

Analyse cinématique et dynamique tridimensionnelle de la performance au virage culbute crawl - Influences du niveau et du genre

Frédéric Puel

► To cite this version:

Frédéric Puel. Analyse cinématique et dynamique tridimensionnelle de la performance au virage culbute crawl - Influences du niveau et du genre. Biomécanique [physics.med-ph]. Université Bordeaux 1 Sciences et Technologies, 2011. Français. NNT: . tel-03016172

HAL Id: tel-03016172 https://hal.science/tel-03016172

Submitted on 20 Nov 2020 $\,$

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers. L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

THÈSE



présentée à

L'UNIVERSITÉ BORDEAUX 1

Sciences Technologies ÉCOLE DOCTORALE DES SCIENCES PHYSIQUES ET DE L'INGÉNIEUR ED 209

par M. Frédéric PUEL

pour obtenir le grade de

DOCTEUR

Spécialité Mécanique et Ingénierie

Analyse cinématique et dynamique tridimensionnelle de la performance au virage culbute crawl. Influences du niveau et du genre.

Soutenue le 14 février 2011 après avis de

MM. Éric BERTON et Didier CHOLLET, Professeurs des Universités

Devant la commission d'examen formée de

M. Olivier CAHUC, Professeur, Université Bordeaux 1	Président
M. Éric BERTON, Professeur, Université de la Méditerranée	Rapporteur
M. Didier CHOLLET, Professeur, Université de Rouen	Rapporteur
Mme Annie ROUARD, Professeur, Université de Savoie	Examinateur
M. Mariano CID, Professeur, Universités Bordeaux 1 et Bordeaux 2	Directeur de thèse
M. Julien MORLIER, Maître de Conférences HDR, Universités Bordeaux 1 et Bordeaux 2	Encadrant
M. Philippe HELLARD, Adjoint au Directeur Technique National, Fédération Française de Na	atation Encadrant

Ma première pensée va à Mariano Cid, qui a accepté de diriger cette thèse et dont je suis fier d'avoir été le dernier thésard (enfin c'est ce que je croyais jusqu'au jour de ma soutenance). Je suis aussi très reconnaissant envers Julien Morlier d'avoir également accepté de m'encadrer. Ses avis sincères voire lapidaires sont si justes et productifs.

Mes plus vifs remerciements s'adressent à Philippe Hellard, à l'initiative de ce projet de recherche. Notre passion commune pour la natation a permis de produire ce document qui illustre *a minima* un flot de données recueillies. Je lui porte un profond respect et une grande admiration.

Je tiens à remercier les professeurs Éric Berton et Didier Chollet, courageux rapporteurs de ce manuscrit, mais aussi les professeurs Olivier Cahuc et Annie Rouard, examinateurs énergiques et attentifs (à tout, même aux petits poissons).

Je remercie également l'ensemble du personnel du CREPS Aquitaine pour m'avoir accueilli pendant la première moitié de la thèse, puis l'ensemble du personnel et les doctorants du LMP, pour m'avoir supporté ensuite. Vous m'avez tous demandé ce que je faisais, je pense malheureusement n'avoir su vous répondre complètement que le jour de ma soutenance. Merci pour votre écoute, votre aide, toutes nos discussions.

Pêle-mêle, je remercie enfin :

- M. Loïc Belloir et Mme Brigitte Malartic, de la société TSR, pour le soutien administratif apporté ;
- MM. Michel Knopp et Nicolas Houel, ingénieux bricoleurs de bord de bassin ;
- Les nageuses et nageurs présentés dans cette étude mais également tous ceux qui ont participé aux évaluations fédérales et ceux qui m'ont donné l'envie de mener ces recherches;
- Tous les entraineurs, votre dévouement à votre sport et à vos « gamins » est admirable ;
- Les stagiaires formés, pour leur écoute, leur travail et leurs questions bien souvent judicieuses;
- Le sport en général, bien qu'il (ou elle) ne m'ait pas choisi ;
- Tous mes amis, délaissés mais pas oubliés, merci d'avoir accepté le temps que nous n'avons pas passé ensemble;
- Ma famille, qui grandit bien vite, et à qui je dois tout et bien plus encore, et ma colocataire bienveillante, sans qui je n'aurais pas écrit ces pages. Je vous aime et vous dédie ce travail.

Merci.

Introduction générale	1
État de l'art	5
1. Le virage crawl : études cinématiques et dynamiques	7
1.1. Impulses exerted in performing several kinds of swimming turns, BMS III [Nico79]	7
1.2. Propulsive force generated by swimmers during a turning motion, BMS IV	1
[Taka83]	8
1.3. Turning techniques of elite swimmers, Journal of Sports Sciences [Chow84]	. 10
1.4. Analysis of 50-, 100-, and 200-m freestyle swimmers at the 1992 Olympic Games, Journal of Applied Biomechanics [Arel94]	. 12
1.5. Force plate and video analysis of the tumble turn by age-group swimmers, Journal of Swimmina Research [Blan96]	. 14
1.6. A kinematic and kinetic analysis of the freestyle and butterfly turns, Journal of	ء 16
1.7. The influence of plyometric training on the freestyle tumble turn, Journal of	r 10
Science and Medicine in Sport [Coss99]	. 19
1.8. Investigating kinetics in the freestyle flip turn push-off, Journal of Applied	/
Biomechanics [Lytt99]	. 21
1.9. Swim turn performances at the Sydney 2000 Olympic Games, ISBS XIX [Maso01]	. 24
1.10. Kinematic and dynamographic research in different swimming turns, BMS IX [Dani03]	. 24
1.11. Turning force measurement in swimming using underwater force platforms,	,
BMS IX [Roes03]	. 26
1.12. The influence of tuck index, depth of foot-plant, and wall contact time on the	•
velocity of push-off in the freestyle flip turn, BMS X [Prin06]	. 28
1.13. Biomechanical analysis of the turn in front crawl swimming, BMS X [Pere06]	. 30
1.14. A combined biomechanical analysis of the flip turn technique, ISBS XXVI	l
[Pere08]	. 31
1.15. Analyse des variables étudiées	. 32
2. Directions de la recherche	. 33
2.1. Cadre de l'étude	. 33
2.2. De l'intérêt d'une analyse tridimensionnelle	. 35
2.3. Effets du niveau et du genre sur la performance au virage crawl	. 35
Méthodes	. 37
1. Principes de l'analyse cinématique	. 39
1.1. Reconstruction 3D par la méthode DLT	. 39
1.2. Résolution de systèmes linéaires surdimensionnés au sens des moindres carrés	. 40
1.3. Spécificités de l'analyse cinématique sous-marine	. 41
2. Principes de l'analyse dynamique	. 42
2.1. Extensométrie et jauges à éléments résistifs	. 42
2.2. Piézoélectricité et capteurs de pression	. 43
2.3. Mesure d'efforts dynamiques	. 43
2.4. Système de mesure choisi	. 44

3.	. Dispositif expérimental d'analyse 3D du virage crawl	. 45
	3.1. Contraintes en milieu sportif	. 45
	3.2. Tâche et consignes	. 46
	3.3. Dispositif d'analyse cinématique	. 46
	3.4. Dispositif d'analyse dynamique	. 50
	3.5. Synchronisation des signaux	. 52
4.	Modélisation du nageur	. 53
5.	. Traitement du signal	. 55
	5.1. Du signal vidéo aux coordonnées 3D	. 55
	5.2. Interpolation des coordonnées	. 57
	5.3. Lissage des signaux	. 57
6	. Définition des variables de la performance	. 61
	6.1. Cinématique	. 61
	6.2. Dynamique	. 65
	6.3. Caractéristiques des sujets	. 68
Influ	ences du niveau et du genre sur les variables de la performance au virage crawl	. 69
1	Population	. 71
2.	Analyse statistique	. 72
	2.1. Statistiques descriptives	. 72
	2.2. Comparaison des moyennes	. 73
3.	Discussion	. 76
	3.1. Influence du niveau d'expertise sur les variables biomécaniques du virage crawl	. 76
	3.2. Influence du genre sur les variables biomécaniques du virage crawl	. 81
	3.3. Remarques générales et conclusions	. 85
Mod	dèles experts du virage culbute crawl	. 89
1.	Population	. 91
2.	Analyse statistique	. 91
	2.1. Analyses bivariées	. 92
	2.2. Analyse multivariée	. 95
3.	Discussion	. 98
	3.1. Modèle d'optimisation de la performance au virage des nageuses expertes	. 98
	3.2. Modèle d'optimisation de la performance au virage des nageurs experts	104
	3.3. Vers un modèle unique ?	111
	3.4. Conclusions	111
Con	clusion et Perspectives	113
Bibli	iographie	117
Ann	exes	123

Liste des figures

Figure 1 : Décomposition du virage culbu	e en crawl,	reproduction	de dessins	de
Counsilman [Coun86]				1
Figure 2 : Représentation des variables cinér	atiques mesur	ées [Nico79]		7
Figure 3 : Évolution de la force et de l'impu	sion de contac	ct lors d'un vira	age (en vert) et
lors d'un exercice de poussée (en	violet) [Nico79]]		8

[Taka83]1	10
Figure 5 : Relation entre l'impulsion lors du virage et l'impulsion lors d'un exercice de poussée [Taka83]1	10
Figure 6 : Exemple d'enregistrement dynamique lors d'un virage culbute crawl [] vtt97] 1	17
Figure 7 : Évolution des forces propulsives et résistives de l'accélération et de la vitesse	- /
d'un pageur au cours de la poussée (exemple d'un virage culture crawl)	
	าว
[Ly(199]2	<u>'</u> Z
Figure 8 : Evolution de la force norizontale enregistree lors d'un virage crawi (en vert) et	
lors d'une poussee (en violet) pour une nageuse (trait plein) et un nageur	
(pointillés) [Dani03]2	25
Figure 9 : Profils de forces horizontales enregistrées chez trois nageurs de niveaux	
différents [Roes03] 2	26
Figure 10 : Profils de forces horizontale (en vert) et verticale (en rouge) enregistrées chez	
un nageur de bon niveau [Roes03] 2	27
Figure 11 : Installation de deux plateformes de force sur le mur de virage [Roes03] 2	27
Figure 12 : Composantes horizontales des forces enregistrées sur chacune des deux	
plateformes [Roes03] 2	28
Figure 13 : Propagation de la lumière de l'eau vers l'air 4	12
Figure 14 : Repère cinématique 4	17
Figure 15 : Positionnement des mires et volume de calibration (délimité par les points	
blancs)	18
Figure 16 : Volume d'étude associé à une sphère et découpé par le repère choisi	19
Figure 17 : Positionnement de cing caméras pour l'analyse cinématique 3D du virage	
crawl	
1.1 (1 WV 1	50
Figure 18 · Renère dynamique	50 51
Figure 19 : Système mécanique de fixation de la plateforme	50 51 52
Figure 18 : Repère dynamique	50 51 52
Figure 18 : Repère dynamique	50 51 52 53
Figure 18 : Repère dynamique	50 51 52 53
 Figure 18 : Repère dynamique	50 51 52 53 55
 Figure 18 : Repère dynamique	50 51 52 53 55 56
 Figure 18 : Repère dynamique	50 51 52 53 55 56 59
 Figure 18 : Repère dynamique	50 51 52 53 55 56 59
 Figure 18 : Repère dynamique	50 51 52 53 55 56 59 50
 Figure 18 : Repère dynamique	50 51 52 53 55 56 59 50
 Figure 18 : Repère dynamique	50 51 52 53 55 56 59 50 50
 Figure 18 : Repère dynamique	50 51 52 53 55 56 59 50 50 50 55
 Figure 18 : Repère dynamique	50 51 52 53 55 56 59 50 50 50 50 55 56
 Figure 18 : Repère dynamique	50 51 52 53 55 56 50 50 50 55 56 50 55 56 56 56
Figure 18 : Repère dynamique 5 Figure 19 : Système mécanique de fixation de la plateforme	50 51 52 53 55 56 50 50 55 56 50 55 56 57
Figure 18 : Repère dynamique	50 51 52 53 55 56 50 50 56 56 56 56 57
 Figure 18 : Repère dynamique	50 51 52 53 55 56 50 50 50 56 56 57
 Figure 18 : Repère dynamique	50 51 52 53 55 56 50 55 56 56 56 57
 Figure 18 : Repère dynamique	50 51 52 53 55 56 50 55 56 57 77
 Figure 18 : Repère dynamique	50 51 52 53 55 50 50 50 50 55 56 57 77

	nageuses expertes (EF, en vert) et le groupe de nageuses non expertes (NEF, en bleu)	78
Figure 32	: Composantes moyennées de la force de contact pour le groupe de nageuses expertes (EF, en vert) et le groupe de nageuses non expertes (NEF, en bleu)	80
Figure 33	: Évolution comparative de la vitesse de déplacement horizontal en fonction de la distance parcourue, du début du contact à la reprise de nage, pour le groupe de nageuses expertes (EF, en vert) et le groupe de nageurs experts (EM, en rouge)	82
Figure 34	: Composantes moyennées de la force de contact pour le groupe de nageuses expertes (EF, en vert) et le groupe de nageurs experts (EM, en rouge)	84
Figure 35	: Indices d'extension des membres inférieurs (marqueurs carrés) et du haut du corps (marqueurs triangulaires) aux instants clés du contact pour le groupe de nageuses expertes (EF, en vert) et le groupe de nageurs experts (EM, en rouge) s	85
Figure 36	: Moyennes et écarts-types des durées de placement (en bleu) et de poussée (en violet) nour chacun des trois groupes (NEE_EE et EM)	86
Figure 37	: Profondeurs de la tête lors des instants clés du contact (C-, Po-, Pe- et G-) pour chacun des trois groupes (NEE, en bleu : EE, en vert et EM, en rouge)	87
Figure 38	: Corrélations de Pearson (valeurs absolues) entre la performance au virage (3mRTT) et les variables explicatives pour le groupe de nageuses expertes (EF)	94
Figure 39	: Corrélations de Pearson (valeurs absolues) entre la performance au virage (3mRTT) et les variables explicatives pour le groupe de nageurs experts (EM)	94
Figure 40	: Impulsion latérale pendant le placement en fonction de la performance au virage pour le groupe de nageuses expertes (EF)	99
Figure 41	: Vitesses horizontales de la tête à la limite glisse-coulée (cercles oranges) et à la reprise de nage (disques violets) en fonction de la performance au virage pour le groupe de nageuses expertes (EF)	00
Figure 42	: Évolution de la vitesse horizontale de la tête lors du virage culbute crawl pour l'ensemble des dix nageuses expertes (moyenne en trait continu ± un écart- type en pointillés)	01
Figure 43	: Profondeurs de la tête au pic de poussée (triangles oranges) et en fin de poussée (triangles violets) en fonction de la vitesse horizontale à la limite glisse-coulée pour le groupe de nageuses expertes (EF)	01
Figure 44	: Distance horizontale tête-mur au début du retournement en fonction de la performance au virage pour le groupe de nageurs experts (EM)	05
Figure 45	: Composante horizontale de la force de contact et vitesse horizontale de la tête pour l'ensemble des dix nageurs experts	06
Figure 46	: Vitesse horizontale de la tête au pic de poussée en fonction de la performance au virage pour le groupe de nageurs experts (EM)	07
Figure 47	: Longueur de la trajectoire parcourue en fonction de la performance au virage pour le groupe de nageurs experts (EM)	08
Figure 48	: Comparaisons 2D et 3D des trajectoires parcourues par deux nageurs experts. 10	09

<u>Liste des tableaux</u>

Tableau 1 : Moyennes et écarts-types des variables mesurées [Nico79]	8
Tableau 2 : Valeurs, moyennes (m) et écarts-types (ét) des impulsions, pics de force,	
vitesses, angles de flexion maximale du genou et durées de contact [Taka83]	9
Tableau 3 : Nombre d'observations pour les épreuves de nage libre [Chow84]	11
Tableau 4 : Moyennes et écarts-types des variables cinématiques lors des épreuves	
masculines de nage libre [Chow84]	11
Tableau 5 : Moyennes et écarts-types des variables cinématiques lors des épreuves	
féminines de nage libre [Chow84]	11
Tableau 6 : Coefficients de corrélation entre la vitesse en sortie (Vout) ou le temps total du	
virage (TT) et le temps total de l'épreuve ($r_{ m te}$) ou l'ordre d'arrivée ($r_{ m oa}$) pour les	
épreuves masculines de nage libre [Chow84]	12
Tableau 7 : Coefficients de corrélation entre la vitesse en sortie (Vout) ou le temps total du	
virage (TT) et le temps total de l'épreuve ($r_{ m te}$) ou l'ordre d'arrivée ($r_{ m oa}$) pour les	
épreuves féminines de nage libre [Chow84]	12
Tableau 8 : Valeurs moyennes et écarts-types des paramètres mesurés lors des 100 m et	
200 m nage libre [Arel94]	13
Tableau 9 : Coefficients de corrélations linéaires entre le temps en début de virage (7,5 m	
avant le mur), le temps en fin de virage (7,5 m après le mur) et les autres	
variables mesurées [Arel94]	13
Tableau 10 : Moyennes et écarts-types (m ± ét) des variables mesurées [Blan96]	15
Tableau 11 : Comparaison des meilleurs (1 ^{er} tiers) et des moins bons vireurs (3 ^{ème} tiers)	
[Blan96]	16
Tableau 12 : Définition des variables cinématiques utilisées [Lytt97]	17
Tableau 13 : Moyennes et écarts-types des variables étudiées [Lytt97]	18
Tableau 14 : Caractéristiques de la population étudiée [Coss99]	19
Tableau 15 : Moyennes et écarts-types des variables mesurées pour les deux groupes de	
nageurs lors du dernier test [Coss99]	20
Tableau 16 : Corrélations de Pearson (r) entre le temps au virage (2.5mRTT) et les	
variables mesurées pour l'ensemble de la population [Coss99]	20
Tableau 17 : Moyennes et écarts-types (m ± ét) des caractéristiques des sujets participant	
à l'étude [Lytt99]	21
Tableau 18 : Moyennes et écarts-types (m ± ét) des paramètres analysés [Lytt99]	23
Tableau 19 : Valeurs, moyennes (m) et écarts-types (ét) des variables étudiées [Dani03]	25
Tableau 20 : Moyenne et écarts-types (m ± ét) des variables enregistrées lors des 12	
virages effectués par le nageur participant à l'étude [Roes03]	28
Tableau 21 : Moyennes et écarts-types (m ± ét) des variables mesurées [Prin06]	29
Tableau 22 : Nombre d'observations, moyennes et écarts-types (m ± ét), valeurs	
minimales et maximales des variables mesurées [Pere06]	30
Tableau 23 : Moyennes et écarts-types (m ± ét) des variables dynamiques et cinématiques	
mesurées [Pere08]	31
Tableau 24 : Modèle à 7 segments indéformables choisi pour l'étude du retournement et	
du contact	54
Tableau 25 : Variables cinématiques	64
Tableau 26 : Variables dynamiques	68
Tableau 27 : Variables caractéristiques des sujets	68

Tableau 28 : Caractéristiques (moyenne ± écart-type) des trois groupes comparés 72

Liste des abréviations

2D : bidimensionnel

- 3D : tridimensionnel
- AIS : Australian Institute of Sport
- BMS : Biomechanics and Medicine in Swimming
- bw : body weight

CG : centre de gravité

DLT : Direct Linear Transformation

EF : groupe de nageuses expertes (EF pour Expertes Féminines)

EM : groupe de nageurs experts (EM pour Experts Masculins)

FFN : Fédération Française de Natation

FINA : Fédération Internationale de Natation Amateur

JO : Jeux Olympiques

NEF : groupe de nageuses non expertes (NEF pour Non Expertes Féminines)

n.s. : non significatif

s.a. : sans unité

XmRTT : temps mis pour parcourir un aller-retour dans la zone délimitée par une ligne située X mètres avant et après le mur de virage et le mur de virage (XmRTT pour *X metres Round Trip Time*) La natation, comme activité sportive, apparait au XIX^{ème} siècle. Elle devient épreuve olympique dès 1896, lors des premiers Jeux Olympiques modernes à Athènes. La Fédération Internationale de Natation Amateur (FINA), qui établit les règles internationales, est créée en 1908 et la Fédération Française de Natation (FFN) existe sous sa forme actuelle depuis 1938.

En natation, la recherche de la performance passe en partie par une évolution des techniques avec pour seules contraintes celles imposées par la réglementation FINA. De nos jours, le crawl est la technique de nage la plus rapide et donc celle employée lors des épreuves de nage libre. De même, la technique de virage culbute, autorisée sous sa forme actuelle depuis 1965, est unanimement employée par les nageuses et nageurs de crawl en compétition [Oppe77] [Corn92].

La culbute consiste à combiner un demi-tour (rotation de 180° autour de l'axe transverse du nageur) et une vrille (rotation de 180° autour de l'axe longitudinal). Cette technique a été précisément décrite par de nombreux auteurs [Coun86] [Magl87] [Cost94] [Chol97] et une lecture attentive de leurs ouvrages permet de proposer une décomposition du virage culbute crawl en cinq phases principales : l'approche, le retournement, le contact avec le mur, la phase sous-marine et la reprise de nage (Figure 1, notons que tout au long de ce document l'adjectif « sous-marin » sera préféré à « subaquatique », bien que ce terme soit plus juste). La phase de contact avec le mur et la phase sous-marine sont ensuite elles-mêmes décomposées en deux sous-phases distinctes, une phase « passive » suivie d'une phase active [Prin06] : le placement et la poussée pour la phase de contact [Lytt99] [Prin06], la glisse et la coulée pour la phase sous-marine.



Figure 1 : Décomposition du virage culbute en crawl, reproduction de dessins de Counsilman [Coun86]

Lors de l'approche, le nageur exécute ses derniers cycles de nage avant d'atteindre le mur. Il est alors à la recherche d'informations visuelles sur sa position. Selon les informations recueillies, le nageur peut décider d'effectuer des modifications dans son approche (modifier son amplitude de nage [Magl87]) pour entamer le retournement à la bonne distance du mur (de 1 à 1,2 m [Magl87]),

sans perte de vitesse [Cost94]. Les yeux fixés sur le mur, il met fin à l'approche en laissant un bras dans l'eau (pas de retour aérien) le long de son corps (main à la hanche [Magl87]) et termine le dernier mouvement du bras opposé.

Le nageur initie le retournement en basculant sa tête vers la poitrine. Il exécute alors une ondulation puis regroupe ses jambes ce qui a pour effet d'accélérer sa rotation dans l'axe transverse. Le corps du nageur étant alors groupé, il a tendance à s'enfoncer dans l'eau. Pour contrôler sa descente, le nageur augmente ses appuis en orientant les paumes de ses mains vers le fond du bassin. Les jambes et les pieds traversent alors la surface. Hors de l'eau, la résistance hydrodynamique de ces segments corporels s'annule ce qui permet d'accélérer le mouvement de rotation [Chol97]. La tête remonte entre les bras lorsque le demi-tour se termine et que les pieds vont atteindre le mur. Le retournement se termine au premier contact des pieds avec le mur.

Lors d'un virage culbute, seuls les pieds sont en contact avec le mur, à une profondeur comprise entre 0,3 et 0,4 m [Magl87] [Cost94]. Le placement est considéré comme « préparatoire » et durerait entre 25,7% [Prin06] et 32,5% [Lytt99] du temps total du contact. Toutefois, aucune étude ne décrit cette phase, Costill énonçant même que « le nageur commence à étendre ses jambes dès que ses pieds sont en contact avec le mur », ne tenant pas compte de la durée du placement [Cost94]. Cette phase permet pourtant au nageur de s'organiser de manière à optimiser sa poussée. Cette organisation est composée en parties par la vrille mais aussi par l'extension des membres supérieurs et du tronc. La distinction entre les phases de placement et de poussée se fait à l'instant où les hanches du nageur commencent à s'éloigner du mur [Prin06]. La poussée correspond à une contraction concentrique des muscles extenseurs des membres inférieurs [Sand02]. Le nageur continue parfois à vriller et complète l'extension du haut du corps afin d'être totalement aligné en fin de poussée.

La fin de contact des pieds du nageur avec le mur marque le début de la phase sous-marine. Elle peut être débutée en position dorsale, costale ou bien ventrale selon l'accomplissement de la vrille réalisée en amont. Costill proposait que le nageur glisse en « position profilée » jusqu'à ce qu'il ait atteint sa vitesse de course [Cost94]. Lyttle, en mesurant les forces nécessaires à la traction de nageurs expérimentés, a établi que la vitesse appropriée pour initier la coulée était comprise entre 2,2 et 1,9 m/s [Lytt00]. Le nageur débute sa propulsion sous-marine par un mouvement des membres inférieurs. Les deux techniques couramment employées sont les battements et les ondulations. L'efficacité de ces deux techniques est améliorée par la profondeur de coulée d'une part par la diminution des résistances de vagues présentes en surface [Lytt00] [Venn06] et d'autre part par la possibilité d'appliquer un appui propulsif sur l'ensemble du mouvement, ce qui est impossible lorsque les pieds traversent la surface. De nos jours, les battements sont moins employés que les ondulations ; ils apparaissent toutefois en fin de coulée et permettent la transition avec la reprise de nage. La vrille est alors achevée, c'est le retour à « l'équilibre ventral » [Chol97].

La reprise de nage débute avec l'action motrice des membres supérieurs. Cette phase de transition fait passer le nageur d'une propulsion sous-marine à une propulsion en surface. Le nageur commence à sortir de l'eau quand il sent qu'un mouvement de bras va amener sa tête à la surface [Cost94].

Au-delà de la description, « l'étude » du virage apparait comme un territoire « vierge » car aucune méthode simple, appropriée ou suffisamment polyvalente n'existait alors [Hay88]. Depuis de nombreuses années, le service Recherche de la FFN s'attache à mener des actions d'aide à la performance auprès des meilleurs nageurs nationaux avec pour objectif la réussite lors des Jeux Olympiques (JO). Cette aide à la performance se matérialise entre autres par des évaluations techniques à l'entrainement et des analyses de courses en compétition. Les observations qui en sont extraites nécessitent une étude scientifique et statistique afin de pouvoir être généralisées à une population.

Ce travail de recherche sur le virage culbute crawl initie une collaboration entre le Laboratoire de Mécanique Physique de Bordeaux et la FFN.

Il met en place un protocole complet d'analyse sous-marine du virage afin d'étudier l'ensemble des paramètres biomécaniques de la performance (Chapitre 2) basé sur l'analyse détaillée des études cinématiques et dynamiques existantes sur le virage culbute crawl (Chapitre 1).

Ensuite, une première étude statistique comparera un groupe de nageuses expertes à un groupe de nageuses non expertes d'une part puis à un groupe de nageurs experts d'autre part afin de déterminer l'influence du niveau et du genre sur la performance au virage crawl (Chapitre 3).

Enfin, une seconde étude statistique sera consacrée aux nageuses et nageurs du plus haut niveau d'expertise. Elle tentera de mettre en avant les principaux paramètres de la performance au virage culbute crawl et d'établir des modèles d'optimisation pour une population de nageuses expertes d'une part et une population de nageurs experts d'autre part (Chapitre 4).

« La vraie nouveauté naît toujours dans le retour aux sources. » Edgar Morin (1921 -) Extrait de Amour, poésie, sagesse

<u>Sommaire</u>

1. Le virage crawl : études cinématiques et dynamiques7
1.1. Impulses exerted in performing several kinds of swimming turns, BMS III [Nico79]7
1.2. Propulsive force generated by swimmers during a turning motion, BMS IV [Taka83]8
1.3. Turning techniques of elite swimmers, Journal of Sports Sciences [Chow84]10
1.4. Analysis of 50-, 100-, and 200-m freestyle swimmers at the 1992 Olympic Games,
Journal of Applied Biomechanics [Arel94]12
1.5. Force plate and video analysis of the tumble turn by age-group swimmers, Journal
of Swimming Research [Blan96]14
1.6. A kinematic and kinetic analysis of the freestyle and butterfly turns, Journal of
Swimming Research [Lytt97]16
1.7. The influence of plyometric training on the freestyle tumble turn, Journal of Science
and Medicine in Sport [Coss99]19
1.8. Investigating kinetics in the freestyle flip turn push-off, Journal of Applied
Biomechanics [Lytt99]21
1.9. Swim turn performances at the Sydney 2000 Olympic Games, ISBS XIX [Maso01]24
1.10. Kinematic and dynamographic research in different swimming turns, BMS IX
[Dani03]24
1.11. Turning force measurement in swimming using underwater force platforms, BMS
IX [Roes03]26
1.12. The influence of tuck index, depth of foot-plant, and wall contact time on the
velocity of push-off in the freestyle flip turn, BMS X [Prin06]
1.13. Biomechanical analysis of the turn in front crawl swimming, BMS X [Pere06]30
1.14. A combined biomechanical analysis of the flip turn technique, ISBS XXVI [Pere08]31
1.15. Analyse des variables étudiées32
2. Directions de la recherche
2.1. Cadre de l'étude33
2.2. De l'intérêt d'une analyse tridimensionnelle
2.3. Effets du niveau et du genre sur la performance au virage crawl

1. LE VIRAGE CRAWL : ÉTUDES CINÉMATIQUES ET DYNAMIQUES

La plupart des études menées sur le virage crawl ont été réalisées par des chercheurs australiens. Très peu d'études sont exclusivement dynamiques [Taka83] ou exclusivement cinématiques (analyses de courses [Chow84] [Arel94] [Maso01]), les autres études rapportées dans cet état de l'art combinent une approche cinématique et dynamique du mouvement.

1.1. <u>Impulses exerted in performing several kinds of swimming turns, BMS III</u> [Nico79]

Dans une étude publiée en 1979, Nicol et Krüger initient une analyse biomécanique descriptive et comparative du virage culbute et du virage ouvert encore utilisé à l'époque lors des épreuves de nage libre.

Les auteurs y évoquent les difficultés rencontrées par les études antérieures pour quantifier et distinguer l'efficacité de différentes techniques, les recherches précédentes étant conduites à l'aide de chronomètres manuels et de bandes vidéo. Cette étude est la première concernant les virages à être présentée lors de la série de congrès *Biomechanics and Medicine in Swimming* (BMS).

Cinq nageurs universitaires entrainés (quatre femmes et un homme) ont participé à cette étude pilote.

Chacun a exécuté trois fois une poussée au mur suivie d'une phase de glisse, sans coulée ni reprise de nage (a), un virage culbute complet (b), un virage ouvert complet (c) et un virage culbute suivi seulement d'une phase de glisse (d).

À l'aide d'un système automatisé de chronométrage (électrodes de cuivre fixées aux lignes d'eau et à la taille du nageur), les auteurs ont mesuré la vitesse moyenne d'approche à l'aller V_A (entre des lignes situées à 6 mètres et 3 mètres du mur), la vitesse moyenne en sortie de virage au retour V_R (entre des lignes situées à 3 mètres et 6 mètres du mur) et le temps mis pour parcourir un aller-retour dans la zone délimitée par une ligne située à 3 mètres du mur et le mur de virage (décomposé en temps à l'aller T_A , temps de contact T_C et temps au retour T_R , Figure 2). Grâce à une plateforme de force à capacitance, les auteurs ont mesuré l'impulsion horizontale pendant le contact (Figure 3). Ils ont également mesuré la distance maximale parcourue en phase de glisse (aucun mouvement propulsif), pour les exercices (a) et (d).



Figure 2 : Représentation des variables cinématiques mesurées [Nico79]



Figure 3 : Évolution de la force et de l'impulsion de contact lors d'un virage (en vert) et lors d'un exercice de poussée (en violet) [Nico79]

Les auteurs ont montré que le temps du virage est plus court avec la technique culbute qu'avec le virage ouvert mais également que la vitesse moyenne en sortie de virage est plus faible. Ce second résultat s'accorde avec le fait que la distance maximale de glisse est réduite après le virage culbute (d) par rapport à une poussée simple (a) et ce alors que les impulsions enregistrées lors des exercices ne sont pas significativement différentes (Tableau 1).

Une hypothèse explicative avancée par les auteurs serait d'une part que, lors de la culbute, des résistances hydrodynamiques supplémentaires seraient induites par la vrille et d'autre part que le virage culbute demanderait une plus grande habileté.

Type d'exercice	Vitesse d'approche (V _A , m/s)	Temps à l'aller (T _A , s)	Impulsion (N.s)	Temps de contact (T _c , s)	Glisse (G, m)	Temps au retour (T _R , s)	Vitesse en sortie de virage (V _R , m/s)
Poussée suivie d'une	/	/	210	*0,62	8,20	/	/
phase de glisse (a)	/	/	± 26	± 0,17	± 0,95	/	1
Virago culhuto (h)		2,56			,		1,26
vilage culbute (b)	1,36	± 0,34	217	0,51	/	1,12	± 0,07
Virago ouvert (a)	± 0,11	2,83	± 28	± 0,11	,	± 0,27	1,36
virage ouvert (c)		± 0,18			/		±0,11
Virage culbute suivi		1	229	*0,62	7,00	. /	1
d'une phase de glisse (d)	/	/	± 35	± 0,17	± 0,95	/	/

Tableau 1 : Moyennes et écarts-types des variables mesurées [Nico79]

/ : valeur non mesurée

* : le temps de contact des exercices (a) et (d) a été moyenné

1.2. <u>Propulsive force generated by swimmers during a turning motion, BMS IV</u> [Taka83]

Dans une étude publiée en 1983, Takahashi et ses collaborateurs rappellent que seuls Nicol et Krüger [Nico79] ont étudié jusqu'alors le virage de compétition. L'objectif principal de la présente

étude est d'analyser la relation entre la force générée par le nageur en poussant sur le mur lors d'un virage et la vitesse horizontale du nageur après le virage.

Six nageurs adultes, dont trois nageurs entrainés et trois nageurs amateurs, ont participé à cette étude. Leur stature moyenne était de 1,71 m (statures individuelles comprises entre 1,60 et 1,81 m) et leur masse corporelle moyenne de 70,7 kg (masses individuelles comprises entre 65 et 85 kg).

