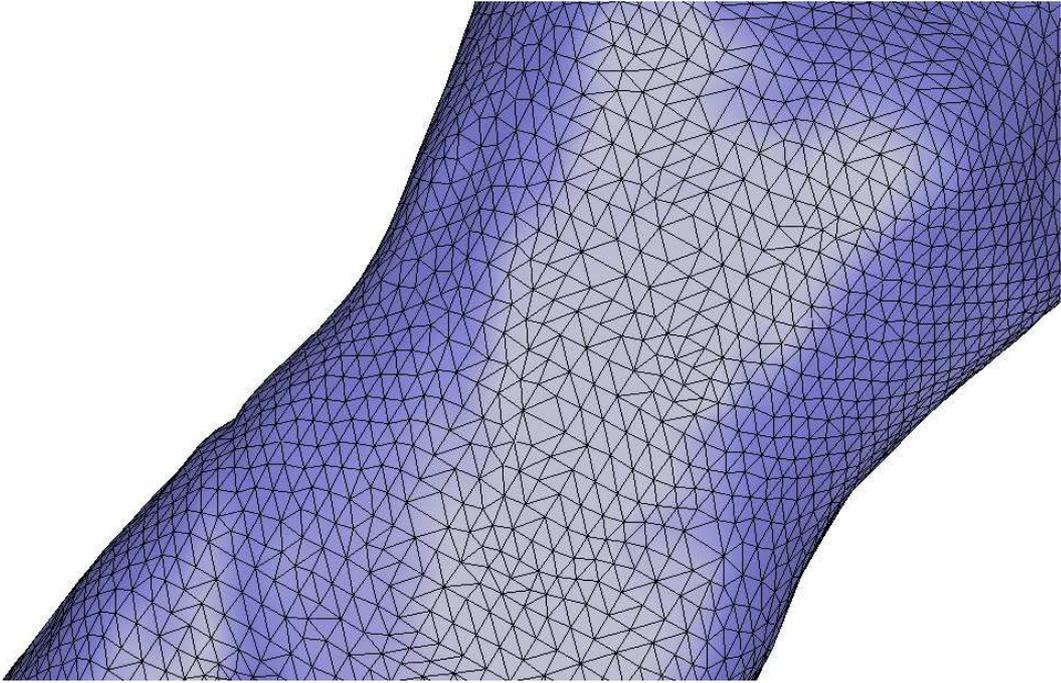
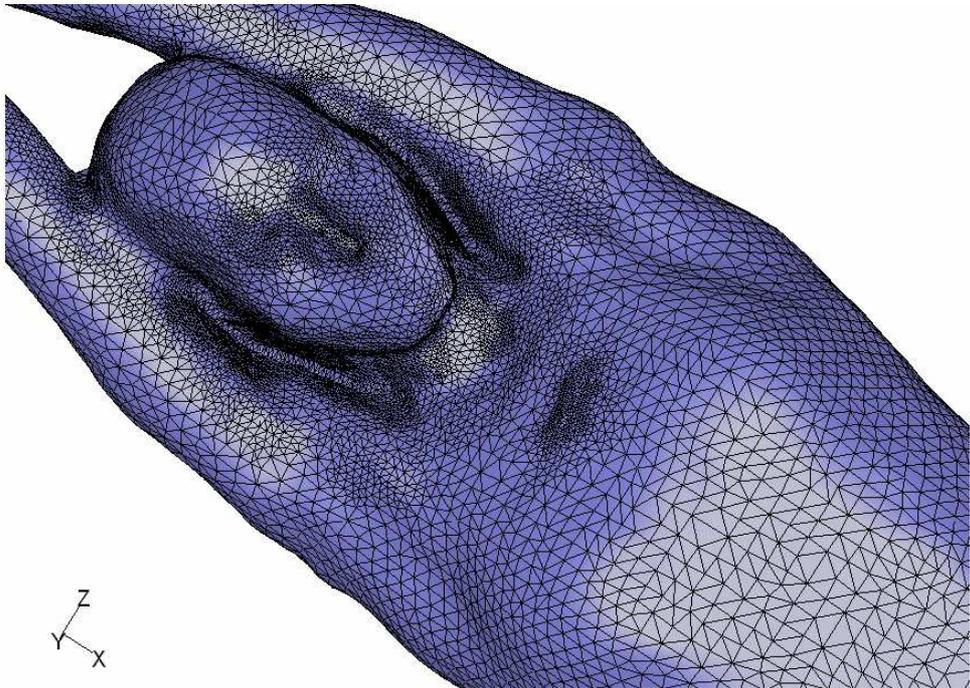


Figure IV- 34 : Maillage de l'entrée et de la sortie du domaine fluide



a) : Maillage surfacique du corps du nageur

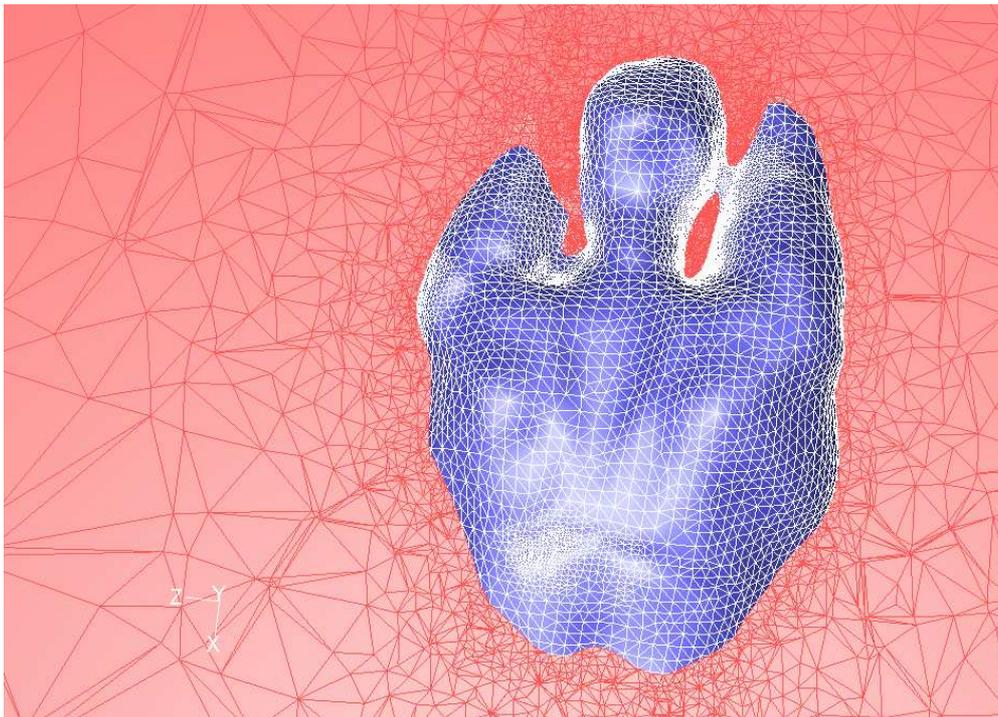


b) : Maillage surfacique de la tête et des bras du nageur

Figure IV- 35: Maillage surfacique du nageur



a) Coupe du maillage dans le domaine fluide passant par le nageur (vue de dessous)



b) Coupe du maillage dans le domaine fluide passant par le nageur (vue de dessus)

Figure IV- 36 : Maillage progressif, raffiné près du corps et relâché loin du corps du nageur

IV.3.4. Conditions aux limites

Les conditions aux limites imposées dans le cas 3D sont les mêmes que dans le cas 2D. Nous avons seulement rajouté la condition de symétrie au niveau des deux frontières gauche et droite du domaine fluide (figure IV-37).

- À l'entrée du domaine fluide : une vitesse horizontale selon l'axe x constante.
- À la sortie : la condition de conservation du débit a été imposée.
- Sur la surface du nageur : la condition de non glissement a été imposée.
- Sur toutes les frontières du domaine fluide : la condition de symétrie a été imposée.

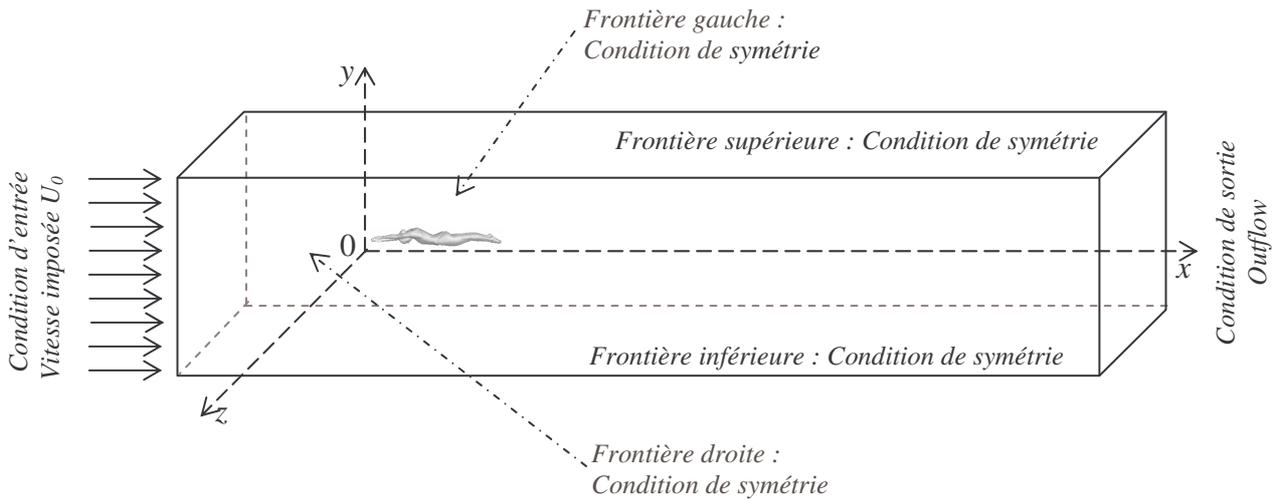
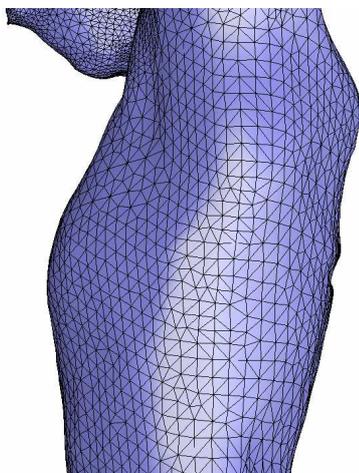


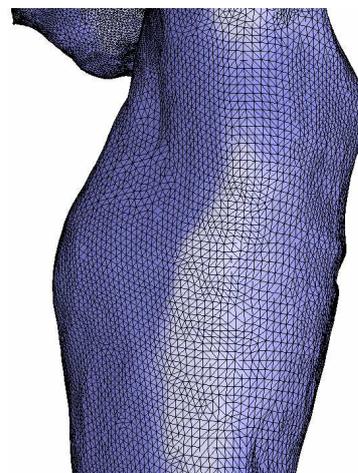
Figure IV- 37 : Conditions aux limites imposées dans le cas 3D

IV.3.5. Adaptation du maillage 3D

Pour chaque calcul, il faut vérifier les valeurs de y^+ pour assurer le bon traitement de la région proche paroi (cf. Chapitre III). Si les valeurs de y^+ ne sont pas comprises dans l'intervalle $[11,225 ; 300]$, le maillage doit être adapté et le calcul relancé jusqu'à ce que la condition sur y^+ soit satisfaite. La figure IV-38 présente une vue de profil du maillage avant et après l'adaptation.



a) : Maillage avant adaptation



b) : Maillage après adaptation

Figure IV- 38 : Maillage surfacique du nageur avant et après adaptation

Le tableau IV-2 montre les caractéristiques du maillage avant et après l'adaptation.

	Maillage initial	Maillage final
Nombre de cellules	642115	2012526
Nombre de faces	1336470	4496409
Nombre de nœuds	134685	563066

Tableau IV- 2 : Caractéristiques du maillage 3D avant et après l'adaptation

IV.3.6. Résultats et discussions

IV.3.6.a. Validation du code de calcul

Dans le cas tridimensionnel, une simulation numérique de l'écoulement fluide autour du nageur durant la phase de glissement a récemment été effectuée par Bixler et al. (2007) pour des vitesses de 1,5 m/s, 1,75 m/s, 2 m/s et 2,25m/s. Ce dernier a utilisé le modèle $k-\epsilon$ standard pour le traitement de la turbulence, associé à la loi "Non Equilibrium Wall Function" pour le traitement de la région proche paroi.

Dans un premier temps, nous avons effectué les simulations numériques pour la même position du nageur que celle utilisée par Bixler et al. (2007), avec les mêmes vitesses et le même modèle de turbulence. Le but est de comparer nos résultats avec ceux obtenus par Bixler et al. (2007). Sur la figure IV-39 on présente une comparaison entre la force de traînée obtenue dans nos simulations numériques en utilisant les deux modèles de turbulences $k-\epsilon$ standard et $k-\omega$ standard avec ceux numériques (modèle turbulences $k-\epsilon$ standard) et expérimentaux obtenus par Bixler et al. (2007).

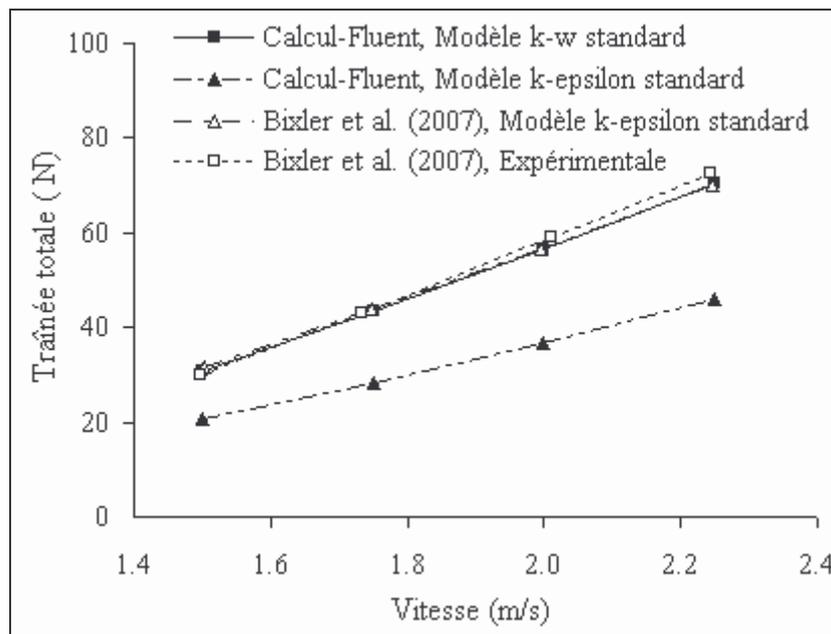


Figure IV- 39 : Comparaison entre nos résultats et ceux de Bixler et al. (2007) en fonction de la vitesse

La figure IV-40 montre que, avec le modèle de turbulence $k-\omega$ standard, nos résultats numériques sont en bon accord avec ceux expérimentaux obtenus dans le test réalisé par Bixler et al. (2007). En revanche, on constate que le modèle $k-\varepsilon$ standard sous-estime la force de résistance rencontrée par le nageur durant la phase de coulée.