Le premier exercice demandé était une poussée sur le mur (départ dans l'eau) non suivie de mouvements propulsifs (a). Le but de l'exercice était de parcourir la plus grande distance sousmarine possible en glissant. Le second exercice y ajoutait le virage (b). Là le nageur devait également parcourir la plus grande distance sous-marine possible sans aucun mouvement propulsif excepté la poussée sur le mur qui suit le demi-tour. Trois essais pour chaque condition ont été réalisés et, de l'avis de l'entraineur qui suivait le mouvement à l'aide d'une caméra sous-marine, la meilleure poussée (a) et le meilleur virage (b) ont été conservés pour analyse.

Les auteurs ont attaché un électro-goniomètre au genou droit des nageurs pour mesurer l'évolution de l'angle de flexion du genou (entre la cuisse et la jambe) durant le contact avec le mur, mur équipé d'une plateforme piézoélectrique étanche (Takei-Kiki, Tokyo) pour enregistrer les pics de force et les impulsions. Afin de mesurer la vitesse horizontale de glisse du nageur lors des exercices de poussée (a), les auteurs ont également utilisé un *speed meter* [Ohmi81] (Takei-Kiki, Tokyo) attaché par une ceinture à la taille du sujet. Toutes les valeurs mesurées sont rapportées dans le tableau 2.

		Impulsio	on (N.s)	Pic de force (N)		Vitesse maximale (m/s)	Flexion maximale du genou (°)		Durée du contact (s)	
Exercice		Poussée	Virage	Poussée	Virage	Poussée	Poussée	Virage	Poussée	Virage
	1	237	250	804	1176	2,87	65	82	0,41	0,35
Nageurs	2	269	351	1205	1999	3,07	61	98	0,38	0,29
entrainés	3	213	305	833	1960	2,99	41	49	0,38	0,44
0	m	240	302	947	1712	2,98	56	76	0,39	0,36
	ét	± 28	± 51	± 224	± 464	± 0,10	± 13	± 25	± 0,02	± 0,08
	4	190	230	764	862	2,67	41	33	0,36	0,44
Nageurs	5	194	215	1352	1323	2,80	57	45	0,31	0,57
amateurs	6	197	225	803	1019	2,70	49	49	0,45	0,44
	т	194	224	973	1068	2,72	49	42	0,37	0,48
	ét	±4	±8	± 329	± 234	± 0,07	± 8	± 8	± 0,07	± 0,08
Moyenn	е	217	263	960	1390	2,85	52	59	0,38	0,42
Écart-typ	e	± 31	± 54	± 252	± 482	± 0,16	± 10	± 25	± 0,05	± 0,10
		p < (),05	n.	s.	-	n.	s.	n.	s.

Tableau 2 : Valeurs, moyennes (m) et écarts-types (ét) des impulsions, pics de force, vitesses, anglesde flexion maximale du genou et durées de contact [Taka83]

n.s. : différence non significative entre l'exercice de poussée et le virage

Lors de l'exercice de poussée (a), la vitesse maximale et l'impulsion horizontale ont été reliées linéairement (Figure 4). Cette relation est évidente pour un exercice réalisé hors de l'eau, lors d'un *squat jump* par exemple, mais n'avait jusqu'alors pas été observée dans l'eau où les caractéristiques du milieu (densité, viscosité) associées aux caractéristiques du mouvement (vitesse, forme du corps du nageur) créent une résistance hydrodynamique. En outre, les auteurs ont observé

que les trois nageurs entrainés présentent des impulsions plus grandes et des vitesses plus élevées que les trois nageurs amateurs.

De la même manière, les nageurs entrainés présentent des flexions maximales du genou moins importantes (angles minimaux plus grands) que les nageurs amateurs. Les auteurs rapportent aussi que les pics de force coïncident avec un angle de flexion du genou d'environ 120° et mettent ce résultat en rapport aux 120-140° enregistrés lors de saut verticaux [Ae82] et aux 114-125° enregistrés lors d'exercices isocinétiques de contraction maximale [Thor76].

Lors des poussées au mur (a), la vitesse horizontale de glisse enregistrée des six sujets décroit hyperboliquement selon l'équation suivante déterminée par la méthode des moindres carrés :

$$V = \frac{V_0}{0,33 \, V_0 \, t \, + \, 1}$$

Où V est la vitesse horizontale du nageur à l'instant t et V_0 la vitesse moyenne initiale.

Le matériel employé ne permettant pas de mesurer la vitesse lors des virages (b), les auteurs s'appuient sur la relation linéaire entre l'impulsion et la vitesse obtenue lors des poussées (Figure 4), la différence significative d'impulsion entre les poussées et les virages (Tableau 2) et la relation linéaire entre les impulsions (Figure 5) pour émettre l'hypothèse que la vitesse générée lors des virages (b) serait supérieure à celle générée lors de simples poussées (a).



Figure 4 : Relation entre la vitesse maximale et l'impulsion lors d'un exercice de poussée [Taka83]



Figure 5 : Relation entre l'impulsion lors du virage et l'impulsion lors d'un exercice de poussée [Taka83]

1.3. <u>Turning techniques of elite swimmers, Journal of Sports Sciences [Chow84]</u>

Lors des Jeux du Commonwealth 1982, Chow et ses collaborateurs (1984) ont été les premiers à étudier les virages lors de courses en compétition.

À l'aide de deux caméras de 16 mm placées perpendiculairement aux couloirs de nage dans les tribunes latérales, ils ont analysé les techniques de virage utilisées par les finalistes de 19 épreuves individuelles (Tableau 3).

Épreuve		Hommes			Femmes	
(nage libre)	Nageurs	Virages	Observations	Nageuses	Virages	Observations
100 m	8	1	8	8	1	8
200 m	8	3	24	8	3	24
400 m	8	4	32	8	6	48
800 m				8	6	48
1500 m	6	15	90			

Tableau 3 : Nombre d'observations pour les épreuves de nage libre [Chow84]

Les auteurs ont défini le début du virage comme l'instant de la dernière immersion d'une main du nageur avant le virage. De la même manière, ils ont défini la fin du virage comme l'instant où se termine le premier cycle de bras (première immersion d'une main du nageur) après le virage. À ces instants, les auteurs ont mesuré la distance horizontale entre la tête du nageur et le mur (D_{in} et D_{out}) et le temps séparant ces instants du premier contact des pieds du nageur avec le mur (T_{in} et T_{out}). Ils ont ensuite calculé les vitesses moyennes ($V_{in} = D_{in} / T_{in}$ et $V_{out} = D_{out} / T_{out}$) et le temps total du virage ($TT = T_{in} + T_{out}$).

Épreuve	D _{in} (m)	T _{in} (s)	V _{in} (m/s)	D _{out} (m)	T _{out} (s)	V _{out} (m/s)	TT (s)
100 m	2,13 ± 0,57	1,27 ± 0,32	1,67 ± 0,10	5,07 ± 0,41	2,08 ± 0,18	2,44 ± 0,14	3,35 ± 0,44
200 m	2,04 ± 0,28	1,28 ± 0,19	1,61 ± 0,06	4,93 ± 0,48	1,96 ± 0,30	2,54 ± 0,14	3,24 ± 0,34
400 m	2,03 ± 0,25	1,37 ± 0,17	1,49 ± 0,11	4,71 ± 0,20	1,97 ± 0,14	2,40 ± 0,13	3,34 ± 0,25
1500 m	1,95 ± 0,14	1,33 ± 0,09	1,47 ± 0,05	4,64 ± 0,23	1,98 ± 0,16	2,37 ± 0,11	3,31 ± 0,25

Tableau 4 : Moyennes et écarts-types des variables cinématiques lors des épreuves masculines de nage libre [Chow84]

Épreuve	D _{in} (m)	T _{in} (s)	V _{in} (m/s)	D _{out} (m)	T _{out} (s)	V _{out} (m/s)	TT (s)
100 m	2,07 ± 0,28	1,28 ± 0,12	1,62 ± 0,11	4,38 ± 0,66	2,00 ± 0,41	2,22 ± 0,18	3,28 ± 0,43
200 m	1,80 ± 0,21	1,21 ± 0,14	1,49 ± 0,11	4,13 ± 0,38	1,76 ± 0,25	2,37 ± 0,21	2,97 ± 0,33
400 m	1,79 ± 0,22	1,26 ± 0,17	1,42 ± 0,07	3,89 ± 0,40	1,74 ± 0,27	2,26 ± 0,20	3,00 ± 0,35
800 m	1,68 ± 0,10	1,21 ± 0,06	1,39 ± 0,09	3,82 ± 0,40	1,70 ± 0,28	2,23 ± 0,17	2,94 ± 0,29

Tableau 5 : Moyennes et écarts-types des variables cinématiques lors des épreuves féminines de nage libre [Chow84]

L'analyse des distances et des vitesses moyennes en début et en fin de virage (D_{in} , D_{out} , V_{in} et V_{out}) a montré des différences significatives entre les genres, les hommes ayant des valeurs moyennes plus élevées que les femmes pour toutes les épreuves (Tableau 4 et Tableau 5).

Dans les épreuves de nage libre, les distances en entrée et en sortie (D_{in} et D_{out}) et la vitesse moyenne en entrée V_{in} ont tendance à diminuer lorsque la longueur de l'épreuve augmente (Tableau 4 et Tableau 5). Cela signifie que, pour les épreuves de sprint, la vitesse en approche de virage augmente et que les nageurs initient leur virage plus loin du mur. La diminution de la distance en sortie D_{out} peut être due à une poussée sur le mur moins importante lors des épreuves de demifond où le nageur évolue avec plus d'économie.

Les auteurs ont montré que, lors des épreuves de demi-fond (800 m pour les femmes et 1500 m pour les hommes), la vitesse moyenne en sortie de virage V_{out} était significativement corrélée

à la fois avec le temps total de l'épreuve et l'ordre d'arrivée (Tableau 6 et Tableau 7). Ainsi plus la vitesse en sortie de virage est grande, meilleurs seront le temps final et la place à l'arrivée.

Pour les épreuves de nage libre, la corrélation entre le temps total du virage et le temps total de l'épreuve augmente systématiquement avec la longueur de l'épreuve (Tableau 6 et Tableau 7). La technique de virage revêt ainsi une importance grandissante avec la longueur de l'épreuve.

Épreuve	r	te	ra	a
(nage libre)	V_{out}	TT	V_{out}	TT
100 m	-0,43	-0,18	-0,54	-0,07
200 m	0,11	0,39	-0,54	0,45
400 m	-0,35	0,46	-0,24	0,47
1500 m	-0,82*	0,65	-0,86*	0,70

Tableau 6 : Coefficients de corrélation entre la vitesse en sortie (V_{out}) ou le temps total du virage (TT) et le temps total de l'épreuve (r_{te}) ou l'ordre d'arrivée (r_{oa}) pour les épreuves masculines de nage libre

* : p ≤ 0,05

-				
Épreuve	r	te	٢ _c	Da
(nage libre)	V_{out}	TT	V_{out}	TT
100 m	-0,16	-0,24	-0,18	-0,16
200 m	-0,59	0,29	-0,56	0,28
400 m	-0,44	0,42	-0,45	0,41
800 m	-0,73*	0,63	-0,71*	0,61

[Chow84]

* : p ≤ 0,05

1.4. Analysis of 50-, 100-, and 200-m freestyle swimmers at the 1992 Olympic Games, Journal of Applied Biomechanics [Arel94]

Lors des JO de Barcelone, Arellano et ses collaborateurs (1994) ont filmé toutes les épreuves de 50, 100 et 200 m nage libre. L'âge, la stature, la masse corporelle, la fréquence de nage (nombre de cycles de bras par seconde), l'amplitude de nage (distance parcourue par cycle de bras), le temps au départ (temps pris au passage de la tête après 10 m de course), les temps au virage (7.5mRTT soit le temps mis pour parcourir un aller-retour dans la zone délimitée par une ligne située à 7,5 mètres du mur et le mur de virage), le temps réalisé sur la partie finale de l'épreuve (derniers 10 m parcourus) et la vitesse moyenne de nage ont été mesurés et reliés au temps total de l'épreuve. Les objectifs de cette étude étaient au nombre de trois : évaluer les corrélations entre toutes les variables mesurées pour les hommes et les femmes, comparer les hommes et les femmes et étudier les différences selon les trois longueurs d'épreuve étudiées.

Les courses de 200 nageurs et 135 nageuses ont été analysées.

Les expérimentateurs ont utilisé trois caméras S-VHS fixes filmant à 30 Hz dont ils ont jugé la précision satisfaisante pour l'étude considérée. Les caméras étaient placées au-dessus des tribunes

Tableau 7 : Coefficients de corrélation entre la vitesse en sortie (V_{out}) ou le temps total du virage (TT) et le temps total de l'épreuve (r_{te}) ou l'ordre d'arrivée (r_{oa}) pour les épreuves féminines de nage libre [Chow84]

Chapitre 1

des spectateurs, à 10 m au dessus de la surface du bassin et à 25 m du bord du bassin. La première caméra filmait la zone des départs, la seconde une zone de 30 m de long au milieu du bassin et la troisième caméra la zone des virages. Chaque caméra filmait toute la largeur du bassin soit l'ensemble des huit couloirs de nage, chaque couloir étant occupé par un nageur. Les flotteurs des lignes d'eau, dont la couleur était alternée tous les 5 m, ont servi de mires de calibration.

À cause d'une forte corrélation entre la stature et la masse corporelle (r > 0,79), les résultats impliquant la masse corporelle n'ont pas été détaillés dans l'étude.

	Hom	nmes	Femmes		
Variable	100 m	200 m	100 m	200 m	
Observations	66 ≤ n ≤ 75	46 ≤ n ≤ 54	45 ≤ n ≤ 48	34 ≤ n ≤ 37	
Âge (années)	22,0 ± 3,39	21,2 ± 3,26	19,9 ± 3,3	19,4 ± 2,81	
Masse corporelle (kg)	76,8 ± 10,1	76,8 ± 8,2	61,8 ± 7,2	61,9 ± 7,1	
Stature (m)	1,85 ± 0,10	1,85 ± 0,07	1,72 ± 0,07	1,72 ± 0,08	
Temps total (s)	52,97 ± 3,45	114,5 ± 5,84	58,23 ± 2,29	124,5 ± 4,55	
Départ (s)	4,08 ± 0,35	4,10 ± 0,31	4,43 ± 0,20	4,76 ± 0,26	
Arrivée (s)	5,84 ± 0,72	6,00 ± 0,40	6,20 ± 0,27	6,62 ± 0,31	
Vitesse de nage (m/s)	1,84 ± 0,10	1,70 ± 0,08	1,67 ± 0,07	1,58 ± 0,06	
Fréquence (cycles/s)	0,89 ± 0,08	0,78 ± 0,06	0,88 ± 0,07	0,79 ± 0,07	
Amplitude (m)	2,09 ± 0,22	2,20 ± 0,21	1,92 ± 0,18	2,03 ± 0,20	
Début de virage (s)	4,28 ± 0,25	4,73 ± 0,28	4,77 ± 0,18	5,13 ± 0,18	
Fin de virage (s)	3,36 ± 0,32	3,55 ± 0,25	3,82 ± 0,28	4,01 ± 0,21	

Tableau 8 : Valeurs moyennes et écarts-types des paramètres mesurés lors des 100 m et 200 m nage libre [Arel94]

	Hommes				Femmes				
Variable	100 m		200	200 m		100 m		200 m	
Variable	Début de	Fin de							
	virage	virage	virage	virage	virage	virage	virage	virage	
Stature	-0,65*	-0,77*	-0,73*	-0,63*	-0,36*	-0,52*	-0,42*	-0,66*	
Temps total	0,93*	0,91*	0,93*	0,91*	0,90*	0,71*	0,88*	0,84*	
Départ	0,82*	0,86*	0,76*	0,80*	0,49*	0,47*	0,63*	0,76*	
Arrivée	0,63*	0,66*	0,78*	0,68*	0,61*	0,47*	0,68*	0,63*	
Vitesse de nage	-0,90*	-0,84*	-0,89*	-0,86*	-0,90*	-0,64*	-0,82*	-0,75*	
Fréquence	0,08	-0,00	0,12	0,06	0,16	0,51*	0,23	0,31	
Amplitude	-0,54*	-0,47*	-0,56*	-0,50*	-0,52*	-0,67*	-0,47*	-0,53*	
Début de virage		0,82*		0,88*		0,52*		0,75*	

Tableau 9 : Coefficients de corrélations linéaires entre le temps en début de virage (7,5 m avant lemur), le temps en fin de virage (7,5 m après le mur) et les autres variables mesurées [Arel94]

* : p < 0,05

Les fortes corrélations entre le temps total de l'épreuve et les temps au virage ($r \ge 0,88$ pour le début du virage ; $r \ge 0,71$ pour la fin du virage) démontrent l'importance du virage dans la performance globale d'une épreuve.

L'étude a montré que les meilleurs nageurs sont ceux qui nagent avec la plus grande amplitude et à la plus grande vitesse moyenne, sont les plus grands et parcourent chaque portion de l'épreuve (départ, nage et virages) le plus rapidement (se référer au tableau 9 pour les corrélations entre les temps au virage et les autres paramètres de course).

Les hommes sont plus vieux que les femmes, plus grands, parcourent chaque portion de l'épreuve plus rapidement et ont une plus grande amplitude de nage.

Lorsque la distance de l'épreuve augmente (de 50 m à 200 m), l'amplitude et le temps pour parcourir chaque portion augmentent, la fréquence et l'âge des nageurs diminuent.

Concernant les virages, les auteurs ont aussi montré que les temps au virage augmentaient avec la distance de l'épreuve. Ils ont montré également que le pourcentage du temps total de l'épreuve passé au virage allait de 14,42% pour les hommes et 14,75% pour les femmes au 100 m jusqu'à 21,69% pour les hommes et 22,02% pour les femmes au 200 m (pourcentages calculés sur les valeurs présentées dans le tableau 8).

Il apparait finalement que le temps au départ, les temps en entrée et en sortie de virage, le temps réalisé sur la fin de l'épreuve et l'amplitude de nage sont les principaux composants de la performance finale.

1.5. <u>Force plate and video analysis of the tumble turn by age-group swimmers,</u> <u>Journal of Swimming Research [Blan96]</u>

À l'aide d'un électro-goniomètre, Takahashi et ses collaborateurs [Taka83] ont rapporté que les meilleures performances au virage étaient réalisées avec de faibles flexions de genoux. Blanksby et ses collaborateurs (1996) ont exploré cette idée en étudiant, parmi d'autres variables cinématiques et dynamiques, le niveau maximal de flexion des membres inférieurs lors du contact au mur d'un virage culbute.

Trente-six jeunes nageurs de groupe d'âge, 17 garçons et 19 filles, ont participé à cette étude. Tous s'entrainaient depuis au moins trois ans et à raison de trois entrainements hebdomadaires de 90 minutes chacun en date de l'expérience. Les garçons âgés de $11,8 \pm 0,8$ ans mesuraient en moyenne $1,57 \pm 0,04$ m et pesaient $46,6 \pm 4,9$ kg. Les filles âgées de $11,9 \pm 0,7$ ans mesuraient en moyenne $1,56 \pm 0,04$ m et pesaient $46,0 \pm 6,0$ kg. La hauteur du trochanter (du sol au bord supérieur du grand trochanter) a été mesurée pour chaque sujet.

Après échauffement, tous les nageurs ont réalisé trois fois un 50 m nage libre à vitesse maximale. Les 50 m ont été nagés dans un bassin de 25 m. L'essai réalisé dans le meilleur temps a été conservé pour analyse.

Une caméra vidéo était fixée à 0,2 m sous la surface de l'eau, perpendiculairement au mouvement du nageur, à 10 m de lui et à 5 m du mur de virage. Une seconde caméra était placée de la même manière, à 8 m du nageur et à 2,5 m du mur de virage. Une tige de calibration de 5 m de long, présentant des marqueurs espacés de 0,1 m, a été placée sous le nageur. Les enregistrements vidéos ont été numérisés à 50 im/s, le centre de la tête et le trochanter ont été suivis image par image.

Les forces, les impulsions et les temps de contact ont été obtenus à l'aide d'une plate forme de force à jauges de contraintes fixée au mur de virage.

Les variables mesurées étaient : le temps total au 50 m, les temps au virage (5mRTT et 2.5mRTT), le temps de contact des pieds avec la plateforme de force, le pic de force horizontal (normal à la plate forme), l'impulsion, la vitesse maximale en sortie de virage, le *tuck index*, la distance entre la tête et le mur en début de retournement, la distance entre la tête et le mur lorsque le nageur recommence à nager et enfin la vitesse du nageur à cet instant. Le niveau maximal de

flexion est défini à l'instant où la distance trochanter-mur est minimale lors du contact. Le rapport de cette distance sur la hauteur du trochanter est le *tuck index*. Le début de retournement est défini comme l'instant où le nageur initie un mouvement vertical descendant de la tête. La reprise de nage est décrite comme l'instant du premier mouvement de la main du nageur en fin de glisse. La vitesse à la reprise de nage est la vitesse moyenne calculée sur les derniers 0,3 m de la phase de glisse.

Variable	m ± ét
Stature (m)	1,57 ± 0,04
Masse corporelle (kg)	46,3 ± 5,5
Âge (années)	11,8 ± 0,7
Temps au 50 m (s)	38,64 ± 3,39
5mRTT (s)	7,66 ± 0,79
2.5mRTT (s)	3,70 ± 0,47
Pic de force horizontale (N)	693 ± 228
Temps de contact (s)	0,58 ± 0,20
Impulsion (N.s)	177 ± 50
Tuck index (%)	56,6 ± 17,2
Début du retournement (m)	0,62 ± 0,18
Reprise de nage (m)	2,51 ± 0,58
Vitesse maximale (m/s)	2,05 ± 0,29
Vitesse à la reprise de nage (m/s)	1,35 ± 0,24

Tableau 10 : Moyennes et écarts-types (m ± ét) des variables mesurées [Blan96]

Une première analyse statistique ne montrant pas de différence significative entre les temps au virage (5mRTT) des garçons et des filles a permis aux auteurs de regrouper tous les nageurs au sein d'un même groupe de 36 individus (Tableau 10).

Les fortes corrélations entre le temps au 50 m et les temps au virage (r = 0,90 pour 5mRTT ; r = 0,72 pour 2.5mRTT) appuient les résultats antérieurs obtenus lors d'analyses de courses [Arel94] démontrant l'importance du virage dans la performance globale d'une épreuve.

Une régression linéaire multiple pas à pas a été conduite afin de déterminer les meilleurs indicateurs de la performance au virage (r = 0,775, $r_{ajusté}^2$ = 0,549) : 5mRTT = 18,115 - 0,160 *Pic de force* - 0,302 *Reprise de nage* - 1,384 *Retournement* - 0,049 *Stature*.

Le pic de force horizontal représenterait 33% de la performance au virage, la distance de reprise de nage 11%, la distance de retournement 5% et la stature 5% également.

En séparant le groupe de nageurs en tiers en fonction de leur performance au virage (5mRTT), les auteurs ont montré que ce qui distinguait les meilleurs des moins bons vireurs était le temps total au 50 m, les temps au virage (5mRTT et 2.5mRTT), le pic de force, le temps de contact, le début du retournement, la distance de reprise de nage et la vitesse maximale atteinte (Tableau 11).

	Groupe de nageurs ayant	Groupe de nageurs ayant	
Variable	réalisé les meilleurs temps	réalisé les moins bons	
	au virage	temps au virage	
Temps au 50 m (s)	35,61 ± 2,68	41,82 ± 1,97	p < 0,05
5mRTT (s)	6,76 ± 0,40	8,50 ± 0,18	p < 0,05
2.5mRTT (s)	3,22 ± 0,33	$4,18 \pm 0,14$	p < 0,05
Pic de force horizontale (N)	805 ± 224	548 ± 167	p < 0,05
Temps de contact (s)	0,47 ± 0,16	0,73 ± 0,21	p < 0,05
Impulsion (N.s)	186 ± 52	161 ± 27	n.s.
Tuck index (%)	62,7 ± 19,0	49,3 ± 15,6	n.s.
Début du retournement (m)	0,75 ± 0,17	$0,54 \pm 0,14$	p < 0,05
Reprise de nage (m)	2,77 ± 0,56	2,16 ± 0,31	p < 0,05
Vitesse maximale (m/s)	2,17 ± 0,21	1,85 ± 0,21	p < 0,05
Vitesse à la reprise de nage (m/s)	1,36 ± 0,21	1,36 ± 0,26	n.s.

Tableau 11 : Comparaison des meilleurs (1^{er} tiers) et des moins bons vireurs (3^{ème} tiers) [Blan96]

n.s. : différence non significative entre les meilleurs et les moins bons vireurs

Les résultats de cette étude indiquent qu'un pic de force élevé et un temps de contact réduit permettent de réduire les temps au virage et le temps total d'un 50 m nage libre. Selon les auteurs, les entraineurs devraient inciter les nageurs à élever leur vitesse d'approche, tourner rapidement et appuyer fermement sur le mur. De plus, les nageurs devraient apprendre à reprendre à nager au bon moment, c'est-à-dire ni trop tôt pour pouvoir bénéficier pleinement des forces de réaction de la poussée au mur, ni trop tard pour ne pas devoir dépenser un surplus d'énergie pour atteindre à nouveau leur vitesse de nage. Cette étude suggère également que débuter le retournement assez loin du mur ou avoir les jambes relativement tendues au début du contact permettrait de réaliser des virages plus rapides.

1.6. <u>A kinematic and kinetic analysis of the freestyle and butterfly turns, Journal of</u> <u>Swimming Research [Lytt97]</u>

L'objectif de l'étude menée par Lyttle et Mason (1997) était de fournir une analyse complète des paramètres cinématiques et dynamiques qui affectent la performance des virages crawl et papillon de nageurs élites. Les virages crawl et papillon ont été choisis car ils représentent les deux méthodes actuelles employées lors d'un virage en natation de compétition, le virage culbute d'une part (que l'on retrouve lors des épreuves de nage libre et de dos), le virage ouvert d'autre part (comme en papillon et en brasse).

Sept nageurs masculins de niveau national et international ont participé à cette étude. Trois d'entre eux étaient spécialistes des épreuves de nage libre, quatre étaient des papillonneurs. Les caractéristiques des crawleurs étaient : $19,0 \pm 1,0$ ans, $1,88 \pm 9,42$ m, $77,5 \pm 3,6$ kg.

Chaque nageur a effectué au moins sept virages à vitesse maximale dans sa spécialité. Les essais ont ensuite été moyennés afin d'obtenir un profil de virage de chaque nageur.

Pour l'analyse dynamique, une plateforme intégrant quatre capteurs de forces triaxiaux (Kistler 9251A, Suisse) a été conçue et fixée verticalement sur le mur du virage, au milieu du couloir de nage. La fréquence d'acquisition des capteurs était de 500 Hz. Les variables mesurées étaient le pic de force horizontal, l'impulsion et le temps de contact avec le mur. Les valeurs absolues et

relatives (par rapport à la masse corporelle du nageur) du pic de force (N et bw pour *body weight*) et de l'impulsion (N.s et bw.s) ont été retenues pour l'analyse. Le premier contact a été initialement déterminé par observation d'un expérimentateur (noté « déclenchement manuel » sur la figure 6). Cette observation coïncidant avec une augmentation des forces verticales et horizontales enregistrées, les auteurs décidèrent que le contact débutait avec ces augmentations de force et se terminait par l'annulation de la force horizontale.



Figure 6 : Exemple d'enregistrement dynamique lors d'un virage culbute crawl [Lytt97] Exemple où le pic de force horizontale atteignait 1558 N, le contact durait 0,27 s et l'impulsion valait 279 N.s.

Le système Kinex d'analyse pour la natation (Estonie) a été utilisé pour l'analyse cinématique (Tableau 12).

Variable cinématique	Virage crawl		
Début de rotation	Distance tête-mur à l'immersion totale de la tête		
Tomps do rotation	Intervalle de temps entre l'immersion totale de la tête et le		
remps de rotation	contact des pieds avec le mur		
Vitesse de poussée	Vitesse moyenne durant le contact des pieds avec le mur		
Durás de la glisse	ntervalle de temps entre la fin du contact des pieds avec le mur		
Duree de la glisse	et le premier mouvement de bras		
Vitosso do glisso	Vitesse moyenne entre la fin du contact des pieds avec le mur et		
vitesse de glisse	le premier mouvement de bras		
Vitesse de nage (1 ^{er} cycle)	Vitesse moyenne durant le premier cycle complet de bras		
Kinov turn chood	Vitesse moyenne entre l'immersion totale de la tête et la fin du		
Killex turn speed	premier cycle complet de bras		
Vitassa mayanna du viraga	Vitesse moyenne de virage entre les deux passages successifs à		
vitesse moyenne du vilage	la distance de 7,5 m		

Tableau 12 : Définition des variables cinématiques utilisées [Lytt97]

Deux caméras fixées sur un chariot mobile ont permis d'obtenir une vidéo à 25 im/s combinant une vue sous-marine et une vue aérienne de l'ensemble du mouvement de virage (de 15 m avant le mur de virage jusqu'à 15 m après). Des marqueurs sous-marins placés tous les mètres (dans les quatre premiers mètres) puis tous les deux mètres ont permis la calibration du système Kinex.

Variable Virage crawl Début de rotation (m) 0,97 ± 0,05 Temps de rotation (s) 0,72 ± 0,05 Vitesse de poussée (m/s) 1,47 ± 0,19 Durée de la glisse (s) 1,33 ± 0,24 Vitesse de glisse (m/s) 1,85 ± 0,08 Vitesse de nage (m/s) 1,74 ± 0,04 *Kinex turn speed* (m/s) $1,99 \pm 0,04$ Vitesse moyenne du virage (m/s) 1,88 ± 0,05 Pic de force horizontal (N) 1345 ± 236 Pic de force horizontal (bw) 1,77 ± 0,28 Temps de contact (s) 0,29 ± 0,05 Impulsion (N.s) 247 ± 29 Impulsion (bw.s) 0,33 ± 0,03

Le faible nombre de nageurs participant à l'étude n'a permis aux auteurs qu'une analyse statistique descriptive (Tableau 13).

Tableau 13 : Moyennes et écarts-types des variables étudiées [Lytt97]

Associée aux valeurs cinématiques et dynamiques, une analyse qualitative individuelle du virage a été rendue possible grâce aux enregistrements vidéos. Les auteurs ont remarqué que, lors de virages où la vitesse de poussée était élevée mais la vitesse de glisse faible, les nageurs effectuaient la poussée dans une position dorsale. Une hypothèse explicative serait que, lors d'une poussée dorsale, la vrille, effectuée nécessairement et exclusivement lors de la phase de glisse, augmenterait fortement la résistance hydrodynamique du nageur. Pour les virages crawl, les auteurs concluent sur les recommandations suivantes :

- Les nageurs devraient maintenir leur vitesse de nage lors de l'approche du virage. Une approche lente pourrait être révélée par une forte différence entre la *Kinex turn* speed et la vitesse moyenne du virage. De même un mauvais timing lors de la rotation pourrait entrainer une trop faible impulsion.
- Les nageurs devraient maintenir une position profilée lors de la glisse. Des petits écarts dans l'alignement causent une augmentation de la trainée de forme et ralentissent la glisse, ce qui a été observé chez les nageurs débutant la glisse sur le dos.

Les auteurs concluent également sur l'importance de l'utilisation d'une plateforme de force pour l'étude des virages.

1.7. <u>The influence of plyometric training on the freestyle tumble turn, Journal of</u> <u>Science and Medicine in Sport [Coss99]</u>

Cossor, Blanksby et Elliott (1999) ont étudié l'influence d'un entrainement en plyométrie sur la performance au virage crawl. La plyométrie est une technique d'entrainement qui permettrait d'augmenter la force développée sur un temps très court (inférieur à 0,4 s).

Trente-huit nageurs et nageuses adolescents ont participé à cette étude (Tableau 14). Les nageurs ont été également répartis dans deux groupes d'étude : un premier groupe expérimental qui a suivi un entrainement en plyométrie et un second groupe contrôle. La stature et la masse corporelle des nageurs des deux groupes n'étaient pas significativement différentes.

Variable	m ± ét
Âge (années)	11,7 ± 1,16
Stature (m)	1,60 ± 0,8
Masse corporelle (kg)	47,9 ± 9,6

Tableau 14 : Caractéristiques de la population étudiée [Coss99]

La stature et la masse corporelle ont été mesurées lors du dernier test. Les auteurs rapportant également les caractéristiques anthropométriques mesurées lors du premier test, il peut être noté que les jeunes nageurs participant à l'étude sont en pleine croissance (+ 2,6 cm et + 2,2 kg en moyenne au cours des 20 semaines de l'expérience).

Après que leur âge, stature, masse corporelle et hauteur du trochanter aient été relevés, chaque sujet a nagé deux 50 m nage libre à vitesse maximale. Ces deux essais ont été réalisés départ dans l'eau et chronométrés manuellement. Ensuite, chaque sujet a réalisé deux sauts verticaux maximaux (*counter movement jump*) sur le système Plyopower (Optimal Kinetics, Australie) grâce auquel la hauteur et la vitesse de saut ont été mesurés.

Pour l'analyse cinématique des virages, deux caméras sous-marines ont été utilisées. Les caméras ont été placées perpendiculairement au mouvement principal du nageur, à la même profondeur, la première à 5 m du mur, la seconde à 2,5 m. La calibration des images a été réalisée dans le plan sagittal du nageur (plan perpendiculaire à l'axe des caméras) à l'aide de deux tiges de calibration, l'une placée horizontalement sur le fond du bassin, l'autre verticalement en face de la première caméra (à 5 m du mur).

Pendant les 20 semaines de durée du protocole expérimental, tous les entrainements ont été conduits par le même entraineur. Le groupe contrôle a suivi trois entrainements hebdomadaires de 90 minutes chacun, échauffement à sec compris. Le groupe expérimental a suivi trois entrainements hebdomadaires de 75 minutes chacun précédés de 30 minutes d'entrainement en plyométrie. Cet entrainement spécifique était divisé en une période d'échauffement suivie d'exercices de plyométrie suivis d'une période de récupération si bien que chaque entrainement en plyométrie comportait environ 15 minutes d'exercices spécifiques. Trois tests complets (virages et sauts verticaux) ont été réalisés au cours des 20 semaines : un premier test à la semaine 0, un deuxième à la semaine 13 et un troisième test à la fin du protocole, semaine 20.