Ces résultats sont contradictoires avec les résultats numériques de Bixler et al. (2007). Ces derniers ont trouvé des valeurs de force de traînée correspondant aux valeurs mesurées dans le test expérimental mais en utilisant le modèle $k-\varepsilon$ standard. Par contre, nous avons trouvé en utilisant le même modèle que les valeurs de force de traînée sont beaucoup plus petites.

Cette différence entre les deux simulations, en utilisant les deux modèles de turbulence $k-\varepsilon$ standard et $k-\omega$ standard, peut être due à la taille du domaine fluide autour du nageur. En effet, dans leur étude, Bixler et al. (2007) n'ont pas pris en considération l'effet de la taille du domaine fluide sur la fidélité des résultats numériques [Korichi & Oufer (2005), Zaïdi et al. (2008)]. Or, lors de l'étude réalisée dans le cas bidimensionnel, nous avons constaté qu'un domaine étroit donnait des valeurs de forces plus importantes qu'un domaine plus grand. Bixler et al. (2007) ont utilisé un petit domaine fluide autour du nageur qui pourrait expliquer les valeurs élevées de la force de traînée obtenues en utilisant le modèle $k-\varepsilon$ standard.

Leur domaine fluide ne fait que $6m$ de longueur, $2,5m$ de largeur et $1,5m$ de profondeur tandis que pour nos simulations numériques, nous avons utilisé un domaine fluide beaucoup plus grand ($15m$ de longueur, $3m$ de largeur et $3m$ de profondeur). La longueur du domaine utilisé pour nos simulations est 2,5 fois plus grande que celle utilisée par Bixler et al. (2007). La profondeur est 2 fois plus grande. Par ailleurs, lors de l'étude 2D, nous avons trouvé que le domaine autour du nageur doit également inclure $3m$ en amont et $9,6m$ en aval du nageur en prenant comme origine l'extrémité des doigts.

D'après cette comparaison, et en faisant attention à avoir un domaine fluide suffisamment grand, on peut conclure que, parmi les modèles de turbulence utilisés, le modèle $k-\omega$ standard semble être le meilleur pour prédire ces forces de résistance. Ce résultat sur la force de résistance confirme les résultats obtenus en 2D, dans le cadre de la présente thèse.

Nous rappelons que nous avons alors constaté que le modèle $k-\varepsilon$ standard ne captait pas les structures tourbillonnaires se développant au niveau du corps du nageur contrairement au modèle $k-\omega$ standard.

IV.3.6.b. La force de traînée

Après avoir choisi le modèle de turbulence $k-\omega$ standard, nous avons calculé la force de résistance (de traînée) pour les mêmes valeurs de vitesses que celles utilisées dans le cas bidimensionnel, à savoir $1,4m/s$, $1,9m/s$, $2,2m/s$, $2,9 m/s$ et $3,1 m/s$. La figure IV- 40 présente les évolutions, en fonction de la vitesse, des forces de traînée visqueuse, de forme et totale.

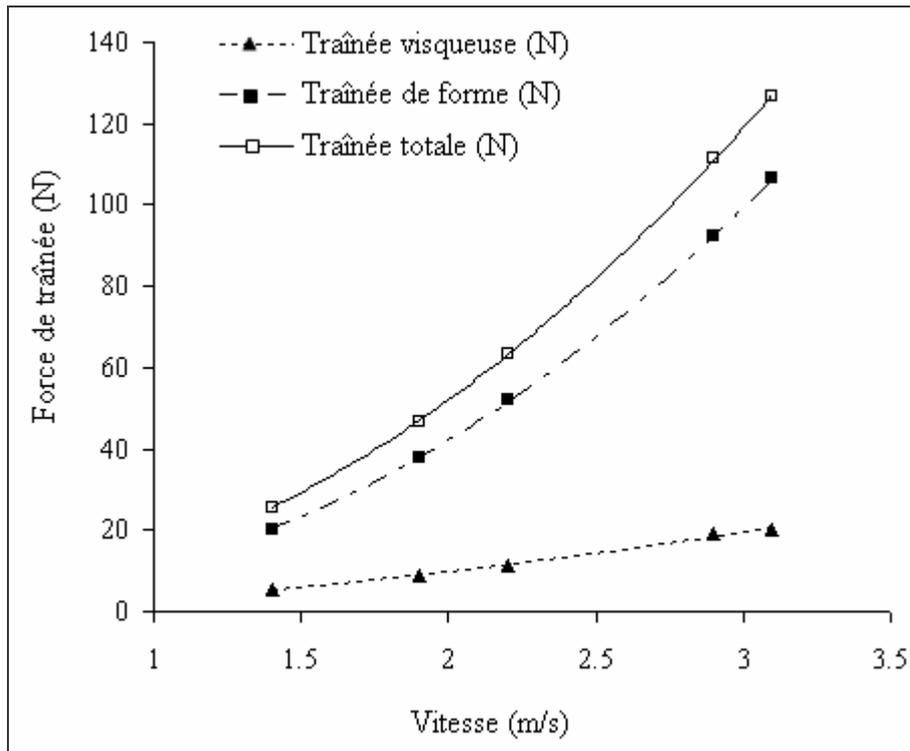


Figure IV- 40 : Evolution des traînées visqueuse, de forme et totale en fonction de la vitesse

Sur cette figure, nous observons que la traînée de forme est la composante dominante mais aussi que la traînée visqueuse n'est pas négligeable. La traînée visqueuse représente en effet 20,9% de la traînée totale pour une vitesse de 1,4m/s et encore 16,4% pour une vitesse de 3,1m/s. Ces résultats montrent que la contribution (en pourcentage) de la traînée visqueuse sur la traînée totale diminue avec l'augmentation de la vitesse. Cela est en accord avec les résultats obtenus par Bixler et al. (2007). Ces derniers indiquent que la traînée visqueuse représente 27% de la traînée totale pour une vitesse de 1,5m/s et 25% pour une vitesse de 2,25m/s en utilisant le modèle $k-\epsilon$ standard.

IV.3.6.c. Champs de pression statique et des contraintes

Nous représentons sur les figures IV-41 et IV-42 les contours de la pression statique et la contrainte pariétale pour trois valeurs de vitesses de la nageuse 1,4m/s, 2,2m/s et 3,1m/s.

Notons que ces champs sont des paramètres fondamentaux dans la natation de haut niveau.

- On identifie clairement les zones à gradients de pression négatifs et positifs. Des différences notables sont observées entre les vues de face et de dos de la nageuse.
- A mesure que la vitesse augmente les amplitudes, entre gradients de pression positifs et gradients négatifs, augmentent.

On voit notamment pour $V=3,1m/s$, les zones à fort gradient négatif, correspondant à des zones où l'écoulement est décollé, en accord avec les structures tourbillonnaires observées.

Ces résultats des pressions sont complétés par ceux relatifs aux contraintes pariétales. Ils montrent clairement le rôle joué par les zones dépressionnaires dans le processus de résistance à l'avancement (contraintes pariétales élevées).

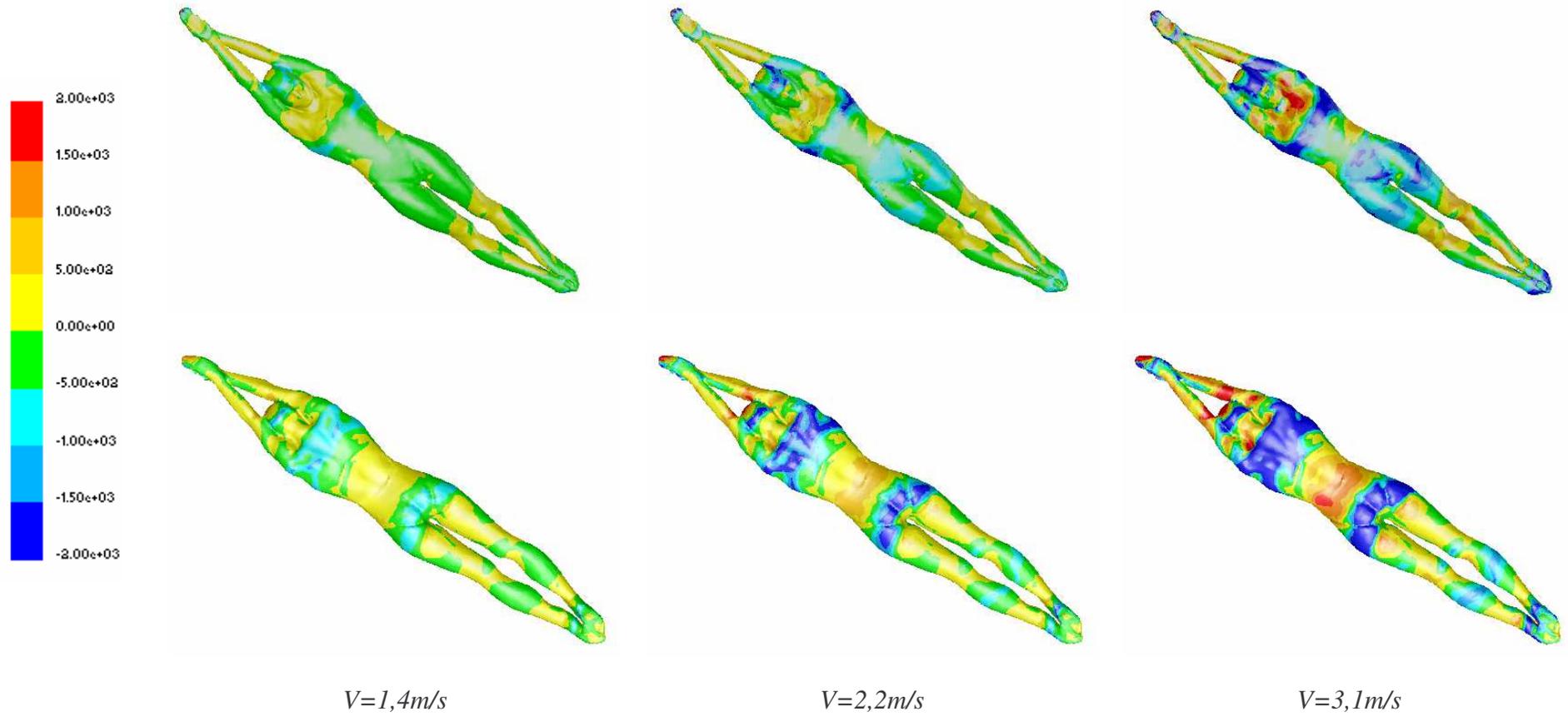


Figure IV- 41 : Pressions statiques en fonction de la vitesse (position 2)

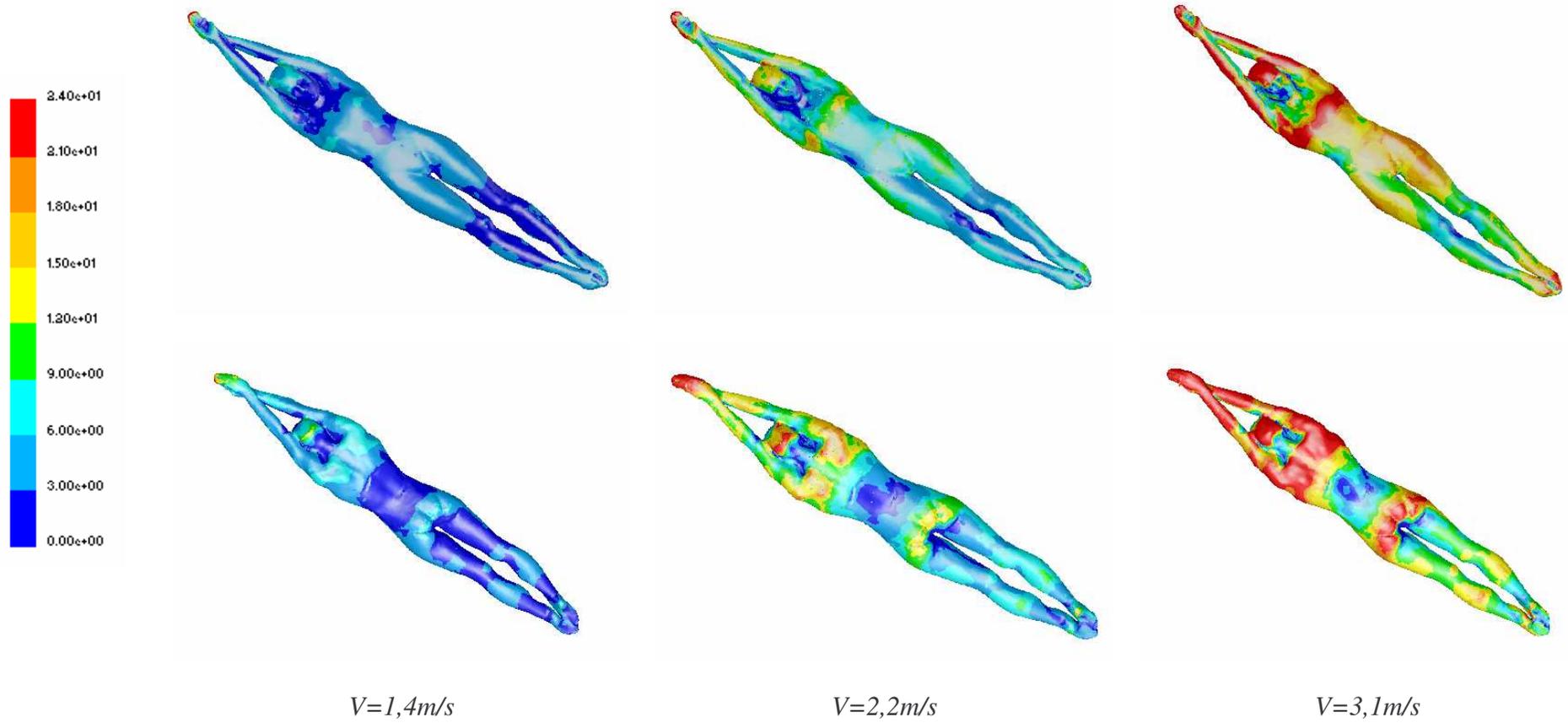
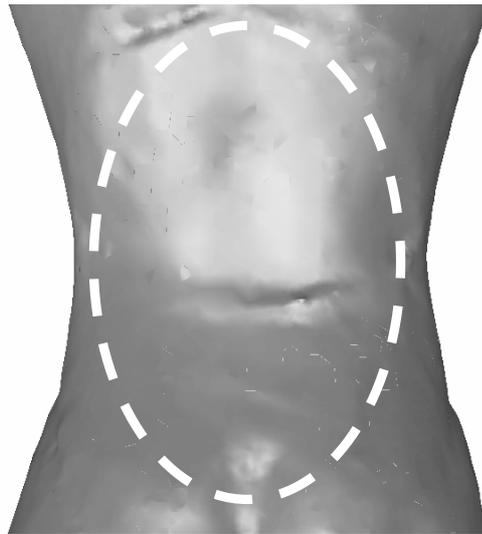


Figure IV- 42 : Champ de contrainte en fonction de la vitesse (position 2)

IV.3.6.d. Structures tourbillonnaires

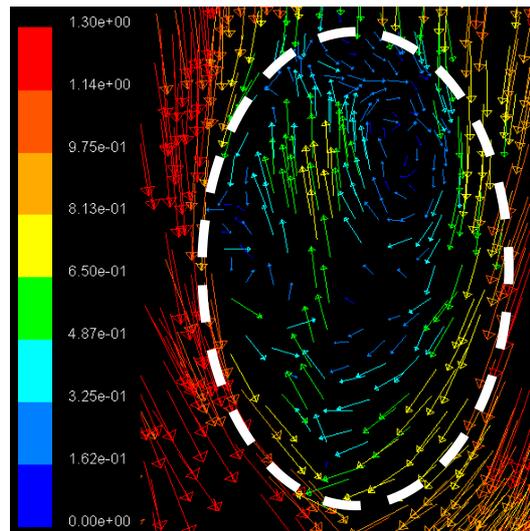
La simulation tridimensionnelle en utilisant le modèle géométrique réel du nageur a permis de capturer les structures tourbillonnaires visualisées durant les expériences réalisées au sein de l'INSEP. Ces structures ont été visualisées au niveau du dos et au niveau des fesses. Sur les figures IV-45 et IV-46, on présente une comparaison entre les structures tourbillonnaires obtenues par simulation numérique en utilisant le modèle $k-\omega$ standard et ceux obtenus par l'expérience de l'INSEP. On observe que le fluide, situé au niveau des deux zones tourbillonnaires le dos et les fesses, est animé d'un mouvement de rotation. Au niveau des fesses, on observe deux zones pariétales tourbillonnaires symétriques, caractéristiques de cellules contra-rotatives.