Les temps aux virages ont été mesurés au passage de la tête du nageur. Lors de chaque test, le 50 m réalisé avec le meilleur virage (temps au 2.5mRTT) a été conservé pour analyse.

Le *tuck index* a été mesuré selon la méthode détaillée par Blanksby [Blan96]. La vitesse en fin de poussée a été déterminée aux hanches du nageur sur les 60 cm qui suivent la fin de contact des pieds avec le mur.

Les données dynamiques (pics de force, impulsion et temps de contact) ont été obtenues grâce à une plateforme de force.

Variable	Groupe expérimental	Groupe contrôle
Temps au 50 m nage libre (s)	37,51 ± 2,90	37,57 ± 3,35
5mRTT (s)	6,94 ± 0,67	6,89 ± 0,65
2.5mRTT (s)	3,32 ± 0,42	3,25 ± 0,37
Tuck index	$0,60 \pm 0,14$	0,65 ± 0,16
Vitesse en fin de poussée (m/s)	1,22 ± 0,29	1,14 ± 0,26
Pic de force absolu (N)	565 ± 152	600 ± 242
Pic de force relatif (bw)	1,17 ± 0,19	1,31 ± 0,26
Impulsion (N.s)	134 ± 40	124 ± 33
Temps de contact (s)	0,50 ± 0,12	0,49 ± 0,12
Hauteur de saut (m)	0,21 ± 0,06	0,22 ± 0,07
Vitesse de saut (m/s)	1,63 ± 0,35	1,70 ± 0,31

Tableau 15 : Moyennes et écarts-types des variables mesurées pour les deux groupes de nageurs lors du dernier test [Coss99]

Variable	r	
Temps au 50 m nage libre (s)	0,85	p < 0,05
5mRTT (s)	0,94	p < 0,05
Tuck index	-0,56	p < 0,05
Vitesse en fin de poussée (m/s)	-0,52	p < 0,05
Pic de force absolu (N)	-0,72	p < 0,05
Pic de force relatif (bw)	-0,66	p < 0,05
Impulsion (N.s)	-0,20	n.s.
Temps de contact (s)	0,42	n.s.
Hauteur de saut (m)	-0,42	n.s.
Vitesse de saut (m/s)	-0,47	p < 0,05

Tableau 16 : Corrélations de Pearson (r) entre le temps au virage (2.5mRTT) et les variables mesuréespour l'ensemble de la population [Coss99]

Le temps au virage (2.5mRTT) est positivement corrélé au temps total au 50 m nage libre ainsi qu'au 5mRTT. Il est négativement corrélé au *tuck index*, à la vitesse en fin de poussée, au pic de force ainsi qu'à la vitesse de saut mesurée par le système Plyopower.

Les auteurs ont remarqué qu'au cours de l'étude, les nageurs ont plus amélioré leur performance au virage (gain de 6,9 à 9,7% au 5mRTT selon le groupe entre le pré-test, semaine 0, et le post-test, semaine 20 ; gain de 7,3 à 10,2% au 2.5mRTT) que leur performance au 50 m nage libre (gain de 2,5 à 3,9%). Les auteurs ont également remarqué que le gain de vitesse en fin de poussée était de l'ordre de 50% pour les deux groupes, sans qu'il y ait de différence significative d'amélioration entre les groupes. L'hypothèse explicative avancée serait que cette amélioration ne soit pas due à l'entrainement spécifique mais à la croissance et à l'entrainement général en natation.

Concernant le *tuck index*, la corrélation négative avec le 2.5mRTT a montré que les nageurs virant avec les jambes les plus tendues réussissaient mieux leur virage, en accord avec Blanksby [Blan96].

Enfin les auteurs ont discuté leur protocole pensant que de futures études sur l'entrainement en plyométrie pourraient être menées. Il serait intéressant d'étudier plutôt des nageurs ayant achevé leur croissance sur lesquels un entrainement spécifique à plus haute intensité pourrait être conduit.

1.8. <u>Investigating kinetics in the freestyle flip turn push-off, Journal of Applied</u> <u>Biomechanics [Lytt99]</u>

Avec cette étude, Lyttle, Blanksby, Elliott et Lloyd ont proposé d'explorer les effets de paramètres dynamiques et hydrodynamiques sur la vitesse créée en fin de poussée de virage crawl. Cette étude, initialement présentée au *XVIth International Symposium on Biomechanics in Sports* [Lytt98], a été publiée l'année suivante dans le *Journal of Applied Biomechanics* [Lytt99].

Trente nageurs masculins expérimentés ont participé à cette étude (Tableau 17). Leurs caractéristiques anthropométriques (masse corporelle, stature, envergure, tours de poitrine, taille et hanches, largeur d'épaules et épaisseur thoracique) étaient homogènes (réduction des variations de trainée de forme) et similaires à celles des nageurs ayant participé aux Championnats du Monde en 1991 [Mazz94].

Chaque nageur a réalisé trois fois un virage crawl à pleine vitesse suivi d'une phase de glisse. Pour chaque nageur, le meilleur virage (meilleur temps au 5mRTT) a été conservé pour analyse.

Variable	m + ét
Age (années)	19,8 ± 2,8
Masse corporelle (kg)	75,7 ± 4,5
Stature (m)	1,81 ± 0,05
Record personnel au 50 m nage libre (s)	26,83 ± 1,13
Temps du virage retenu pour analyse (5mRTT, s)	5,07 ± 0,21

Tableau 17 : Moyennes et écarts-types (m ± ét) des caractéristiques des sujets participant à l'étude [Lytt99]

Dans cette étude, les auteurs ont souhaité mesurer le temps exact correspondant à la poussée sur le mur, la phase « active » du contact. Pour ce faire, ils ont déterminé le début de poussée comme le premier mouvement vers l'avant des hanches du nageur et la fin de poussée comme l'instant suivant le dernier contact des pieds avec le mur.

À l'aide d'une plateforme de force bidimensionnelle (2D) à jauges de contraintes montée verticalement sur le mur du virage, le pic de force horizontal, l'impulsion horizontale lors de la poussée et le temps total de contact avec le mur ont été mesurés à une fréquence d'acquisition de 300 Hz.

L'analyse cinématique a été réalisée à l'aide d'une caméra sous-marine filmant à 60 im/s. La caméra était positionnée perpendiculairement au mouvement principal du nageur à une profondeur de 0,5 m, dans un plan parallèle à la surface de l'eau. La calibration de la caméra a été réalisée avant les passages des nageurs par l'immersion d'une croix de calibration. Des marqueurs ont été dessinés sur les nageurs de manière à visualiser et suivre le mouvement des centres articulaires des poignets,

coudes, épaules, hanches, genoux et chevilles. Le déplacement des centres articulaires a été reconstruit dans le plan sagittal via la méthode DLT [Abde71] puis le déplacement du centre de gravité (CG) déterminé à partir des tables anthropométriques de Dempster [Demp55]. La vitesse du centre de gravité du nageur et son accélération ont été obtenues après filtrage et dérivation successive des positions du CG. Une seconde caméra, positionnée au-dessus de la surface de l'eau et face à la ligne des 5 m, a permis de chronométrer le temps au virage (5mRTT).

Un système *trigger-flash* a été utilisé pour synchroniser les enregistrements dynamiques et cinématiques.

Les forces résistives s'opposant à l'avancement du nageur lors de la poussée (F_{drag} composée des trainées de friction, de forme, de vague et de la force nécessaire à l'accélération de l'eau entourant le nageur ou *added mass*) ont été calculées dans l'axe horizontal suivant l'équation ci-dessous et représentées sur la figure 7 :

$$F_{drag} = \sum (m a_{CG} - F_{prop})$$

Où m est la masse corporelle du nageur, a_{CG} son accélération et F_{prop} les forces propulsives enregistrées par la plateforme de force.



Figure 7 : Évolution des forces propulsives et résistives, de l'accélération et de la vitesse d'un nageur au cours de la poussée (exemple d'un virage culbute crawl) [Lytt99]

Le pic de force résistive ainsi que l'impulsion résistive lors de la poussée ont été calculées et utilisées comme variables hydrodynamiques.

Les moyennes et les écarts-types des paramètres sont présentés dans le tableau 18.

Variable	m ± ét			
Pic de force propulsif (N)	1190 ± 246			
Impulsion propulsive (N.s)	204 ± 55			
Temps de poussée (s)	0,22 ± 0,05			
Temps total de contact (s)	0,32 ± 0,04			
Temps de poussée relatif (%)	67,5 ± 15,2			
Pic de force résistive (N)	-570 ± 238			
Impulsion résistive (N.s)	-63 ± 42			
Vitesse de fin de poussée v_{CG} (m/s)	2,75 ± 0,25			

Tableau 18 : Moyennes et écarts-types (m ± ét) des paramètres analysés [Lytt99]

Une première remarque des auteurs a concerné la large gamme des valeurs des temps de poussée relatifs (de 33 à 94%). Cette variable correspond au rapport entre le temps de poussée et le temps total de contact. Les différences mesurées témoigneraient d'une grande variabilité des techniques de virage employées.

Les auteurs ont également remarqué que pour certains sujets, la vitesse maximale était atteinte un peu avant la fin de la poussée (Figure 7). Ceci serait dû au fait que les forces résistives deviendraient plus importantes que les forces propulsives en fin d'extension des chevilles (flexion plantaire).

Une régression linéaire pas à pas a mis en avant le temps de poussée, le pic de force résistive et le pic de force propulsive comme paramètres déterminant la vitesse de fin de poussée ($F_{3,27} = 15,5$; r = 0,80; r² = 0,64; r²_{ajusté} = 0,60; p = 0,00).

La corrélation positive (r = 0,42) entre le temps de poussée et la vitesse créée suggèrerait qu'une longue poussée pourrait entrainer une grande vitesse. Toutefois allonger le temps de poussée pourrait être préjudiciable au temps total du virage. Il faut garder en tête que la performance correspond directement au temps total et non à la vitesse créée en fin de poussée. La corrélation positive (r = 0,59) entre le pic de force résistive et la vitesse créée suggérerait que plus faible est la résistance plus grande est la vitesse. Enfin la corrélation positive (r = 0,80) entre le pic de force propulsive et la vitesse créée suggérerait que plus élevé est le pic de poussée plus grande est la vitesse. La forte corrélation négative (r = -0,77) entre les pics de forces propulsive et résistive suggéreraient quant à elle qu'un compromis doit être trouvé car une poussée excessive entrainerait également une trainée excessive, préjudiciable à la performance au virage.

Aussi, le profil de F_{drag} jouerait un rôle important dans la création de vitesse. Si le pic de force propulsive apparait précocement lors de la poussée, le pic de force résistive apparaitra également très tôt ce qui aura pour effet de décélérer le nageur avant la fin de sa poussée. Il serait intéressant pour le nageur de pousser progressivement afin de retarder le pic de force propulsive en toute fin de poussée, retardant ainsi le pic de force résistive. Le nageur serait alors plus aligné, dans une position plus profilée, diminuant ainsi les forces de trainée de forme.

1.9. Swim turn performances at the Sydney 2000 Olympic Games, ISBS XIX [Maso01]

Lors des JO de Sydney, Mason et Cossor (2001) ont analysé les virages des finalistes et demifinalistes de toutes les épreuves, quelle que soit la spécialité ou bien la distance.

Cinq caméras aériennes et les temps de passage officiels ont permis ces analyses de courses, deux caméras ont été spécifiquement utilisées pour l'analyse des virages. Toutefois d'inévitables obstructions n'ont permis d'analyser que la moitié des virages d'une même épreuve. Seuls les couloirs numérotés de 1 à 4 étaient visibles sur la caméra filmant les virages réalisés à l'opposé des arrivées, et seuls les couloirs numérotés de 5 à 8 étaient visibles sur la caméra filmant les virages réalisés sur le mur d'arrivée.

Le début du virage (les 7,5 m qui précédaient le contact avec le mur) et la fin du virage (les 7,5 m suivant le contact) ont été chronométrés, le temps total au virage étant le 7.5mRTT, c'est-àdire la somme de ces deux temps. La vitesse de nage précédant le virage (de -25 à -7,5 m) a également été mesurée. Le suivi de la tête du nageur a permis de calculer les temps, les distances et les vitesses de chacune des phases « clés » du virage. Le temps de contact a été déterminé entre le premier contact du nageur avec le mur (information donnée par les temps de passage officiels) et la fin de contact des pieds. Cet évènement étant difficile à observer à cause des bulles d'air présentes autour des pieds du nageur à cet instant, les auteurs ont décidé d'inclure la durée du contact à la durée de la phase sous-marine afin de s'affranchir d'erreurs dues à cette difficulté d'observation. Cependant, la vitesse moyenne de la phase sous-marine n'a été calculée qu'à partir de l'instant où les pieds n'étaient assurément plus en contact avec le mur et jusqu'à ce que la tête du nageur refasse surface. Les auteurs ne rapportent pas les valeurs des variables, seuls les coefficients de corrélations significatives entre les variables sont présentés.

Le fait que la vitesse de nage qui précède le virage ne soit jamais corrélée avec la vitesse au virage, sauf pour le 200 m nage libre féminin (r = -0,55 ; n = 16 ; p \leq 0,05), fait penser aux auteurs que les performances réalisées dans la phase de nage (la vitesse atteinte notamment) ne reflètent pas une certaine habileté au virage.

En ne considérant que les épreuves de nage libre analysées (100 m et 200 m pour les hommes, 100 m, 200 m et 400 m pour les dames), les auteurs n'ont pas démontré d'influence ni de la distance parcourue sous l'eau, ni de la durée de la phase sous-marine sur le temps au virage (7.5mRTT). Excepté pour le 200 m nage libre féminin (r = -0,52 ; n = 16 ; p \leq 0,05) et le 400 m nage libre féminin (r = -0,79 ; n = 8 ; p \leq 0,05), les auteurs n'ont pas observé non plus d'influence de la vitesse moyenne de la phase sous-marine sur la performance au virage.

1.10. <u>Kinematic and dynamographic research in different swimming turns</u>, BMS IX [Dani03]

Daniel, Klauck et Bieder (2003) se sont intéressés à la vitesse atteinte par un nageur au cours d'une poussée sur le mur lors des virages en natation.

Un nageur (1,89 m et 81 kg) et une nageuse (1,69 m et 67 kg) ont participé à cette étude pilote.

Chacun des deux sujets a réalisé trois essais de virage pour chaque style de nage : papillon, dos, brasse et crawl ; ainsi que trois essais de poussée au mur (non précédée d'un demi-tour).

La force de poussée horizontale a été enregistrée via un système composé d'une jauge de contrainte conçu pour l'expérience. Une analyse cinématique sous-marine a été conduite à 200 im/s

par suivi des chevilles, des genoux, des hanches et de la tête des deux nageurs. La vitesse horizontale du centre de gravité et les angles de flexion des genoux et des hanches ont pu être mesurés lors de la phase de poussée. Le temps total de contact ainsi que la durée de la poussée ont été mesurés. L'impulsion a également été calculée. Toutes les valeurs enregistrées lors des essais de poussée au mur et lors des virages crawl sont rapportées dans le tableau 19.

Exercice	Variable	Nageuse					Nageur				
	Valiable	Essai 1	Essai 2	Essai 3	m	ét	Essai 1	Essai 2	Essai 3	m	ét
Virage crawl	Pic de force relatif (N/kg)	/	16,8	17,0	16,9	0,1	15,3	18,8	19,1	17,7	2,1
	Pic de force absolu (N)	/	1126	1139	1132	9	1239	1523	1547	1436	171
	Durée de la poussée (s)	/	0,28	0,27	0,28	0,01	0,33	0,31	0,31	0,32	0,01
	Impulsion (N.s)	/	231	221	226	7	333	317	317	322	9
	Temps total de contact (s)	/	0,38	0,38	0,38	0,00	0,45	0,41	0,42	0,43	0,02
	Vitesse de fin de poussée (m/s)	/	2,40	/	/	/	/	2,53	/	/	/
Poussée	Pic de force relatif (N/kg)	17,0	15,5	14,7	15,7	1,2	15,3	15,2	/	15,3	0,1
	Pic de force absolu (N)	1139	1039	985	1054	78	1239	1231	/	1235	6
	Durée de la poussée (s)	0,23	0,25	0,33	0,27	0,05	0,48	0,48	/	0,48	0,00
	Impulsion (N.s)	169	172	194	178	14	302	304	/	303	1
	Temps total de contact (s)	0,23	0,25	0,33	0,27	0,05	0,48	0,48	/	0,48	0,00
	Vitesse de fin de poussée (m/s)	2,65	/	/	/	/	/	3,31	/	/	/

Tableau 19 : Valeurs, moyennes (m) et écarts-types (ét) des variables étudiées [Dani03]

/ : valeur non mesurée

Les résultats ont montré que seules les valeurs absolues des pics de force horizontaux étaient significativement supérieures chez l'homme, les valeurs de force relatives au poids du sujet ne sont pas significativement différentes.



Figure 8 : Évolution de la force horizontale enregistrée lors d'un virage crawl (en vert) et lors d'une poussée (en violet) pour une nageuse (trait plein) et un nageur (pointillés) [Dani03]

Les auteurs ont observé que lors des virages crawl (Figure 8) et dos, un pic caractéristique d'environ 300 N précédait le pic de poussée. L'hypothèse explicative serait que ce pic correspondrait
au contact initial des pieds avec le mur, survenant en fin de rotation, lors du placement, avant la phase de poussée. Les auteurs ont observé un phénomène similaire lors de la poussée de la nageuse (Figure 8) qu'ils ont expliqué par une correction du placement des pieds sur le mur en tout début de poussée.

De plus, les auteurs ont observé que la plus grande vitesse de fin de poussée atteinte lors de ces essais avait été réalisée par le nageur lors de l'exercice de poussée et expliquent cela par l'absence de vague s'opposant au mouvement du nageur lors de ce type d'exercice.

1.11. <u>Turning force measurement in swimming using underwater force platforms,</u> <u>BMS IX [Roes03]</u>

Lors du IX^{ème} congrès BMS (Saint-Etienne, France, 2002), Helio Roesler (2003) a présenté des travaux antérieurs réalisés lors de sa thèse [Roes97] puis au sein de l'Université de Florianopolis (Brésil) [Arau00] [Mart01] [Hube02].

Deux plateformes de force tridimensionnelles (3D) à jauges de contraintes ont été utilisées lors de ces études. La fréquence d'acquisition était de 600 Hz.

Dans un premier temps une seule plateforme a été montée verticalement au centre du mur de virage du troisième couloir d'une piscine. Trois nageurs de niveaux différents y ont réalisé trois virages crawl chacun. Seule la force horizontale (normale à la plateforme) a été enregistrée (Figure 9). La durée du contact, le pic de force et l'impulsion ont été mesurés.



Figure 9 : Profils de forces horizontales enregistrées chez trois nageurs de niveaux différents [Roes03]

Lors d'une seconde expérimentation, ces mêmes variables ont été mesurées chez cinq nageurs de bon niveau réalisant neuf virages chacun. Les forces horizontales, verticales et latérales ont été enregistrées et les valeurs des variables ont été normalisées par le poids de chaque nageur. Les résultats ont montré que les forces verticales variaient entre 10 et 20% des forces horizontales (Figure 10) et que les forces latérales étaient insignifiantes, que les pics de force horizontale moyens (rapportés au poids de chaque nageur) variaient entre 1,6 et 2,2 (sans unité) selon le nageur et que les temps de contact moyens variaient entre 0,47 et 0,65 s.



Figure 10 : Profils de forces horizontale (en vert) et verticale (en rouge) enregistrées chez un nageur de bon niveau [Roes03]

Les expérimentateurs ont noté que, lors de la plupart des essais, une force horizontale d'amplitude équivalente à environ 10% du pic de force horizontale de poussée apparaissait avant tout contact des pieds du nageur avec la plateforme. L'hypothèse émise était que cette force était due à la vague qui précédait le nageur. Dès lors, une seconde plateforme de force a été installée à côté de la première (Figure 11), un nageur de haut niveau a effectué 12 nouveaux essais et le temps au virage (7.5mRTT), le temps total du contact, le pic de force horizontale (valeur rapportée au poids du nageur et sans unité) et l'impulsion (valeur également rapportée au poids du nageur, exprimée en secondes) ont été mesurés (Tableau 20).



Figure 11 : Installation de deux plateformes de force sur le mur de virage [Roes03]

Variable	m ± ét
Temps au virage (7.5mRTT, s)	8,11 ± 0,09
Temps total du contact (s)	0,30 ± 0,03
Pic de force horizontale (s.a.)	2,0 ± 0,2
Impulsion (s)	0,37 ± 0,06

Tableau 20 : Moyenne et écarts-types (m ± ét) des variables enregistrées lors des 12 virages effectués par le nageur participant à l'étude [Roes03]







La zone cerclée en orange correspond à l'effet de la vague qui précède le nageur.

Les résultats présentés sur la figure 12 permettraient de valider cette hypothèse car les deux plateformes ont enregistré de manière synchronisée une force avant tout contact, la durée d'application de cette force étant de 0,143 s. L'amplitude plus faible enregistrée sur la plateforme 2 (non impactée par le nageur) serait due au décalage de position des deux plateformes. Dès lors, le temps de contact ne devrait être considéré qu'après cette vague.

1.12. <u>The influence of tuck index, depth of foot-plant, and wall contact time on the</u> velocity of push-off in the freestyle flip turn, BMS X [Prin06]

Cette étude menée par Prins et Patz (2006) est née de la volonté de décomposer la phase de poussée d'un virage crawl et d'analyser l'influence de chacune de ses composantes sur la vitesse en fin de poussée. Selon les auteurs, trois variables principales représenteraient la poussée d'un virage :

- le *tuck index* [Blan96],
- la profondeur des pieds lors du contact à laquelle aucune étude ne s'est intéressée jusqu'alors,
- le temps de contact durant lequel les auteurs distingueraient une phase « préparatoire » et une phase « active ».

Douze nageurs et onze nageuses américains, tous universitaires, âgés de 19 à 25 ans, ont participé à cette étude.

Chaque sujet devait réaliser une série de 50 yards (soit 45,72 m) nage libre dans un bassin de 25 yards. Le virage devait être réalisé à allure de course. Au total, 109 essais ont été analysés.

Chaque virage a été filmé par une caméra sous-marine, placée à une profondeur de 0,5 m, à 2 m du mur et à une distance latérale de 7 m du mouvement principal du nageur. Un système de calibration à quatre mires a permis une reconstruction 2D du mouvement, dans le plan sagittal du nageur.

La vitesse de fin de poussée a été déterminée comme la vitesse moyenne des hanches du nageur sur les 60 cm qui suivent la fin de contact des pieds avec le mur [Coss99].

Les variables indépendantes choisies pour l'analyse étaient le *tuck index*, le *foot plant index* et le pourcentage de la phase active de poussée sur le temps total de contact ; le *foot plant index* ayant été défini comme le rapport de la profondeur de la cheville avec la hauteur du trochanter (les résultats sont présentés dans le tableau 21).

Variable	m ± ét
Vitesse de fin de noussée (m/s	2,47 ± 0,40
vitesse de ini de poussee (injs	, pour les hommes : 2,69 ± 0,34
Tuck index	0,57 ± 0,14
Foot plant index	0,45 ± 0,10
Temps de contact (s)	0,28
Temps de poussée relatif (%)	74,3

Tableau 21 : Moyennes et écarts-types (m ± ét) des variables mesurées [Prin06]

Seul le *tuck index* a été relié significativement à la vitesse de fin de poussée. La corrélation négative a indiqué que plus les nageurs viraient les jambes fléchies, plus la vitesse créée serait importante. Ce résultat contraste avec ceux de Blanksby ou de Cossor qui ont trouvé une corrélation négative entre le *tuck index* et le temps au virage [Blan96] [Coss99]. Les nageurs de Blanksby qui virent les jambes les plus tendues effectuent leur virage dans un temps réduit. Il semblerait donc que fléchir les jambes permettrait d'augmenter la vitesse en fin de poussée et que tendre les jambes permettrait de gagner du temps au virage. De plus, un compromis dans la flexion des jambes devrait être trouvé par le nageur. En effet, une flexion excessive des jambes comme une extension totale ne permettraient pas aux muscles des membres inférieurs de générer une force musculaire optimale [Lint00]. Ces résultats mènent les auteurs à penser qu'une relation non linéaire existerait entre le *tuck index* et la vitesse de fin de poussée.

Dans cette étude, ni le *foot plant index* ni le temps de poussée relatif n'ont été reliés significativement à la vitesse de fin de poussée. Comme pour Lyttle [Lytt99], une large gamme de valeurs pour le temps de poussée relatif a été observée (de 35 à 95%).

En conséquence de ces résultats, les auteurs ont émis l'hypothèse qu'il serait préférable pour le nageur de s'assurer d'un contact ferme des pieds avec le mur pendant la poussée plutôt que d'essayer de « rebondir » lors du virage.

1.13. *Biomechanical analysis of the turn in front crawl swimming*, BMS X [Pere06]

Lors du X^{ème} congrès BMS, Pereira et ses collaborateurs (2006) ont présenté une étude biomécanique du virage crawl à travers l'analyse de l'influence du pic de force, du temps de contact et de la flexion du genou sur le temps au virage.

Trente-huit nageurs de club ont participé à cette étude. Âgés en moyenne de 18,2 ans, ils mesuraient 1,70 m et pesaient 63,8 kg. Après avoir suivi un échauffement et réalisé quelques virages d'essai, chaque nageur a effectué une série de huit virages crawl à pleine vitesse avec un temps de repos de 12 minutes entre chaque virage.

L'acquisition du pic de force et du temps de contact a été réalisée à l'aide d'une plateforme de force [Roes03] et le mouvement a été filmé par deux caméras (60 Hz). La première caméra était placée au fond du bassin et filmait la plateforme de bas en haut afin de déterminer l'angle de flexion du genou. Pour faciliter le suivi, le grand trochanter, l'épicondyle latéral du fémur et la malléole latérale du nageur ont été marqués à l'aide d'adhésifs de couleur. Pour déterminer le temps au virage (7.5mRTT), la seconde caméra a été placée sur le bord du bassin, perpendiculairement au mouvement principal du nageur, à 7,5 m du mur du virage. Enfin le pic de force enregistré à été normalisé par le poids du nageur et l'angle de flexion maximale du genou a été mesuré grâce au logiciel *Corel Photo-Paint v10*.

Variable	Nombre	m ± ét	Valeur	Valeur
variable	d'observations		minimale	maximale
Temps au virage (7.5mRTT, s)	301	9,06 ± 1,10	7,08	11,24
Pic de force normalisé (s.a.)	293	1,38 ± 0,38	0,61	2,78
Angle de flexion maximale du genou (°) 304	78 ± 24	29	161
Temps du contact (s)	291	0,41 ± 0,11	0,18	0,8

Tableau 22 : Nombre d'observations, moyennes et écarts-types (m ± ét), valeurs minimales et maximales des variables mesurées [Pere06]

s.a. : sans unité

Une régression linéaire multiple a montré que le pic de force normalisé comptait pour 17,7% du temps au virage, l'angle de flexion du genou pour 4,8% et le temps de contact pour 1%.

Une corrélation positive entre le pic de force normalisé et l'angle de flexion du genou (r = 0,38) indiquerait qu'un grand angle de flexion (c'est-à-dire une extension des genoux) permettrait d'appliquer une grande force sur le mur de virage. Associé aux valeurs rapportées dans le tableau 22, ce résultat semblerait en accord avec Takahashi et ses collaborateurs qui ont montré que les pics de force coïncidaient avec un angle de flexion du genou d'environ 120° [Taka83].

Les auteurs ont ainsi identifié le pic de force normalisé comme la variable qui contribuerait le plus à la performance du virage crawl.

1.14. <u>A combined biomechanical analysis of the flip turn technique</u>, ISBS XXVI [Pere08]

Pereira et ses collaborateurs (2008) ont présenté une étude biomécanique du virage crawl combinant une analyse dynamique, cinématique et électromyographique.

Un nageur international portugais, âgé de 20 ans, mesurant 1,80 m et pesant 77,3 kg, spécialiste de nage libre et de dos, a participé à cette étude. Le nageur a effectué trois virages crawl à vitesse maximale.

L'acquisition des paramètres dynamiques a été réalisée à l'aide d'une plateforme de force à jauges de contrainte (1000 Hz) et le mouvement de demi-tour a été filmé par six caméras (50 Hz). Deux caméras étaient placées sous l'eau et quatre caméras sur les bords du bassin. Une structure de calibration flottante à 10 points de référence a été utilisée pour la reconstruction 3D.

L'analyse électromyographique (1000 Hz) a été conduite à l'aide d'électrodes de surface placées sur quatre muscles des membres inférieurs : le *vastus lateralis*, le *gastrocnemius*, le *tibialis anterior* et le *biceps femoris*.

Variable	m ± ét
Pic de force normalisé (s.a.)	2,05 ± 0,14
Impulsion normalisée (s)	0,47 ± 0,09
Temps du contact (s)	0,40 ± 0,04
Temps de glisse (s)	0,93 ± 0,21
Angle de flexion maximale du genou (°)	63 ± 2
Vitesse d'approche (m/s)	1,77 ± 0,08
Vitesse de fin de poussée (m/s)	3,00 ± 0,09
Angle tronc-surface (°)	13 ± 5

Tableau 23 : Moyennes et écarts-types (m ± ét) des variables dynamiques et cinématiques mesurées [Pere08]

s.a. : sans unité

Les expérimentateurs ont observé que le nageur effectuait sa rotation en étant très proche du mur. Ils opposent ce résultat aux conclusions de Blanksby pour qui se retourner loin du mur permettrait de réaliser des virages plus rapides [Blan96]. Bien que les populations participantes à ces deux études soient très différentes de par l'âge, la morphologie et le niveau, Pereira s'appuie sur les résultats de Blanksby pour expliquer un temps de contact élevé et un angle de flexion des genoux réduit, observés chez ce nageur de niveau international.

Par contre, les auteurs rapportent avoir également observé une bonne position à la fin de la poussée. Ceci s'est traduit par un angle tronc-surface contenu et une grande vitesse de fin de poussée.

Les résultats de l'analyse électromyographique ne sont pas repris ici car ils sont essentiellement descriptifs en raison du peu de littérature sur le sujet.

1.15. Analyse des variables étudiées

En annexes sont présentés deux tableaux récapitulatifs des valeurs des principales variables mesurées lors des études rapportées ci-dessus. Le premier tableau rassemble les paramètres cinématiques du virage crawl (hors phase de contact, Annexe 1) et le second tableau s'attache aux paramètres spécifiques à la phase de contact (paramètres principalement dynamiques, Annexe 2).

Une analyse des variables étudiées dans la bibliographie présentée montre que :

- Le temps au virage est mesuré comme le temps mis pour parcourir un aller-retour entre une même ligne placée à 2,5, 3, 5 ou 7,5 m du mur de virage ;
- La vitesse d'approche est souvent considérée comme la vitesse de nage et moyennée entre deux positions ;
- La définition du début de retournement n'est pas standardisée et, exceptée la durée de la phase, aucun paramètre ne permet de quantifier le retournement ;
- La distinction des phases de placement et de poussée lors du contact n'a été étudiée que par quelques auteurs [Lytt99] [Dani03] [Prin06] ;
- Seule la composante horizontale de la force appliquée sur le mur de virage a été étudiée jusqu'ici ;
- La flexion du genou a été souvent rapportée mais la multiplicité des indices et des méthodes de mesure rend difficile l'interprétation des résultats ;
- La vitesse de fin de poussée, parfois considérée comme représentative de la performance au virage, peut varier de 1,14 à 3 m/s ;
- La limite entre la glisse et de la coulée lors de la phase sous-marine, chère aux études hydrodynamiques de Lyttle [Lytt00], n'a été que très rarement identifiée ou discutée;
- Peu d'auteurs ont étudié la reprise de nage [Chow84] [Blan96].

Il apparait également qu'aucune étude antérieure n'a proposé une analyse biomécanique complète du virage en utilisant chacun des paramètres pertinents étudiés jusqu'à présent.

L'étude proposée ici s'attachera à analyser le rôle de chacun de ces paramètres mais aussi le rôle de paramètres nouveaux, nés de la réflexion de nombreux auteurs et qui tenteront de quantifier certains aspects du mouvement : regroupement [Sand02], latéralisation des forces de contact [Lytt04], instant du pic de force [Klau05], extension des membres inférieurs et du haut du corps [Coun86] [Cost94], profondeur du nageur [Lytt98b] [Lytt00] [Venn06].

2. DIRECTIONS DE LA RECHERCHE

Certains auteurs rapportent le manque d'études cinématiques et dynamiques du virage [Hay88] [Vila03]. Ils expliquent cela par l'absence de méthode simple, appropriée ou suffisamment polyvalente et par le moindre intérêt porté par la communauté technique et scientifique à cet aspect de la cause par rapport aux phases de nage ou de départ. Selon Lyttle, ce manque est dû aux problèmes de conception de systèmes de mesures fiables et adaptés à l'environnement aquatique [Lytt97]. Vilas-Boas reprend cette idée en listant les obstacles ainsi :

- Définition et standardisation des instants de début et de fin de virage ;
- Tridimensionnalité du mouvement qui rend les études 2D non pertinentes ;
- Milieu aquatique qui pose des problèmes techniques, notamment par la nécessité d'utiliser des dispositifs dynamométriques étanches.

Vilas-Boas pose ainsi le problème de la définition d'un cadre pour l'étude de la performance au virage crawl, cadre dépendant de la définition même du virage. Avec Sanders, ils introduisent l'intérêt d'une étude 3D du virage [Sand02].

Enfin, ces auteurs ont énoncé la nécessité de développer une méthode appropriée et adaptée à l'environnement aquatique pour l'étude des virages (Chapitre 2) [Hay88] [Lytt97] [Vila03].

2.1. Cadre de l'étude

Le temps qu'un nageur prend pour accomplir une épreuve serait la mesure « ultime » de la performance selon Hodgkinson [Hodg95]. Pour les virages, Sanders assure l'importance des variables qui influencent le temps à l'aller, le temps de contact et le temps au retour [Sand02]. À l'image du temps total d'une épreuve, le temps du virage serait le critère principal de la performance.