Zone de décollement de l'écoulement au niveau de dos de la nageuse

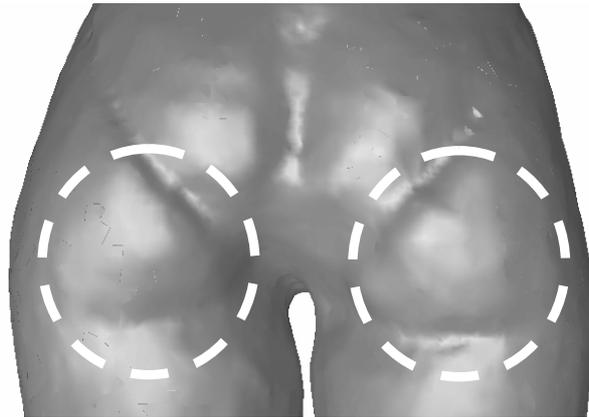


a) Structures tourbillonnaires au niveau du dos obtenues expérimentalement avec l'équipe de France de natation à l'INSEP

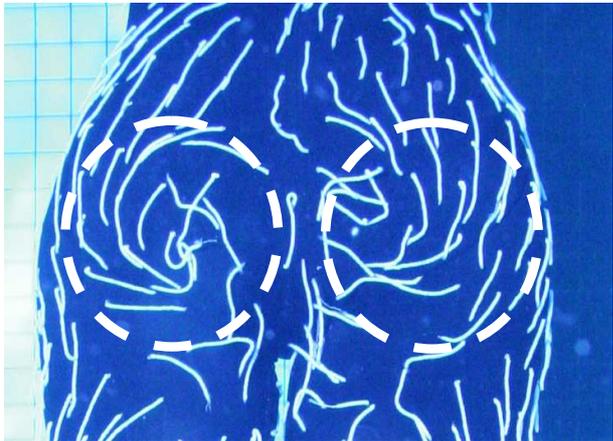


b) Vecteurs vitesses au niveau du dos de la nageuse colorés en fonction de l'amplitude de la vitesse

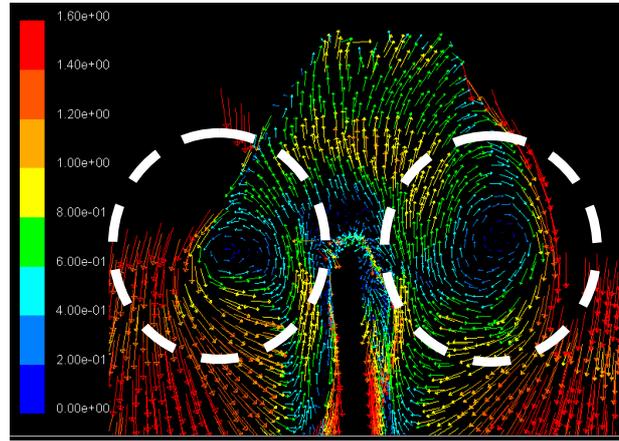
Figure IV- 43 : Comparaison entre les structures tourbillonnaires au niveau du dos obtenues par voies expérimentale et numérique ($V=2,2m/s$).



Zoom des zones de décollement au niveau des fesses de la nageuse



a) Structures tourbillonnaires obtenues expérimentalement avec l'équipe de France de natation à l'INSEP



b) Structures tourbillonnaires au niveau des fesses visualisées numériquement

Figure IV- 44 : Comparaison entre les structures tourbillonnaires au niveau des fesses obtenues par voies expérimentale et numérique ($V=2,2m/s$)

On montre sur la figure IV-46 l'écoulement fluide autour du corps du nageur pour une vitesse de $3,1m/s$. On observe que l'écoulement suit la forme du corps à l'exception des structures tourbillonnaires au niveau du dos et des fesses. Comme dans le cas bidimensionnel, on observe également une structure tourbillonnaire au niveau du cou, juste derrière la tête du nageur (figure IV-47).

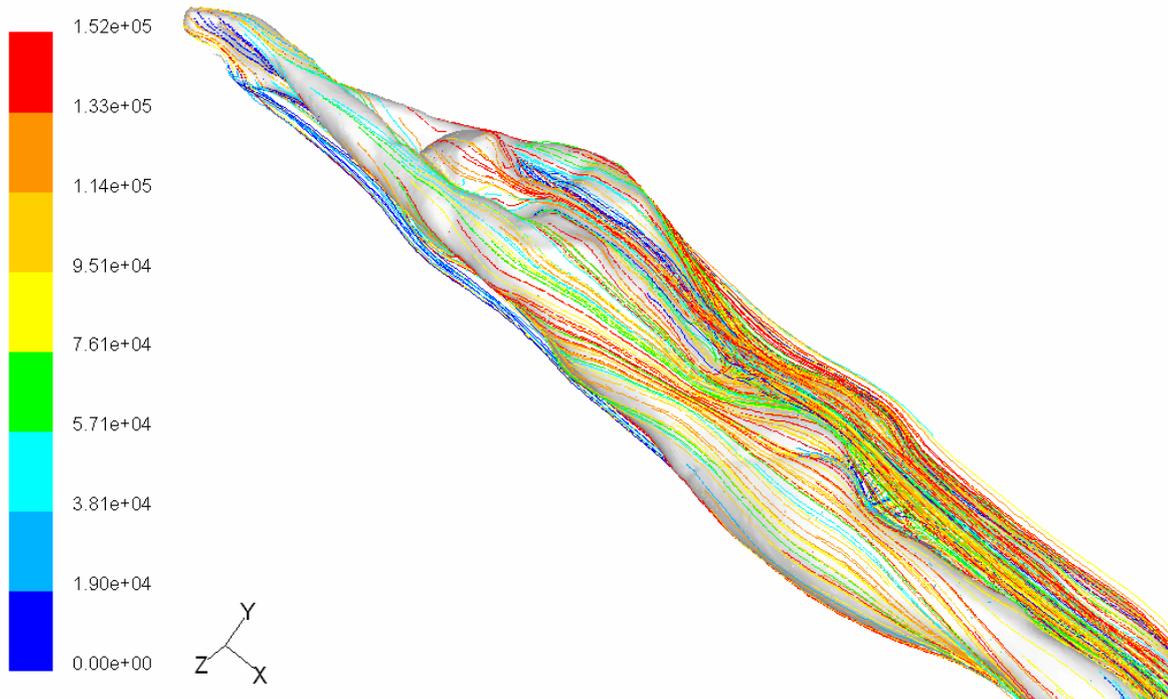


Figure IV- 45 : Lignes d'émission autour du corps du nageur colorées selon l'amplitude de la vitesse

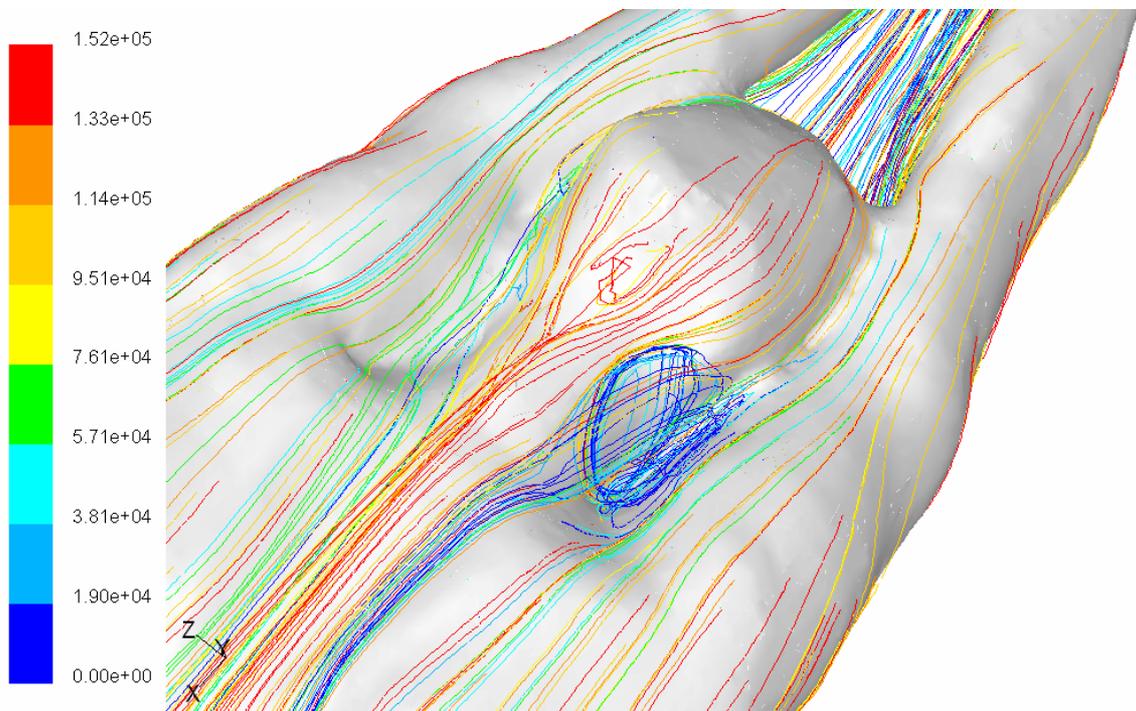


Figure IV- 46 : Structure tourbillonnaire au niveau du cou près de la tête

IV.3.7. Comparaison 2D-3D-expérience

La comparaison entre les résultats des études bidimensionnelle et tridimensionnelle réalisées sur Fluent[®] et expérimentale réalisée par Bixler et al. (2007), montre que l'étude en 2D a permis de capter les structures tourbillonnaires qui se développent autour du corps du nageur, mais elle ne permet pas d'évaluer les forces de résistances rencontrées par les nageurs. La figure IV-48 montre les forces de traînée totale calculées dans les cas bidimensionnel et tridimensionnel et celle obtenue expérimentalement par Bixler et al. (2007), en fonction de la vitesse.

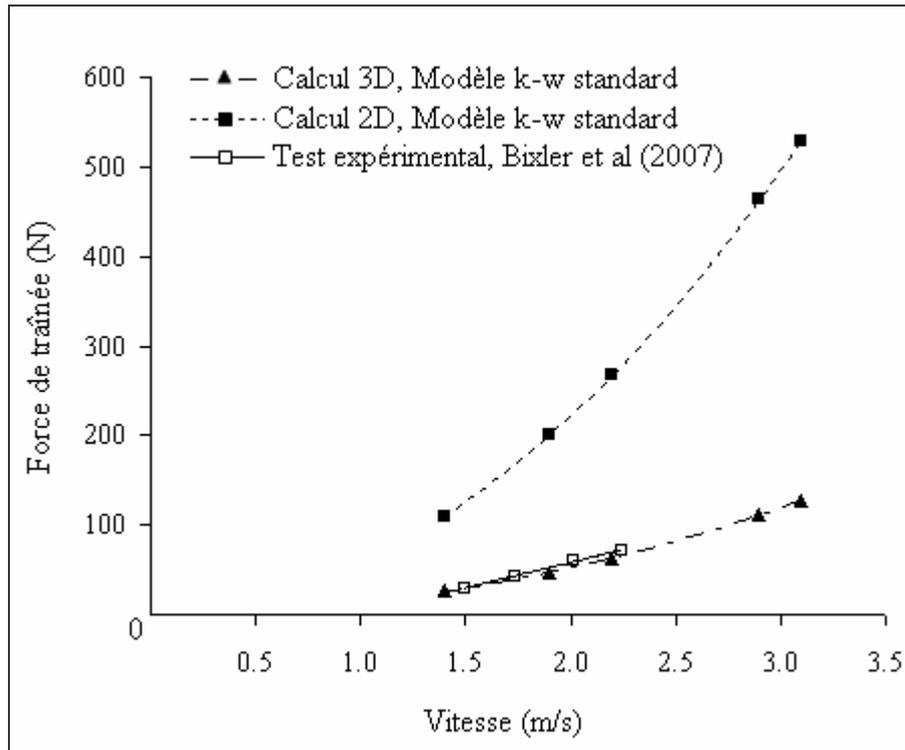


Figure IV- 47 : Comparaison entre l'étude numérique en 2D, 3D et expérimentale de Bixler et al. (2007).

On observe que les valeurs de force de traînée calculées dans le cas de l'étude bidimensionnelle sont beaucoup plus élevées que les valeurs calculées dans le cas de l'étude tridimensionnelle. On constate que l'approche bidimensionnelle n'est pas capable d'évaluer les forces de résistances rencontrées par les nageurs. Cela nous permet de conclure que le calcul en 3D est inévitable.

IV.4. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les résultats de l'étude numérique de l'écoulement autour du nageur pour les trois positions de la tête, relevée, alignée et baissée en utilisant le modèle de turbulence $k-\varepsilon$ standard. Ils ont permis de révéler que la position de la tête alignée avec l'axe du corps semble être la meilleure pour améliorer la performance hydrodynamique. Cette position offre moins de résistance en comparant avec la position de la tête baissée ou relevée.

Ensuite, l'effet du choix du modèle de turbulence sur les résultats numériques a été étudié dans le cas 2D et 3D. D'un point de vue qualitatif, la comparaison entre les structures tourbillonnaires visualisées expérimentalement à partir des essais réalisés à l'INSEP et obtenues numériquement en utilisant les différents modèles de turbulence a permis de constater que le modèle $k-\omega$ standard est le mieux adapté pour prédire la structure de l'écoulement fluide autour du corps des nageurs. D'un point de vue quantitatif, l'étude 3D a permis de renforcer ces résultats, elle montre que le modèle de turbulence $k-\omega$ standard est le meilleur pour calculer les forces de traînées rencontrées par les nageurs durant le déplacement dans le milieu fluide.

CHAPITRE V : ETUDE THERMIQUE

La deuxième partie de notre travail s'intéresse à l'aspect thermique de la natation. Elle comporte deux parties : une expérimentale et l'autre numérique. La partie expérimentale a été réalisée en utilisant la thermographie infrarouge. Elle s'intéresse à étudier l'influence du type de nage sur la distribution de température cutanée après un effort musculaire. Cette étude répond à une demande de la FFN de développer un outil permettant de quantifier la dépense énergétique de nageurs de haut niveau à partir d'un protocole de nage bien défini. La partie numérique a été réalisée en utilisant la méthode CFD. Elle concerne l'étude de l'effet d'un gradient thermique entre la température du nageur et l'eau du bassin sur la force de traînée rencontrée par le nageur durant son avancement dans le milieu fluide.