Une épreuve de natation en compétition consiste à nager une distance dans le minimum de temps. Alors qu'il est aisé de déterminer le début (signal du starter) et la fin d'une épreuve (contact avec le mur d'arrivée), et ainsi de chronométrer la performance du nageur, qu'en est-il pour le virage ? Quelles peuvent être les « bornes » du virage afin d'en quantifier la performance ?

Pour déterminer le début et la fin du virage et ainsi mesurer un temps de virage, les chercheurs ont dans un premier temps opposé deux méthodes :

- Une délimitation individuelle du virage, le début et la fin étant marqués par un mouvement particulier du nageur ;
- Une délimitation universelle du virage, basée sur des distances prédéfinies.

Chow et ses collaborateurs [Chow84] définissent le début du virage comme l'instant où la deuxième main du nageur entre dans l'eau pour la dernière fois avant le virage. De la même manière, ils définissent la fin du virage comme l'instant où l'une des mains du nageur entre dans l'eau pour la première fois après le virage. L'intérêt principal de cette définition est qu'elle permettrait de ne prendre en compte que le virage en supprimant toute phase nagée. Toutefois les bornes étant individuelles, elles ne permettent pas une comparaison des virages de différents nageurs ni même la comparaison de plusieurs virages d'un même nageur. Ces bornes individuelles ne permettent pas non plus de comparer des études concernant les virages qui utiliseraient cette méthode de délimitation. L'utilisation de distances prédéfinies résout ce problème.

À la même période, dans un article du magazine *Swimming Technique* rédigé pour faire prendre conscience aux nageurs de l'importance des départs et des virages et les inciter à améliorer

ces mouvements, Thayer et Hay [Thay84] proposent de caractériser la performance au virage crawl par le temps mis pour parcourir les 3 m avant et les 6,5 m après le mur, distances « arbitraires » définies d'après une étude antérieure [Hay83].

Blanksby propose dans un premier temps d'utiliser le 2.5mRTT (temps mis pour parcourir les 2,5 m avant et les 2,5 m après le mur de virage) car cette distance courte permet de minimiser la proportion de nage dans le virage [Blan95]. Plus tard, il utilisera le 5mRTT, qui permettrait aux entraineurs de chronométrer plus aisément le virage grâce à l'utilisation des lignes de drapeaux [Blan96] [Blan04]. Lyttle et Mason expliquent avoir adopté le 7.5mRTT au sein de l'*Australian Institute of Sport* (AIS) afin de tenir compte de la préparation du virage, du retournement, de la glisse et de la préparation à la reprise de nage [Lytt97]. L'AIS a été en charge des analyses de courses des Championnats du Monde nagés à Perth en 1998 et des JO de Sydney en 2000 [Maso01] et analyse chaque année les courses des Championnats d'Australie de natation.

Le choix d'utiliser des distances prédéfinies s'est alors imposé, notamment lors des analyses de courses [Arel94] (à l'exception des *US Olympic Team Trials* d'aout 2000 où les analystes ont mesuré le temps au virage crawl entre l'instant de la dernière immersion de la main du nageur et la fin du contact des pieds avec le mur). Depuis 1986 et les Championnats du Monde à Madrid, toutes les compétitions internationales majeures ont fait l'objet d'analyses de courses. Le service Recherche de la FFN prend en charge tous les ans les analyses des Championnats de France de natation et, en 2004, a été choisi pour réaliser les analyses des JO d'Athènes puis des Championnats du Monde nagés à Melbourne en 2005. Pour la performance au virage, le principal paramètre employé était le 5mRTT pour les analyses nationales et le 7.5mRTT pour les analyses internationales.

Au vu de la variété des distances proposées, Silveira a mené une étude afin d'établir une procédure d'analyse des virages [Silv07]. À partir d'une population de 11 nageurs et nageuses de compétition ($15,8 \pm 3,2$ ans ; $63,3 \pm 8,9$ kg ; $1,73 \pm 0,08$ m), l'auteure souhaitait déterminer du 5mRTT ou du 7.5mRTT lequel était le meilleur paramètre de mesure de la performance au virage. Ses résultats mettent en avant le 5mRTT car, pour les nageurs étudiés, 48% du temps du virage correspond à une phase nagée, contre 67% pour le 7.5mRTT.

En utilisant le 5mRTT près de la moitié du temps mesuré pour le virage est donc un temps nagé. De ce fait, ce paramètre ne reflète pas exclusivement la performance au virage. Il semble dès lors intéressant de réduire les distances de mesure. Après avoir proposé le 2.5mRTT [Blan95], Blanksby estime qu'une trop petite distance pourrait ne pas contenir suffisamment d'informations [Blan96]. Il précise que l'étude du 2.5mRTT permet de se focaliser sur le mouvement de rotation mais qu'elle n'inclue pas les conséquences du temps passé au mur telles que peuvent l'être la vitesse maximale ou bien la distance et la vitesse à la reprise de nage. D'après Klauck, la vitesse maximale serait atteinte un peu avant la fin de la poussée et donc à une distance sensiblement égale à la stature du nageur [Klau05]. De plus, dans cette même étude [Blan96], Blanksby rapporte une distance moyenne de reprise de nage de 2,51 m mesurée à la tête, chez 36 jeunes nageurs et nageuses de compétition (11,8 ans). Il s'avère donc que le choix du 2.5mRTT reste pertinent pour une population de jeunes nageurs.

À partir de cela et des observations réalisées lors des analyses de courses par le service Recherche fédéral, le 3mRTT peut être proposé comme cadre d'étude de la performance au virage crawl. En effet, il permet d'une part de réduire l'effet de la vitesse de nage à l'aller et, d'autre part, de réduire l'effet de la coulée (au retour) qui n'est pas une phase spécifique au virage [Clot04] [Elip09].

2.2. De l'intérêt d'une analyse tridimensionnelle

Le virage culbute en crawl est un mouvement typiquement 3D où aucune trajectoire des segments du nageur ne s'effectue dans un même plan tout au long du virage [Vila03]. Une étude 2D du virage crawl n'est donc pas approprié sauf si elle se concentre sur une partie du mouvement comme ont tenté de le faire Pereira et ses collaborateurs avec une étude de la flexion du genou [Pere06]. Toutefois une analyse cinématique 2D implique que l'axe optique de la caméra soit perpendiculaire au mouvement étudié. La plupart des gestes réalisés lors du virage crawl et la diversité des techniques employées ne garantissent donc pas que les conditions d'une analyse cinématique 2D soient remplies. La complexité et la nature du mouvement du nageur obligent les biomécaniciens à réaliser une analyse cinématique 3D.

De même, certains auteurs ont établi l'intérêt d'une analyse dynamique 3D pour l'étude des forces de contact [Lytt97]. Grâce à l'étude des forces verticales et horizontales, Lyttle a pu déterminer objectivement le début du contact. Les études hydrodynamiques démontrent l'influence de la profondeur de la phase sous-marine [Lytt00]. Cette profondeur est en partie obtenue par une poussée oblique, vers l'avant et le fond du bassin, clairement quantifiable à partir des systèmes de mesure dynamométriques disponibles de nos jours. Dans une revue de littérature consacrée à l'étude des départs, le même auteur affirme que la composante latérale de la force de poussée lors des virages confirme l'intérêt d'une étude nouvelle de la latéralisation de la poussée. En suivant cette idée, il apparait qu'un nouveau paramètre prenant en compte le déplacement latéral du nageur puisse être proposé : la distance 3D parcourue par le nageur lors du virage.

2.3. Effets du niveau et du genre sur la performance au virage crawl

Grâce à une définition individuelle des virages, Chow et ses collaborateurs ont montré que les hommes débutaient et complétaient leurs virages plus loin du mur que les femmes, avec une vitesse d'exécution moyenne plus élevée [Chow84]. Ces auteurs postulent que, si les hommes possèdent une plus grande force dans les membres inférieurs, une plus grande impulsion horizontale peut être produite pendant la poussée et ainsi créer une plus grande vitesse en sortie. En étudiant la puissance maximale d'extension des membres inférieurs chez des nageurs (population de nageuses et nageurs de tous niveaux : jeunes à olympique), Miyashita et ses collaborateurs ont observé une grande différence de puissance entre les genres [Miya92]. Par conséquent, il semblerait que le genre contribue à la variation de performance au virage.

Vilas-Boas met en avant deux points majeurs pouvant être reliés à la performance au virage : d'une part l'impulsion, qualité physique du nageur qui fait également appel à une certaine habileté notamment en ce qui concerne son orientation mais aussi son séquençage temporel ; d'autre part le profilage du nageur, habileté corporelle qui requiert des qualités de gainage et de tonicité musculaire [Vila03]. Une autre qualité à analyser est la pertinence de l'instant choisi pour la reprise propulsive lors de la phase sous-marine [Lytt00] [Sand02] [Vila03].

Ces résultats mènent à penser que le genre ou le niveau auraient une influence sur la performance au virage crawl. Il semble dès lors intéressant d'étudier comparativement trois groupes de nageurs : un groupe de nageuses expertes, un groupe de nageurs experts et un groupe de nageuses non-expertes.

Au vu de la littérature, il semble essentiel de mettre en place un protocole complet d'analyse sous-marine du virage afin de mesurer l'ensemble des paramètres biomécaniques de la performance (Chapitre 2).

Cette méthode sera ensuite associée à une analyse statistique pour comparer des nageuses expertes à des nageuses non expertes afin d'établir l'influence du niveau sur les variables de la performance au virage culbute crawl. Ce même groupe de nageuses expertes sera aussi comparé à un groupe de nageurs experts afin de déterminer l'influence du genre sur les variables de la performance au virage culbute crawl (Chapitre 3).

Cette étude sera complétée par une seconde analyse qui tentera de mettre en avant les principaux paramètres de la performance au virage crawl pour les deux populations expertes. Une méthode statistique innovante sera utilisée pour établir des modèles d'optimisation à partir des nombreux paramètres répertoriés dans cette analyse de la littérature (Chapitre 4).

« Measure what is measurable, and make measurable what is not so. » Galilée (1564 - 1642)

Le dispositif d'analyse dynamique 3D détaillé dans ce chapitre a été présenté oralement lors des 4^{èmes} Journées Spécialisées de Natation, à Lille, les 27 et 28 mai 2008 et publié dans les actes du congrès [Puel08].

<u>Sommaire</u>

1.1. Reconstruction 3D par la méthode DLT	1. Principes de l'analyse cinématique	39
1.2. Résolution de systèmes linéaires surdimensionnés au sens des moindres carrés .40 1.2.1. Principe .40 1.2.2. Applications à la méthode DLT. .41 1.3. Spécificités de l'analyse cinématique sous-marine. .41 1.3.1. Réfraction de la lumière .41 1.3.2. Influence de la réfraction sur l'analyse cinématique sous-marine .42 2. Principes de l'analyse dynamique .42 2.1. Extensométrie et jauges à éléments résistifs .42 2.2. Piézoélectricité et capteurs de pression .43 2.3. Mesure d'efforts dynamiques .43 2.4. Système de mesure choisi .44 3.1. Contraintes en milieu sportif. .45 3.2. Tâche et consignes .46 3.3.1. Repère d'étude .46 3.3.2. Conception et positionnement des mires de calibration .47 3.3. Préparation et positionnement des caméras .50 3.4. Synchronisation des caméras .50 3.4. Dispositif d'analyse dynamique .50 3.5. Synchronisation des caméras .50 3.4. Synchronisation des caméras .50 3.4. Dispositif d'analyse dynamique .50 3.4. Dispositif d'analyse dynamique <td< td=""><td>1.1. Reconstruction 3D par la méthode DLT</td><td>39</td></td<>	1.1. Reconstruction 3D par la méthode DLT	39
1.2.1. Principe	1.2. Résolution de systèmes linéaires surdimensionnés au sens des moindres carrés	40
1.2.2. Applications à la méthode DLT	1.2.1. Principe	40
1.3. Spécificités de l'analyse cinématique sous-marine .41 1.3.1. Réfraction de la lumière .41 1.3.2. Influence de la réfraction sur l'analyse cinématique sous-marine .42 2. Principes de l'analyse dynamique .42 2.1. Extensométrie et jauges à éléments résistifs .42 2.2. Piézoélectricité et capteurs de pression .43 2.3. Mesure d'efforts dynamiques .43 2.4. Système de mesure choisi .44 3. Dispositif expérimental d'analyse 3D du virage crawl .45 3.1. Contraintes en milieu sportif .45 3.2. Tâche et consignes .46 3.3. Dispositif d'analyse cinématique .46 3.3.1. Repère d'étude .46 3.3.2. Conception et positionnement des mires de calibration .47 3.3.3. Préparation et positionnement des caméras .50 3.4. Synchronisation des caméras .50 3.4. Dispositif d'analyse dynamique .50 3.4.1. Repère d'étude .50 3.4.2. Conception d'un système nomade de fixation de la plateforme .51 3.4.3. Acquisition des signaux .52 3.5. Synchronisation des signaux .52 3.5. Traitement du signal	1.2.2. Applications à la méthode DLT	41
1.3.1. Réfraction de la lumière 41 1.3.2. Influence de la réfraction sur l'analyse cinématique sous-marine 42 2. Principes de l'analyse dynamique 42 2.1. Extensométrie et jauges à éléments résistifs 42 2.2. Piézoélectricité et capteurs de pression 43 2.3. Mesure d'efforts dynamiques 43 2.4. Système de mesure choisi 44 3. Dispositif expérimental d'analyse 3D du virage crawl 45 3.1. Contraintes en milieu sportif. 45 3.2. Tâche et consignes 46 3.3. Dispositif d'analyse cinématique 46 3.3.1. Repère d'étude 46 3.3.2. Conception et positionnement des mires de calibration 47 3.3.3. Préparation et positionnement des caméras 48 3.3.4. Synchronisation des caméras 50 3.4.1. Repère d'étude 50 3.4.2. Conception d'un système nomade de fixation de la plateforme 51 3.4.3. Acquisition des forces de contact 52 3.5. Synchronisation des signaux 52 3.5. Interpolation des coordonnées 3D 55 5.1. Du signal vidéo aux coordonnées 3D 55 5.2. Interpolation des coordonnées 57	1.3. Spécificités de l'analyse cinématique sous-marine	41
1.3.2. Influence de la réfraction sur l'analyse cinématique sous-marine .42 2. Principes de l'analyse dynamique .42 2.1. Extensométrie et jauges à éléments résistifs. .42 2.2. Piézoélectricité et capteurs de pression .43 2.3. Mesure d'efforts dynamiques .43 2.4. Système de mesure choisi .44 3. Dispositif expérimental d'analyse 3D du virage crawl .45 3.1. Contraintes en milieu sportif. .45 3.2. Tàche et consignes .46 3.3. Dispositif d'analyse cinématique .46 3.3.1. Repère d'étude .46 3.3.2. Conception et positionnement des mires de calibration .47 3.3.3. Préparation et positionnement des caméras .48 3.3.4. Synchronisation des caméras .50 3.4. Dispositif d'analyse dynamique .50 3.4. Disposition d'un système nomade de fixation de la plateforme .51 3.4. Acquisition des forces de contact .52 3.5. Synchronisation des signaux .52 3.5. Traitement du signal .55 5.1. Du signal vidéo aux coordonnées 3D .55 5.2. Interpolation des coordonnées .57 5.3. Lissage des signaux <t< td=""><td>1.3.1. Réfraction de la lumière</td><td>41</td></t<>	1.3.1. Réfraction de la lumière	41
2. Principes de l'analyse dynamique422.1. Extensométrie et jauges à éléments résistifs.422.2. Piézoélectricité et capteurs de pression432.3. Mesure d'efforts dynamiques432.4. Système de mesure choisi443. Dispositif expérimental d'analyse 3D du virage crawl453.1. Contraintes en milieu sportif.453.2. Tâche et consignes463.3. Dispositif d'analyse cinématique463.3.1. Repère d'étude463.3.2. Conception et positionnement des mires de calibration473.3.3. Préparation et positionnement des caméras503.4. Dispositif d'analyse dynamique503.4.1. Repère d'étude503.4.2. Conception d'un système nomade de fixation de la plateforme513.4.3. Acquisition des forces de contact523.5. Synchronisation des signaux524. Modélisation du nageur535. Traitement du signal555.1. Du signal vidéo aux coordonnées 3D555.2. Interpolation des coordonnées575.3. Lissage des signaux57	1.3.2. Influence de la réfraction sur l'analyse cinématique sous-marine	42
2.1. Extensométrie et jauges à éléments résistifs.422.2. Piézoélectricité et capteurs de pression432.3. Mesure d'efforts dynamiques432.4. Système de mesure choisi443. Dispositif expérimental d'analyse 3D du virage crawl453.1. Contraintes en milieu sportif.453.2. Tâche et consignes463.3. Dispositif d'analyse cinématique463.3.1. Repère d'étude463.3.2. Conception et positionnement des mires de calibration473.3.3. Préparation et positionnement des caméras503.4. Synchronisation des caméras503.4.1. Repère d'étude503.4.2. Conception d'un système nomade de fixation de la plateforme513.4.3. Acquisition des signaux524. Modélisation du nageur535. Traitement du signal555.1. Du signal vidéo aux coordonnées 3D555.2. Interpolation des coordonnées575.3. Lissage des signaux57	2. Principes de l'analyse dynamique	42
2.2. Piézoélectricité et capteurs de pression432.3. Mesure d'efforts dynamiques432.4. Système de mesure choisi443. Dispositif expérimental d'analyse 3D du virage crawl453.1. Contraintes en milieu sportif.453.2. Tâche et consignes463.3. Dispositif d'analyse cinématique463.3.1. Repère d'étude463.3.2. Conception et positionnement des mires de calibration473.3.3. Préparation et positionnement des caméras483.3.4. Synchronisation des caméras503.4.1. Repère d'étude503.4.2. Conception d'un système nomade de fixation de la plateforme513.4.3. Acquisition des forces de contact523.5. Synchronisation des signaux524. Modélisation du nageur535. Traitement du signal555.1. Du signal vidéo aux coordonnées 3D555.2. Interpolation des coordonnées575.3. Lissage des signaux57	2.1. Extensométrie et jauges à éléments résistifs	42
2.3. Mesure d'efforts dynamiques432.4. Système de mesure choisi443. Dispositif expérimental d'analyse 3D du virage crawl453.1. Contraintes en milieu sportif.453.2. Tâche et consignes463.3. Dispositif d'analyse cinématique463.3.1. Repère d'étude463.3.2. Conception et positionnement des mires de calibration473.3.3. Préparation et positionnement des caméras483.3.4. Synchronisation des caméras503.4. Dispositif d'analyse dynamique503.4.1. Repère d'étude503.4.2. Conception d'un système nomade de fixation de la plateforme513.4.3. Acquisition des forces de contact523.5. Synchronisation des signaux524. Modélisation du nageur535. Traitement du signal555.1. Du signal vidéo aux coordonnées 3D555.2. Interpolation des coordonnées575.3. Lissage des signaux57	2.2. Piézoélectricité et capteurs de pression	43
2.4. Système de mesure choisi.443. Dispositif expérimental d'analyse 3D du virage crawl453.1. Contraintes en milieu sportif.453.2. Tâche et consignes463.3. Dispositif d'analyse cinématique463.3.1. Repère d'étude.463.3.2. Conception et positionnement des mires de calibration473.3.3. Préparation et positionnement des caméras483.3.4. Synchronisation des caméras503.4.1. Repère d'étude.503.4.2. Conception d'un système nomade de fixation de la plateforme513.4.3. Acquisition des forces de contact523.5. Synchronisation des signaux524. Modélisation du nageur535. Traitement du signal.555.1. Du signal vidéo aux coordonnées 3D555.2. Interpolation des coordonnées575.3. Lissage des signaux57	2.3. Mesure d'efforts dynamiques	43
3. Dispositif expérimental d'analyse 3D du virage crawl 45 3.1. Contraintes en milieu sportif. 45 3.2. Tâche et consignes 46 3.3. Dispositif d'analyse cinématique 46 3.3.1. Repère d'étude 46 3.3.2. Conception et positionnement des mires de calibration 47 3.3.3. Préparation et positionnement des caméras 48 3.3.4. Synchronisation des caméras 50 3.4. Dispositif d'analyse dynamique 50 3.4.1. Repère d'étude 50 3.4.2. Conception d'un système nomade de fixation de la plateforme 51 3.4.3. Acquisition des forces de contact 52 3.5. Synchronisation des signaux 52 3.5. Traitement du signal 53 5. Traitement du signal 55 5.1. Du signal vidéo aux coordonnées 3D 55 5.2. Interpolation des coordonnées 57 5.3. Lissage des signaux 57	2.4. Système de mesure choisi	44
3.1. Contraintes en milieu sportif.453.2. Tâche et consignes463.3. Dispositif d'analyse cinématique463.3.1. Repère d'étude463.3.2. Conception et positionnement des mires de calibration473.3.3. Préparation et positionnement des caméras483.3.4. Synchronisation des caméras503.4. Dispositif d'analyse dynamique503.4.1. Repère d'étude503.4.2. Conception d'un système nomade de fixation de la plateforme513.4.3. Acquisition des forces de contact523.5. Synchronisation des signaux524. Modélisation du nageur535. Traitement du signal555.1. Du signal vidéo aux coordonnées 3D555.2. Interpolation des coordonnées575.3. Lissage des signaux57	3. Dispositif expérimental d'analyse 3D du virage crawl	45
3.2. Tâche et consignes463.3. Dispositif d'analyse cinématique463.3.1. Repère d'étude463.3.2. Conception et positionnement des mires de calibration473.3.3. Préparation et positionnement des caméras483.3.4. Synchronisation des caméras503.4. Dispositif d'analyse dynamique503.4.1. Repère d'étude503.4.2. Conception d'un système nomade de fixation de la plateforme513.4.3. Acquisition des forces de contact523.5. Synchronisation des signaux524. Modélisation du nageur535. Traitement du signal555.1. Du signal vidéo aux coordonnées 3D555.2. Interpolation des coordonnées575.3. Lissage des signaux57	3.1. Contraintes en milieu sportif	45
3.3. Dispositif d'analyse cinématique463.3.1. Repère d'étude463.3.2. Conception et positionnement des mires de calibration473.3.3. Préparation et positionnement des caméras483.3.4. Synchronisation des caméras503.4. Dispositif d'analyse dynamique503.4.1. Repère d'étude503.4.2. Conception d'un système nomade de fixation de la plateforme513.4.3. Acquisition des forces de contact523.5. Synchronisation des signaux524. Modélisation du nageur535. Traitement du signal555.1. Du signal vidéo aux coordonnées 3D555.2. Interpolation des coordonnées575.3. Lissage des signaux57	3.2. Tâche et consignes	46
3.3.1. Repère d'étude	3.3. Dispositif d'analyse cinématique	46
3.3.2. Conception et positionnement des mires de calibration.473.3.3. Préparation et positionnement des caméras.483.3.4. Synchronisation des caméras.503.4. Dispositif d'analyse dynamique.503.4.1. Repère d'étude.503.4.2. Conception d'un système nomade de fixation de la plateforme.513.4.3. Acquisition des forces de contact.523.5. Synchronisation des signaux.524. Modélisation du nageur.535. Traitement du signal.555.1. Du signal vidéo aux coordonnées 3D.555.2. Interpolation des coordonnées.575.3. Lissage des signaux.57	3.3.1. Repère d'étude	46
3.3.3. Préparation et positionnement des caméras.483.3.4. Synchronisation des caméras.503.4. Dispositif d'analyse dynamique503.4.1. Repère d'étude.503.4.2. Conception d'un système nomade de fixation de la plateforme.513.4.3. Acquisition des forces de contact523.5. Synchronisation des signaux524. Modélisation du nageur535. Traitement du signal.555.1. Du signal vidéo aux coordonnées 3D555.2. Interpolation des coordonnées575.3. Lissage des signaux57	3.3.2. Conception et positionnement des mires de calibration	47
3.3.4. Synchronisation des caméras503.4. Dispositif d'analyse dynamique503.4.1. Repère d'étude503.4.2. Conception d'un système nomade de fixation de la plateforme513.4.3. Acquisition des forces de contact523.5. Synchronisation des signaux524. Modélisation du nageur535. Traitement du signal555.1. Du signal vidéo aux coordonnées 3D555.2. Interpolation des coordonnées575.3. Lissage des signaux57	3.3.3. Préparation et positionnement des caméras	48
3.4. Dispositif d'analyse dynamique503.4.1. Repère d'étude503.4.2. Conception d'un système nomade de fixation de la plateforme513.4.3. Acquisition des forces de contact523.5. Synchronisation des signaux524. Modélisation du nageur535. Traitement du signal555.1. Du signal vidéo aux coordonnées 3D555.2. Interpolation des coordonnées575.3. Lissage des signaux57	3.3.4. Synchronisation des caméras	50
3.4.1. Repère d'étude503.4.2. Conception d'un système nomade de fixation de la plateforme513.4.3. Acquisition des forces de contact523.5. Synchronisation des signaux524. Modélisation du nageur535. Traitement du signal555.1. Du signal vidéo aux coordonnées 3D555.2. Interpolation des coordonnées575.3. Lissage des signaux57	3.4. Dispositif d'analyse dynamique	50
3.4.2. Conception d'un système nomade de fixation de la plateforme513.4.3. Acquisition des forces de contact523.5. Synchronisation des signaux524. Modélisation du nageur535. Traitement du signal555.1. Du signal vidéo aux coordonnées 3D555.2. Interpolation des coordonnées575.3. Lissage des signaux57	3.4.1. Repère d'étude	50
3.4.3. Acquisition des forces de contact.523.5. Synchronisation des signaux.524. Modélisation du nageur.535. Traitement du signal.555.1. Du signal vidéo aux coordonnées 3D.555.2. Interpolation des coordonnées.575.3. Lissage des signaux.57	3.4.2. Conception d'un système nomade de fixation de la plateforme	51
3.5. Synchronisation des signaux524. Modélisation du nageur535. Traitement du signal555.1. Du signal vidéo aux coordonnées 3D555.2. Interpolation des coordonnées575.3. Lissage des signaux57	3.4.3. Acquisition des forces de contact	52
4. Modélisation du nageur 53 5. Traitement du signal 55 5.1. Du signal vidéo aux coordonnées 3D 55 5.2. Interpolation des coordonnées 57 5.3. Lissage des signaux 57	3.5. Synchronisation des signaux	52
5. Traitement du signal	4. Modélisation du nageur	53
5.1. Du signal vidéo aux coordonnées 3D	5. Traitement du signal	55
5.2. Interpolation des coordonnées57 5.3. Lissage des signaux	5.1. Du signal vidéo aux coordonnées 3D	55
5.3. Lissage des signaux57	5.2. Interpolation des coordonnées	57
	5.3. Lissage des signaux	57
6. Définition des variables de la performance61	6. Définition des variables de la performance	61

6.1. Cinématique	61
6.1.1. Début et fin du virage	61
6.1.2. Approche et retournement	61
6.1.3. Contact	62
6.1.4. Glisse, coulée et reprise de nage	63
6.1.5. Paramètres globaux	63
6.2. Dynamique	65
6.3. Caractéristiques des sujets	68

1. PRINCIPES DE L'ANALYSE CINÉMATIQUE

De nos jours, l'analyse vidéo 3D est un moyen peu couteux permettant des études relativement précises du mouvement sportif.

Pendant longtemps, l'utilisation de caméras métriques (dont les paramètres optiques internes sont connus), très couteuses, était indispensable aux techniques de stéréophotogrammétrie (mesure 3D à partir d'images photographiques ou d'images issues de caméras cinématographiques).

En 1971, Abdel-Aziz et Karara développèrent une méthode permettant d'utiliser des caméras classiques (dont les paramètres internes ne sont pas connus) pour la stéréophotogrammétrie [Abde71]. Cette méthode est appelée *Direct Linear Transformation* (DLT). Elle s'appuie sur les relations linéaires qui existent entre les coordonnées 2D d'un point sur le plan de l'image et les coordonnées 3D de ce même point dans le repère d'étude. À partir de plusieurs prises de vues différentes d'un même point, la DLT permet de reconstruire les coordonnées 3D de ce point.

Une vidéo étant une succession d'images, la reconstruction 3D d'un point de chaque image permet de déterminer la trajectoire 3D de ce point.

1.1. <u>Reconstruction 3D par la méthode DLT</u>

L'objectif de la DLT est d'exprimer les coordonnées 2D (U, V) d'un point sur le plan de l'image en fonction de ses coordonnées 3D (x, y, z) dans le repère d'étude, ce repère étant attaché à des mires de calibration de coordonnées connues. L'algorithme de reconstruction permet de prendre en compte les distorsions linéaires suivant les deux axes du plan de l'image filmée et repose sur une calibration linéaire du volume d'étude.

(U, V) peuvent être exprimées ainsi selon (x, y, z):

$$\begin{cases} U = \frac{Ax + By + Cz + D}{Ex + Fy + Gz + 1} \\ V = \frac{Hx + Jy + Kz + L}{Ex + Fy + Gz + 1} \end{cases}$$

Où (A, B, C, D, E, F, G, H, J, K, L) sont appelées constantes de la DLT.

Ces constantes, pour un réglage donné de la caméra, sont des combinaisons des paramètres internes de la caméra (axe optique, coordonnées de la projection du point principal dans le plan de projection idéal et facteurs de correction des distorsions radiales et tangentielles) et de paramètres externes (coordonnées du centre de l'objectif de la caméra dans le repère d'étude et composantes de la matrice de passage du repère de la caméra vers le repère d'étude).

Afin de déterminer ces 11 constantes, il faut filmer au moins 5 points et $\frac{1}{2}$ d'un objet de calibration de coordonnées connues. Après numérisation de l'image et mesure des coordonnées 2D (U, V) de chaque mire (mesure appelée suivi ou *tracking*), un système à 11 équations et 11 inconnues (les constantes de la DLT de la caméra) est obtenu. La résolution de ce système (qui peut être surdimensionné en filmant un plus grand nombre de mires de calibration) s'effectue par la méthode des moindres carrés.

Afin de reconstruire les coordonnées 3D d'un point d'intérêt, il faut qu'au moins deux caméras calibrées (dont les 11 constantes de la DLT ont été déterminées au préalable) filment ce point. Nous obtenons alors le système matriciel suivant :

$$\begin{bmatrix} A_1 - E_1 U & B_1 - F_1 U & C_1 - G_1 U \\ H_1 - E_1 V & J_1 - F_1 V & K_1 - G_1 V \\ A_2 - E_2 U' & B_2 - F_2 U' & C_2 - G_2 U' \\ H_2 - E_2 V' & J_2 - F_2 V' & K_2 - G_2 V' \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U - D_1 \\ V - L_1 \\ U' - D_2 \\ V' - L_2 \end{bmatrix}$$

OÙ :

- $(A_1, B_1, C_1, D_1, E_1, F_1, G_1, H_1, J_1, K_1, L_1)$ sont les constantes de la DLT de la caméra 1
- $(A_2, B_2, C_2, D_2, E_2, F_2, G_2, H_2, J_2, K_2, L_2)$ sont les constantes de la DLT de la caméra 2
- (U,V) sont les coordonnées 2D du point filmé dans le plan de numérisation de la caméra 1
- (U',V') sont les coordonnées 2D du point filmé dans le plan de numérisation de la caméra 2
- (*x*, *y*, *z*) sont les coordonnées 3D du point filmé dans le repère d'étude

La résolution de ce système surdimensionné (4 équations et 3 inconnues) s'effectue par la méthode des moindres carrés. Utiliser plus de deux caméras permet d'augmenter le nombre d'équations du système et, de manière générale, d'accroitre la précision de la reconstruction (1.2.2).

1.2. Résolution de systèmes linéaires surdimensionnés au sens des moindres carrés

1.2.1. Principe

Le problème est de déterminer un vecteur *x* tel que :

$$Ax = b$$

Où la matrice
$$A \in \mathbb{R}^{m \times n}$$
, le vecteur $x \in \mathbb{R}^n$ et le vecteur $b \in \mathbb{R}^m$ avec $m \ge n$.

Si m est supérieur à n, il y a plus d'équations que d'inconnues, le système est dit surdimensionné et ne possède pas de solution unique.

Le vecteur résidu r est défini de la manière suivante :

$$r = b - Ax$$

Il s'agit désormais de trouver le vecteur x qui minimise la *taille* du vecteur résidu r.

Une mesure appropriée de la *taille* de r est la somme des carrés de ses composantes et se calcule ainsi :

$$\sum_{i=1}^{m} r_i^2 = \|r\|^2 = r^T r$$

Le vecteur x est alors appelé solution au sens des moindres carrés. Il est tel que :

$$x = \min\{r^{T} : x \in \mathbb{R}^{n}\} = \min\{(b - Ax)^{T} (b - Ax) : x \in \mathbb{R}^{n}\}$$

Le minimum est atteint lorsque :

$$\nabla\{(b - Ax)^T(b - Ax)\} = 0$$

Soit :

$$-2A^T(b-Ax)=0$$

Et en développant :

$$(A^T A)x = A^T b$$

Cette équation est appelée équation normale associée au problème des moindres carrés. L'unique solution de cette équation est aussi solution au sens des moindres carrés.

1.2.2. Applications à la méthode DLT

Le système est surdimensionné en utilisant un objet de calibration dont les coordonnées de plus de 5 points et ½ sont connues. La résolution au sens des moindres carrés va tirer avantage de l'information fournie par toute mire de calibration supplémentaire en homogénéisant les valeurs des constantes de la DLT dans le volume défini par l'objet de calibration et en minimisant les erreurs dues aux mesures expérimentales [Chen94].

À l'image du nombre de mires de calibration qui influence l'homogénéisation des 11 constantes de la DLT de chaque caméra, le nombre de caméras influence la précision de reconstruction 3D. En effet, au-delà de deux caméras, pour chaque caméra supplémentaire, le nombre d'équations du système matriciel à résoudre est augmenté de deux alors que le nombre d'inconnues (3) reste toujours le même. La résolution au sens des moindres carrés va tirer avantage de l'information fournie par toute caméra supplémentaire placée judicieusement et correctement calibrée.

1.3. Spécificités de l'analyse cinématique sous-marine

L'analyse du mouvement en conditions sous-marines pose de nombreux problèmes spécifiques au milieu. Les déformations de l'image liées au phénomène de réfraction de la lumière à l'interface eau-air, les difficultés d'utilisation d'une grille de calibration, le manque de lumière et de recul pour les caméras selon le bassin d'étude et les bulles d'air générées par le mouvement du nageur sont autant d'éléments qui rendent l'analyse cinématique sous-marine extrêmement délicate. La réfraction de la lumière est l'obstacle principal à une analyse précise du mouvement sous-marin [Kwon06].

1.3.1. Réfraction de la lumière

Dans un milieu homogène, les rayons lumineux se propagent en ligne droite. Lors du passage d'un milieu à un autre, de densités différentes, la trajectoire et la vitesse de ces rayons sont modifiées. La loi de Snell-Descartes définit dans quelle mesure les phénomènes de réfraction et de réflexion se produisent lors de ce changement de milieu. Dans le cas de la propagation de la lumière de l'eau vers l'air (Figure 13), les rayons lumineux sont réfléchis et réfractés jusqu'à un angle d'incidence i maximal de 48,6°. Au-delà de cet angle, les rayons lumineux sont totalement réfléchis.



Figure 13 : Propagation de la lumière de l'eau vers l'air

1.3.2. Influence de la réfraction sur l'analyse cinématique sous-marine

Les rayons de lumière réfléchis par un point de l'espace passent à travers la lentille de la caméra et produisent une image inversée sur le film. Dans un milieu homogène, le point réel, la lentille et la projection du point réel dans le plan image sont alignés. La condition de colinéarité nécessaire à la méthode DLT est alors respectée.

Si le point filmé et la caméra ne sont pas dans le même milieu, la réfraction à l'interface des milieux entraîne une déformation non-linéaire de l'image. Cette déformation est source d'erreurs pour la reconstruction 3D. Elle est d'autant plus importante que les distances point filmé-interface et interface-caméra sont petites [Kwon99]. Afin de limiter la déformation induite par le phénomène de réfraction, deux solutions seront mises en œuvre dans le dispositif expérimental :

- Utiliser des caissons étanches grâce auxquels la perpendicularité entre l'axe optique de la caméra et l'interface est garantie ;
- Maximiser la distance interface-point filmé en utilisant tout le recul disponible pour le placement des caméras.

2. PRINCIPES DE L'ANALYSE DYNAMIQUE

La détermination des efforts exercés par un sportif sur les solides avec lesquels il est en contact est indispensable pour toute approche dynamique du mouvement. Les dynamomètres permettent de mesurer la variation de ces efforts au cours du temps.

2.1. Extensométrie et jauges à éléments résistifs

Pour un solide homogène, isotrope et soumis à des petites déformations élastiques (théorie de l'élasticité linéaire), il existe une relation linéaire entre les contraintes et les déformations. Ainsi, la connaissance des déformations permet de calculer l'état des contraintes. L'utilisation de jauges extensométriques permet de mesurer les déformations sur la surface du solide considéré.

Pour la conception de jauges extensométriques, le principal phénomène physique utilisé est la variation de résistance. Une jauge à éléments résistifs est constituée d'un fil, collé en spires rapprochées sur un support mince, lui-même collé à la surface du solide afin de subir les mêmes déformations. La résistance de la jauge est proportionnelle à sa déformation. Afin de mesurer ses variations de résistance, des montages électriques appelés ponts de Wheatstone peuvent être réalisés. Un dynamomètre peut être formé d'un pont de Wheatstone dont une, deux ou quatre des résistances sont des jauges.

Ainsi, de la mesure de la variation de résistance de la jauge est déduite la déformation du solide puis la contrainte engendrée par les efforts du sportif sur le solide.

2.2. Piézoélectricité et capteurs de pression

La piézoélectricité est une propriété électrique de certains matériaux qui émettent une charge électrique proportionnellement à la sollicitation mécanique qu'ils subissent [Gaut02]. Les capteurs piézoélectriques sont des capteurs dont le transducteur est fabriqué dans un matériau piézoélectrique. Le cristal de quartz est le matériau le plus utilisé pour les transducteurs. Contrairement aux capteurs de type passif (comme les dynamomètres fonctionnant sur le principe d'une variation de la résistance, de la capacitance ou de l'inductance), les capteurs piézoélectriques, dits actifs, ne nécessitent pas de source d'énergie extérieure pour émettre un signal de sortie caractérisant la mesure. De plus, les capteurs piézoélectriques ont pour principaux avantages une très grande rigidité, une fréquence propre élevée, une large gamme de mesures et de températures d'utilisation, une grande stabilité, une haute reproductibilité, une grande linéarité reliant la mesure et le signal de sortie et une insensibilité aux champs électriques, magnétiques et aux radiations. Leur seul inconvénient est leur incapacité à mesurer un phénomène statique sur une longue durée.

L'effet piézoélectrique est le principal phénomène physique utilisé pour la conception de capteurs de pression. La mesurande (la force de pression) est transmise directement au transducteur par des pièces métalliques rigides. Le signal de sortie est une charge électrique proportionnelle à la mesurande. Dans le Système International (SI), l'unité de charge électrique est le Coulomb défini par 1 C = 1 A.s. La quantité de charge électrique émise par un capteur piézoélectrique est en général de l'ordre du pico-Coulomb seulement ($1 \text{ pC} = 10^{-12} \text{ C}$).

2.3. Mesure d'efforts dynamiques

La rigidité est une des propriétés essentielles qui doit être considérée lors de la conception d'un système de mesure dynamométrique.

En régime statique, l'équilibre du dynamomètre soumis à une force F peut s'écrire F = kxoù k est la rigidité du dynamomètre et x son déplacement.

En régime dynamique, la masse m et l'amortissement c du dynamomètre interviennent dans l'équilibre : $F = kx + c\dot{x} + m\ddot{x}$.

Afin de limiter l'influence de la conception du dynamomètre sur la mesure de l'effort, le matériau choisi doit avoir un amortissement c faible et un rapport k/m le plus grand possible.

Toutefois, pour les capteurs à jauges extensométriques, il convient de ne pas augmenter de manière inconsidérée la rigidité du solide car cela nuirait à la sensibilité du dynamomètre.

Les capteurs piézoélectriques ne posent pas ce genre de difficultés car ils conservent une grande sensibilité pour une rigidité importante et sont donc mieux adaptés à la mesure d'efforts dynamiques.

2.4. Système de mesure choisi

Les plateformes de force à plusieurs composantes servent à mesurer dynamiquement et quasi statiquement les trois composantes orthogonales d'une force agissant sur la plaque supérieure, quels que soient le point d'application ou la direction de la force. L'idée de mesurer les appuis des nageurs lors des virages a conduit à la sélection de plateformes de force étanches dédiées à la mesure d'impacts en biomécanique (impacts des pieds lors du virage culbute crawl).

Deux constructeurs proposent de tels systèmes de mesure : AMTI et Kistler. Les modèles OR6-WP d'AMTI sont des plateformes de force à jauges de contraintes de type résistif. Leurs caractéristiques sont similaires au modèle OR6-7-2000 utilisé à partir de 2005 par le service Recherche de la FFN pour l'évaluation des départs. Dans sa gamme de plateformes de mesure, Kistler dispose des modèles du type 9253B, d'indice de protection IP67. Ce type de plateformes de force à capteurs de pression piézoélectriques a été utilisé pour l'étude de la marche en gravité réduite (sous l'eau) [Miyo04] [Miyo06], pour l'étude des départs en natation [Arel00] ainsi que pour l'étude des virages [Clot00]. Auparavant, Lyttle et Mason ont utilisé des capteurs de force triaxiaux de type 9251A pour concevoir leur système de mesure du pic de force horizontal, de l'impulsion et du temps de contact du nageur avec le mur lors de virages en crawl et en papillon [Lytt97]. Enfin, Blanksby et ses collaborateurs ont utilisé une plateforme de force Kistler de type 9253A11 pour l'étude de virages en dos [Blan04].

AMTI et Kistler proposant des plateformes de dimensions similaires, le choix du système de mesure a été déterminé par le type de capteurs utilisés. Les capteurs piézoélectriques étant mieux adaptés à la mesure d'efforts dynamiques, une plateforme de force Kistler de type 9253B12 a été choisie.

Cette plateforme peut être utilisée pour le diagnostic de performances dynamiques et permet la mesure de forces dans des conditions difficiles et variées. De par la conception de sa plaque supérieure en aluminium, cette plateforme de force résiste à de très fortes sollicitations dues à des charges ponctuelles comme cela peut advenir lors d'un virage mal réalisé où les talons du nageur viennent impacter fortement la plateforme.

Elle comprend quatre capteurs de force sous précontrainte. Ces capteurs de force contiennent des anneaux en quartz montés entre deux plaques en acier dans le boitier du capteur. Deux anneaux sensibles au cisaillement mesurent les composantes de force tangentielles à la plaque supérieure tandis qu'un anneau sensible à la pression mesure la composante normale de la force.

La gamme de mesures est de -10 à 10 kN en cisaillement et de -10 à 20 kN en pression avec une gamme de mesures étalonnée en usine allant de 0 à 1 kN en cisaillement et de 0 à 2 kN en pression, valeurs similaires à la gamme de mesures envisagée. Le constructeur ne prévoit aucun étalonnage ultérieur sauf en cas d'accident : chute, choc ou surcharge ; cas dans lesquels la plateforme doit retourner en usine pour réparation et/ou réétalonnage.

Pour les besoins de l'étude, cette plateforme devait être mobile et permettre des mesures dans différents bassins. Un système de fixation répondant aux instructions de montage préconisées par le constructeur a donc été conçu pour répondre à ces besoins (3.4.2).

3. DISPOSITIF EXPÉRIMENTAL D'ANALYSE 3D DU VIRAGE CRAWL

Ce dispositif a pour objectif de permettre l'étude de l'influence de paramètres biomécaniques choisis sur la performance au virage crawl. Il se compose d'un ensemble de caméras calibrées et d'un système de mesures dynamométriques fixé verticalement sur le mur de virage. Le protocole expérimental a été établi en fonction des contraintes environnementales et du haut niveau de la population étudiée.

3.1. Contraintes en milieu sportif

Les contraintes induites par l'analyse d'un mouvement sportif sont supérieures à celles rencontrées lors d'expérimentations en laboratoire. L'environnement d'analyse ne peut être contrôlé. Dans le cas de l'analyse du virage crawl, l'environnement est une piscine (bassin intérieur pour toutes les expérimentations) avec toutes les contraintes qui en découlent : humidité et chaleur permanentes, lumière variable, espace et temps disponibles restreints pour les expérimentations. La nature des instruments de mesure est déterminée par l'environnement. L'analyse sous-marine implique l'utilisation de systèmes de mesure étanches, la nature du système de mesure en est donc affectée. Par exemple, l'utilisation de caissons pour les caméras devient nécessaire et cela a des conséquences sur la mesure et sur les possibilités de mise au point. L'expérimentation se déroule dans un milieu public dont l'accès est restreint durant les courtes plages horaires obtenues pour l'étude. Il est de ce fait nécessaire de choisir ou de concevoir des instruments de mesure adaptés à ce travail de terrain et répondant principalement aux contraintes d'étanchéité et de mobilité.

Le second type de contraintes est lié aux particularités de la population d'étude. Les sportifs de haut niveau sont une population délicate à « manipuler », de laquelle il ne faut attendre que peu de coopération et ne pas demander de compromis. Bien que les résultats de cette étude soient applicables à leur activité, la population élite a des difficultés à s'impliquer dans un protocole de recherche. Le sportif de compétition reste intéressé par une information, une activité lui permettant de progresser mais il faut pour cela le convaincre de participer en lui proposant un gain dans un délai court et, surtout, qu'il en soit l'unique bénéficiaire. Pour ces raisons, des activités d'évaluation technique et de formation ont été proposées autour du protocole de recherche. De plus le contexte sportif impose une planification stricte des expérimentations, particulièrement lors d'une saison préolympique. Enfin, la coopération limitée de l'athlète ne permet pas d'utiliser des marqueurs pour l'analyse cinématique. Cette contrainte, bien qu'entrainant un travail de suivi très conséquent, permet d'éviter les erreurs dues au mauvais positionnement de ces marqueurs et à un suivi réalisé sans réflexion, comme les erreurs dues au déplacement des marqueurs collés sur la peau par rapport aux éléments squelettiques qu'ils doivent représenter [Chèz95] ; déplacement qui peut même être aggravé par l'utilisation de marqueurs volumiques sujets à des résistances lors du mouvement sousmarin.

En conclusion, le système d'analyse ne doit en rien perturber la performance de l'athlète afin que cette dernière soit représentative de sa technique et de son niveau. Toutes ces contraintes ont été intégrées afin d'établir un protocole et un système de mesure performants.

3.2. Tâche et consignes

Cette étude a la particularité de n'avoir aucune condition expérimentale à tester. Chaque nageur devait réaliser la tâche demandée selon sa propre technique avec pour seule consigne de réaliser « son meilleur virage ». Par la suite, la comparaison des virages sera réalisée à partir du niveau *a priori* ou du genre de chaque nageur et non de la performance au virage ou du type de technique employée.

Le niveau d'expertise global de la population d'étude permet de ne travailler que sur un seul essai pour chaque sujet. En effet, ces nageurs ont la capacité de réaliser le même geste, « leur » geste, « à la demande ». Toutefois l'entraineur, l'expérimentateur et l'athlète se gardaient la possibilité de demander à réaliser un ou plusieurs essais supplémentaires jusqu'à ce que tous les protagonistes soient satisfaits de l'essai : l'entraineur avec son œil de technicien et sa connaissance de l'athlète, l'expérimentateur, spécialiste de natation également, à la vue du geste et des premiers enregistrements (notamment lorsque le nageur réalisait son virage en dehors des limites de la plaque supérieure du système d'analyse dynamométrique) et le nageur en fonction de son intention et de son ressenti. Un échauffement ainsi que quelques virages d'essais étaient toujours réalisés au préalable. Enfin, jamais plus de trois virages n'étaient réalisés consécutivement, sans une longue période de repos, ceci pour que la fatigue n'influence pas les résultats [Blan95] [Silv07].

Pour « réaliser son meilleur virage », le nageur débutait sa nage à environ 15 m du mur et accélérait jusqu'à atteindre sa vitesse maximale avant d'avoir passé les drapeaux (à 5 m du mur). Dans la suite du mouvement, le nageur réalisait son virage culbute en crawl à pleine vitesse puis reprenait à nager toujours à vitesse maximale avant de stopper son effort.

3.3. Dispositif d'analyse cinématique

À partir des principes de l'analyse cinématique, un système composé de caméras et de mires de calibration a été développé pour cette étude sous-marine.

3.3.1. Repère d'étude

Le repère d'étude choisi pour l'analyse cinématique est un repère orthonormé direct $(O_c, \vec{x_c}, \vec{y_c}, \vec{z_c})$. La surface de l'eau fait office de plan horizontal $(\vec{x_c}, \vec{z_c})$, le plan d'appui du nageur sur la plateforme de force est le plan vertical parallèle au mur de virage $(\vec{y_c}, \vec{z_c})$ et le plan médian du couloir de nage est le plan vertical parallèle au plan de déplacement principal du nageur $(\vec{x_c}, \vec{y_c})$. L'origine du repère O_c est le point commun à ces trois plans.



Figure 14 : Repère cinématique

3.3.2. Conception et positionnement des mires de calibration

Le système de calibration utilisé précédemment par le service Recherche de la FFN lors d'évaluations techniques sous-marines reposait sur l'utilisation de balles de tennis de table. Une ligne de mire était alors composée d'au moins deux balles, noircies au marqueur et percées finement afin d'être traversées d'un fil de pêche permettant de lier les balles et d'en choisir l'écartement. Un lest était fixé à un bout de chaque ligne. La flottabilité des balles assurait la verticalité de la ligne de calibration une fois celle-ci immergée. Malheureusement ce système nécessitait d'être fabriqué à nouveau pour chaque expérimentation. L'utilisation de tuyaux en PVC a permis de remédier à ce problème. Découpés à une longueur choisie et bouchés à leur extrémité supérieure par un cylindre de mousse compressée, les tuyaux étaient ensuite reliés à des lests par du fil de pêche. La verticalité de st assurée par l'air contenu dans chaque tuyau. Du ruban adhésif noir recouvrant chaque extrémité du tuyau de couleur claire permet de dessiner deux mires de calibration.

La configuration parallélépipédique du système de mires est préférable à une configuration en étoile qui correspond à une concentration des mires au centre des plans images [Chen94]. Il est nécessaire que les mires soient situées au plus près du lieu du mouvement mais également que le volume de calibration contienne le mouvement [Wood86]. De plus, la configuration permet au système d'être laissée en place pendant l'expérimentation (Figure 15). Cela permet de ne pas « perdre » d'essais dans le cas où une caméra serait légèrement déplacée par inadvertance lors de l'expérimentation ou réajustée par un expérimentateur. En effet, la reconstruction du mouvement pourrait être quand même réalisée moyennant une nouvelle calibration de la caméra déplacée.

L'écart horizontal et latéral entre deux lignes de mires est d'environ 2 m. La distance verticale moyenne séparant deux mires est de 0,57 m (distance liée à la longueur des tuyaux en PVC découpés). La mesure des positions des mires de calibration dans le repère d'étude a été effectuée avec la plus grande rigueur possible afin d'influencer au minimum la précision de la reconstruction.



Figure 15 : Positionnement des mires et volume de calibration (délimité par les points blancs)

3.3.3. Préparation et positionnement des caméras

Les expérimentations se sont déroulées en bassin de 50 m (et occasionnellement en bassin de 25 m). La nécessaire portabilité du système d'analyse cinématique a conduit à l'utilisation de caissons étanches et de trépieds lestés pour assurer l'étanchéité et l'immobilité de chaque caméra. Les caméras utilisées étaient des modèles mini-DV Sony (DCR-HC62E et DCR-HC96E) et Panasonic (NV-GS17). Les caissons étaient des modèles Sony (SPK-HCD) et des caissons conçus spécifiquement au préalable par un membre du service Recherche de la FFN. La focale des caméras a du être réglée en automatique afin d'obtenir des images nettes. En effet, un réglage manuel de la focale avant la mise en caisson puis l'immersion ne permet pas de s'assurer de la netteté finale des images. Au cours de l'expérimentation, le réglage automatique pourrait toutefois faire varier les constantes de la DLT de chaque caméra. Pour réduire cet effet, la calibration de chaque caméra a été effectuée peu avant le passage du nageur. Puis, pour contrôler cet effet, deux calibrations successives ont été réalisées et comparées : la première peu avant le passage du nageur, la seconde au début du passage du nageur à un instant où il est dans le champ de la caméra et où toutes les mires de calibration sont visibles. Une comparaison des valeurs des 11 constantes de la DLT n'ayant montré aucune différence, le réglage de la focale n'a donc pas varié au cours de l'expérimentation.

Le positionnement des caméras devait répondre aux contraintes dues au mouvement analysé (le virage) et aux limites physiques de l'environnement d'étude (le bassin).

Au vu de la complexité d'un tel mouvement, l'identification par l'expérimentateur de tous les points d'intérêt du sujet implique de positionner des caméras tout autour de l'espace dans lequel l'athlète évolue. Dans le cas où un point ne peut être vu par au moins deux caméras, sa reconstruction 3D est impossible. L'identification des parties cachées du sujet est alors soumise à la subjectivité de l'expérimentateur ce qui doit être limité au maximum. La multiplication des points de vues et donc du nombre de caméras permet de diminuer la surface corporelle cachée. Cette multiplication des prises de vues rend aussi la tâche de suivi des points longue et fastidieuse. Toutefois, elle permet d'une part de maximiser le nombre de points reconstruits et d'autre part d'affiner la reconstruction de ces points. Ainsi, lors de chaque expérimentation, toutes les caméras disponibles ont été utilisées. Cela a permis en outre de s'assurer de la possibilité d'une reconstruction même lorsque survenaient diverses complications : étanchéité perfectible (présence

de buée ou destruction de la caméra), mauvaise qualité d'une cassette mini-DV (pertes d'images à la numérisation), batterie de caméra défectueuse (enregistrement incomplet), mauvais cadrage (le cadrage est difficile voire impossible lorsque la caméra est dans le caisson). Enfin, le temps disponible pour la mise en place des caméras était restreint : d'une part à cause du peu de temps accordé par les sportifs et les responsables de bassin, d'autre part par la durée d'enregistrement limitée (batterie et cassette).

Le positionnement des caméras est réalisé en fonction des possibilités offertes par le bassin. En règle générale, un point de l'espace peut être observé sous une infinité d'angles de vue. Si cet espace est représenté par une sphère dont le centre est le point d'intérêt puis qu'un repère orthonormé y est appliqué en vue de son étude, la sphère sera alors découpée en huitièmes par les trois plans orthogonaux du repère. Dans le cas du repère cinématique associé à l'expérience, les plans sont la surface de l'eau, le mur de virage et le plan médian du couloir de nage. La surface de l'eau ne permet pas d'observer les points immergés à partir du bord du bassin (réfraction de la lumière et instabilité de la surface due aux vagues). De par sa totale opacité, le mur du bassin ne permet pas non plus d'observer quoi que ce soit à travers lui. Dès lors, des huit portions de sphère, seules deux sont disponibles pour le placement des caméras (Figure 16).



Figure 16 : Volume d'étude associé à une sphère et découpé par le repère choisi

Enfin, le fond du bassin et les murs latéraux limitent encore les points de vue disponibles de par le peu de recul qu'ils offrent. La solution adoptée a été de positionner les caméras à des hauteurs différentes en bordure d'une semi-ellipse dont un des centres est l'extrémité du T (Figure 17).



Figure 17 : Positionnement de cinq caméras pour l'analyse cinématique 3D du virage crawl

3.3.4. Synchronisation des caméras

La synchronisation des fichiers vidéo obtenus à partir des différentes caméras filmant le même essai de virage a été réalisée à partir d'un flash lumineux sous-marin (Epoque ES-150 DS α), déclenché au début de chaque expérimentation.

3.4. Dispositif d'analyse dynamique

Autour de la plateforme de force Kistler choisie, un dispositif complet d'analyse dynamique a été mis en place pour les besoins de l'étude.

3.4.1. Repère d'étude

Comme pour l'analyse cinématique, le repère d'étude choisi pour l'analyse dynamique est un repère orthonormé direct $(O_d, \vec{x_d}, \vec{y_d}, \vec{z_d})$. Il est toutefois différent : l'origine du repère O_d est le point central de la plaque supérieure de la plate forme de force, l'axe $\vec{x_d}$ est tangentiel à la plaque et orienté du centre du couloir de nage vers le côté du bassin, l'axe $\vec{y_d}$ est aussi tangentiel à la plaque mais orienté verticalement, du centre de la plaque vers la surface et l'axe $\vec{z_d}$ est normal à la plaque et dirigé vers l'intérieur de la plateforme (Figure 18). Ce repère est identique au repère d'origine du système Kistler. Comme seules les forces et les impulsions seront étudiées, la position de l'origine du repère O_d n'influence pas les résultats.



Figure 18 : Repère dynamique

Le fait d'utiliser deux repères différents n'a pas d'incidence sur l'étude car les dénominations \vec{x} , \vec{y} ou \vec{z} des axes ne seront pas utilisées. Par la suite, nous discuterons de vitesses ou de déplacements latéraux $(\vec{z_c})$, verticaux $(\vec{y_c})$ et horizontaux $(\vec{x_c})$ et de forces ou d'impulsions latérales $(\vec{x_d})$, verticales $(\vec{y_d})$ et horizontales $(\vec{z_d})$, l'origine du repère d'étude restant l'origine du repère cinématique O_c car les moments ne seront pas étudiés.

3.4.2. Conception d'un système nomade de fixation de la plateforme

La principale contrainte de conception du système de fixation de la plateforme de force était d'assurer la mobilité du système d'analyse dynamométrique. En cela, le système devait s'adapter à la majorité des bassins sans modification de ces derniers (pas de perçage par exemple). De plus, la conception du système devait prendre en compte les instructions de montage propre à la plateforme choisie.

Des profilés aluminium standards ont été choisis pour la structure du système mécanique. Leurs principaux avantages sont un poids contenu, une bonne résistance à l'oxydation et à la flexion. De plus, l'assemblage de tels éléments par des équerres est aisé et de très nombreuses configurations sont possibles.

Le système conçu est composé de deux structures distinctes. Un cadre rigide, de dimensions 0,8 x 0,8 m sur lequel est vissée la plateforme de force, permet de transmettre l'appui du nageur au mur du bassin. Une seconde structure, dont la forme peut être adaptée à la majorité des bassins, permet de fixer l'ensemble du système au mur de virage. Des pieds réglables vissés sur le cadre rigide assurent le contact permanent du système avec le mur.



Figure 19 : Système mécanique de fixation de la plateforme

Enfin, une plaque en polystyrène expansé (matériau d'isolation) a été ajoutée au système afin que le nageur ne se blesse pas dans le cas où il manquerait la plaque supérieure de la plateforme lors de son virage. Cette protection est représentée par le composant orange sur la figure 18, la plateforme étant représentée en gris foncé et le système de fixation en blanc.

3.4.3. Acquisition des forces de contact

La chaine d'acquisition des forces de contact est composée de la plateforme de force Kistler 9253B12 ainsi que d'un amplificateur de charge Kistler 9865E1Y28 adapté à cette plateforme. Les charges électriques engendrées par les efforts sur la plateforme de mesure sont transformées en tensions proportionnelles par l'amplificateur de charge. En utilisation, l'amplificateur affiche une dérive inférieure à ± 0,03 pC/s. Une remise à zéro de l'amplificateur est effectuée entre chaque essai (10 s d'acquisition) bien que la dérive soit négligeable par rapport aux grandeurs enregistrées : la dérive maximale sur un essai est inférieure à 0,04 N. L'acquisition des données est réalisée sur PC portable grâce au logiciel BioWare. Une carte d'acquisition Kistler 5691A1 est reliée au PC via un câble USB et la plateforme est reliée à l'amplificateur de charge via un câble de connexion 1678A10 de 10 m.

3.5. Synchronisation des signaux

La synchronisation des signaux cinématiques et dynamiques ne peut s'effectuer que si un même évènement apparait sur les deux types d'enregistrement. C'est le cas de la fin de contact, observable sur les enregistrements vidéo (l'expérimentateur relèvera le numéro de l'image sur laquelle il voit la fin de contact des pieds du nageur avec le mur) et détectable automatiquement sur les enregistrements dynamiques (annulation de la force horizontale en fin de contact). La précision de cette synchronisation dépend de la fréquence d'acquisition la moins élevée. La fréquence d'acquisition des images vidéo étant de 50 Hz, la précision de synchronisation est de 0,02 s.

4. MODÉLISATION DU NAGEUR

Le choix d'un modèle segmentaire du corps humain est une phase indispensable pour pouvoir décrire la cinématique du mouvement. L'étude des positions relatives des segments est particulièrement intéressante lors de la phase de retournement où le nageur se regroupe [Sand02] et lors de la phase de contact où le nageur se place puis se détend vers une position profilée [Vila03]. Pour ce faire, un modèle du corps à segments indéformables semble être adapté. Ce modèle sera ajusté en fonction des caractéristiques du mouvement.



Figure 20 : Symétrie sagittale lors du retournement (en haut) et lors du contact (en bas)

Lors du retournement et du contact, le mouvement du nageur est essentiellement symétrique (Figure 20), les segments gauches et droits du nageur effectuent simultanément le même mouvement. Les membres inférieurs du nageur restent serrés limitant les écarts de position entre les orteils, les chevilles et les genoux gauches et droits. Pour un même instant, l'identification concomitante des deux points gauches et droits n'étant pas garantie, la moyenne ou la seule position connue sera prise en compte. Cette symétrie sagittale permet ainsi de choisir un modèle à huit segments indéformables. Lors du virage, les mouvements d'abduction-adduction et de flexion-extension du poignet sont réalisés avec une faible amplitude. Ainsi, il semble raisonnable d'unir les segments main et avant-bras en un segment unique avant-bras + main. Cela permet de s'affranchir du suivi des poignets au cours du mouvement et de choisir un modèle à sept segments indéformables. Le modèle choisi sera basé sur les travaux de Dempster [Demp55] rapportés par Winter [Wint90] (Tableau 24).

	Point distal / Point proximal		Position du	Masse du
Segment		Panàra anatomique du paint provinal	centre de gravité	segment
		Repere anatomique du point proximal	du segment /	relative au
			Point proximal	sujet
Diad	Bout des orteils /	Milieu du segment liant les malléoles	50%	3%
Tieu	Cheville	latérale et médiale		
		Point commun aux axes principaux de la		
Jambe	Cheville / Genou	jambe et de la cuisse confondu avec le	43,3%	9,2%
		milieu du segment liant les condyles		
		fémoraux (latéral et médial)		
Cuisse	Genou / Hanche	Épine iliaque antéro-supérieure du bassin	43,3%	20%
Tronc	Hanche / Épaule	Tête de l'humérus	50%	49,7%
Tête	Centre de la tête	Milieu du segment inter-oreilles (centre	100%	8,1%
		géométrique du crâne)		
Bras	Coude / Épaule	Tête de l'humérus	43,6%	5,6%
Avant-bras	Bout des doigts /	Point commun aux axes principaux du bras	69.20/	1 10/
+ Main	Coude	et de l'avant-bras (trochlée de l'humérus)	00,270	4,470

Tableau 24 : Modèle à 7 segments indéformables choisi pour l'étude du retournement et du contact

Le suivi du mouvement global du nageur est approché par un point. Idéalement c'est le centre de gravité qui est choisi. Malheureusement l'émersion épisodique de certains segments corporels et la présence de bulles d'air rendent impossible le suivi permanent de l'ensemble des points nécessaires à la détermination du centre de gravité. Le centre de la tête est un point anatomique qui reste visible à chaque instant du mouvement, son déplacement semble même contrôler le début des phases de retournement et de reprise de nage [Cost94]. Lors de la phase sousmarine d'un départ plongé, Elipot a montré que le mouvement de la tête est comparable au mouvement du centre de gravité (correspondance avec l'auteur) [Elip09].

Pour déterminer si le centre de la tête peut être choisi comme modèle 3D ponctuel représentant le déplacement global du nageur lors du virage, une étude de cas a été menée. Sur quelques exemples de virages pour lesquels huit caméras sous-marines ont été utilisées, maximisant ainsi les possibilités de reconstruction, le déplacement horizontal de la tête a été comparé au déplacement horizontal du centre de gravité (exemple d'une nageuse non experte, Figure 21). Lors de la phase sous-marine (lors de laquelle aucun segment corporel ne coupe la surface de l'eau et où peu de bulles d'air cachent le corps du nageur), le nombre de caméras utilisées a permis de déterminer le centre de gravité à partir d'un modèle du corps humain un peu plus complexe et précis, sans hypothèse de symétrie sagittale et tenant compte du mouvement des poignets. Ce modèle à 14 segments indéformables représente les pieds, les jambes, les cuisses, le tronc, la tête, les bras, les avant-bras et les mains du nageur [Demp55] [Wint90].







Il peut être noté que les vitesses horizontales de déplacement de la tête et du centre de gravité concordent très bien au début de la phase sous-marine c'est-à dire pendant la phase de glisse. Les ondulations utilisées ensuite lors de la coulée provoquent une altération de la concordance (mouvement « en accordéon »).

La bonne concordance des déplacements horizontaux de la tête et du centre de gravité lors de la phase sous-marine (seul moment où la position du centre de gravité peut être déterminée précisément) permet de choisir le centre de la tête comme modèle ponctuel du nageur pour l'analyse cinématique de son déplacement global lors du virage culbute crawl.

5. TRAITEMENT DU SIGNAL

5.1. Du signal vidéo aux coordonnées 3D

Une fois les essais enregistrés sur les cassettes mini-DV, la procédure de reconstruction pour obtenir les coordonnées 3D de chaque point d'intérêt passe par les étapes suivantes :

- Numérisation des films ;
- Synchronisation et décomposition des films en séquences d'images détramées ;
- Calibration des caméras ;
- Suivi des points d'intérêt ;
- Reconstruction 3D.

Cette procédure est facilitée par l'utilisation du logiciel SportLab développée par Julien Morlier. Deux fonctionnalités supplémentaires y ont été intégrées afin de supporter les points invisibles et de permettre l'utilisation de plus de deux caméras. Les logiciels CaptureFlux et VirtualDub (licence GNU) ont été utilisés en complément.

La numérisation des films enregistrés sur cassettes mini-DV a été réalisée à l'aide du logiciel CaptureFlux. Chaque cassette a été numérisée en un seul fichier vidéo *.avi, au format DV de type 2. Les fichiers vidéo ont ensuite été ouverts dans le logiciel VirtualDub. Le filtre vidéo *bob doubler* a été utilisé afin de sur-échantillonner les vidéos entrelacées pour en doubler la fréquence. Cette opération de détramage repose sur le fait que les vidéos enregistrées par les caméscopes utilisés sont composées d'images entrelacées. Chaque image est composée de deux trames superposées, une trame paire et une trame impaire. Le détramage consiste à recréer 50 im/s numérotées, alternant les trames paires et impaires et respectant la chronologie de la vidéo. L'image détramée sur laquelle apparait le flash a été repérée manuellement sur chacune des vidéos. Pour chaque virage autant de séquences d'images que de caméras ont été utilisées. Toutes les séquences d'images d'un même virage sont synchronisées entre elles et comportent le même nombre d'images. Les images étant détramées, deux centièmes de seconde séparent chaque image consécutive.

Pour chaque configuration du système d'analyse, une calibration des caméras doit être effectuée. Au préalable, il faut avoir mesuré précisément la position des mires de calibration dans le repère d'étude puis extraire pour chaque caméra une image où toutes les mires sont visibles et saisir sur cette image chaque mire dans un ordre prédéfini (le suivi ou *tracking*). Un fichier de référence comporte les coordonnées mesurées des mires. Les unités choisies dans ce fichier seront les unités obtenues après la reconstruction 3D sur les trajectoires des points d'intérêt. Après calcul, le module permet d'obtenir les constantes de la DLT de chaque caméra.