V.1. Etude expérimentale

Dans le domaine sportif, l'activité musculaire entraîne une augmentation de la température au niveau des différentes parties du corps humain. Cette augmentation varie selon la nature du mouvement effectué et selon les segments qui participent à l'effort durant l'activité sportive.

La natation, comme toute activité sportive, induit un processus de thermorégulation complexe où une partie de la chaleur est évacuée par la peau du nageur. Comme toute la chaleur produite ne peut pas être entièrement évacuée, il s'ensuit un échauffement musculaire se traduisant par une augmentation des températures cutanées. Cette étude est née de deux questions fort simples que nous nous sommes posés : quelle est la température de peau d'un nageur au cours de son activité et quelle est l'influence du type de nage sur les distributions des températures? Les réponses à ces questions sont d'importance dès lors qu'elles constituent les conditions aux limites thermiques dans la modélisation numérique de l'écoulement autour d'un nageur que nous verrons dans la deuxième partie de ce chapitre.

Un examen attentif de la littérature montre que les études s'intéressant à l'aspect thermique de la natation humaine sont très rares. Si, par exemple, Brandt et Pichowsky (1995) précisent une température du nageur de 33°C après exercice, il ne s'agissait que d'une mesure locale, donc très partielle, obtenue par thermocouple au niveau du muscle deltoïde. De même, Huttunen et al. (2000), ont étudié les variations de la température interne de nageurs de longues distances en eau froide de 10°C à 14°C . En aucun cas ils n'ont étudié la distribution de température cutanée. La thermographie infrarouge permet d'obtenir cette distribution.

Cette technique a été utilisée en thermique du vivant par Jansky et al. (2003). Ils ont étudié la variation de la température cutanée en fonction du temps après avoir immergé un être humain jusqu'au genou dans l'eau à la température de 12°C . Les enregistrements thermographiques sont effectués toutes les 5 ou 10min. Dans le domaine de la natation, aucune application n'est mentionnée dans la littérature.

Pour pallier ce manque de données, nous avons opté pour une acquisition globale des distributions de température, par thermographie infrarouge. Le but de cette étude expérimentale est donc d'une part, de montrer la faisabilité d'application de la thermographie IR à la natation et, d'autre part, de montrer dans quelle mesure les températures cutanées sont influencées par le style de nage pratiquée. Dans ce qui suit, nous allons présenter en premier lieu le matériel et la méthode utilisés, puis le protocole expérimental suivi et, en fin, les principaux résultats obtenus.

V.1.1. Matériels et méthodes

V.1.1.a. Le sujet

Le sujet ayant participé à cette étude est un nageur de niveau national spécialiste du 400m quatre nages s'entraînant en moyenne 10 à 12 heures/semaine. Ses données anthropométriques sont résumées sur le tableau V- 1.

	Age	Taille (m)	Masse (kg)	Masse grasseuse (%)
Nageur homme	19	1,78	67	12,4

Tableau V- 1 : Données anthropométriques du sujet

V.1.1.b. La décomposition corporelle

Pour mieux appréhender l'influence de style de nage sur l'échauffement musculaire, la surface cutanée du nageur a été divisée en surfaces polygonales fermées A, B, ..., J selon la distribution représentée sur la figure V-1. Les extrémités des membres et les régions articulaires, ayant une moindre participation au processus de thermorégulation corporelle, ont été exclues de ce découpage. Il est à préciser qu'un tel découpage permet d'approcher les géométries élémentaires (parallélépipèdes rectangles, tronçons,...) adoptées par Yanai (2001) dans la représentation du nageur à des fins de simulation numérique.

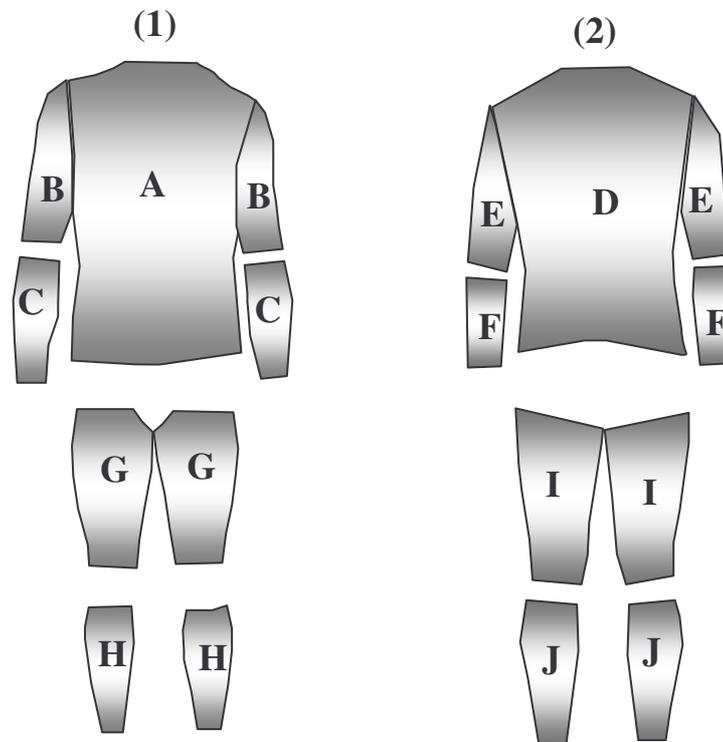


Figure V- 1 : Définition des zones corporelles frontales (1) et dorsales (2)

V.1.1.c. La caméra thermique

Les champs de températures cutanées du nageur ont été mesurés à l'aide d'une caméra thermique (FLIR, SC1000) sensible aux infrarouges courts dans la gamme de longueurs d'ondes comprises entre 3 et $5\mu\text{m}$. La figure V-2 montre la caméra infrarouge utilisée pour effectuer les acquisitions des champs de température.



Figure V- 2 : Caméra thermique infrarouge utilisée pour mesurer les températures cutanées du nageur

La peau humaine présentant une émissivité de 0,97 quel que soit son degré de pigmentation [Cohen (1977)], l'écart de température minimal détectable est inférieur à $0,1^{\circ}\text{C}$. Les images thermiques ont été prises à une distance de 4m du sujet. Quatre acquisitions successives permettent de cartographier la température cutanée du nageur ; le tronc et les membres supérieurs, puis les membres inférieurs sont étudiés, tant de face (A, B, C – G, H) que de dos (D, E, F – I, J).

V.1.1.d. Le protocole

L'expérimentation s'est déroulée le matin en bassin couvert de 25m. La température de l'eau du bassin a été mesurée à 27°C et celle de l'air ambiant à 24°C . La température du bassin est un paramètre important qui conditionne l'évolution de paramètres physiologiques comme par exemple la production de lactate ou la fréquence cardiaque [Mougios et Deligiannis (1993)] qui ont une incidence directe sur le processus de thermorégulation corporelle. Une analyse menée par Robinson et Sommers (1971) a montré qu'en natation, la température optimale de l'eau pour 20minutes de nage libre doit être comprise entre 21°C et 33°C , avec un seuil de rentabilité optimale à 29°C . Cette valeur est légèrement supérieure à celle que nous avons mesurée en bassin, 27°C .

Le protocole expérimental résumé sur le tableau V-2 est défini comme suit : dans un premier temps, le nageur est immergé dans l'eau du bassin, sans aucun mouvement, jusqu'au cou. Au bout de 10min, il sort de l'eau puis est séché très rapidement (l'eau est opaque à l'infrarouge). On effectue alors la première cartographie thermique de la surface corporelle, qui constitue le niveau de référence thermique du nageur au repos. Le nageur effectue ensuite son premier 100m nage papillon, sort de l'eau, est séché puis est soumis à la deuxième séance d'acquisition thermique, fournissant la cartographie des températures corporelles après la nage papillon. Une fois ces thermographies obtenues, le nageur s'immerge de nouveau dans l'eau. La durée entre deux séries de nage est suffisamment longue (10 minutes) pour permettre un retour à l'équilibre thermique du nageur. Ce cycle se produit ainsi pour les trois autres

nages. Il est à préciser que le nageur testé était dans une période de récupération par rapport à son programme d'entraînement, ce qui explique les résultats moyens obtenus durant le test des 4x100m quatre nages, départ dans l'eau.

	Mise à l'équilibre thermique	100m nage papillon	Retour équilibre	100m nage dos	Retour équilibre	100m nage brasse	Retour équilibre	100m nage de crawl	Fin de test
Durée des séquences	10'	1'03	10'	1'08	10'	1'22	10'	1'03	-

	x	x	x	x	x
Acquisition thermique	(référence)				

Chronologie du test →

Tableau V- 2 : Protocole mise en place

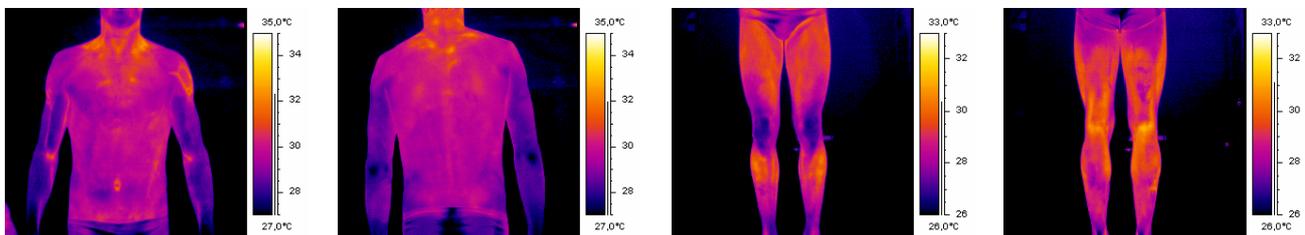
V.1.1.e. Utilisation du logiciel ThermaCAMResearcher99

Le logiciel ThermaCAM Researcher 99 est utilisé pour le traitement des données et les acquisitions numériques sauvegardées auparavant lors des expériences sous format de cartes thermiques. Ce logiciel permet de connaître la température à chaque point du corps ou sur une zone quelconque. Pour ce faire, il suffit juste d'entourer la zone pour laquelle on souhaite connaître la température moyenne. Pour toutes les acquisitions effectuées, la température moyenne a été calculée pour les zones A, B, C, D, E, F, G et H au repos et après la nage, pour chaque style de nage.

V.1.2. Résultats et discussion

V.1.2.a. Température de référence

On présente sur la figure V-3 les cartographies infrarouges établies au repos pour les membres supérieurs et inférieurs du nageur, après que le nageur eut séjourné 10min dans l'eau du bassin à 27°C.



a) Thermographies au repos des membres supérieurs

b) Thermographies au repos des membres inférieurs

Figure V- 3 : Thermographies des membres supérieurs et inférieurs lorsque le nageur est au repos

A partir de ces cartographies et en utilisant le logiciel ThermaCAM Researcher 99, les températures au repos ont été calculées pour les zones A, B, C, D, E, F, G et H définies sur la figure V-1. On présente sur la figure V-4 l'historique des températures cutanées du nageur au repos pour les différentes parties du corps. Ces températures constituent le cas de référence de l'étude.

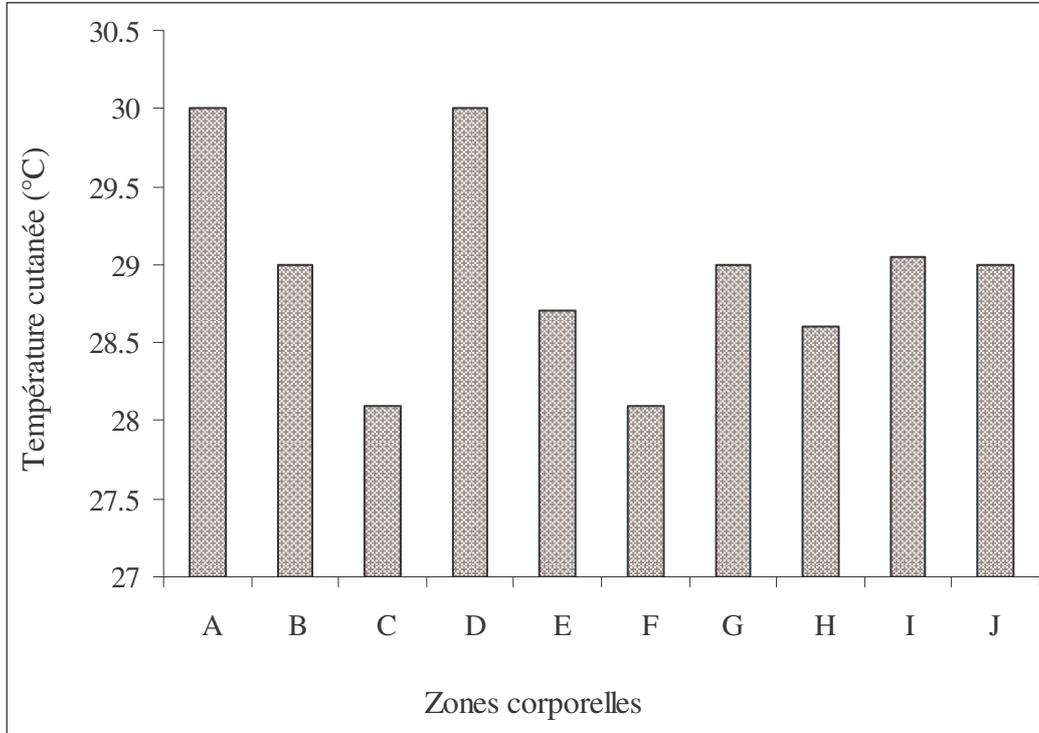


Figure V- 4 : Température de référence du nageur au repos

Il apparaît des disparités dans les distributions de température moyenne des zones ; les plus élevées correspondent aux zones les plus proches des organes vitaux du nageur (abdomen, torse, dos), alors que les plus faibles relevées se trouvent être les avant-bras du nageur. L'écart maximal noté entre la température la plus élevée et la température la plus basse est de l'ordre de 1,7°C.

V.1.2.b. Température après l'effort : influence de style de nage

Les différentes cartographies infrarouges établies pour les quatre nages selon le protocole défini précédemment sont présentées sur les figures V-5 et V-6.