Un module de SportLab permet de réaliser de manière manuelle le suivi des points d'intérêt en relation avec les modélisations choisies. Le centre de la tête sera suivi sur l'ensemble du mouvement. Ensuite, lors du retournement et du contact, le bout des orteils, les chevilles, les genoux, les hanches, les épaules, les coudes et le bout des doigts seront également suivis. Tous ces points seront également suivis durant la phase sous-marine afin d'établir les longueurs segmentaires de chaque sujet. Ce travail, long et précis, consiste à saisir tous les points nécessaires à l'aide de la souris, sur chaque image détramée créée (Annexe 3). Une fonctionnalité de support des points invisibles a été développée pour les besoins de l'étude. Désormais le logiciel offre la possibilité de ne pas suivre un point temporairement invisible.

La reconstruction est possible grâce à l'intégration de l'algorithme de la DLT à SportLab. Initialement prévu pour permettre une reconstruction 3D à partir de deux caméras, le logiciel a été modifié pour permettre une reconstruction à partir de deux et jusqu'à huit caméras. Cette augmentation du nombre de caméras utilisables simultanément permet principalement d'augmenter le nombre de points reconstruits. La précision de la reconstruction peut être quantifiée en comparant les coordonnées réelles des mires (celles indiquées dans le fichier de référence) avec celles reconstruites par l'algorithme. Pour une configuration à 14 mires et cinq caméras (Figure 22-a), l'écart de position 3D moyen calculé a été de 12,8 mm et l'écart maximal de 28,7 mm (Annexe 4). Le volume de calibration avait pour dimensions 4,12 x 1,1 x 1,885 m.



Figure 22 : Configurations à cinq (a), trois (b) ou deux (c) caméras

Le positionnement des caméras était tel que si une ou plusieurs caméras ne fonctionnaient pas, la reconstruction resterait possible et sa précision resterait constante. Seul le nombre de points d'intérêt reconstruits serait moindre à cause de la diminution des angles de vue. Dans cet exemple, si deux caméras (Figure 22-b) ou même trois caméras (Figure 22-c) ne fonctionnaient pas, l'écart de position 3D moyen calculé demeurerait alors respectivement à 13,4 mm ou 12,1 mm et l'écart maximal de 28,0 mm ou 26,5 mm.

5.2. Interpolation des coordonnées

La reconstruction 3D du mouvement n'est pas garantie à chaque instant. Lorsqu'un point d'intérêt est caché par des bulles d'air ou d'autres parties du corps et que le nombre de caméras pour lesquelles ce point est visible est inférieur à deux, la reconstruction est impossible. Dans ce cas, l'ensemble des données comporte des trous et nécessite d'être interpolé.

Le logiciel Scilab (licence CeCILL) a été choisi pour développer l'algorithme de traitement des données cinématiques. Pour réaliser l'interpolation des coordonnées manquantes, les fonctions splin et interp ont été utilisées. Une interpolation de type monotone et un pas d'interpolation de 0,005 s ont été choisis. Ce pas correspond à une augmentation fictive (multiplication par 4) de la fréquence des données cinématiques imposée à 50 Hz par les caméras utilisées.

5.3. Lissage des signaux

Une certaine quantité d'erreurs est créée au cours de toutes les étapes liées à l'acquisition de données. Ces erreurs (appelées aussi bruit) viennent se superposer au signal réel et modifient les résultats obtenus. L'élimination du bruit est nécessaire, particulièrement en cinématique dans le cas du calcul de la vitesse [Wint90].

Il existe essentiellement deux méthodes permettant de réduire la quantité de bruit par rapport au signal réel. Il s'agit des filtres et des techniques de lissage.

L'utilisation de filtres fait référence à l'analyse fréquentielle du signal. Ces techniques reposent sur l'idée qu'un signal peut être décomposé en une série de fonctions périodiques [Wint90]. Grâce à l'analyse fréquentielle, les fréquences des composantes constituant le signal réel et le bruit peuvent être mises en évidence. Dans le cas de mouvements cycliques humains, les composantes ayant des fréquences élevées sont le plus souvent associées à du bruit [Wint90]. Les filtres vont permettre d'éliminer le bruit tout en conservant le signal réel. Parmi les filtres existants, le filtre Butterworth est le plus souvent utilisé dans le cadre de l'analyse cinématique du mouvement humain. Ce filtre passe-bas permet d'éliminer toutes les parties du signal dont les fréquences sont supérieures à la fréquence de coupure choisie. Le choix de la fréquence de coupure du filtre est guidé par l'analyse des puissances des harmoniques constituant le signal brut ou par l'analyse résiduelle des différences existant entre le signal filtré et le signal brut. Dans ces deux cas, le choix de la fréquence de coupure devient délicat lorsque le bruit est partiellement superposé au signal réel : trop élevée, seule une partie du bruit sera éliminée, trop basse, une partie du signal réel sera supprimée.

Les techniques de lissage se basent sur l'hypothèse que le signal réel a une forme prédéterminée, régie par une fonction, mais que les points qui composent ce signal comportent des erreurs [Wint90]. Le lissage par une méthode polynomiale consiste à calculer l'ensemble des polynômes d'ordre compris entre 1 et n-1 qui ajustent au mieux l'ensemble des n points expérimentaux. Il convient ensuite de comparer les résultats obtenus au signal brut. Cette

comparaison se fait grâce au calcul des résidus. Ces derniers indiquent la différence qui existe entre le signal brut et le signal lissé. L'analyse des résidus permet de choisir le degré du polynôme à utiliser. Au lieu d'ajuster la courbe sur toute la durée du signal, une amélioration de cette méthode de lissage consiste à l'ajuster morceau par morceau [Savi64]. La taille de la fenêtre d'ajustement est un paramètre de la méthode, ce doit être un entier impair. Le second paramètre est le degré maximal des polynômes utilisés. Cette méthode est basée sur une approximation polynomiale au sens des moindres carrés [Vaip06].

Winter précise que dans le cas de mouvements non-cycliques, il est fréquent que le bruit et le signal réel soient superposés. Ainsi, pour l'analyse du virage (mouvement non-cyclique), il semble préférable de traiter le signal par une méthode de lissage. Pour confirmer ce choix, une comparaison d'une méthode de filtrage [Morl99] et d'une méthode de lissage [Savi64] a été réalisée.

Utilisée dans le cadre d'une étude du saut à la perche, la première méthode de réduction du bruit et de calcul de la vitesse est la suivante :

- Filtrage des coordonnées (Butterworth passe-bas) ;
- Interpolation du signal filtré par des splines ;
- Dérivation des splines pour l'obtention des vitesses.

Le traitement est automatisé et ne demande de choisir que la fréquence de coupure du filtre. Pour l'étude du saut à la perche, l'utilisation d'une plateforme de force a permis de déterminer avec précision la fréquence optimale en comparant l'accélération obtenue par l'analyse cinématique (suivie du filtrage, d'une interpolation et d'une double dérivation) à l'accélération déduite des forces enregistrées. Bien que la présente étude utilise aussi une plateforme de force, l'accélération déduite des forces de poussée ne peut être comparée à l'accélération reconstruite par la cinématique car les forces résistives de l'eau sur le corps du nageur ne sont pas directement quantifiables.

La seconde méthode d'obtention des vitesses se fait par dérivation temporelle des polynômes p de Savitky-Golay selon l'équation suivante [Stag05] :

$$v_{i} = \dot{d}_{i} = \frac{1}{t_{i+\frac{f-1}{2}} - t_{i-\frac{f-1}{2}}} \sum_{j=1}^{r} jp_{j}\tau^{j-1}$$

 $O\dot{u}(t_i, d_i)$ est un ensemble de données temporelles, r le degré maximal des polynômes p et f la taille de la fenêtre ; noter que $r \le (f - 1)/2$ et que f est impair.

La fonction sgolay_filt permet d'intégrer la méthode de Savitzky-Golay à Scilab. Le choix des paramètres r et f est réalisé en fonction de la nature du mouvement analysé. Pour cette étude, le choix des paramètres est présenté ci-après au travers d'une étude de sensibilité (Figure 24 et Figure 25). Pour la comparaison avec la méthode de filtrage, un degré maximal de 2 et une fenêtre de lissage de 13 points ont été utilisés (r = 2, f = 13). Le paramètre de différentiation a été établi à 1 pour obtenir la vitesse.



Filtrage (fc = 3, 5, 7 Hz) vs Lissage par Savitzky-Golay (r = 2; f = 13)

Figure 23 : Effets des méthodes de filtrage et de lissage sur la vitesse horizontale L'exemple présenté permet de choisir la méthode de lissage de Savitzky-Golay comme méthode de réduction de bruit et d'obtention de la vitesse. Il apparait que le signal de vitesse est mieux lissé que lors de l'utilisation de filtres passe-bas à fréquence de coupure élevée (5 ou 7 Hz). L'amplitude du signal est conservé et le lissage n'induit aucun décalage dans le temps (comme cela peut-être observé lors de l'utilisation d'un filtre passe-bas à 3 Hz).

Le choix des paramètres de lissage r et f est estimé dans un premier temps par une analyse séquentielle du mouvement de la tête. Nous nous attachons alors à décomposer le mouvement en séquences de complexité maximale (nombre d'inflexions ou changement de direction principale) et de durée minimale. Lors d'une séquence débutant avec le retournement et finissant pendant le contact, nous observons que le déplacement vertical de la tête peut être assimilé à une courbe à trois inflexions sur un intervalle de temps d'environ 1 s. Cette courbe peut être ajustée par un polynôme de degré 4 (trois inflexions) sur une fenêtre de 50 points (1 s à 50 Hz).

Jakubowska et Kubiak préconisent l'utilisation de degrés peu élevés [Jaku04]. Réduire le degré du polynôme afin d'éviter de créer un déplacement fictif (phénomène de Runge) mène à réduire la taille de la fenêtre en conséquence. En choisissant un polynôme de degré 2, la fenêtre de lissage doit être réduite à environ 16 points. Plus la fenêtre sera réduite moins le signal sera lissé. Une fenêtre de 13 points sera ainsi choisie dans un premier temps. Les coordonnées ayant été interpolées avec un pas de 0,005 s, la taille de la fenêtre sera réévaluée à 53 points (l'interpolation augmente fictivement la fréquence des images dans un rapport de 4, la taille de la fenêtre doit donc être élargie avec le même rapport). Le degré des polynômes utilisé reste défini à 2, l'étude de sensibilité montrant qu'un degré baissé à 1 lisse trop le signal et qu'un degré de 4 n'améliore pas le lissage (Figure 24 et Figure 25).



Ecart entre le signal brut et les signaux lissés (r = 1, 2, 4 ; f = 13)

Figure 24 : Effets du choix du degré maximal des polynômes de Savitzky-Golay sur l'écart entre le signal brut et les signaux lissés



Figure 25 : Effets du choix du degré maximal des polynômes de Savitzky-Golay sur le signal interpolé lissé

Ces figures montrent une bonne concordance des signaux interpolés lissés de degré 2 et 4 avec le signal brut (écart maximal inférieur à 22 mm). Les différences entre les signaux de degré 2 et 4 étant infimes, le degré le plus faible sera utilisé pour le lissage du signal brut [Jaku04]. Le degré choisi (r = 2) reste suffisamment élevé pour permettre une dérivation et le calcul des vitesses.

Dès lors, les paramètres r = 2 et f = 13 seront utilisés pour le lissage de tous les signaux cinématiques (positions et vitesses). La méthode de Savitzky-Golay sera également utilisée pour le lissage des signaux enregistrés par la plateforme de force (signaux non-cycliques également). La fréquence d'acquisition plus élevée portera la taille de la fenêtre à 65 points. La taille de la fenêtre correspond alors à un intervalle de lissage plus court (0,0325 s) car le bruit contenu dans le signal

brut dynamométrique est moins important que celui contenu dans les coordonnées reconstruites : pas de suivi manuel des points et donc pas d'influence de l'expérimentateur sur le résultat.

6. DÉFINITION DES VARIABLES DE LA PERFORMANCE

Issue de la revue de la littérature, une liste exhaustive des paramètres biomécaniques de la performance au virage crawl a été établie avec le 3mRTT comme cadre d'étude et temps de référence pour la performance au virage (Chapitre 1).

Ces variables explicatives de la performance sont classées en fonction du dispositif d'obtention des valeurs : variables cinématiques d'une part, obtenues par l'observation des enregistrements vidéo et par la reconstruction 3D, variables dynamiques d'autre part, obtenues à partir des enregistrements de la plateforme de force. Au-delà du traitement du signal, les programmes développés sous Scilab permettent de déterminer les valeurs de ces variables.

6.1. Cinématique

6.1.1. <u>Début et fin du virage</u>

Le programme automatise la détection des passages de la tête sur la ligne virtuelle des 3 m et permet ainsi le calcul du paramètre **3mRTT**, temps relatif à la performance au virage.

La dérivation de la position horizontale de la tête permet d'obtenir les vitesses horizontales **VIn** et **VOut**, 3 m avant le mur de virage et 3 m après.

6.1.2. Approche et retournement

L'approche débute en même temps que le virage c'est-à-dire lorsque la tête du nageur passe la ligne située 3 m avant le mur de virage. Le retournement débute quant à lui lorsque la tête du nageur commence à s'enfoncer sous l'eau [Blan96]. Le programme essaie de détecter automatiquement cet instant (Annexe 5) mais l'observation de cet instant reste la solution de détection choisie majoritairement. La fin du retournement correspond au début du contact et est détectée grâce aux signaux dynamométriques. La durée d'approche **AT** et la durée de retournement **RT** sont calculées.

En début de retournement, la distance horizontale **RD** qui sépare la tête du nageur du mur et la vitesse horizontale de la tête **VR** sont enregistrées. La vitesse horizontale de la tête **V1mR** un mètre avant le retournement est également enregistrée. Elle correspond à la vitesse d'approche du nageur. Outre les études antérieures qui se sont intéressées à cette vitesse [Nico79] [Arel94] [Pere08], des évaluations récentes des nageurs de l'Équipe de France à l'aide d'une centrale inertielle ont permis d'observer une décélération lors de l'approche.

Lors du retournement, Sanders souhaitait que soit étudié, au moins d'un point de vue théorique, l'habileté de regroupement du nageur. L'auteur associe à cette habileté une diminution du moment d'inertie du corps du nageur [Sand02]. Shahbazi et ses collaborateurs ont successivement réalisé différents modèles du regroupement lors du retournement et leurs résultats ont démontré l'importance d'un moment d'inertie minimal autour de l'axe de rotation [Shah05] [Shah06] [Shah08].
Le moment d'inertie d'un système en rotation autour d'un axe est une grandeur qui diminue avec le regroupement autour de cet axe des segments qui composent ce système. Le mouvement de retournement étant principalement une rotation autour de l'axe transverse du nageur, c'est le moment d'inertie autour de cet axe qui sera calculé. Il quantifie la « résistance » du nageur à cette rotation. Le minimum du moment d'inertie transverse sera retenu et noté **I**.

Pour déterminer le moment d'inertie d'un système il faut déterminer au préalable les positions des centres de gravité de chacun des segments qui le composent. La position du centre de gravité du système est déterminée à partir des centres de gravité de chacun des segments. Puis, à partir du théorème de transport de Huyghens, le moment d'inertie transverse du système, exprimé en son centre de gravité, est calculé de la manière suivante : $I_{CG} = \sum_{i=1}^{n} (m_i r_i^2 + I_{CG,i})$ où n est le nombre de segment, m_i la masse de chaque segment, r_i la distance qui sépare le centre de gravité du système et $I_{CG,i}$ le moment d'inertie transverse propre au segment [Wint90] [Barb94] [Pied08].

Le moment d'inertie transverse de chaque segment $I_{CG,i}$ se calcule à partir de la masse m_i et du rayon de giration du segment k_i . Le rayon de giration est le produit de la longueur du segment l_i et d'un coefficient c_i propre au segment et au point du segment étudié [Wint90]. Le moment d'inertie transverse du segment se calcule donc ainsi : $I_{CG,i} = m_i k_i^2$ avec $k_i = l_i c_i$.

Lors du retournement, le passage aérien des jambes et des pieds du nageur perturbe l'identification des genoux, des chevilles et du bout des orteils. Les orteils étant quasiment toujours invisibles, le modèle à 7 segments indéformables a été adapté pour le calcul du moment d'inertie de sorte que la masse du pied soit concentrée à la cheville. Comme les orteils semblent suivre la trajectoire des chevilles lors du retournement, cet ajustement a peu d'incidence sur le calcul. Par contre, l'identification épisodique des genoux et des chevilles diminue la pertinence du résultat. En conséquence de cela, la valeur l calculée n'a pu être retenue que pour quelques sujets.

6.1.3. Contact

Les évènements caractéristiques de la phase de contact (début de contact, début de poussée, pic de poussée et fin de poussée) sont détectés grâce aux signaux dynamométriques. L'instant de fin de poussée est également observable sur les vidéos. Cet instant servira de point de synchronisation entre les signaux cinématiques et dynamométriques.

La vitesse en début de contact VC, la vitesse en début de poussée VPo, la vitesse au pic de poussée VPe et la vitesse en fin de poussée VG sont calculées. L'augmentation de la vitesse horizontale de la tête pendant la poussée est aussi calculée : Δ VPo = VG - VPo.

À ces instants, la profondeur de la tête est également relevée (variables CDe, PoDe, PeDe et GDe).

En évoquant l'importance du profilage du nageur durant la poussée, Vilas-Boas [Vila03] démontre l'intérêt de quantifier comment l'ensemble des segments corporels du nageur sont positionnés par rapport à la direction principale du mouvement.

Une valeur élevée du moment d'inertie pourrait témoigner d'une extension importante du corps du nageur. Malheureusement cette seule valeur ne permet pas ni de déterminer si cette extension est bien orientée (vers l'avant, extension horizontale), ni de différencier l'extension du haut du corps (prépondérante lors du placement) de celle des membres inférieurs (prépondérante lors de la poussée).

Les paramètres cinématiques à définir alors sont des indices d'extension des membres inférieurs et des indices d'extension du haut du corps à chaque instant caractéristique du contact :

- L'indice d'extension des membres inférieurs sera le rapport entre la distance horizontale hanches-mur et la somme des longueurs segmentaires des pieds, des jambes et des cuisses. Cette somme est notée LLLm. Les quatre indices d'extension des membres inférieurs sont notés successivement CLLei, PolLei, PelLei et GLLei selon l'instant auquel ils se réfèrent ;
- L'indice d'extension du haut du corps sera le rapport entre la distance horizontale doigts-hanches et la somme des longueurs segmentaires du tronc, des bras et des avant-bras + mains. Cette somme est notée UBLm. Les quatre indices d'extension du haut du corps sont notés successivement CUBei, PoUBei, PeUBei et GUBei selon l'instant auquel ils se réfèrent.

6.1.4. Glisse, coulée et reprise de nage

La phase de glisse débute avec la fin de la poussée. La limite glisse-coulée, instant où le nageur rompt son alignement et reprend une action propulsive avec les jambes, est déterminée à partir de l'observation des enregistrements vidéo. La coulée se termine avec l'instant de reprise de nage. Comme pour l'instant de retournement, un algorithme programmé dans Scilab essaie de le détecter automatiquement (Annexe 5) mais c'est l'observation qui permet de valider cet instant. La connaissance de ces instants permet de déterminer la durée de glisse **GT** et la durée de coulée **UT**.

À la limite glisse-coulée, la distance horizontale **UD** qui sépare la tête du nageur du mur et la vitesse horizontale de la tête **VU** sont enregistrées.

À la reprise de nage, la distance horizontale **SD** qui sépare la tête du nageur du mur et la vitesse horizontale de la tête **VS** sont enregistrées.

6.1.5. Paramètres globaux

La dérivation de la position horizontale de la tête sur l'ensemble du virage permet d'obtenir la vitesse horizontale maximale atteinte **Vmax**.

De plus, l'analyse de la vitesse permet de déterminer à quelle distance du mur le nageur devrait reprendre une action propulsive des jambes (limite glisse-coulée) [Lytt00]. Deux distances sont notées **D22** et **D19** et correspondent aux instants où la vitesse horizontale de la tête du nageur est de 2,2 puis de 1,9 m/s.

La longueur de la trajectoire 3D du centre de la tête, entre le début et la fin du virage, est également calculée et notée **TD**.

	Variable	Unité	Description
3mRTT	3 metres Round Trip Time	S	temps au virage
AT	Approach Time	S	temps d'approche
RT	Rotation Time	S	temps de retournement
GT	Glide Time	S	temps de glisse
UT	Underwater propulsion Time	s	temps de coulée
VIn	Velocity In	m/s	vitesse en entrée de virage, 3 m avant le mur
V1mR	Velocity 1 metre before Rotation	m/s	vitesse d'approche

L'ensemble des paramètres cinématiques est récapitulé dans le tableau 25.

	Variable	Unité	Description
VR	Velocity at Rotation	m/s	vitesse au retournement
VC	Velocity at Contact	m/s	vitesse au contact
VPo	Velocity at Push-off	m/s	vitesse en début de poussée
VPe	Velocity at Peak	m/s	vitesse au pic de poussée horizontale
VG	Velocity at Glide	m/s	vitesse en fin de poussée
ΔVPo	∆ Velocity during Push-off	m/s	gain de vitesse pendant la poussée
VU	Velocity at Underwater propulsion	m/s	vitesse à la limite glisse-coulée
VOut	Velocity Out	m/s	vitesse en sortie de virage, 3 m après le mur
VS	Velocity at Swim resumption	m/s	vitesse à la reprise de nage
Vmax	Velocity max	m/s	vitesse maximale atteinte lors du virage
RD	Rotation Distance	m	position au début du retournement
D22	Distance at 2.2 m/s	m	position à 2,2 m/s après la fin de poussée
D19	Distance at 1.9 m/s	m	position à 1,9 m/s après la fin de poussée
UD	Underwater propulsion Distance	m	position à la limite glisse-coulée
SD	Swim resumption Distance	m	position à la reprise de nage
TD	Total Distance	m	longueur de la trajectoire parcourue par la tête
I	Inertia	kg.m²	moment d'inertie transverse minimal lors du retournement
CDe	Contact Depth	m	profondeur au contact
PoDe	Push-off Depth	m	profondeur en début de poussée
PeDe	Peak Depth	m	profondeur au pic de poussée horizontale
GDe	Glide Depth	m	profondeur en fin de poussée
LLLm	Lower Limb Length	m	longueur maximale d'extension des membres inférieurs
UBLm	Upper Body Length	m	longueur maximale d'extension du haut du corps
CLLei	Contact Lower Limb extension index		indice d'extension des membres inférieurs au contact
PoLLei	Push-off Lower Limb extension index		indice d'extension des membres inférieurs en début de poussée
PeLLei	Peak Lower Limb extension index		indice d'extension des membres inférieurs au pic de poussée horizontale
GLLei	Glide Lower Limb extension index		indice d'extension des membres inférieurs en fin de poussée
CUBei	Contact Upper Body extension index		indice d'extension du haut du corps au contact
PoUBei	Push-off Upper Body extension index		indice d'extension du haut du corps en début de poussée
PeUBei	Peak Upper Body extension index		indice d'extension du haut du corps au pic de poussée horizontale
GUBei	Glide Upper Body extension index		indice d'extension du haut du corps en fin de poussée

Tableau 25 : Variables cinématiques

6.2. Dynamique

L'algorithme de traitement du signal dynamométrique automatise la détection du contact et des sous-phases qui le composent (Figure 26).







Malgré le phénomène de vague « de corps », l'observation du premier contact avec le mur coïnciderait avec une augmentation simultanée des forces horizontales et verticales enregistrées [Lytt97]. L'analyse des signaux enregistrés pour cette étude suggère que le début du contact est caractérisé par l'augmentation simultanée des valeurs absolues des forces dans les trois directions principales du repère. Ceci serait dû au mouvement de retournement qui précède le contact, composé principalement d'une rotation autour de l'axe transverse et dans une moindre mesure d'une rotation autour de l'axe longitudinal (la vrille). Juste avant le contact, les pieds du nageur ont un mouvement descendant ce qui crée une force verticale vers le bas. Selon l'importance de la vrille déjà engagée, une composante latérale plus ou moins grande sera enregistrée. Cette observation renforce l'intérêt de l'utilisation d'une plateforme de force 3D. Comme Lyttle, Roesler avait remarqué qu'une plateforme de force enregistrait également l'effet de la vague de corps qui précède le nageur [Roes03]. Cette vague est créée par le déplacement principal du nageur dans l'axe horizontal. La détection automatique du début de contact est programmée, comme celle du retournement ou bien de la reprise de nage (Annexe 5).

La poussée est caractérisée par un effort des membres inférieurs sur le mur, repérable par l'enregistrement d'une force horizontale positive. L'impact des pieds sur le mur en début de contact et la préparation du nageur à cette action de poussée (phase de placement) se traduisent également par l'enregistrement d'une force horizontale positive. Ce qui semble distinguer le début de la poussée est le changement de direction de la force verticale. Négative dans un premier temps (impact des pieds de haut en bas sur la plateforme), elle devient positive lorsque le nageur commence à pousser sur le mur. La poussée, bien que principalement horizontale, est aussi dirigée légèrement vers le fond du bassin. Cette verticalisation de la poussée pourrait assurer au nageur une certaine profondeur lors de la phase sous-marine et lui permettrait de limiter les résistances dues aux vagues en surface [Lytt98b] [Venn06].

Une étude de modélisation de la vitesse du nageur créée lors d'une poussée [Klau05] suggère que la position du pic de poussée influencerait la vitesse créée. Le pic de poussée est l'instant où la valeur de force horizontale est maximale. Cette valeur **Pe**, exprimée en Newton, est rapportée au poids du nageur : **nPe** = Pe / (BM x g), avec g = 9,80665 m/s². À cet instant, l'angle vertical **vA** et l'angle latéral **IA** de poussée sont aussi calculés (Figure 27 et Figure 28). La valeur absolue de l'angle IA est conservée pour analyse.



Figure 27 : Angle vertical au pic de poussée (vA)



Figure 28 : Angle latéral au pic de poussée (IA)

La fin de contact est marquée par l'annulation de la force horizontale.

Une fois ces quatre instants caractéristiques déterminés, les durées du contact **CT**, de la phase de placement **BT**, de la phase de poussée **PoT** et de la sous-phase du début de la poussée jusqu'au pic **PeT** sont calculées. Les durées relatives de placement (**BP** = BT / CT [Lytt99] [Prin06]) et de poussée jusqu'au pic (**PeP** = PeT / PoT [Klau05]) sont également calculées.

Ces sous-phases permettent également de découper les composantes de l'impulsion enregistrée (Figure 29). Nous distinguerons les impulsions latérales lors du placement **LBI** et lors de la poussée **LPOI**, les impulsions verticale **VPOI** et horizontale **HPOI** pendant la poussée ainsi que l'impulsion verticale du début de poussée jusqu'au pic **HPeI**. L'impulsion relative de poussée "croissante" se calcule ensuite ainsi : **HPeIP** = HPeI / HPOI.





Impulsion horizontale pendant la poussée



Figure 29 : Impulsions calculées lors du contact

	Variable	Unité	Description
СТ	Contact Time	S	temps de contact
BT	Brake Time	S	temps de placement
BP	Brake Proportion	%	part de placement dans le contact
РоТ	Push-off Time	S	temps de poussée
D-T	De sta Time e		temps nécessaire pour atteindre le pic de
Per	Реак Пте	S	poussée horizontale lors de la poussée
D - D		0/	part de poussée jusqu'au pic dans la poussée
Рер	Реак Proportion	%	totale
LBI	Lateral Brake Impulse	N.s	impulsion latérale lors du placement
LPol	Lateral Push-off Impulse	N.s	impulsion latérale lors de la poussée
VPol	Vertical Push-off Impulse	N.s	impulsion verticale lors de la poussée
HPol	Horizontal Push-off Impulse	N.s	impulsion horizontale lors de la poussée
		Ν	impulsion horizontale jusqu'au pic de poussée
нрег	Horizontal Peak Impulse	IN.S	horizontale
		0/	part d'impulsion horizontale avant le pic dans
HPelP	Horizontal Peak Impulse Proportion	%	l'impulsion horizontale durant toute la poussée
Pe	Peak	Ν	pic de force horizontale
-			pic de force horizontale normalisée par le poids
nPe	normalized Peak		du sujet
vA	vertical Angle	o	angle vertical de poussée au pic
IA	lateral Angle	0	angle latéral de poussée au pic

Tableau 26 : Variables dynamiques

6.3. Caractéristiques des sujets

Les variables anthropométriques retenues sont la masse corporelle **BM**, en kg, et la stature **BH**, en m, de chaque sujet. L'âge **A**, exprimé en années, est également relevé. Ces valeurs sont établies à la date de l'expérimentation.

Le niveau individuel au 200 m nage libre (noté L, exprimé en %) a été calculé comme le rapport entre le record du monde et le record personnel du sujet. Le record personnel est le meilleur temps officiel, en bassin de 50 m, au 200 m nage libre en date du 17 aout 2008. À cette date, le record du monde féminin était détenu par Federica Pellegrini (ITA) en 1'54"82 et le record du monde masculin était détenu par Michael Phelps (USA) en 1'42"96.

	Variable	Unité	Description
A	Age	ans	âge en date de l'expérimentation
BM	Body Mass	kg	masse corporelle
BH	Body Height	m	stature
L	Level	%	niveau au 200 m nage libre

Tableau 27 : Variables caractéristiques des sujets

INFLUENCES DU NIVEAU ET DU GENRE

SUR LES VARIABLES DE LA PERFORMANCE AU VIRAGE CRAWL

« Des lecteurs attentifs qui se communiquent leurs pensées vont toujours plus loin que l'auteur. »

Voltaire (1694 - 1778) Extrait de *Traité sur la tolérance, à l'occasion de la mort de Jean Calas*

<u>Sommaire</u>

opulation	71
nalyse statistique	72
.1. Statistiques descriptives	72
.2. Comparaison des moyennes	73
Discussion	76
.1. Influence du niveau d'expertise sur les variables biomécaniques du virage crawl	76
2. Influence du genre sur les variables biomécaniques du virage crawl	81
.3. Remarques générales et conclusions	85

Lors de l'exécution d'un virage, Vilas-Boas souligne l'importance d'une habileté physique comme l'impulsion mais aussi l'importance d'une habileté technique comme l'adoption d'une position profilée [Vila03]. Cet auteur suggère ainsi l'idée que le niveau d'expertise aurait une influence sur la performance au virage.

Lors d'une compétition internationale de natation, Chow a relevé des performances aux virages différentes pour les hommes et les femmes [Chow84]. En étudiant la puissance maximale d'extension des membres inférieurs, Miyashita a rapporté des résultats significativement différents entre des nageurs et des nageuses de niveaux identiques [Miya92]. Ces observations permettent de penser que le genre jouerait également un rôle dans la performance au virage.

Au travers d'une démarche expérimentale associée au protocole présenté au chapitre précédent, l'hypothèse que le niveau d'expertise ou le genre auraient une influence sur les paramètres biomécaniques de la performance au virage crawl sera étudiée dans ce chapitre. Les résultats issus d'une analyse statistique confrontant une population de nageuses expertes à une population de nageuses non expertes d'une part puis à une population de nageurs experts d'autre part seront discutés ci-dessous.

1. POPULATION

Trois groupes de nageuses et nageurs ont été rassemblés pour cette étude.

Un premier groupe de dix nageuses expertes (EF) était composé exclusivement de nageuses membres de l'Équipe de France de natation. Début janvier 2008 un stage de préparation aux JO de Pékin s'est déroulé à Font-Romeu au cours duquel ont été conduites les expérimentations concernant ces nageuses. Dans ce groupe, il peut être noté que la nageuse présentant le niveau au 200 m nage libre le moins élevé (91,75%) est une spécialiste de sprint. Son niveau au 100 m nage libre correspondant à 97,94% du record du monde.

Pour juger de l'influence du niveau d'expertise, un groupe de dix nageuses de niveau moins élevé (NEF) a été formé. L'expertise de ces nageuses devait être suffisante pour qu'elles soient capables de réaliser naturellement la tâche demandée, à savoir un virage culbute crawl à vitesse maximale, comparable aux virages réalisés par les nageuses expertes. Exceptée une nageuse sociétaire du Cercle des Nageurs de Nouméa (évaluée en janvier à Font-Romeu), les nageuses de ce groupe étaient membres de la sélection Aquitaine pour la Coupe de France des Régions. Les expérimentations concernant ces nageuses ont été conduites lors d'un stage de rassemblement en vue de la compétition, fin avril 2008 à Agen.

Pour juger de l'influence du genre, un groupe de dix nageurs experts (EM) a été formé et a été comparé au même groupe de nageuses expertes (EF). Ces nageurs étaient également membres des Équipes de France de natation. La plupart des expérimentations ont eu lieu en janvier 2008 lors du stage de préparation aux JO de Pékin à Font-Romeu et l'ensemble des expérimentations a été conduit entre le 28 novembre 2007 (Antibes) et le 28 avril 2008 (Agen).

Les caractéristiques des trois groupes de nageuses et nageurs sont présentés dans le tableau 28.

Variable	Nageuses non expertes	Nageuses expertes	Nageurs experts
Nombre de sujets	10	10	10
Âge (A, ans)	15,9 ± 1,3	21,9 ± 4,1	19,7 ± 3,5
Masse corporelle (BM, kg)	55,2 ± 5,6	63,5 ± 5,9	80,3 ± 9,7
Stature (BH, m)	1,66 ± 0,05	1,76 ± 0,04	1,87 ± 0,09
Niveau (L, %)	84,9 ± 2,6	95,7 ± 2,6	91,0 ± 4,0

Tableau 28 : Caractéristiques (moyenne ± écart-type) des trois groupes comparés

2. ANALYSE STATISTIQUE

Une analyse statistique a été conduite pour mettre en avant les différences significatives entre les groupes. Dans un premier temps, une analyse de type univarié a été menée de manière à décrire l'ensemble des variables de l'étude (statistiques descriptives). Le test paramétrique t de Student (bilatéral) a ensuite été utilisé pour comparer les moyennes des groupes deux à deux. Ce test a été renforcé par le calcul des tailles d'effet ou « d de Cohen » [Cohe88] [Naka07] [Cham07].