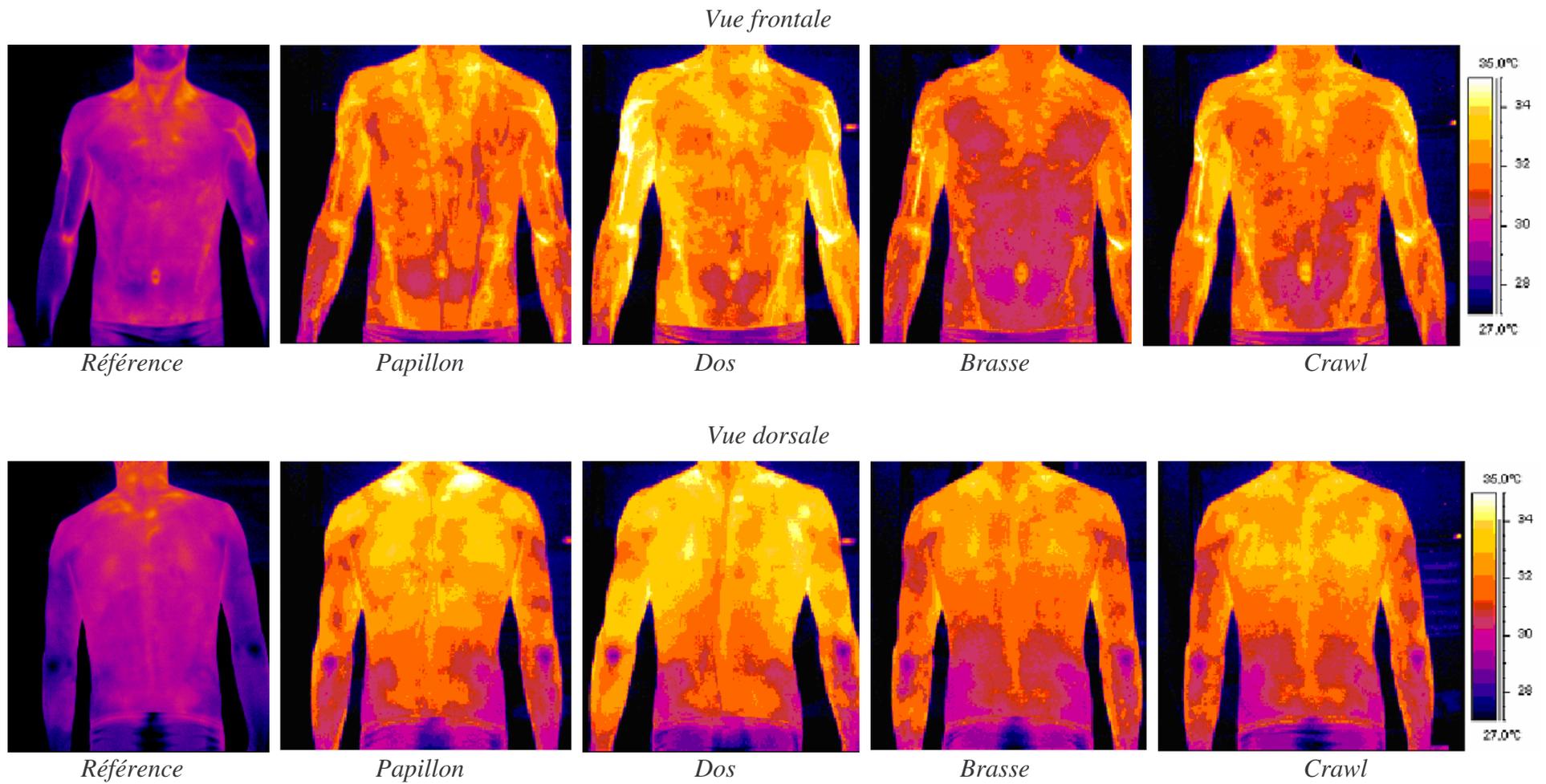
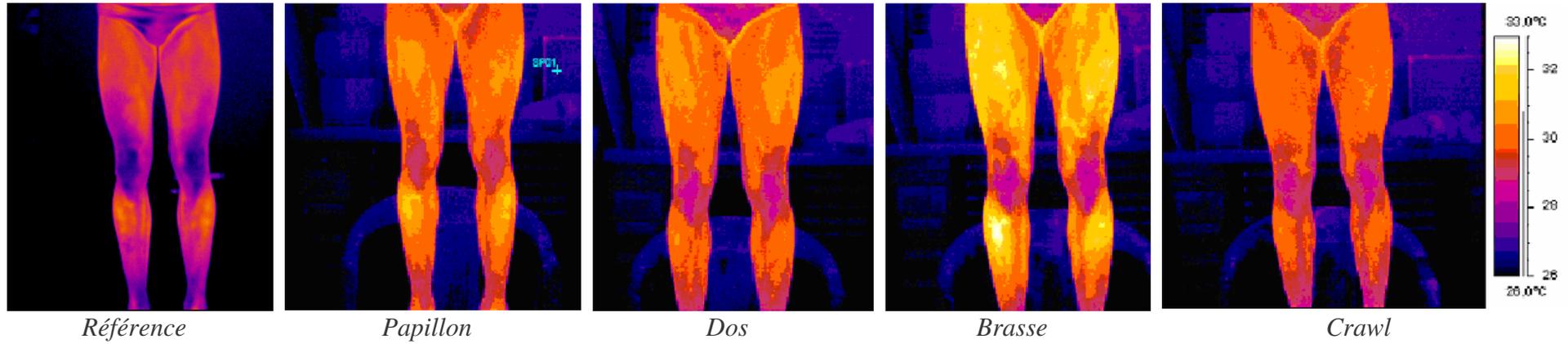


Figure V- 5 : Thermographies de la partie supérieure du corps pour différentes nages

Vue frontale



Vue dorsale

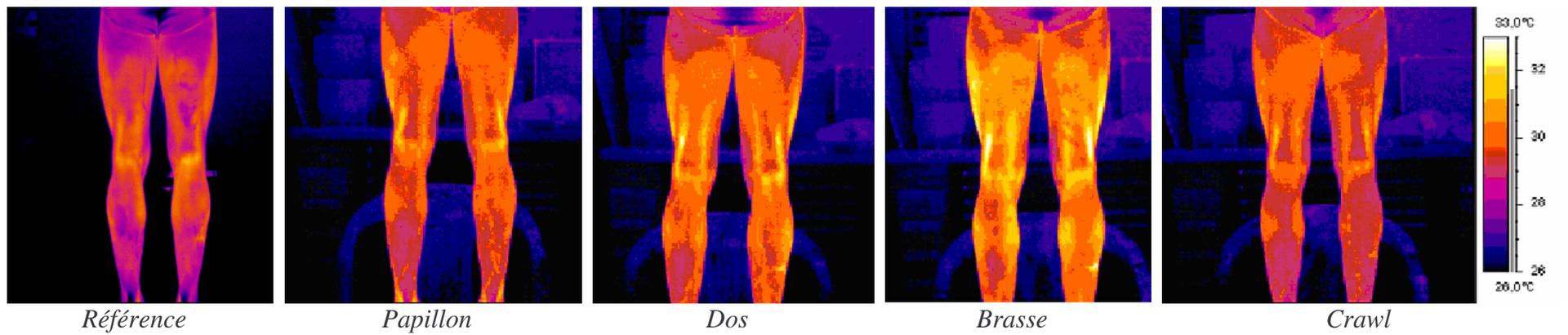


Figure V- 6: Thermographies de la partie inférieure du corps pour différentes nages

On constate des différences notables qui apparaissent sur les différentes images, laissant présager une influence non négligeable du style de nage sur les distributions des températures cutanées.

Afin de quantifier cette influence, on introduit l'écart de température moyenne ΔT défini comme étant la différence entre la température mesurée après effort et celle du repos. Sur la figure V-7 sont fournis les histogrammes correspondants.

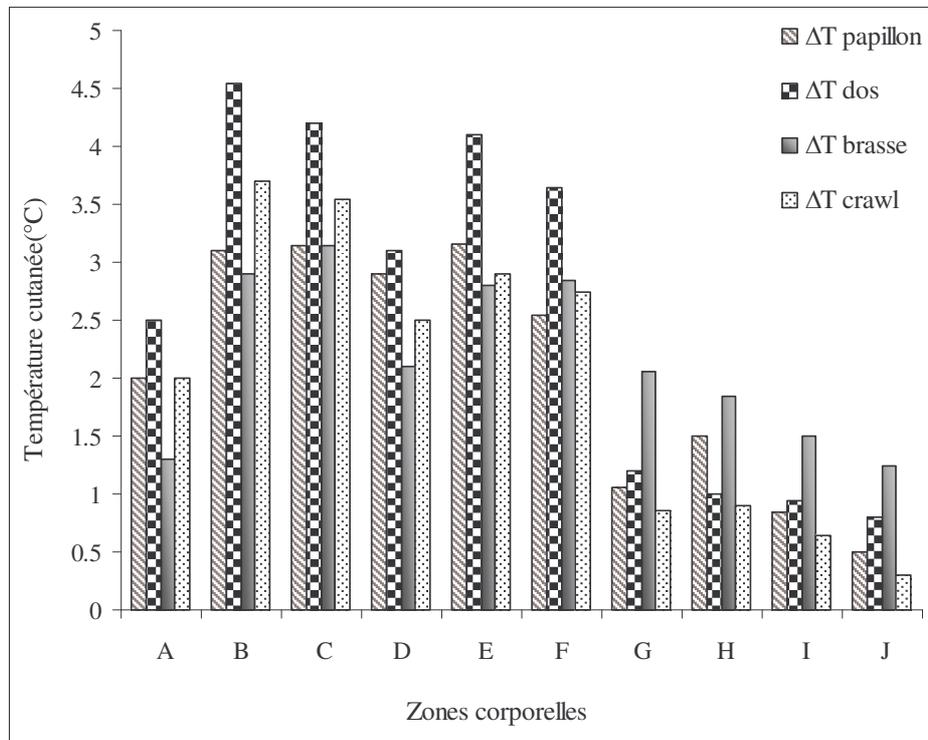


Figure V- 7 : Influence de type de nage sur les écarts de température mesurés après effort et au repos

On observe une augmentation significative de la température cutanée selon le style de nage et selon la zone corporelle considérée. En effet, il apparaît que la température la plus élevée est atteinte dans la partie supérieure du corps correspondant aux zones A, B, C, D, E, F pour la nage "Dos" avec $2,50 \pm 0,10 \leq \Delta T \leq 4,55 \pm 0,10$ alors qu'au niveau des zones G, H, I, J correspondant aux membres inférieurs, c'est la nage "Brasse" qui génère les plus fortes augmentations de la température cutanée avec $1,25 \pm 0,10 \leq \Delta T \leq 2,05 \pm 0,10$. A contrario, c'est la nage "Crawl" qui induit les plus faibles écarts de température sur les membres inférieurs avec $0,30 \pm 0,10 \leq \Delta T \leq 0,90 \pm 0,10$. Ces résultats sont en adéquation avec l'intensité de l'activité musculaire liée au type de nage. Les tableaux V-3 et V-4 récapitulent les résultats trouvés pour les membres supérieurs et inférieurs.

	Zone A	Zone B	Zone C	Zone D	Zone E	Zone F
ΔT max	Dos	Dos	Dos	Dos	Dos	Dos
ΔT min	Brasse	Brasse	Brasse Papillon	Brasse	Brasse	Papillon

Tableau V- 3 : Type de nage induisant une différence de température maximale et minimale pour les membres supérieurs

	Zone G	Zone H	Zone I	Zone J
ΔT max	Brasse	Brasse	Brasse	Brasse
ΔT min	Crawl	Crawl	Crawl	Crawl

Tableau V- 4 : Type de nage induisant une différence de température maximale et minimale pour les membres inférieurs

V.1.2.c. Température cutanée globale

Après avoir calculé toutes les températures moyennes pour toutes les zones corporelles définies précédemment pour chaque style de nage, nous nous sommes intéressés maintenant à définir la température cutanée globale $T_{Globale}$ calculée sur l'ensemble des zones corporelles. Elle est définie par la relation suivante:

$$\bar{T}_{Globale} = \frac{\sum_{i=A}^J T_i S_i}{\sum_{i=A}^J S_i} \quad (V- 1)$$

Où :

S_i est le nombre de pixels définissant chaque zone polygonale,

T_i est la température moyenne pour chaque zone.

Le tableau (V-5) fournit les températures cutanées globales obtenues pour chaque style de nage.

	Papillon	Dos	Brasse	Crawl
$\bar{T}_{Globale}$ (°C)	31,73 ± 0,10	32,14 ± 0,10	31,43 ± 0,10	31,58 ± 0,10

Tableau V- 5 : Température cutanée totale pour les quatre types de nage

A partir des résultats du tableau V-5, on peut constater que la température cutanée moyenne du nageur varie en fonction du style de nage. On constate que la température cutanée moyenne la plus élevée établie sur l'ensemble des secteurs choisis correspond au cas de nage "Dos" qui semble être, pour notre étude, la plus exigeante d'un point de vue énergétique. La température la plus basse correspond au cas de nage "Brasse" qui semble globalement la moins coûteuse énergétiquement. La différence de température induite par la pratique de ces deux nages est, dans le cas présent et selon le protocole établi, de $0,78^{\circ}\text{C} \pm 0,10$. La figure V-8

présente l'écart sur la température moyenne globale, calculée après effort pour chaque style de nage.

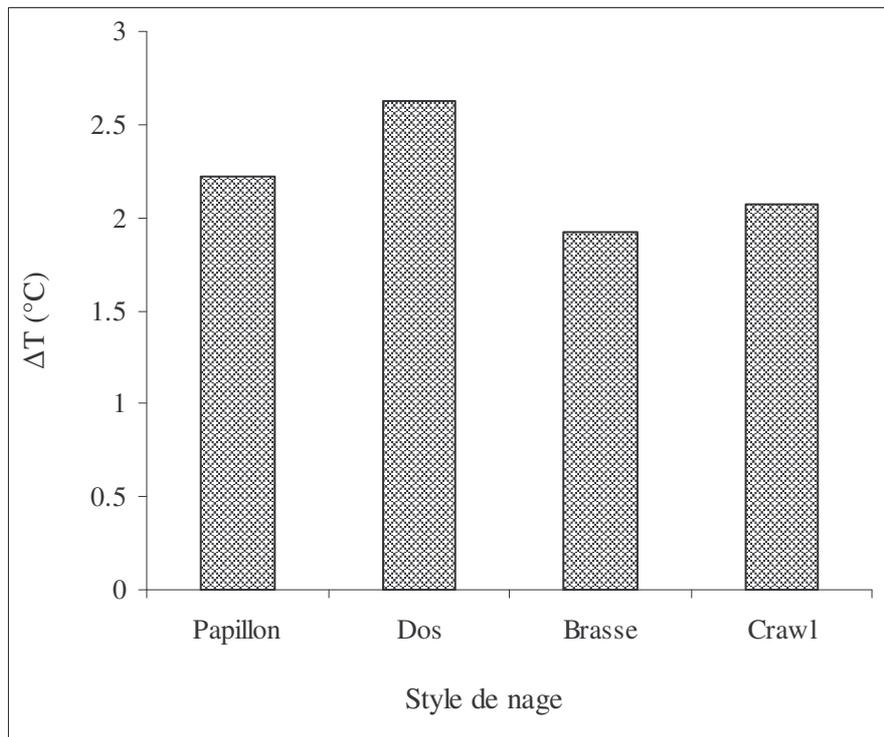


Figure V- 8 : Augmentation de la température corporelle moyenne après effort pour les quatre nages

On constate, à partir du dépouillement des thermographies infrarouges, que les températures moyennées sur l'ensemble de la surface cutanée ont, par rapport à la situation de repos, augmenté respectivement de $2,16^{\circ}\text{C}$ pour la nage papillon, $2,56^{\circ}\text{C}$ pour le Dos, $1,78^{\circ}\text{C}$ pour la Brasse et $2,00^{\circ}\text{C}$ pour le Crawl, après le test pratiqué.

Les travaux de Holmer (1974) réalisés dans le bassin expérimental de Stockholm mirent en évidence, à une vitesse donnée, d'importantes différences de coût énergétique entre les quatre styles de nage : les techniques à cycles locomoteurs alternatifs (crawl et dos) étant plus économiques que les techniques à cycles simultanés (papillon et brasse). Ces résultats ont par la suite été confirmés par Lavoie & Montpetit (1986).