2.1. Statistiques descriptives

Variable	Nageuses non expertes	Nageuses expertes	Nageurs experts
3mRTT (s)	3,16 ± 0,11	2,89 ± 0,08	2,62 ± 0,12
AT (s)	1,23 ± 0,08	1,10 ± 0,07	0,99 ± 0,09
RT (s)	0,88 ± 0,09	0,89 ± 0,06	0,85 ± 0,07
GT (s)	0,30 ± 0,15	0,36 ± 0,15	0,32 ± 0,14
UT (s)	1,11 ± 0,44	$1,10 \pm 0,40$	1,23 ± 0,47
VIn (m/s)	-1,54 ± 0,22	-1,69 ± 0,16*	-1,77 ± 0,16
V1mR (m/s)	-1,57 ± 0,13	-1,73 ± 0,13	-1,78 ± 0,07
VR (m/s)	$-1,80 \pm 0,16$	-1,66 ± 0,16	-1,90 ± 0,18
VC (m/s)	0,27 ± 0,25	0,24 ± 0,27	0,40 ± 0,29
VPo (m/s)	0,97 ± 0,40	0,88 ± 0,32*	1,25 ± 0,49
VPe (m/s)	2,10 ± 0,29	2,29 ± 0,30	2,59 ± 0,14
VG (m/s)	2,31 ± 0,22	2,55 ± 0,15	2,78 ± 0,13
ΔVPo (m/s)	1,34 ± 0,55	1,66 ± 0,45*	1,53 ± 0,54
VU (m/s)	1,87 ± 0,19	1,88 ± 0,20	2,17 ± 0,19
VOut (m/s)	1,68 ± 0,12	2,01 ± 0,19	2,17 ± 0,20
VS (m/s)	$1,48 \pm 0,15$	1,48 ± 0,15	$1,64 \pm 0,21$
Vmax (m/s)	2,34 ± 0,22	2,59 ± 0,17	2,79 ± 0,12
RD (m)	$1,08 \pm 0,11$	1,10 ± 0,12	$1,20 \pm 0,13$
D22 (m)	1,87 ± 0,16	2,31 ± 0,32	2,70 ± 0,29
D19 (m)	2,42 ± 0,36	2,79 ± 0,38	3,43 ± 0,45
UD (m)	2,29 ± 0,33	2,62 ± 0,35	2,71 ± 0,36
SD (m)	4,04 ± 0,76	4,50 ± 0,72	4,99 ± 0,62
TD (m)	5,04 ± 0,39	4,99 ± 0,17	4,88 ± 0,31
1** (kg.m²)	0,07 ± 0,01	0,12 ± 0,02	0,11 ± 0,03

Variable	Nageuses non expertes	Nageuses expertes	Nageurs experts
CDe (m)	-0,34 ± 0,07	-0,33 ± 0,09	-0,31 ± 0,09
PoDe (m)	-0,33 ± 0,06	-0,32 ± 0,08	-0,32 ± 0,08
PeDe (m)	-0,37 ± 0,06	-0,36 ± 0,07	-0,38 ± 0,08
GDe (m)	-0,38 ± 0,07	-0,38 ± 0,07	-0,41 ± 0,07
LLLm (m)	1,12 ± 0,06	1,15 ± 0,05	1,21 ± 0,08
UBLm (m)	1,22 ± 0,09	1,25 ± 0,05	1,37 ± 0,09
CLLei	0,52 ± 0,10	0,56 ± 0,04	0,57 ± 0,07
PoLLei	0,57 ± 0,12	0,61 ± 0,07	0,62 ± 0,08
PeLLei	0,78 ± 0,12	0,81 ± 0,09	0,81 ± 0,06
GLLei	0,97 ± 0,07	1,03 ± 0,07	1,01 ± 0,05
CUBei	0,78 ± 0,09	0,81 ± 0,08	0,82 ± 0,09
PoUBei	0,85 ± 0,07	0,89 ± 0,06	0,90 ± 0,06
PeUBei	0,93 ± 0,04	0,95 ± 0,05	0,96 ± 0,04
GUBei	0,94 ± 0,03	0,96 ± 0,05	0,98 ± 0,03
CT (s)	0,36 ± 0,09	0,35 ± 0,05	0,34 ± 0,05
BT (s)	0,11 ± 0,05	0,11 ± 0,05	$0,11 \pm 0,01$
BP (%)	32,1 ± 11,5	31,0 ± 10,3	33,4 ± 7,1
PoT (s)	0,25 ± 0,09	0,24 ± 0,05	0,23 ± 0,05
PeT (s)	0,16 ± 0,09	0,14 ± 0,05	0,14 ± 0,05
PeP (%)	60,8 ± 15,2	55,5 ± 16,1	60,2 ± 8,9
LBI (N.s)	7 ± 3	9 ± 5	10 ± 4
LPol (N.s)	10 ± 6	11 ± 5	13 ± 4
VPol (N.s)	24 ± 17	23 ± 12	30 ± 16
HPol (N.s)	135 ± 43	171 ± 49	200 ± 61
HPel (N.s)	88 ± 45	103 ± 46	126 ± 45
HPeIP (%)	62,6 ± 15,6	56,7 ± 16,7	62,2 ± 9,1
Pe (N)	803 ± 213	942 ± 184	1210 ± 268
nPe	1,48 ± 0,36	1,51 ± 0,25	1,54 ± 0,29
vA (°)	8,6 ± 4,8	8,2 ± 4,6	8,0 ± 4,9
IA ^{abs} (°)	3,2 ± 2,5	4,0 ± 4,4	3,2 ± 2,5

Tableau 29 : Moyennes et écarts-types des variables pour chacun des groupes ^{abs} Moyennes et écarts-types calculés sur les valeurs absolues de la variable IA Pour toutes les variables et tous les groupes, n = 10 sauf mentions :

* n = 9 (VIn, VPo, ΔVPo pour EF) ** n = 2/5/4 (I pour NEF/EF/EM)

En raison d'un trop faible nombre d'observations, le moment d'inertie transverse minimal lors du retournement (variable I) ne sera pas retenu pour l'analyse comparative.

2.2. Comparaison des moyennes

Pour déterminer si deux moyennes sont significativement différentes, un test t de Student a été conduit. Le résultat du test est une *p*-value permettant son interprétation.

Ensuite la taille d'effet ou « d de Cohen » a été mesurée ainsi [Cohe88] [Naka07] :

$$d = \frac{m_2 - m_1}{\acute{\mathrm{e}}t_{commun}}$$

Où m_1 et m_2 sont les moyennes de chacun des deux groupes et $\acute{ ext{tr}}_{commun}$ est l'écart-type commun :

$$\acute{et}_{commun} = \sqrt{\left((n_2 - 1) \acute{et}_2^2 + (n_1 - 1) \acute{et}_1^2 \right) / (n_1 + n_2 - 2)}$$

Avec n_1 et n_2 les nombres d'observations, ét₁ et ét₂ les écarts-types de chacun des deux groupes.

Pour déterminer l'influence du niveau d'expertise sur les variables mesurées, une première analyse comparative est menée entre le groupe de nageuses expertes (EF) et le groupe de nageuses non expertes (NEF).

Variable	р	d	-	Variable	р	d
L	< 0,0001	-4,127	-	HPelP	0,421	0,368
3mRTT	< 0,0001	2,801		PeP	0,453	0,343
BH	< 0,0001	-2,224		CUBei	0,455	-0,342
VOut	< 0,001	-2,078		PeUBei	0,477	-0,325
А	< 0,001	-1,988		HPel	0,478	-0,324
D22	< 0,001	-1,771		PeT	0,509	0,301
AT	0,001	1,725		PeLLei	0,565	-0,262
BM	0,004	-1,453		VPo	0,611	0,238
VG	0,011	-1,261		RD	0,627	-0,221
V1mR	0,013	1,240		IA^{abs}	0,648	-0,208
Vmax	0,015	-1,209		LPol	0,691	-0,181
D19	0,037	-1,008		CDe	0,696	-0,177
UD	0,046	-0,957		СТ	0,701	0,174
VR	0,074	-0,850		TD	0,737	0,153
GLLei	0,079	-0,832		РоТ	0,782	0,125
HPol	0,090	-0,801		RT	0,811	-0,108
VIn	0,110	0,774		BP	0,830	0,098
Pe	0,134	-0,703		PoDe	0,830	-0,097
VPe	0,158	-0,659		nPe	0,842	-0,090
PoUBei	0,174	-0,634		vA	0,845	0,089
SD	0,182	-0,621		VPol	0,846	0,088
ΔVPo	0,192	-0,624		VC	0,847	0,087
LLLm	0,195	-0,603		BT	0,859	0,081
CLLei	0,271	-0,508		PeDe	0,910	-0,051
GUBei	0,282	-0,496		VU	0,927	-0,042
PoLLei	0,351	-0,428		UT	0,956	0,025
UBLm	0,360	-0,420		VS	0,991	-0,005
GT	0,363	-0,417		GDe	0,996	0,003
LBI	0,410	-0,377				

Tableau 30 : P-value (p) et taille d'effet (d) illustrant pour chaque variable la différence entre la moyenne du groupe de nageuses expertes (EF) et la moyenne du groupe de nageuses non expertes (NEF). Variables classées par p-value croissante.

Chapitre 3

Les variables L, 3mRTT, BH, VOut, A, D22, AT, BM, VG, V1mR, Vmax, D19 et UD présentent une *p-value* inférieure à 0,05. Pour ces variables, la différence entre la moyenne du groupe de nageuses expertes (EF) et la moyenne du groupe de nageuses non expertes (NEF) est significative.

Pour déterminer l'influence du genre sur les variables mesurées, une seconde analyse comparative est menée entre le groupe de nageuses expertes (EF) et le groupe de nageurs experts (EM).

Variable	р	d	-	Variable	р	d
3mRTT	< 0,0001	-2,664	_	TD	0,310	-0,467
BM	< 0,001	2,107		LPol	0,315	0,463
UBLm	0,001	1,714		HPelP	0,370	0,411
VG	0,002	1,586		GDe	0,372	-0,410
BH	0,003	1,559		PeP	0,430	0,361
D19	0,003	1,544		GLLei	0,484	-0,319
VU	0,004	1,451		UT	0,492	0,314
VR	0,005	-1,417		GT	0,494	-0,312
Vmax	0,006	1,403		PeUBei	0,496	0,311
L	0,006	-1,403		BP	0,562	0,264
AT	0,006	-1,397		UD	0,563	0,263
D22	0,010	1,290		ΔVPo	0,575	-0,263
VPe	0,011	1,260		РоТ	0,620	-0,226
Pe	0,018	1,165		CDe	0,643	0,211
LLLm	0,047	0,956		PeDe	0,645	-0,209
VS	0,071	0,859		СТ	0,651	-0,205
VPo	0,075	0,871		IA^{abs}	0,652	-0,205
RD	0,083	0,822		CLLei	0,694	0,179
VOut	0,086	0,813		LBI	0,706	0,171
SD	0,121	0,728		PoUBei	0,716	0,165
RT	0,180	-0,624		nPe	0,802	0,114
А	0,207	-0,585		CUBei	0,809	0,110
VC	0,221	0,567		PoLLei	0,821	0,103
VPol	0,248	0,534		PeLLei	0,830	0,098
HPol	0,253	0,528		PeT	0,856	0,082
HPel	0,271	0,508		vA	0,919	-0,046
V1mR	0,276	-0,503		BT	0,921	0,045
GUBei	0,290	0,488		PoDe	0,942	0,033
VIn	0.294	-0.497				

Tableau 31 : P-value (p) et taille d'effet (d) illustrant pour chaque variable la différence entre la moyenne du groupe de nageuses expertes (EF) et la moyenne du groupe de nageurs experts (EM). Variables classées par p-value croissante.

Les variables 3mRTT, BM, UBLm, VG, BH, D19, VU, VR, Vmax, L, AT, D22, VPe, Pe et LLLm présentent une *p*-value inférieure à 0,05. Pour ces variables, la différence entre la moyenne du groupe de nageuses expertes (EF) et la moyenne du groupe de nageurs experts (EM) est significative.

3. DISCUSSION

3.1. Influence du niveau d'expertise sur les variables biomécaniques du virage crawl

Les premières valeurs du tableau 30 montrent que déterminer l'influence du niveau d'expertise en comparant le groupe de nageuses expertes (EF) et le groupe de nageuses non expertes (NEF) est pertinent car les variables qui se différencient le plus sont le **niveau** *a priori* des nageuses (niveau basé sur le record personnel au 200 m nage libre) et la **performance** réalisée au virage culbute crawl lors de l'expérimentation.

Ensuite le tableau 30 dévoile des différences significatives pour toutes les **variables anthropométriques**. La stature, la masse corporelle et l'âge des nageuses sont significativement plus élevés chez les expertes. Cela s'explique par la difficulté de rassembler deux populations de nageuses suffisamment expérimentées pour réaliser des virages culbutes crawl à vitesse élevée (aptitude) tout en étant à la fois de morphologies semblables et de niveaux différents. Les nageuses rassemblées ici répondent aux critères d'aptitude et de niveau mais la morphologie des deux groupes est différente : en moyenne, les expertes sont plus grandes (+ 0,10 m), plus lourdes (+ 8,3 kg) et plus âgées (+ 6,0 ans) que les non expertes. Il est intéressant de noter que pour l'ensemble de ces 20 nageuses, les coefficients de corrélation entre la stature, la masse corporelle et l'âge sont tous supérieurs à 0,673 (p ≤ 0,001) ce qui indiquerait que la morphologie peut être considérée comme un paramètre unique.

Apparaissent ensuite un ensemble de **vitesses** horizontales, mesurées à différents instants du virage, qui sont significativement différentes entre les expertes et les non expertes. Les nageuses expertes nagent plus rapidement en approche (V1mR) et continuent d'être plus rapides en fin de poussée (VG) puis à 3 mètres (VOut). En début de virage, la différence de vitesse est affermie par une durée d'approche plus courte. La durée de cette phase est certainement due aux capacités de vitesse de nage supérieures pour le groupe d'expertes. Elles présentent un record moyen au 100 m nage libre de 56"86 contre 1'02"26 pour le groupe de non expertes. En fin de virage, les différences de vitesse s'accompagnent de distances parcourues plus longues lorsque la vitesse horizontale de déplacement baisse à 2,2 puis à 1,9 m/s. Il apparait également que la vitesse maximale atteinte lors du virage est significativement différente entre les deux groupes et supérieure pour les nageuses expertes. Cette vitesse maximale est atteinte peu avant la fin de poussée et est donc très proche de la vitesse de fin de poussée (r = 0,962, p < 0,0001 pour l'ensemble des 20 nageuses). Cet ensemble d'observations sur les vitesses a pour conséquence directe un meilleur temps au virage pour les nageuses expertes.

La dernière variable présentant une différence significative entre les deux groupes de nageuses est la position à la **limite glisse-coulée**. Les expertes débutent leur propulsion sous-marine en ayant parcouru 0,33 m de plus que les non expertes. Il est intéressant de noter qu'à cet instant la vitesse horizontale de la tête est la même pour les deux groupes : $\overline{VU_{EF}}$ = 1,88 m/s et $\overline{VU_{NEF}}$ = 1,87 m/s, p = 0,927. Cette vitesse à la limite glisse-coulée a été étudiée par Lyttle et ses collaborateurs [Lytt00]. En mesurant les forces nécessaires à la traction de nageurs expérimentés, ces

auteurs ont établi que la vitesse appropriée pour initier la coulée était comprise entre 2,2 et 1,9 m/s. L'ensemble des nageuses étudié ici initient donc leur coulée à une vitesse proche de la limite basse préconisée par ces auteurs, quel que soit leur niveau d'expertise. Cela pourrait démontrer que les nageuses non expertes ont « déjà » acquis cette habileté de débuter la coulée « au bon moment », c'est-à dire à une vitesse suffisamment élevée pour limiter efficacement la décélération inévitable entre la fin de poussée et la reprise de nage. Par contre, la différence de distance parcourue à cet instant depuis le mur de virage montre bien que les nageuses non expertes ne sont pas aussi performantes que les nageuses de niveau international sur les phases de contact puis de glisse. Cette différence est mise en avant sur un graphique de comparaison présentant l'**évolution de la vitesse** horizontale de déplacement en fonction de la distance parcourue (Figure 30).



Figure 30 : Évolution comparative de la vitesse de déplacement horizontal en fonction de la distance parcourue, du début du contact à la reprise de nage, pour le groupe de nageuses expertes (EF, en vert) et le groupe de nageuses non expertes (NEF, en bleu)

La phase de contact au mur est marquée par une augmentation rapide de la vitesse. Dès la fin de la poussée la vitesse commence à diminuer. La décélération est quasi-constante lors de la phase de glisse (jusqu'à la ligne verticale en pointillés) puis elle varie avec quelques instants d'accélération lors de la coulée. La reprise de nage correspond au dernier point affiché.

Dès le début du **contact** les nageuses expertes sont en avance sur les nageuses non expertes. L'écart de 0,10 m est certainement dû à la différence significative de stature entre les nageuses d'une part et à la tendance des nageuses expertes à une meilleure extension du corps lors du contact d'autre part (Figure 31). La vitesse de déplacement augmente ensuite avec la poussée pour atteindre un maximum dont l'écart significatif est de 0,24 m/s en faveur des nageuses expertes (p = 0,015). Puis la vitesse diminue lors de la glisse jusqu'à atteindre 1,9 m/s, vitesse proche de laquelle l'ensemble des nageuses a choisi de débuter la coulée. L'écart de position à cet instant est conséquent, il est la double conséquence d'une meilleure extension du corps lors du contact mais aussi probablement d'un meilleur profil hydrodynamique lors de la glisse (non mesuré). En fin de **glisse** les profils de décélération se différencient selon le niveau des nageuses. Alors que pour les non expertes la décélération apparait comme constante avec une légère tendance à diminuer, la décélération des nageuses expertes s'accentue en fin de glisse, un peu avant qu'elles n'aient parcouru 2,5 m et que leur vitesse ne soit descendue sous la barre des 2 m/s. Pour éviter cette aggravation de la perte de vitesse, les nageuses expertes devraient débuter leur action propulsive de coulée avant d'avoir atteint ce point d'inflexion. Il faudrait pour cela qu'elles débutent leurs ondulations en étant à une distance tête-mur plus proche de celle des non expertes à la limite glisse-coulée (ligne verticale bleue sur la figure 30) et donc à une vitesse sensiblement plus élevée que les non expertes, dans un intervalle plutôt compris entre 2,1 et 2 m/s.

À partir du début de la **coulée**, les profils des courbes de vitesses des expertes et des non expertes évoluent de manière similaire jusqu'à la reprise de nage (Figure 30). La reprise est effectuée elle aussi à une vitesse identique pour toutes les nageuses ($\overline{VS_{EF}} = \overline{VS_{NEF}} = 1,48$ m/s, p = 0,991) mais avec un écart de position encore légèrement augmenté pour les expertes (+ 0,46 m, p = 0,182) bien que la durée de coulée soit identique ($\overline{UT_{EF}} = 1,10$ s et $\overline{UT_{NEF}} = 1,11$ s, p = 0,956), signe d'une coulée légèrement plus efficace. En comparant cette vitesse de reprise à la vitesse d'approche, nous pensons que les nageuses expertes ont trop attendu avant de reprendre à nager car elles évoluent alors 0,25 m/s en dessous de leur potentiel de vitesse de nage. Les nageuses non expertes, moins rapides lors de l'approche, n'auraient elles « que » 0,09 m/s à regagner et fourniront donc moins d'effort pour recouvrer leur vitesse maximale de nage.

Tous les indices d'**extension du corps** calculés lors du contact ont tendance à être plus élevés pour les nageuses expertes que pour les nageuses non expertes (Figure 31). L'observation des moyennes de chaque indice d'extension pour les deux groupes laisse penser que les expertes ont les membres inférieurs et le haut du corps plus étendus à chaque instant du contact.



Figure 31 : Indices d'extension des membres inférieurs (marqueurs carrés) et du haut du corps (marqueurs triangulaires) aux instants clés du contact pour le groupe de nageuses expertes (EF, en vert) et le groupe de nageuses non expertes (NEF, en bleu)

Concernant les **membres inférieurs**, des études antérieures [Taka83] [Blan96] [Coss99] [Pere06] suggèrent qu'une faible flexion des genoux lors du contact permettrait de diminuer le temps au virage et appuient la tendance observée ici.

Concernant le **haut du corps**, il semblerait qu'aucune étude jusqu'à ce jour n'ai étudié le « profil » des nageuses au cours du contact. Cette étude initie donc l'analyse de la position relative du haut du corps des nageuses en calculant les indices d'extension CUBei, PoUBei, PeUBei et GUBei. Les résultats tendent à montrer que les nageuses expertes sont légèrement mieux profilées que les nageuses non expertes tout au long du contact. L'indice CUBei calculé en début de contact pourrait illustrer une habileté supérieure pour les expertes qui parviennent mieux à placer leurs bras au cours du retournement en les orientant vers l'avant, dans la direction principale du mouvement à venir. Dès le début du contact le meilleur placement des expertes est peut être également dû à une moindre nécessité de se rééquilibrer. En effet, si le retournement est moins bien négocié, les nageuses doivent alors davantage se servir des appuis de leur bras pour repositionner leur tête et leur buste voire pour réaliser une partie de la vrille lors du placement. Ensuite, à chaque instant de la poussée, les nageuses expertes restent mieux placées que les nageuses de niveau inférieur, optimisant ainsi la création de vitesse due à l'extension des membres inférieurs en appui sur le mur de virage. Pour la phase de glisse, il peut être avancé que des meilleures performances des nageuses expertes seraient également dues à une meilleure extension globale du corps (non mesurée).

Concernant les **variables dynamiques**, l'analyse comparative statistique ne fait apparaitre aucune différence significative entre les moyennes des groupes des nageuses expertes et non expertes. La figure 32 permet de comparer les composantes de la force de contact entre les deux populations. Alors que les composantes latérales et verticales de la force de contact présentent peu de dissemblances, la composante horizontale semble différer sur trois points : l'impulsion lors de la poussée d'une part, la valeur et la position du pic de poussée d'autre part. L'impulsion et la valeur du pic de poussée semblent plus élevées pour les nageuses expertes. Le pic de poussée apparait plus tôt chez les nageuses expertes.

Les différences des valeurs d'impulsion et de pic de force sont en accord avec Miyashita qui avait relevé des puissances d'extension des jambes croissantes pour des jeunes nageuses américaines (12,9 ans), des nageuses de niveau universitaire (19,3 ans) et de niveau national (17,6 ans) [Miya92]. Ici la plus grande impulsion et le plus grand pic de force développés par les nageuses expertes sont certainement dus aux différences significatives de morphologie ou peut-être à la différence de niveau comme le suggèrent les résultats de Miyashita (les nageuses de niveau national, plus performantes mais plus jeunes que les nageuses de niveau universitaire, développent plus de puissance lors de l'extension des jambes).

Par contre, le décalage dans le temps de l'instant du pic de force pourrait témoigner d'une habileté des expertes à développer plus tôt une valeur maximale de force horizontale. Les effets de la position temporelle du pic de force sur la vitesse créée ont été introduits par Klauck [Klau05]. Lors d'une simulation de poussée horizontale sous-marine, l'auteur a mis en avant le rôle de l'eau et son effet freinateur sur la vitesse créée [Klau05]. À la différence d'une poussée réalisée hors de l'eau (un exercice de détente verticale par exemple), la distribution temporelle de la force exercée sur le mur lors d'une poussée sous-marine joue un rôle sur la vitesse créée.

D'après l'équation suivante, l'augmentation de la vitesse est limitée par la présence d'un paramètre dépendant de cette vitesse :

$$a(t) = \frac{dv(t)}{dt} = \frac{F(t)}{\Delta m + m} - \frac{D}{\Delta m + m}v^{2}(t)$$

Avec a l'accélération horizontale du centre de gravité du nageur, v sa vitesse horizontale, F la composante horizontale de la force de poussée, Δm la masse ajoutée due au volume d'eau déplacé par le nageur, m la masse corporelle du nageur et D le facteur de résistance du milieu.

Klauck en conclut que les meilleurs virages devraient être réalisés avec un pic de force placé au plus près de la fin du contact et ceci afin d'atteindre la plus grande vitesse possible en fin de poussée. La figure 32 suggère que les nageuses expertes n'appliquent pas cette idée car leur pic de force apparait avant celui des non expertes.



Figure 32 : Composantes moyennées de la force de contact pour le groupe de nageuses expertes (EF, en vert) et le groupe de nageuses non expertes (NEF, en bleu)

La composante latérale de la force de contact n'est pas représentée ici car le fait de moyenner ses valeurs peut perturber l'interprétation des résultats, lors du placement notamment.

En **conclusion**, les expertes présentent des vitesses plus élevées que les non expertes en approche et en fin de poussée lors du virage culbute crawl. Le gain de vitesse en fin de poussée est probablement dû à l'adoption d'une position mieux profilée à chaque instant clé du contact. Le gain de distance parcourue à la limite glisse-coulée est peut-être lui aussi dû à un meilleur profil hydrodynamique adopté pendant la glisse. Bien que les nageuses expertes et non expertes se

déplacent à la même vitesse à l'initiation de la coulée, il semblerait que les expertes gagneraient à débuter leurs ondulations plus tôt. De même, expertes et non expertes reprennent à nager à la même vitesse alors que leur potentiel de vitesse de nage est différent. Là aussi les nageuses expertes gagneraient à reprendre à nager plus tôt. L'apposition de ces deux conclusions amène à se demander pourquoi les nageuses expertes continuent d'initier la coulée et la reprise de nage à des vitesses semblables à celles des nageuses non expertes. Une hypothèse explicative serait que la vitesse de déplacement, de par les sensations qu'elle procure et les informations que les nageuses en extraient, serait un élément déclencheur de l'action propulsive, en complément de l'idée que seuls les indicateurs visuels liés à la position permettraient aux nageurs de décider de l'action à mener [Elip09]. Par delà cette idée, il convient de se demander pourquoi les nageuses n'ont pas adapté le niveau de leur « déclencheur décisionnel » à leur progression de niveau.

3.2. Influence du genre sur les variables biomécaniques du virage crawl

Comparativement aux nageuses expertes, les nageurs experts ont été principalement caractérisés par une **performance au virage** plus élevée. Ce résultat, conventionnel, est en accord avec l'ensemble des performances réalisées en natation au plus haut niveau et particulièrement avec les temps aux virages rapportés par Arellano lors des JO de Barcelone [Arel94].

Contrairement à ce qui pouvait être attendu, l'analyse statistique a révélé une différence du **niveau** d'expertise entre les nageuses expertes et les nageurs experts. Il est important de noter qu'ici les moyennes des variables de performance au virage et de niveau ne différent pas dans le même sens. Alors qu'entre les nageuses de niveaux différents, les plus expertes sont à la fois plus performantes au virage et de niveau supérieur, les nageurs experts regroupés pour cette études sont plus performants au virage que les nageuses expertes mais ils présentent un niveau plus faible. Cette différence de niveau serait due à l'inclusion de quatre nageurs de niveau un peu moins élevé dans le groupe de nageurs experts (L compris entre 85 et 90%), choix motivé par le besoin de former un groupe suffisamment nombreux. Toutefois le choix d'inclure ces nageurs influence peu la différence d'âge entre les deux populations expertes. Cette différence d'âge modérée laisse penser que l'expérience de la pratique (entrainement et haut niveau) est comparable pour les deux groupes experts étudiés et que les différences relevées entre ces groupes témoignent de l'influence du genre.

Concernant la phase « aller » du virage (approche et retournement), la durée de la phase d'**approche** est significativement inférieure pour les nageurs et la vitesse au **retournement** est significativement plus élevée pour les nageurs (Tableau 31). Les vitesses mesurées trois mètres avant le mur et un mètre avant le retournement ont également tendance à être plus élevées pour les nageurs. Comme lors de la première comparaison entre des nageuses de niveaux différents, ces différences sont certainement dues au potentiel de vitesse de nage supérieur pour le groupe de nageurs. En effet ces derniers présentent un record moyen au 100 m nage libre de 51"58 à comparer au 56"86 calculé pour les nageuses expertes. L'analyse statistique montre donc que les nageurs « attaquent » plus le mur de virage que les nageuses, terme communément utilisé par les entraineurs et qui illustre bien la volonté de débuter le retournement à la vitesse maximale.

Comparativement aux nageuses expertes, les nageurs experts ont tendance à débuter le retournement plus loin du mur ($\overline{RD_{EF}}$ = 1,10 m et $\overline{RD_{EM}}$ = 1,20 m, p = 0,083). Cet aspect de leur virage est en accord avec les mesures réalisées par Chow lors de courses en compétition [Chow84] et

pourrait être dû à la stature des nageurs, plus grands que les nageuses. Les nageurs experts présentent également une très faible tendance à compléter ce mouvement de retournement plus rapidement que les nageuses expertes ($\overline{RT_{EF}}$ = 0,89 s et $\overline{RT_{EM}}$ = 0,85 s, p = 0,180). Bien que la vitesse de rotation n'ait pas été mesurée, elle peut être appréciée à partir de cette durée : la vitesse moyenne de rotation est le rapport entre l'angle parcouru et le temps de rotation. Si nous considérons que le mouvement de retournement correspond globalement à un demi-saut périlleux soit 180°, les vitesses de rotations estimées sont alors $\omega_{EF} \approx 202^{\circ}/s$ pour les nageuses et $\omega_{EM} \approx 212^{\circ}$ /s pour les nageurs, soit bien en deçà de 350°/s, vitesse de rotation critique pour la tête au-delà de laquelle la stabilité rétinienne ne serait plus garantie [Pula81]. La vitesse de rotation lors du retournement ne perturbe donc pas l'acquisition d'informations visuelles. Les nageurs réalisent leur retournement plus rapidement que les nageuses : vitesse linéaire en entrée et vitesse de rotation lors de l'exécution plus élevées. En étudiant les facteurs de la performance aux sauts périlleux en tumbling (gymnastique), King et Yeadon ont montré qu'il était nécessaire de maximiser les vitesses linéaires et angulaires à l'initiation des sauts [King04]. Les caractéristiques du mouvement de retournement des nageurs cadrent avec les conclusions de ces auteurs et participent à un demitour plus performant que celui des nageuses.

À partir du début de la poussée, la majorité des **vitesses** horizontales relevées est significativement différente entre les experts et les expertes (Figure 33).



Figure 33 : Évolution comparative de la vitesse de déplacement horizontal en fonction de la distance parcourue, du début du contact à la reprise de nage, pour le groupe de nageuses expertes (EF, en vert) et le groupe de nageurs experts (EM, en rouge) Commentaires descriptifs identiques à ceux de la figure 30.

La vitesse au pic de poussée, la vitesse maximale atteinte puis la vitesse en fin de poussée sont significativement plus élevées chez les hommes. Ces différences peuvent être expliquées par la valeur du **pic de force** horizontale exercée sur le mur, significativement supérieure pour les hommes (Figure 34). Cette différence de force entre nageuses et nageurs a également été relevée par Miyashita en étudiant la puissance d'extension des membres inférieurs lors d'exercices de poussée

83

sur un ergomètre isocinétique dédié [Miya92]. Miyashita a montré une grande différence de puissance selon le genre : les nageuses ne poussent qu'à 50% en valeur absolue (ou 70% en valeur relative à la masse du sujet) de ce que réalisent les nageurs. À partir d'un ensemble d'études du plongeon à haut niveau, Sanders et ses collaborateurs ont déterminé que ce dont les femmes auraient besoin pour accomplir les mêmes figures que les hommes seraient d'augmenter leur puissance d'extension des membres inférieurs [Sand00], d'accélérer la contraction des fléchisseurs de la hanche afin d'atteindre plus rapidement une position nécessaire à la réalisation des rotations [Sand03] et d'atteindre une plus grande hauteur de saut [Sand04]. Concernant le geste spécifique de poussée au mur en natation, seul Daniel a pu relever des valeurs de force pour une nageuse et un nageur effectuant chacun trois essais de chaque technique usuelle de virage (virages ouverts en papillon et en brasse, virages culbutes en dos et en crawl) ainsi que trois essais de poussée au mur [Dani03]. Cet auteur a montré que les pics de force horizontaux (exprimés en N) étaient significativement supérieurs chez l'homme, ce qui est en accord avec les résultats présentés ici. D'autres études dynamiques du virage ont fait appel à des nageurs de sexe différent mais les auteurs ont choisi de regrouper les sujets car les jeunes nageurs et nageuses ne présentaient pas de différence pour la performance au virage [Blan96] ou bien car l'objectif de l'étude était focalisé sur l'influence d'un entrainement en plyométrie [Coss99]. Cette différence de force selon le genre peut être associée aux différences morphologiques car le groupe de nageurs est en moyenne significativement plus grand (+0,11 m) et plus lourd (+16,8 kg) que le groupe de nageuses. Comparativement aux nageuses expertes, les performances de poussée pour les nageurs experts s'illustrent aussi par des distances parcourues supérieures lorsque la vitesse descend à 2,2 puis à 1,9 m/s.

Concernant les **variables dynamiques**, seule la valeur du pic de force horizontale est significativement différente entre les nageurs et les nageuses (discuté ci-dessus). La figure 34 permet de comparer les composantes de la force de contact entre les deux populations. Comme pour l'analyse comparative précédente (expertes vs non expertes), il apparait que l'impulsion horizontale pendant la poussée semble différer entre les groupes. L'impulsion est plus élevée pour les nageurs que pour les nageuses et ici aussi les différences de morphologie expliqueraient ce résultat. Entre les nageurs et les nageuses, la différence d'amplitude dans la force enregistrée semble se généraliser à l'ensemble du contact, à la fois pour la composante horizontale et la composante verticale de la force. Pour les nageurs, le pic atteint par la composante verticale lors du placement (de l'ordre de - 307 N) est certainement dû à un retournement réalisé plus rapidement (discuté ci-dessus) avec une vitesse élevée des pieds à l'impact, vitesse orientée du haut vers le bas et tangentielle à la plateforme de force (vitesse « aérienne » non mesurée). Par contre les composantes de la force de contact des nageurs et des nageuses ne présentent aucun décalage temporel. Le genre jouerait donc un rôle sur l'amplitude de la force appliquée, pas sur son évolution (la figure 34 présente des profils de courbes identiques).