On rappellera que nos résultats ne peuvent, en aucun cas, être comparés à ceux de Holmer (1974) et de Lavoie & Montpetit (1986), établis statistiquement sur la base de protocoles expérimentaux différents.

V.2. Etude numérique

V.2.1. Introduction

En natation, la force de traînée rencontrée lors du déplacement du nageur dans le milieu aquatique varie sensiblement avec la température de l'eau du bassin. Dans la littérature, les travaux ayant trait à l'aspect thermique de la natation sont très rares. Parmi les travaux effectués dans ce domaine, on peut citer ceux réalisés par Jiskoot, J. & Clarys, J.P. (1975), afin d'étudier l'effet de la température sur la traînée. Ces derniers ont mesuré la résistance

rencontrée lors des déplacements des nageurs pour les vitesses suivantes : $1,6\text{m/s}$, $1,7\text{m/s}$, $1,8\text{m/s}$ et $1,9\text{m/s}$ et pour deux températures de bassin différentes, 18°C et 24°C . Ils ont trouvé que la résistance diminue d'une façon significative avec l'augmentation de la température. Une autre étude a été effectuée par Clarys (1979), en tractant des nageurs pour différentes températures de l'eau du bassin et pour différentes vitesses. Il a trouvé que l'augmentation de la température cause la diminution de la traînée car la densité et la viscosité du fluide diminuent.

Récemment, un travail analytique a été réalisé par Polidori et al. (2006) dans le but de connaître l'effet du gradient thermique entre la peau d'un nageur et l'eau du bassin sur la traînée visqueuse en utilisant un modèle théorique. Dans cette étude, le nageur est assimilé à une plaque plane de température 33°C effectuant une coulée subaquatique à une vitesse constante. La température de bassin varie de 20°C à 30°C avec un incrément de 2°C . Cette étude a montré que quelle que soit la vitesse du nageur, une réduction de la traînée visqueuse de $5,3\%$ est possible en régime laminaire avec l'augmentation du gradient thermique. Par contre, en régime turbulent, la traînée visqueuse dépend principalement de la vitesse de la nage ; une réduction jusqu'au $1,5\%$ peut être atteinte pour des vitesses supérieures à 1 m/s (figure V-9).

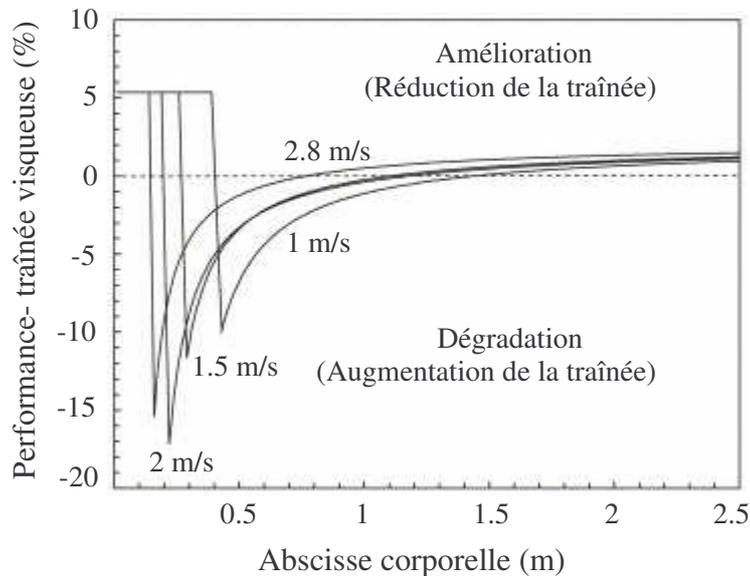


Figure V- 9 : Amélioration de la traînée visqueuse d'après Polidori et al (2006).

L'objectif de cette partie numérique est d'étudier, en utilisant la méthode CFD, l'effet du gradient thermique entre la peau d'un nageur et l'eau du bassin sur la force de traînée rencontrée lors du déplacement des nageurs de haut niveau dans le milieu aquatique. D'après l'examen attentif dans la littérature, c'est la première fois qu'une étude numérique s'intéresse à l'aspect thermique de la natation humaine.

V.2.2. Simulation numérique

V.2.2.a. Géométrie et maillage

L'étude numérique a été effectuée dans le cas bidimensionnel. La position choisie de la nageuse correspond à la tête alignée avec l'axe du corps en gardant les mains en extension

(Figure V-10). Cette position a été choisie puisqu'elle correspond à celle qui offre le moins de résistance d'après les résultats de l'étude réalisée en 2D. Le maillage utilisé est le même que celui construit dans l'étude dynamique 2D.



Figure V- 10 : Géométrie choisie de la nageuse pour l'étude thermique correspond à la tête alignée avec l'axe du corps

V.2.2.b. Conditions aux limites

Les conditions aux limites choisies sont les mêmes que dans le cas bidimensionnel isotherme à l'exception de la température du nageur et du fluide qui ont été rajoutées.

- À l'entrée du domaine fluide
Une vitesse horizontale selon l'axe x constante. Deux températures du fluide ont été considérées : 20°C et 30°C . Les caractéristiques du fluide à l'entrée du domaine de calcul (température, masse volumique, viscosité dynamique et nombre de Prandtl) sont récapitulées dans le tableau V-6.
- À la sortie
La condition de conservation du débit a été imposée.
- Sur les frontières supérieure et inférieure du domaine fluide
La condition de symétrie a été imposée
- La surface du nageur a été définie comme une paroi lisse à une température égale à 33°C . Les deux composantes de vitesses sont nulles.

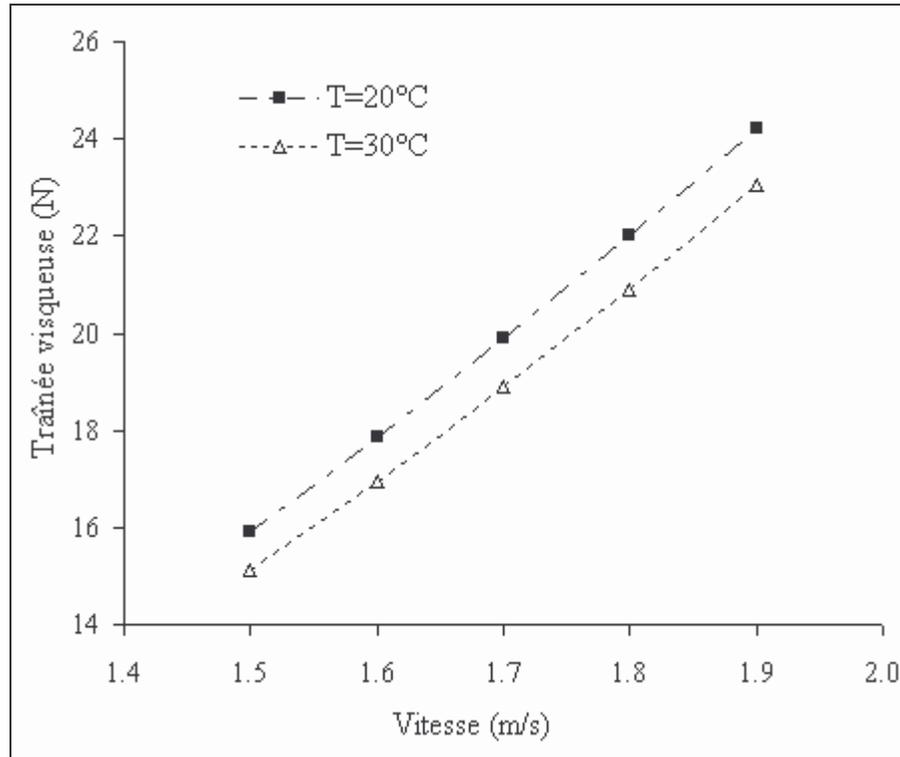
Le tableau ci-dessous récapitule les propriétés du fluide pour les deux températures étudiées 20°C et 30°C .

Température de l'eau ($^{\circ}\text{C}$)	Température de la nageuse ($^{\circ}\text{C}$)	Masse volumique (kg/m^3)	Viscosité dynamique ($\text{Kg}/\text{ms}) \times 10^{-3}$	Nombre de Prandtl
20	33	998,0	1,002	7,01
30	33	996,0	0,798	5,42

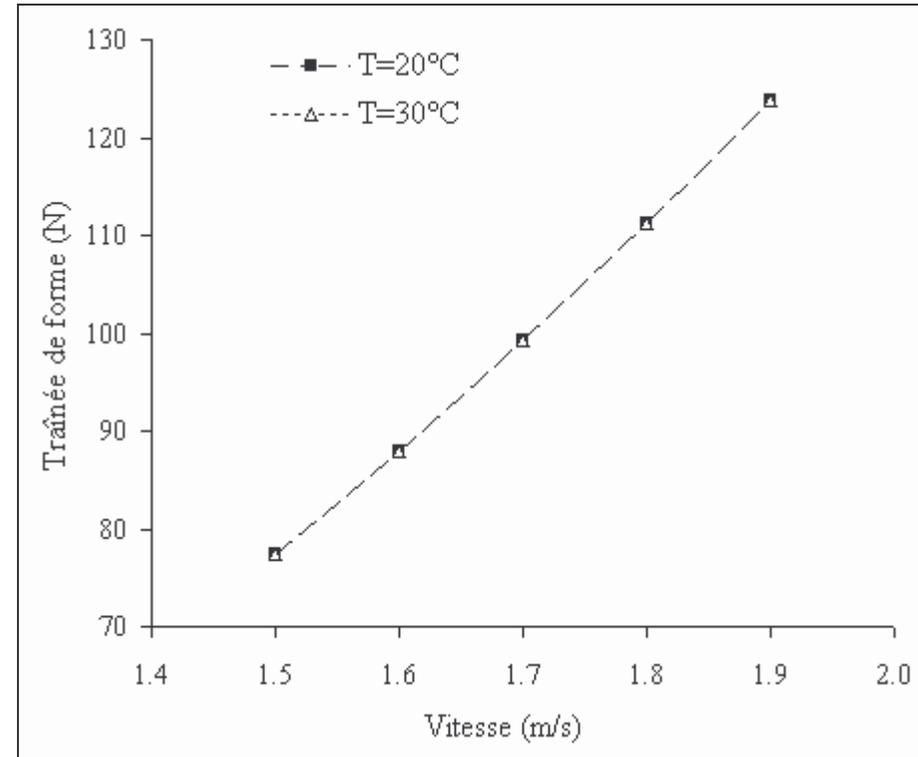
Tableau V- 6 : Propriétés de l'eau pour les températures étudiées

V.2.3. Résultats et discussion

La simulation numérique a été réalisée pour deux températures différentes de l'eau de bassin 20°C et 30°C . Pour chacune des températures cinq calculs ont été lancés qui correspondent aux vitesses suivantes $1,5\text{m/s}$, $1,6\text{m/s}$, $1,7\text{m/s}$, $1,8\text{ m/s}$, $1,9\text{m/s}$. Sur les figures V-11 et V12 sont représentées les évolutions de la traînée visqueuse, la traînée de forme et la traînée totale en fonction de la vitesse pour les températures 20°C et 30°C .



a) Traînée visqueuse



b) Traînée de forme

Figure V- 11 : Evolution des deux traînées en fonction de la vitesse et pour deux températures d'eau de bassin (20°C et 30°C)- (a) traînée visqueuse (b) traînée de forme

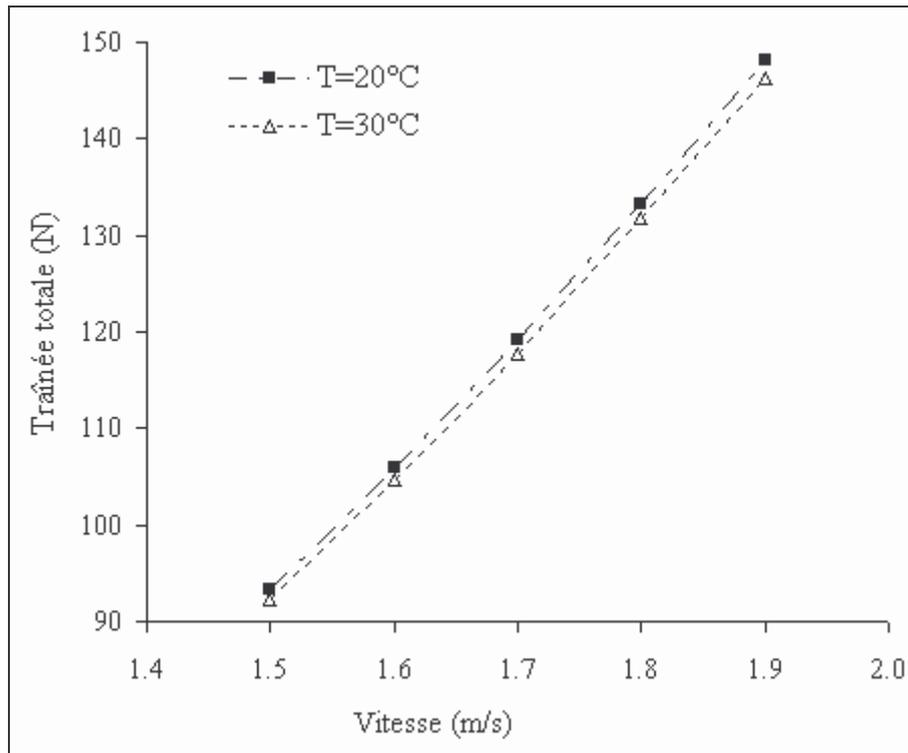


Figure V- 12 : Evolution de la traînée totale en fonction de la vitesse pour les deux températures d'eau de bassin (20°C et 30°C)

On observe d'après les figures V-11 et V-12 que la traînée visqueuse varie avec la température du bassin alors que la traînée de forme reste presque constante. On observe aussi que la traînée visqueuse et la traînée totale diminuent avec l'augmentation de la température de l'eau pour la gamme de vitesse étudiée. Cela est en accord avec les résultats trouvés par Jiskoot & Clarys (1975) et Clarys (1979). En outre, pour ce qui est de la traînée visqueuse, ce résultat est en cohérence avec la diminution de la viscosité de l'eau et avec l'augmentation de la température. En revanche, la traînée de forme semble insensible à la variation de température. Donc, on conclut qu'en phase de coulée subaquatique, une augmentation de la température du bassin permet une diminution de la résistance totale rencontrée par les nageurs et par conséquent une amélioration de la performance.

La figure V-13 représente les évolutions des forces de traînées visqueuse, de forme et totale en fonction de la vitesse pour la température de 20°C. La même allure a été trouvée pour la température de 30°C.

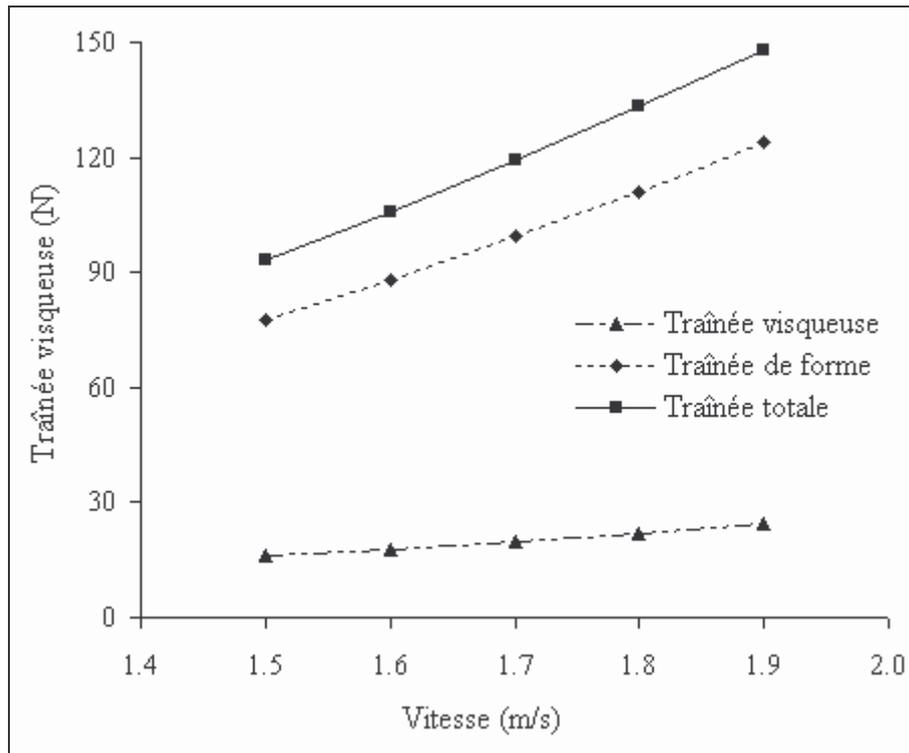


Figure V- 13 : Evolution des traînées visqueuse, de forme et totale en fonction de la vitesse de nage pour une température 20°C.

On constate que les deux composantes de la traînée augmentent avec l'augmentation de la vitesse. La comparaison entre les valeurs des deux traînées montre que la traînée de forme est dominante par rapport à la traînée visqueuse et cela pour toutes les vitesses et les températures étudiées. A titre d'exemple, pour une température de 30°C et une vitesse de 1,9m/s la traînée de forme représente 84,3% de la traînée totale tandis que la traînée visqueuse ne représente que 15,7%.

On constate également que les deux composantes de la traînée, visqueuse et de forme, augmentent de la même manière avec la l'augmentation de la vitesse. On note une augmentation de 59% de la traînée de forme et de 52% et de la traînée visqueuse lorsque la vitesse augmente de la valeur 1,5m/s à 1,9m/s.

Vu la faible sensibilité de la traînée de forme à la température et dans le but de mieux illustrer l'effet de la température sur la résistance à l'avancement, on s'intéresse plus particulièrement à la traînée visqueuse. On présente sur la figure V-14 le gain de la traînée visqueuse pour une augmentation de la température de l'eau de 20°C à 30°C en fonction de la vitesse.

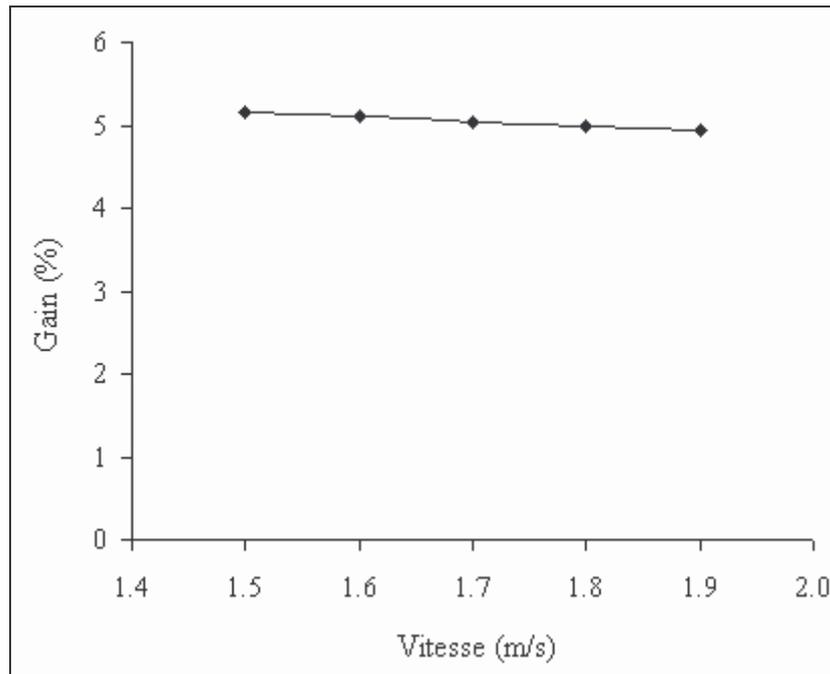


Figure V- 14 : Gain de traînée visqueuse en fonction de la vitesse pour les deux températures étudiées 20°C et 30°C.

On constate qu'une augmentation de la température du bassin de 10°C permet un gain de traînée visqueuse de l'ordre de 5%. Ce dernier diminue légèrement avec l'augmentation de la vitesse, sa valeur passant de 5,16% pour la vitesse de 1,5m/s à 4,93 % pour une vitesse de 1,9m/s. Cela correspond un gain de 1,2% de la traînée totale.

V.3. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons traité (expérimentalement et numériquement) l'aspect thermique de la natation. Dans la première partie, nous avons étudié à partir d'une étude expérimentale préliminaire, d'une part, la faisabilité d'utilisation de cartographies de température IR dans la discipline de la natation et, d'autre part, l'influence du type de nage (dans le cadre d'un protocole bien défini) sur les distributions de températures cutanées. En particulier, cette étude montre des variations significatives de la température cutanée selon le type de nage. Dans la deuxième partie de ce chapitre, nous avons étudié numériquement l'influence du gradient thermique entre l'eau du bassin et la température cutanée du nageur sur la traînée visqueuse, la traînée de forme et la traînée totale rencontrées par le nageur lors de son déplacement dans le milieu fluide. Les résultats des simulations montrent que la traînée visqueuse varie significativement en fonction de la température alors que la traînée de forme reste presque constante. Cette étude montre ainsi qu'un gain de l'ordre de 5% sur la traînée visqueuse est possible en augmentant la température de l'eau de 20°C à 30°C, ce qui correspond à un gain d'environ 1,2% sur la traînée totale. On conclut que l'influence de la traînée visqueuse reste prépondérante quand il s'agit de considérer les effets thermiques (gradients de température nageur/eau du bassin).

CONCLUSION GENERALE

L'objectif principal de ce travail a été l'étude de l'écoulement autour des nageurs de haut niveau en vue d'améliorer leur performance hydrodynamique. La plus grande partie de cette étude a été consacrée à la simulation numérique réalisée par le logiciel Fluent[®]. La procédure de simulation numérique a été validée par une comparaison avec l'expérience dans le cas de l'écoulement laminaire autour d'un profil NACA0012 à une incidence de 34° et à un nombre de Reynolds égal à 1000. A cause de la difficulté rencontrée lors de la construction du modèle géométrique du nageur, l'étude a été réalisée, dans un premier temps, dans le cas bidimensionnel, puis, dans le cas tridimensionnel.

L'étude expérimentale réalisée à l'INSEP en utilisant la technique des fils de laine a permis de visualiser la structure de l'écoulement autour des nageurs. Des structures tourbillonnaires ont été visualisées au niveau du dos et au niveau des fesses. Ces structures sont à l'origine du développement de la traînée hydrodynamique. Cette expérience a été de très grande importance pour l'étude numérique. Elle a permis de sélectionner le modèle de turbulence le mieux adapté pour étudier numériquement la structure de l'écoulement et évaluer les forces de résistance rencontrées par le nageur.

Ce travail nous permet de conclure que le modèle de turbulence $k-\varepsilon$ standard le plus utilisé en natation n'est capable ni de prédire les structures tourbillonnaires, visualisées expérimentalement à l'INSEP qui se développent autour du corps du nageur, ni d'évaluer les forces de résistance rencontrées par le nageur. En revanche, nous avons pu démontrer la capacité du modèle $k-\omega$ standard à identifier les structures tourbillonnaires qui se développent au niveau des différentes parties du corps, à savoir autour de la tête, au niveau du dos et des fesses. En utilisant ce même modèle, ces structures ont été obtenues dans les cas bidimensionnel et tridimensionnel. Par contre, la taille de la structure tourbillonnaire au niveau de dos a été largement sous-estimée dans le cas bidimensionnel.

La présente étude s'est également intéressée à l'influence de la taille du domaine fluide autour de nageur sur l'évaluation des forces de résistances rencontrées. Il semble que les forces de résistance augmentent avec la diminution de la taille du domaine fluide. Cette conclusion est basée sur une comparaison effectuée entre nos résultats numérique et ceux obtenus par Bixler et al. (2007) en utilisant le même modèle de turbulence $k-\varepsilon$ standard.

Le passage de la simulation 2D vers celle 3D augmente énormément le coût en temps de calcul ; cependant elle permet d'estimer avec une bonne précision, en utilisant le modèle $k-\omega$ standard, les forces de résistance opposées par le fluide à l'avancement du nageur. Les valeurs de force obtenues dans le cas bidimensionnel sont beaucoup plus élevées par rapport à celles obtenues dans le cas tridimensionnel et ce, quel que soit le modèle de turbulence utilisé $k-\varepsilon$ ou $k-\omega$ standard.

D'un point de vue qualitatif, on conclut que l'étude bidimensionnelle est suffisante puisqu'elle a permis de capter les structures tourbillonnaires visualisées expérimentalement autour du nageur. En revanche, d'un point de vue quantitatif, elle n'est pas capable de prédire les forces de résistance. De ce fait, l'étude tridimensionnelle est indispensable afin d'évaluer les forces de résistance rencontrées par le nageur.

L'effet de la position de la tête sur la résistance rencontrée par les nageurs a été étudié dans le cas 2D en utilisant les deux modèles de turbulence $k-\varepsilon$ ou $k-\omega$ standard. Trois positions ont été testées ; tête relevée, alignée et baissée par rapport à l'axe du corps. Les résultats de cette étude montrent que la position de la tête alignée offre moins de résistance que les positions

relevée et baissée. Cette étude permet de conclure que la performance hydrodynamique d'un nageur dépend fortement de la position de son corps. Le nageur doit garder la tête alignée avec l'axe de son corps pour avoir moins de résistance à l'avancement. Donc, on conclut que la technique de nage joue un rôle très important dans l'amélioration de la performance ; une bonne technique permet un gain de temps sans avoir à dépenser un effort physique supplémentaire.

Vu les résultats obtenus, il apparaît que la mécanique des fluides numérique, autrement dit la CFD, peut être appliquée avec succès à l'étude de l'écoulement autour des nageurs ainsi qu'à l'évaluation des forces de résistance rencontrées durant leur déplacement dans le milieu aquatique.

L'autre aspect également traité dans la présente étude est l'aspect thermique de la natation ; il comporte deux parties, l'une expérimentale et l'autre numérique. Le but de la partie expérimentale est de quantifier l'effet du style de nage sur la distribution de la température cutanée en utilisant la thermographie infrarouge. Nous avons constaté que la température moyenne sur l'ensemble de la surface cutanée par rapport à la température de repos a augmenté respectivement de $2,16^{\circ}\text{C}$ pour la nage papillon, $2,56^{\circ}\text{C}$ pour le dos, $1,78^{\circ}\text{C}$ pour la brasse et 2°C pour le crawl. On conclut que la température du corps augmente avec l'intensité de l'activité musculaire ainsi que les dépenses énergétiques.

La partie numérique s'intéresse à étudier l'effet de la température de l'eau sur la traînée visqueuse. Les résultats de cette étude ont permis de conclure que la traînée de frottement diminue avec l'augmentation de la température de l'eau. Un gain de 5% en traînée visqueuse est possible en augmentant la température de 20°C à 30°C . Cela correspond à un gain de 1,2% de la traînée totale.

Perspective

- **Evaluer les résistances actives**

Dans le cadre de la présente étude, la méthode CFD a été utilisée pour évaluer la résistance passive rencontrée pendant deux phases importantes du cycle de nage : la coulée et le retour après un virage. Cette méthode pourra être utilisée également au reste du cycle de nage dans le but d'évaluer la force de résistance active rencontrée en situation de nage. Elle peut contribuer également à améliorer la performance pour les quatre types de nage par l'étude des différentes techniques d'entraînement.

- **Améliorer le protocole expérimental**

Dans cette étude, le protocole expérimental et le matériel utilisé ne permettent pas de visualiser toutes les structures tourbillonnaires qui se développent autour du corps du nageur. Seulement les structures au niveau du dos et des fesses ont été visualisées. A cet effet, deux solutions sont envisageables : la première est l'utilisation d'une combinaison intégrale qui couvre la totalité du corps avec une capuche pour pouvoir capter les structures tourbillonnaires au niveau du cou et derrière la tête. La deuxième consiste à fixer directement les fils au niveau des différentes parties du corps du nageur.

- **Améliorer l'étude numérique**

L'étude de l'effet de la position de la tête sur la performance a été effectuée seulement dans le cas bidimensionnel. La position de la tête alignée correspondant à la position la plus performante, a été utilisée dans le cas tridimensionnel pour valider le choix de modèle de turbulence le mieux adapté pour évaluer les forces de résistance. Une étude numérique doit être menée dans le cas tridimensionnel pour les trois positions de la tête ; relevée, alignée et baissée.

- **Utilisation de la thermographie**

L'étude expérimentale réalisée en utilisant la thermographie infrarouge a permis de quantifier la déperdition de la chaleur en fonction du type de nage et d'estimer le rendement musculaire et énergétique au cours de la nage. Il convient de préciser que cette étude n'est pas une étude statistique. Pour donner un caractère universel aux résultats déduits, il faut envisager une autre étude avec plusieurs sujets en respectant le protocole défini.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Alley, L. E., 1952. An analysis of water resistance and propulsion in swimming the crawl stroke. *Research Quarterly* **23**, 257-270.
- Barthels, K. M., 1977. Swimming Biomechanics: Resistance and propulsion. *Swimming Technique* **14**(3), 66-70, 76.
- Benjanuvatra, N., Dawson, G., Blanksby, B. A., Elliott, B. C., 2002. Comparison of buoyancy, passive and net active drag forces between Fastskin™ and standard swimsuits. *Journal of Science and Medicine in Sport* **5**, 115-123.
- Benjanuvatra, N, Blanksby, B. A., Elliott, B. C., 2001. Morphology and hydrodynamic resistance in young swimmers. *Pediatric Exercise Science* **13**, 246-255.
- Bixler, B., Schloder, M., 1996. Computational Fluid Dynamics: An Analytical Tool for the 21st Century Swimming Scientist. *Journal of Swimming Research* **11**, 4-22.
- Bixler, B., Riewald, S., 2002. Analysis of swimmer's hand and arm in steady flow conditions using computational fluid dynamics. *Journal of Biomechanics* **35**, 713-717
- Bixler, B., Pease, D., Fairhurst, F., 2007. The accuracy of computational fluid dynamics analysis of the passive drag of a male swimmer. *Sports Biomechanics* **6**, 81-98.
- Blake, R. W., 1983. Energetics of leaping in dolphins and other aquatic animals. *Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom* **63**, 61-70.
- Brandt, R. A., Pichowsky, M. A., 1995. Conservation of energy in competitive swimming. *Journal of Biomechanics* **28**, 925-933.
- Buil, N., 1999. Modélisation tridimensionnelle du transport de polluants dans les écoulements à surface libre. *Thèse de doctorat à l'université de Lyon*.
- Cappaert, J. M., Gordon, B. J., 1998. Frontal surface area measurements in national calibre swimmers. *Journal Sports Engineering* **1**, 51-55.
- Chatard, J. C., Bourgoïn, B., Lacour, J. R., 1990a. Passive drag is still a good evaluator of swimming aptitude. *European Journal of Applied Physiology* **59**, 399-404.
- Chatard, J. C., Lavoie, J. M., Bourgoïn, B., Lacour, J. R. 1990b. The contribution of passive drag as a determinant of swimming performance. *International Journal of Sports Medicine* **11**, 367-372.
- Choudhury, D., 1993. Introduction to the Renormalization Group Method and Turbulence Modeling. Fluent[®] Inc. Technical Memorandum TM-107.
- Clarys, J. P., 1979. Human morphology and hydrodynamics. In J. Terauds & E. W. Bedingfield (Eds.), *International Series on Sports Science* **8**; *Swimming III* (pp. 3-41). Baltimore, USA: University Park Press.
- Clarys, J. P., Jiskoot, J., 1975. Total resistance of selected body positions in the frontcrawl. In L. Lewillie & J. P. Clarys (Eds.), *International Series on Sport Sciences* **2**; *Swimming II* (pp. 110-117). Baltimore, USA: University Park Press.
- Clarys, J. P., Jiskoot, J., & Lewillie, L. (1973). A kinematographic, electromyographic and resistance study of waterpolo and competition front crawl. In S. Cerguiglini, A. Venerando & J. Wartenweiler (Eds.), *Biomechanics III* (pp. 446-452). Basel: Karger Verlag.
- Clarys, J. P., 1986. Human body dimensions and applied hydrodynamics: Selection criteria for top swimmers. *Snipes Journal* **9**, 32-41.

- Clothier, P. J., 2004. Underwater kickning following the freestyle tumble turn. Thesis.
- Cohen M. L., 1977. Measurement of the thermal properties of human skin – a review. *Journal of Investigative Dermatology* **69**, 333-338.
- Costill, D. L., Maglischo, E. W., Richardson, A. B., 1992. *Swimming: Handbook of Sports Medicine and Science*. Oxford, United Kingdom: Blackwell Scientific Publications.
- Counsilman, J. E., 1955. Forces in swimming two types of crawl stroke. *Research Quarterly*, **26**, 127-139.
- Cousteix, J., 1989. Aérodynamique, Turbulence et couche limite. *Cepadues-ED*.
- Di Prampero, P. E., Pendergast, D. R., Wilson, D. W., Rennie, D. W., 1974. Energetics of swimming in man. *Journal of Applied Physiology* **37**, 1-5.
- Du Bois, R., 1905. Zur Physiologie des Schwimmens. Berlin, 252-278.
- Daube, O., Ta Phuoc, L., Monnet, P., Coutanceau, M. 1985. Ecoulement instationnaire décollé d'un fluide incompressible autour d'un profil d'aile : une comparaison théorie-expérience, *AGARD CP 386*, paper 3.
- Gadd, G. E., 1963. The hydrodynamics of swimming. *New Scientist* **355**, 483-485.
- Gambit[®] User's Guide, 2006
- Gardano, P., Dabnichki, P., 2006. On hydrodynamics of drag and lift of the human arm. *Journal of Biomechanics* **39**, 2767-2773.
- Guerard, F., 2006. Modélisation d'un nageur en 3 dimensions. Projet de fin d'études, Université de Technologie de Troyes.
- Fluent[®] User's Guide, 2006
- Hay, J. G., Thayer, A. M., 1989. Flow visualization of competitive swimming techniques: The tufts method. *Journal of Biomechanics* **22**, 11-17.
- Hertel, H., 1966. *Structure Form Movement*. New York : Reinhold Publishing Corporation.
- Hoerner, S. F., 1965. *Résistance à l'avancement dans les fluides*. Gauthier-Villars Editeur, Paris.
- Holmer I., 1974. Energy cost of arm stroke leg kick and the whole stroke in competitive swimming styles. *Europ.J. Appl. Physiol* **33**, 105-118.
- Hollander, A. P., De Groot, G., Van Ingen Schenau, G. J., Toussaint, H. M., De Best, H., Peeters, W., Meulemans, A., Schreurs, A. W., 1986. Measurement of active drag during crawl arm stroke swimming. *Journal of Sports Sciences* **4**, 21-30.
- Hollander, A. P., Toussaint, H. M., De Groot, G., Van Ingen Schenau, G. J., 1985. Active drag and swimming performance. *The New Zealand Journal Sports Medicine* **13**. 110-113.
- Houssay, R., 1912. *Forme, puissance et stabilité des poissons (Forme, Force and stability of fish)*. Hermann et Fils, Paris.
- Huijing, P. A., Toussaint, H. M., Clarys, J. P., Groot, G. de, Hollander, A. P., Vervoorn, K., Mackay, R. and Savelberg, H. H. C. M., 1988. Active drag related to body dimensions. In *Swimming Science V*, (ed. B. E. Ungerechts, K. Reischle and K. Wilke), pp. 31-37. Champaign, Ill.: Human Kinetics Books.

- Huttunen, P., Lando, N. G, Meshtsheryakov V. A, Lyutov, V. A., 2000. Effects of long-distance swimming in cold water on temperature, blood pressure and stress hormones in winter swimmers. *Journal of Thermal Biology* **25**, 171-174.
- Jansky L, Vavra V, Jansky P, Kunc P, Knzkova I, Jandova D, Slovacek K., 2003. Skin temperature changes in humans induced by local peripheral cooling. *Journal of Thermal Biology* **28**, 429-437.
- Jiskoot, J., Clarys, J. P., 1975. Body resistance on and under the water surface. In L. Lewillie & J. P. Clarys (Eds.), *International Series of Sport Sciences 2; Swimming II* (pp. 105-109). Baltimore, USA: University Park Press
- Karpovich, P. V. (1933). Water resistance in swimming. *Research Quarterly* **4**, 21-28.
- Kolmogorov, S. V., Duplishcheva, O.A., 1992. Active drag, useful mechanical power output and hydrodynamic force coefficient in different swimming strokes at maximal velocity. *Journal of Biomechanics* **25**, 311-318.
- Kolmogorov, S. V., Rumyantseva, O. A., Gordon, B. J., Cappaert, J. M., 1997. Hydrodynamic characteristic of competitive swimmers of different genders and performance levels. *Journal of Applied Biomechanics*, **13**, 88-97.
- Korichi, A., Oufer, L., 2005. Numerical heat transfer in a rectangular channel with mounted obstacles on upper and lower walls. *International Journal of Thermal Sciences* **44**, 644-655.
- Lardart, R., 1996. *Simulation numérique d'écoulement externes instationnaires décollés autour d'une aile avec des méthodes de sous mailles. Thèse de doctorat de l'université Paris VI*
- Lavoie, J. M., Montpetit, R., 1986. Applied physiology of swimming. *Sport Med* **3**, 165-189.
- Launder, B. E., Spalding, D. B., 1974. The numerical computation of turbulent flows. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering* **3**, 269-289.
- Launder, B. E., Spalding, D. B., 1972. *Lectures in Mathematical Models of Turbulence*. Academic Press, London, England.
- Larsen, O. W., Yancher, R. P., Baer, C. L. H., 1981. Boat Design and swimming performance. *Swimming Technique* **18**, 38;40;42-44.
- Lyttle, A. D., Blanksby, B. A., Elliott, B. C., Lloyd, D. G., 1998. The effect of depth and velocity on drag during the streamlined glide. *Journal of Swimming Research* **13**, 15-22.
- Lyttle, A. D., 1999. *Hydrodynamics of the Human Body During the Freestyle TumbleTurn. published Doctoral dissertation, The University of Western Australia, Nedlands, Australia.*
- Lyttle, A., Keys, M., 2004. *Computational fluid dynamics. A tool for future swimming technique analysis; Western Australian Institute of Sport, Perth, WA, Australia.*
- Lyttle, A. D., Elliott, B. C., Blanksby, B. A., Lloyd, D. G., 1999. An instrument for quantifying the hydrodynamic drag of swimmers - a technical note. *Journal of Human Movement Studies*, **37**, 261-270.
- Lyttle, A. D., Blanksby, B. A., Elliott, B. C., Lloyd, D. G., 2000. Net forces during tethered simulation of underwater streamlined gliding and kicking techniques of the freestyle turn. *Journal of sports sciences* **18**, 801-807.
- Maiello, D., Sabatini, A., Demarie, S., Sardella, F., Dal Monte, A., 1998. Passive drag on and under the water surface. *Journal of Sports Sciences* **16**, 420-421.

- Mittal, S., Saxena, P. 2002. Hysteresis in flow past a NACA 0012 airfoil. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering* **191**, 2207-2217.
- Polidori, G., 1994. Etude par visualisation de sillages tridimensionnels application a un profil d'aile rectangulaire. *Thèse de doctorat de l'université de Poitiers*.
- Polidori G., Taiar R., Fohanno S., Mai T.H. Lodini A., 2006. Skin-friction drag analysis from the forced convection modeling in simplified underwater swimming, *Journal of Biomechanics*, **39**, 2535-2541.
- Popa, I. C. 2002. Modélisation numérique de transfert thermique, Méthode des volumes finis. Université Craiova.
- Regard, M., 1996. Contribution à l'étude des mouvements d'air dans le bâtiment à l'aide d'un code de champ: application a la ventilation naturelle d'un local par une ou deux grandes ouvertures. *Thèse de doctorat de l'institut national des sciences appliquées de lyon*.
- Rhie, C. M., Chow, W. L. 1983. Numerical Study of the Turbulent Flow Past an Airfoil with Trailing Edge Separation. *AIAA Journal* **21**. 1525-1532.
- Robinson, S., Somers, A., 1971. Temperature regulation in swimming. *J. Physiol* **63**, 406-409
- Ria, B., Bernard, M., Falgairette, G., Roddier, P., 1987. Approche du coefficient hydrodynamique du nageur tracté. *Cinésiologie* **113**, 123-128.
- Rouboa, A., Silva, A., Leal, L., Rocha, J., Alves, F., 2006. The effect of swimmer's hand/forearm acceleration on propulsive forces generation using computational fluid dynamics. *Journal of Biomechanics* **39**, 1239-1248.
- Rushall, B. S., Holt, L. E., Sprigings, E. J., Cappaert, J. M., 1994. A re-evaluation of forces in swimming. *Journal of Swimming Research* **10**, 6-30.
- Saadjian, E., 1998. Phénomènes de transport et leurs résolutions numériques. Polytechnica.
- Sato, Y., Hino, T., Estimation of Thrust of Swimmer's Hand Using CFD National Maritime Research Institute, Center for CFD Research, Shinkawa 6-38-1, Mitaka, Tokyo, 181-0004, JAPAN
- Shih, T.-H., Liou, W. W., Shabbir, A., Yang, Z., Zhu, J. A., 1995. New k- ϵ Eddy-Viscosity Model for High Reynolds Number Turbulent Flows. Model Development and Validation. *Computers Fluids* **24**. 227-238.
- Schlehauf, R.E., 1979. A Hydrodynamic Analysis of Swimming Propulsion, *Swimming III. International Series of Sports Sciences* **8**, 70-109. University Park Press, Baltimore.
- Sheehan, D. P., Laughrin, D. M., 1992. Device for qualitative measurements of hydrodynamic drag on swimmers. *Journal of Swimming Research* **8**, 30-34.
- Spalart, P., Allmaras, S., 1992. A one-equation turbulence model for aerodynamic flows. Technical Report AIAA-92-0439, American Institute of Aeronautics and Astronautics.
- Strojnik, V., Bednarik, J., Strumbelj, B., 1999. Active and passive drag in swimming. In K. L. Keskinen, P. V. Komi., A. P. Hollander (Eds.), *Biomechanics and Medicine in Swimming VIII* (pp. 113-117). Finland: University of Jyväskylä.
- Patankar, S.V., 1980. Numerical heat transfer and fluid flow. Hemisphere, New York.

- Taiar, R., Bertucci, W., Toshev, Y., Letellier, T., Benkemis, I., 2005. Experimental Assessment of the Drag Coefficient during Butterfly Swimming in Hydraulic Flume. *Acta of Bioengineering and Biomechanics* **7**, 97-107.
- Taiar, R., 2000. Vers une nouvelle approche de modélisation de la performance en papillon: Evaluation de la résistance à l'avancement au cours du cycle. *Thèse de doctorat de l'université de Lyon*.
- Toussaint, H. M., Van der Berg, C., Wiero, B. J., 2002. "Pumped-up propulsion" during front crawl swimming. *Med. Sci. Sports Exerc* **34**, 314-319.
- Toussaint, H.M., Truijens, M., 2005. Biomechanical aspects of peak performance in human swimming. *Journal of animal biology* **25**, 17-40.
- Toussaint, H. M., Truijens, M., Elzinga, M., Van de Ven, A., De Best, H., Snabel, B., De Groot, G., 2002. Effect of a Fast-Skin body suit on drag during front crawl swimming. *Sports Biomechanics* **1**, 1-10.
- Toussaint, H. M., de Looze, M., Van Rossem, B., Leijdekkers, M., & Dignum, H. (1990). The effect of growth on drag in young swimmers. *International Journal of Sport Biomechanics* **6**, 18-28.
- Toussaint, H. M., Vervoorn, K., 1990. Effects of specific high resistance training in the water on competitive swimmers. *Int J Sports Med* **11**. 228-233.
- Vaart, Van der A. J. M., Savelberg, H. H. C. M., De Groot, G., Hollander, A. P., Toussaint, H. M., Van Ingen Schenau, G. J., 1987. An estimation of drag in front crawl swimming. *Journal of biomechanics* **20**, 543-546.
- Van Manen, J. D., Rijken, H., 1975. Dynamic measurement techniques on swimming bodies at the Netherlands ship model basin. In L. Lewillie, J. P. Clarys (Eds.), *International Series on Sport Sciences 2, Swimming II* (pp. 70-79). Baltimore, USA: University Park Press.
- Vennell, R., Pease, D., Wilson, B., 2006. Wave drag on human swimmers. *Journal of Biomechanics*, **39**, 664–671.
- Videler, J. J., 1993. *Fish Swimming*. Melbourne: Chapman, Hall.
- Yanai, T., 2001. Rotational effect of buoyancy in frontcrawl : does it really cause the legs to sink? *Journal of Biomechanics* **34**, 235-243.
- Ungerechts, B. E., 1983. The validity of the Reynolds number for swimming bodies which change form periodically. In A. P. Hollander, P. Huijing & G. de Groot (Eds.), *International Series on Sport Sciences, Volume 14; Biomechanics and Medicine in Swimming: Proceedings of the Fourth International Symposium of Biomechanics in Swimming and the Fifth International Congress on Swimming Medicine* (pp. 81-88). Champaign, USA: Human Kinetics Publishers.
- Wilcox, D. C., 1998. Turbulence Modeling for CFD. DCW Industries, Inc., La Canada, California.
- Webb, P. W., Sims, D., Schultz, W. W., 1991. The effects of air/water surface on the fast-start performance of rainbow trout (*Oncorhynchus Mykiss*). *Journal of Experimental Biology* **155**, 219-226.