Composantes de la force de contact : EF vs EM

Figure 34 : Composantes moyennées de la force de contact pour le groupe de nageuses expertes (EF, en vert) et le groupe de nageurs experts (EM, en rouge) Remarque identique à celle de la figure 32.

Contrairement à ce qui a pu être démontré en comparant des nageuses de niveaux différents, la vitesse horizontale de déplacement à la **limite glisse-coulée** est significativement différente entre les nageurs experts et les nageuses expertes (Figure 33). Il apparait que les nageurs débutent leur coulée alors qu'ils glissent à une vitesse moyenne de 2,17 m/s. Cette vitesse est proche de la limite supérieure préconisée par Lyttle [Lytt00]. Au-delà de 2,2 m/s, cet auteur a démontré qu'utiliser n'importe quelle technique de propulsion sous-marine (battements, ondulations ventrales ou ondulations latérales) entrainait une augmentation globale des forces s'opposant à l'avancement, décélérant ainsi le nageur plus vite qu'en position de glisse. L'âge et la morphologie des 16 nageurs tractés par Lyttle (19,3 ± 2,1 ans, 77,8 ± 6,2 kg et 1,81 ± 0,05 m) sont semblables aux caractéristiques du groupe de nageurs experts. De plus, les positions respectives des nageurs et des nageuses à la limite glisse-coulée sont sensiblement équivalentes ($\overline{UD}_{EF} = 2,62$ m et $\overline{UD}_{EM} = 2,71$ m, p = 0,563).

Alors que les conclusions de l'analyse comparative précédente amènent à se demander si la vitesse de déplacement ne serait pas le principal élément déclencheur de la coulée, le fait que nageurs et nageuses initient leur coulée à une vitesse différente mais à une même distance du mur de virage suggèrerait que c'est la position qui permet aux experts de décider de l'action à engager. Par delà cette hypothèse, ne serait-ce pas l'entrainement à haut niveau et particulièrement l'influence de l'entraineur qui inciterait l'ensemble de la population experte à débuter la coulée à cet instant ?

Enfin tous les indices d'**extension du corps** calculés lors du contact ont tendance à être égaux entre nageuses et nageurs experts (Figure 35). L'écart maximal observé est de 0,02 seulement (sans unité) ce qui laisse penser que tous les experts, quel que soit leur genre, adoptent un profil d'extension similaire au cours du contact.



Figure 35 : Indices d'extension des membres inférieurs (marqueurs carrés) et du haut du corps (marqueurs triangulaires) aux instants clés du contact pour le groupe de nageuses expertes (EF, en vert) et le groupe de nageurs experts (EM, en rouge)

En **conclusion**, les nageurs « attaquent » plus le mur que les nageuses puis poussent plus fort et atteignent des vitesses supérieures grâce à cette poussée. Ils débutent les ondulations de coulée à une vitesse plus élevée que les nageuses tout en restant dans l'intervalle de vitesses préconisé par Lyttle. Les caractéristiques des nageurs considérés par Lyttle et dans cette étude ainsi que les interprétations faites à partir de l'évolution de vitesse des expertes laissent penser que les nageurs initient leur coulée à une vitesse en rapport avec leur potentiel alors que les nageuses pourraient augmenter cette vitesse de transition en reprenant leurs ondulations légèrement plus tôt.

3.3. <u>Remarques générales et conclusions</u>

Les deux analyses statistiques comparatives montrent peu de différences temporelles ou de différences de profondeur lors du contact et peu de différences d'orientation de poussée à la fois entre les groupes différenciés par le niveau d'expertise et entre les groupes différenciés par le genre.

Quel que soit le groupe, nous observons que la **durée** de placement est la même $(\overline{BT_{NEF}} = \overline{BT_{EF}} = \overline{BT_{EM}} = 0,11 \text{ s})$. De plus les différences de durée de poussée sont très faibles et donc les différences de durée totale de contact sont également très faibles (Figure 36). Ce résultat est d'autant plus intéressant que des durées d'approche très différentes entre les groupes ont été observées et qu'il peut être pensé que les nageurs, plus rapides dans la phase de nage mais aussi

plus grands, auraient besoin de plus de temps pour se placer puis pour pousser comme l'avait observé Daniel [Dani03].

Figure 36 : Moyennes et écarts-types des durées de placement (en bleu) et de poussée (en violet) pour chacun des trois groupes (NEF, EF et EM)

Lyttle puis Prins ont relevé de larges gammes de valeurs pour le temps de poussée [Lytt99] [Prin06]. Cette dispersion de la durée de poussée pourrait témoigner du niveau d'expertise. Ici, son écart-type varie entre les groupes : faible et égal pour les nageurs et nageuses expertes, il double pour le groupe de non expertes. De la même manière nous pourrions penser que la dispersion du temps de placement est associée au genre : l'écart-type mesuré pour les deux groupes de nageuses est de 0,05 s, il n'est que de 0,01 s pour le groupe de nageurs experts.

De plus, à chaque instant clé de la phase de contact (début de contact, début de poussée, pic de poussée et fin de poussée), les écarts de **profondeur** de la tête sont réduits (0,03 m maximum) pour l'ensemble des nageurs et nageuses de l'étude et cela bien que leur stature soit différente (Figure 37). Nous observons également un resserrement des courbes de profondeur autour du point de début de poussée ce qui pourrait indiquer qu'une profondeur « cible » caractériserait cet instant pour l'ensemble des virages analysés. Enfin, la superposition des courbes des trois groupes laisse apparaitre une certaine accentuation de la recherche de profondeur au cours du contact pour les nageurs. Cette particularité n'étant pas confirmée par une différence de verticalisation de l'angle de poussée au pic, elle doit être seulement due à la plus grande stature des hommes.



Figure 37 : Profondeurs de la tête lors des instants clés du contact (C-, Po-, Pe- et G-) pour chacun des trois groupes (NEF, en bleu ; EF, en vert et EM, en rouge)

Au pic de poussée, nous observons que les moyennes des angles verticaux et latéraux de poussée sont très proches entre les groupes (moyennes calculées sur les valeurs absolues des angles latéraux, Tableau 29). L'**orientation de poussée** vers le fond du bassin a probablement pour fonction de permettre une phase sous-marine suffisamment profonde dans une zone de moindres résistances hydrodynamiques [Venn06].

En **conclusion**, les deux analyses statistiques comparatives menées sur des groupes différenciés par le niveau d'expertise ou par le genre montrent que le niveau et le genre ont une influence sur la performance au virage.

Expertes et non expertes se différencient principalement par des vitesses plus élevées pour les expertes. Les gains sont réalisés à chaque instant du virage, notamment par des détails techniques comme une meilleure extension tout au long de la poussée.

Les experts se différencient principalement des expertes au moment du retournement qu'ils effectuent à vitesse plus élevée puis au moment de la poussée lors de laquelle ils génèrent un pic de force horizontal plus élevé et obtiennent un gain de vitesse en conséquence.

MODÈLES EXPERTS DU VIRAGE CULBUTE CRAWL

La partie de cette étude concernant les nageuses expertes a fait l'objet de trois communications affichées lors de congrès internationaux, nationaux ou journées thématiques :

- XIth international symposium for Biomechanics and Medicine in Swimming (BMS), à Oslo (Norvège) du 16 au 19 juin 2010 [Puel10] ;
- 35^{ème} congrès annuel de la Société de Biomécanique (SB), au Mans, du 25 au 27 aout 2010 [Puel10b];
- 2^{èmes} Journées de la Mécanique Bordelaise, à Carcans-Maubuisson, les 6 et 7 avril 2010 [Puel10c].

Cette étude a été publiée dans les actes et le livre des résumés du XI^{ème} congrès BMS puis dans le journal *Computer Methods in Biomechanics and Biomedical Engineering* (actes du 35^{ème} congrès SB) et sera indexée dans le moteur de recherche *PubMed* (base de données *Medline*).

<u>Sommaire</u>

1. Population	91
2. Analyse statistique	
2.1. Analyses bivariées	92
2.1.1. Relations linéaires entre la performance au virage et les variables explica	tives92
2.1.2. Relations non-linéaires entre la performance au virage et les va	riables
explicatives	93
2.1.3. Relations linéaires entre les variables explicatives	95
2.2. Analyse multivariée	95
2.2.1. Méthode	95
2.2.2. Nageuses expertes	96
2.2.3. Nageurs experts	96
2.2.4. Alternatives	98
3. Discussion	
3.1. Modèle d'optimisation de la performance au virage des nageuses expertes	98
3.1.1. Origines et effets de l'impulsion latérale pendant le placement	98
3.1.2. Étude des corrélations révélées par les analyses bivariées	
3.2. Modèle d'optimisation de la performance au virage des nageurs experts	104
3.2.1. Origines et effets des variables explicatives constituant le modèle retenu	105
3.2.1.1. Position au début du retournement	105
3.2.1.2. Vitesse au pic de poussée	
3.2.1.3. Longueur de la trajectoire parcourue	
3.2.2. Étude des corrélations révélées par les analyses bivariées	110
3.3. Vers un modèle unique ?	111
3.4. Conclusions	111

Les analyses de course permettent aisément de distinguer la performance au virage de la performance globale à une épreuve. Lors des JO de Sydney en 2000 [AIS00], l'analyse de la finale féminine du 200 m nage libre permet d'observer que la nageuse titrée était la plus rapide dans les phases de virage mais n'était pas la plus rapide dans les phases de nage. Sa performance réalisée en dehors des virages ne lui aurait même pas permis d'atteindre le podium. Ce constat est exactement le même avec l'analyse des résultats du 200 m nage libre féminin lors des Championnats de France de 2008 [FFN08]. De plus, dans ces deux finales, une nageuse est à la fois la moins performante au virage et la plus performante en dehors des virages. La relative faiblesse de ses virages lui coutera le podium olympique dans le premier cas, le titre national dans l'autre cas. Lors des mêmes JO [AIS00], l'analyse de la finale masculine du 200 m nage libre permet d'observer que le nageur médaillé de bronze a conquis sa médaille grâce à ses virages : plus lent que le quatrième lors des phases nagées, il a repris suffisamment de temps lors des trois virages de l'épreuve pour atteindre le podium olympique (extraits des analyses de courses : Annexe 7, Annexe 8 et Annexe 9).

Ces trois exemples témoignent de l'importance des virages à haut niveau et de l'intérêt que doivent y porter les nageurs à l'entrainement. Nous notons également que les écarts de performance au virage chez les nageuses de très haut niveau est considérable (de près de 60% à plus de 76% de l'écart à l'arrivée). Pour mettre en évidence les caractéristiques des meilleurs virages des nageurs et nageuses de haut niveau, une analyse statistique des variables définies précédemment sera conduite. Dans un premier temps, une analyse statistique bivariée sera conduite afin de déterminer les relations entre les variables. Ensuite, une analyse multivariée innovante permettra de mettre en évidence l'influence éventuelle de combinaisons de variables sur la performance au virage culbute crawl et d'établir un modèle d'optimisation du virage pour chacun des groupes experts observés.

1. POPULATION

Pour cette seconde étude statistique, focalisée sur une population experte, les deux groupes de dix nageuses (EF) et dix nageurs experts (EM) ont été étudiés. Le terme « experts » peut être employé en regard de leurs performances chronométriques [Bois06].

2. ANALYSE STATISTIQUE

Les deux bases de données comportent 10 observations indépendantes chacune (sauf mention), 56 variables explicatives et une variable réponse (3mRTT). Le nombre de variables explicatives est très important par rapport au nombre d'observations. Pour chacun des deux groupes une analyse univariée a été présentée au chapitre précédent (statistiques descriptives). Les histogrammes de répartition des variables explicatives pour le groupe de nageuses expertes sont présentés en annexe 10.

2.1. Analyses bivariées

Les analyses de type bivarié permettent de déterminer les relations entre deux variables. Afin de mettre en évidence l'influence des variables explicatives sur la performance (variable réponse 3mRTT), deux analyses établiront les relations linéaires et non-linéaires entre ces variables. Une troisième analyse établira les relations linéaires entre chaque paire de variables explicatives.

Variable	r	р	•	Variable	r	р	Variable	r	р
LBI	-0,763	0,010	-	IA^{abs}	0,323	0,363	PeUBei	0,091	0,803
VS	-0,676	0,032		CDe	0,321	0,366	РоТ	0,089	0,806
VU	-0,674	0,032		PeDe	0,315	0,375	CLLei	0,089	0,807
GT	0,558	0,094		L	-0,309	0,385	GLLei	0,089	0,807
UT	-0,550	0,100		HPel	0,258	0,472	PoLLei	0,074	0,840
D19	-0,470	0,170		PeLLei	0,231	0,520	RD	-0,073	0,842
V1mR	0,470	0,170		HPeIP	0,202	0,575	VPe	0,072	0,844
UD	0,468	0,172		CUBei	-0,198	0,584	VG	-0,066	0,856
VPol	-0,450	0,192		РеТ	0,188	0,602	UBLm	-0,061	0,867
AT	0,436	0,208		СТ	0,182	0,616	Vmax	-0,050	0,891
SD	-0,403	0,249		D22	0,174	0,631	VR	-0,047	0,898
RT	0,398	0,255		LLLm	-0,165	0,650	HPol	0,046	0,901
PoDe	0,382	0,276		nPe	-0,152	0,676	ΔVPo*	0,048	0,902
TD	0,381	0,278		GUBei	0,139	0,702	BP	0,037	0,920
GDe	0,369	0,294		PeP	0,138	0,703	BM	0,027	0,942
vA	-0,353	0,316		BH	-0,121	0,739	PoUBei	-0,026	0,943
А	-0,351	0,320		VPo*	-0,107	0,783	VC	0,022	0,951
LPol	0,343	0,333		BT	0,093	0,798	VOut	-0,001	0,997
VIn*	0,347	0,361		Pe	-0,091	0,802			

2.1.1. Relations linéaires entre la performance au virage et les variables explicatives

Tableau 32 : Corrélations de Pearson (classées par p-value croissante) entre la performance au virage(3mRTT) et les variables explicatives pour le groupe de nageuses expertes (EF)

^{abs} Corrélations calculées sur les valeurs absolues de la variable lA

n = 10 sauf mention : * n = 9 (variables VIn, VPo, ΔVPo)

Pour le groupe de nageuses expertes (EF), seulement 5 variables explicatives sont corrélées avec la variable réponse ($p \le 0,10$). Parmi elles, seules 3 variables explicatives présentent une forte corrélation avec la réponse ($p \le 0,05$, en vert dans le tableau 32). Il s'agit des variables LBI, VS et VU qui quantifient respectivement l'impulsion latérale pendant le placement, la vitesse horizontale de la tête à la reprise de nage et la vitesse horizontale de la tête à la limite glisse-coulée. Chapitre 4

Variable	r	р	Variable	r	р	-	Variable	r	р
RD	-0,885	0,001	СТ	0,479	0,161	-	VS	-0,202	0,575
VPe	0,816	0,004	PoUBei	-0,476	0,164		IA^{abs}	-0,202	0,576
ΑΤ	0,787	0,007	VPo	-0,457	0,184		GUBei	-0,200	0,579
L	-0,706	0,022	LLLm	-0,444	0,199		RT	-0,178	0,623
TD	0,680	0,030	D19	-0,384	0,273		LBI	-0,148	0,683
VC	-0,663	0,037	UBLm	-0,355	0,314		PeUBei	-0,143	0,693
BH	-0,662	0,037	PeDe	-0,353	0,317		HPel	0,137	0,706
CUBei	-0,655	0,040	Vmax	0,352	0,319		VU	0,131	0,719
CLLei	-0,648	0,043	GLLei	-0,334	0,346		PoDe	-0,115	0,753
Pe	-0,610	0,061	PeLLei	-0,331	0,351		VIn	0,112	0,757
А	-0,604	0,064	nPe	-0,328	0,354		HPol	-0,108	0,767
PoLLei	-0,604	0,064	BT	-0,323	0,362		UT	0,079	0,827
BM	-0,596	0,069	VR	0,301	0,399		vA	-0,068	0,852
РеТ	0,546	0,102	GDe	-0,269	0,453		SD	-0,064	0,861
HPeIP	0,540	0,107	VG	0,259	0,470		GT	-0,046	0,899
РоТ	0,516	0,127	D22	-0,252	0,482		CDe	-0,035	0,924
PeP	0,487	0,153	UD	-0,220	0,541		LPol	-0,027	0,941
ΔVPo	0,480	0,160	VOut	-0,216	0,549		V1mR	0,016	0,966
BP	-0,480	0,160	VPol	-0,208	0,563				

Tableau 33 : Corrélations de Pearson (classées par p-value croissante) entre la performance au virage (3mRTT) et les variables explicatives pour le groupe de nageurs experts (EM) ^{abs} Corrélations calculées sur les valeurs absolues de la variable IA

n = 10 pour toutes les variables étudiées

Pour le groupe de nageurs experts (EM), 13 variables explicatives sont corrélées avec la variable réponse ($p \le 0,10$). Parmi elles, 9 variables explicatives présentent une forte corrélation avec la réponse ($p \le 0,05$, en rouge dans le tableau 33). Il s'agit des variables RD, VPe, AT, L, TD, VC, BH, CUBei et CLLei qui quantifient respectivement la distance tête-mur au retournement, la vitesse horizontale de la tête au pic de poussée, la durée de la phase d'approche, le niveau au 200 m nage libre, la longueur de la trajectoire parcourue par la tête, la vitesse horizontale de la tête au début du contact, la stature des nageurs et les indices d'extension du haut du corps et des membres inférieurs au début du contact.

2.1.2. <u>Relations non-linéaires entre la performance au virage et les variables</u> <u>explicatives</u>

La relation entre la variable réponse 3mRTT et chacune des variables explicatives est estimée avec des splines cubiques ; le paramètre de lissage est estimé par validation croisée généralisée (graphes en annexe 11 pour la population féminine).

Certaines variables pourraient présenter une association non-linéaire avec la réponse, association qui ne serait pas mise en évidence avec des corrélations. Néanmoins, l'analyse des corrélations entre les termes quadratiques (valeurs au carré) et la réponse ne fait ressortir aucune nouvelle association (Figure 38 et Figure 39).



Figure 38 : Corrélations de Pearson (valeurs absolues) entre la performance au virage (3mRTT) et les variables explicatives pour le groupe de nageuses expertes (EF) disques verts : valeurs simples ; cercles verts : valeurs au carré



Figure 39 : Corrélations de Pearson (valeurs absolues) entre la performance au virage (3mRTT) et les variables explicatives pour le groupe de nageurs experts (EM) disques rouges : valeurs simples ; cercles rouges : valeurs au carré

EF

EM

2.1.3. Relations linéaires entre les variables explicatives

Les matrices de corrélation entre toutes les variables (tableaux en annexe 12, annexe 13, annexe 14, annexe 15, annexe 16 et annexe 17) montrent que la corrélation entre les variables explicatives, qu'elle soit due à une réelle redondance de l'information apportée par ces variables ou bien due aux faibles effectifs, est très importante.

En conclusion, les analyses bivariées montrent que :

- Pour la population de nageuses expertes, seules les variables LBI, VS et VU ont une relation forte avec la performance au virage culbute crawl (p ≤ 0,05);
- Pour la population de nageurs experts, ce sont les variables RD, VPe, AT, L, TD, VC, BH, CUBei et CLLei qui ont une relation forte avec la performance (p ≤ 0,05).

2.2. Analyse multivariée

Pour observer si les variations de performance au 3mRTT dépendent d'une combinaison entre plusieurs variables explicatives, une analyse multivariée a été menée.

Les méthodes statistiques classiques d'analyse multivariée ne sont pas adaptées aux problèmes où le nombre d'observations est inférieur au nombre de variables explicatives. Des méthodes mieux adaptées aux problèmes soulevés ici sont les méthodes de pénalisation et, en particulier, la méthode Lasso (*least absolute shrinkage and selection operator*) [Aval09] [Chiq09].

2.2.1. <u>Méthode</u>

Le Lasso est une méthode de pénalisation et de sélection de variables initialement proposée pour la régression linéaire [Tibs96]. Dans ce cadre, elle consiste à estimer le vecteur de paramètres par minimisation du critère quadratique des moindres carrés sous une contrainte sur la somme des valeurs absolues des coefficients ou, de façon équivalente, par minimisation du critère quadratique pénalisé par la norme L_1 des coefficients. L'introduction d'une pénalisation réduit la variabilité de l'estimation, améliorant ainsi la précision de prédiction. En outre, la pénalisation de type L_1 rétrécit certains coefficients, alors que les autres sont annulés exactement, aboutissant ainsi à des modèles plus parcimonieux. Cette pénalisation permet donc d'éliminer de façon automatique les variables considérées non pertinentes.

Nous appliquons le Lasso à l'estimation des données. La sélection du meilleur modèle est effectuée par validation croisée *leave-one-out* sur l'erreur de prédiction quadratique. Afin de mesurer la stabilité du résultat, des intervalles de confiance à 95% sont calculés par *bootstrap* non paramétrique [Hopk07]. 2000 échantillons *bootstrap* sont tirés de l'échantillon original. Aucune hypothèse sur la distribution des données n'est demandée par les deux méthodes de rééchantillonage (validation croisée *leave-one-out* et *bootstrap*), seule l'hypothèse de linéarité de la relation entre la réponse et les variables explicatives est utilisée.

2.2.2. Nageuses expertes

Pour la population de nageuses expertes, seulement une variable (LBI : impulsion latérale pendant le placement, N.s) est jugée pertinente dans le modèle :

$$3mRTT = 2,895 - 0,00067 \, LBI$$

Le coefficient associé à la variable explicative LBI est estimé à -0,000666, il représente l'effet de la variable explicative LBI. C'est-à-dire qu'une augmentation de LBI d'un N.s correspond à une diminution de 0,000666 s du 3mRTT moyen.

D'après ce modèle, pour améliorer le temps au virage (3mRTT) de 0,01 s, il faudrait augmenter l'impulsion latérale pendant le placement de 15 N.s. Cette valeur semble élevée car l'impulsion moyenne est de 9 ± 5 N.s pour le groupe de nageuses expertes considéré.

L'intervalle de confiance à 95% du coefficient estimé est [-0,007970 ; 0]. Le zéro à une des extrémités de l'intervalle indique que la variable est jugée non pertinente dans 2,5% des modèles ajustés à partir des échantillons *bootstrap*. L'effet « négatif » sur 3mRTT reste néanmoins stable.

Une autre possibilité consiste à faire une présélection de variables basée sur des critères propres au domaine, au lieu de critères statistiques, afin d'éviter de ne retenir que des variables qui sont liées de façon « évidente » avec la réponse et empêchant d'autres variables ayant un lien moins fort mais plus intéressant de ressortir. Nous avons refait les analyses en éliminant les 15 variables suivantes, essentiellement des durées et des variables anthropométriques : AT, RT, CT, BT, PoT, BP, GT, UT, A, L, BM, BH, LLLm, UBLm et VOut. Néanmoins, le meilleur modèle estimé par validation croisée est identique.

2.2.3. Nageurs experts

Pour la population de nageurs experts, quatre variables (RD : position au début du retournement, m ; VPe : vitesse au pic de poussée, m/s ; TD : longueur de la trajectoire parcourue par la tête du nageur, m ; CT : temps de contact, s) sont jugées pertinentes dans le modèle :

$$3mRTT = 2,543 - 0,440 RD + 0,214 VPe + 0,0095 TD + 0,0151 CT$$

Le coefficient associé à la variable explicative RD est estimé à -0,439787, il représente l'effet de la variable explicative RD « ajusté » sur les autres variables (VPe, TD et CT dans ce cas). C'est-àdire, à VPe, TD et CT identiques, une augmentation de RD d'un mètre correspond à une diminution de 0,439787 s du 3mRTT moyen. Le coefficient associé à la variable explicative VPe est estimé à 0,214139. De même, à RD, TD et CT identiques, une diminution de VPe d'un m/s correspond à une diminution de 0,214139 s du 3mRTT moyen. Le coefficient associé à la variable explicative TD est estimé à 0,009526. À RD, VPe et CT identiques, une diminution de TD d'un mètre correspond à une diminution de 0,009526 s du 3mRTT moyen. Enfin, le coefficient associé à la variable explicative CT est estimé à 0,015103. À RD, VPe et TD identiques, une diminution de CT d'une seconde correspond à une diminution de 0,015103 s du 3mRTT moyen. D'après ce modèle, pour améliorer le temps au virage (3mRTT) de 0,01 s, il faudrait :

- Soit augmenter la position au début du retournement de 0,023 m pour une vitesse au pic de poussée, une trajectoire parcourue et un temps de contact constants ;
- Soit diminuer la vitesse au pic de poussée de 0,047 m/s pour une position au début du retournement, une trajectoire parcourue et un temps de contact constants ;
- Soit diminuer la longueur de la trajectoire parcourue de 1,05 m pour une position au début du retournement, une vitesse au pic de poussée et un temps de contact constants;
- Soit diminuer le temps de contact de 0,66 s pour une position au début du retournement, une vitesse au pic de poussée et une trajectoire parcourue constantes.

Les intervalles de confiance à 95% des coefficients estimés sont [-0,839722;0] pour RD, [0;0,455737] pour VPe; [0;0,178946] pour TD et [0;0,819243] pour CT.

Avec la même présélection de variables que celle détaillée précédemment (2.2.2), le meilleur modèle estimé par validation croisée devient :

$$3mRTT = 2,580 - 0,425 RD + 0,204 VPe + 0,0046 TD$$

La variable CT, non présélectionnée, ne fait donc plus partie du modèle. Le modèle précédent lui attribuait un coefficient de 0,015103 ce qui correspond à une diminution du temps de contact de 0,66 s pour améliorer le temps au virage (3mRTT) de 0,01 s. Cette diminution du temps de contact n'est pas réaliste lorsqu'elle est associée aux moyennes relevées. En effet, le temps de contact moyen pour les nageurs experts est de 0,34 ± 0,05 s, il n'est donc pas possible de le réduire suffisamment pour obtenir un gain visible sur la performance au virage. Le modèle précédent n'étant pas pertinent, le modèle qui sera discuté en suivant est celui obtenu après une présélection de variables.

D'après ce nouveau modèle, pour améliorer le temps au virage (3mRTT) de 0,01 s, il faudrait :

- Soit augmenter la position au début du retournement de 0,024 m pour une vitesse au pic de poussée et une trajectoire parcourue constantes ;
- Soit diminuer la vitesse au pic de poussée de 0,049 m/s pour une position au début du retournement et une trajectoire parcourue constantes ;
- Soit diminuer la longueur de la trajectoire parcourue de 2,19 m pour une position au début du retournement et une vitesse au pic de poussée constantes.

Les intervalles de confiance à 95% des coefficients estimés sont [-0,904553;0] pour RD, [0;0,458596] pour VPe et [0;0,185625] pour TD.
2.2.4. Alternatives

Une alternative possible serait de poser le problème en termes d'identification des variables ayant un effet sur 3mRTT, sans se préoccuper de l'association entre ces variables. Des approches adressées aux problèmes de multiplicité des tests telles que la FDR (*False Discovery Rate*) peuvent alors être appliquées. Mais il faudrait plus d'observations. Pour l'instant le faible nombre d'observations ne permet pas d'obtenir des associations significatives.

D'autres méthodes telles que la PLS (*Partial Least Squares*) permettent de traiter des problèmes où le nombre d'observations est inférieur au nombre de variables explicatives. La PLS se base toutefois sur les combinaisons linéaires de variables explicatives les plus corrélées à la réponse, le résultat ne devrait donc pas être très différent.

En conclusion, les meilleurs modèles obtenus par une analyse multivariée (méthode Lasso) pour expliquer les variations de performance au virage sont :

• Pour la population de nageuses expertes :

$$3mRTT = 2,895 - 0,00067 LBI$$

La performance au virage des nageuses expertes dépend seulement de l'impulsion latérale pendant le placement (LBI) ;

• Pour la population de nageurs experts, après présélection de variables :

3mRTT = 2,580 - 0,425 RD + 0,204 VPe + 0,0046 TD

La performance au virage des nageurs experts dépend d'une combinaison de trois variables : la position au début du retournement (RD), la vitesse au pic de poussée (VPe) et la trajectoire parcourue (TD).

3. DISCUSSION

3.1. Modèle d'optimisation de la performance au virage des nageuses expertes

Le meilleur modèle obtenu par la méthode Lasso comporte une variable : l'impulsion latérale pendant le placement (LBI). D'après ce modèle, il faudrait que les nageuses expertes augmentent leur impulsion latérale pendant le placement pour améliorer leur temps au virage.

Les paragraphes suivants seront consacrés à la discussion de ce modèle et des corrélations mises en avant par les analyses bivariées qui concernent le groupe de nageuses expertes.

3.1.1. Origines et effets de l'impulsion latérale pendant le placement

L'impulsion latérale pendant le placement est l'intégrale de la composante latérale de la force appliquée par chaque nageuse sur le mur de virage pendant toute la durée du placement.

Le signe du coefficient qui apparait dans le modèle obtenu par la méthode Lasso indique que les meilleurs virages des nageuses expertes sont caractérisés par une impulsion latérale pendant le placement plus élevée. Le signe du coefficient de corrélation entre la performance au virage et cette variable va dans le même sens (Figure 40).

Les valeurs élevées de l'impulsion latérale pendant le placement semblent être une conséquence d'un retournement rapide (r = -0,579, p = 0,08) et d'une vitesse d'approche importante (r = -0,454).

Augmenter l'impulsion latérale lors du placement en augmentant sa **vitesse d'approche** et en diminuant le **temps du retournement** pourrait être un enjeu majeur de la performance au virage pour les nageuses expertes. Cette idée semble d'autant plus pertinente que des tendances existent entre le temps total au virage et la vitesse d'approche d'une part (r = 0,470) et dans une moindre mesure entre le temps total au virage et la durée de retournement d'autre part (r = 0,398).



Impulsion latérale pendant le placement

Figure 40 : Impulsion latérale pendant le placement en fonction de la performance au virage pour le groupe de nageuses expertes (EF)

La relation négative entre l'impulsion latérale pendant le placement et l'impulsion latérale pendant la poussée (r = -0,555, p = 0,10) pourrait indiquer d'une part que les meilleures nageuses au virage amortissent l'ensemble des forces latérales générées par le mouvement de vrille lors du retournement durant le court instant que dure le placement. D'autre part, cela pourrait indiquer que les meilleures nageuses auraient tendance à vriller plutôt avant la phase de poussée.

Jusqu'à présent, seule une étude concernant le mouvement de vrille a été publiée [Pere06b]. En 2006, Pereira et ses collaborateurs ont présenté une analyse épidémiologique des techniques de virage crawl employées à haut niveau. À partir des vidéos officielles de la FINA, les auteurs ont classifié 256 virages réalisés entre 1996 et 2005 lors des JO et des Championnats du Monde. Les résultats ont montré que près de 85% des nageurs ajustaient leur position corporelle vers une position ventrale lors de la poussée sur le mur, 13% ajustaient leur position lors de la phase de glisse et 2% touchaient le mur en étant déjà en position ventrale. Selon les auteurs, la prédominance de cette rotation longitudinale du buste (ou vrille) lors de la poussée ne serait pas optimale d'un point de vue biomécanique car elle tendrait à « disperser » la force appliquée.

En l'état actuel des connaissances, l'interprétation des résultats concernant l'impulsion latérale pendant le placement n'est pas aisée pour deux raisons principales : d'une part une seule étude de classification des techniques de virage crawl existe à ce jour, d'autre part le calcul de la composante latérale de l'impulsion est inédit. Il apparait tout de même que l'étude de la composante latérale de l'impulsion lors du contact permettrait d'estimer l'instant et l'amplitude de **vrille** réalisée. L'hypothèse avancée ici que les meilleurs virages sont réalisés avec une part de vrille avant la poussée et que cette vrille est maitrisée au cours du placement est en accord avec les conclusions de Pereira [Pere06b].

3.1.2. Étude des corrélations révélées par les analyses bivariées

La vitesse à la limite glisse-coulée est une des variables les plus corrélées avec la performance au virage (r = -0,674, p = 0,032). Elle correspond à la vitesse horizontale de la nageuse à l'instant où elle rompt son alignement corporel maintenu pendant la glisse pour reprendre une action propulsive avec les membres inférieurs. Augmenter cette vitesse pour diminuer le temps au virage signifie-t-il qu'il convient de débuter les ondulations de coulée plus tôt ?



Figure 41 : Vitesses horizontales de la tête à la limite glisse-coulée (cercles oranges) et à la reprise de nage (disques violets) en fonction de la performance au virage pour le groupe de nageuses expertes (EF)

La nageuse choisit l'instant où elle débute ses ondulations (ou battements pour une des nageuses étudiée) en fonction de sa technique individuelle, des consignes de l'entraineur et de ses sensations [Elip09]. Il apparait que pour l'ensemble des nageuses étudié, la vitesse croit légèrement en début de coulée puis décroit à nouveau jusqu'à la reprise de nage. La décroissance de vitesse en fin de coulée est moindre que pendant la glisse (Figure 42). Ceci n'est pas forcément dû à l'absence d'action propulsive pendant la glisse mais peut-être au fait que la vitesse de glisse étant plus élevée, les forces aquatiques de résistance à l'avancement sont alors plus importantes et freinent donc plus la nageuse. Il est primordial de conserver une position profilée lors de la glisse afin de limiter ces résistances à l'avancement.



Figure 42 : Évolution de la vitesse horizontale de la tête lors du virage culbute crawl pour l'ensemble des dix nageuses expertes (moyenne en trait continu ± un écart-type en pointillés)

La vitesse horizontale à la limite glisse-coulée est d'autant plus grande que la fin de poussée est réalisée en profondeur (r = -0,750 avec la profondeur au pic de poussée et r = -0,791 avec la profondeur en fin de poussée, p = 0,01, Figure 43). Certaines études hydrodynamiques ont mis en avant l'importance d'une profondeur adaptée à la vitesse de déplacement [Lytt98b] [Lytt00] [Venn06], toutefois sans que les expériences ne reproduisent les effets du virage avec notamment la vague « de corps » mise en avant par Roesler [Roes03]. La profondeur de la tête au cours de la phase de contact sera discutée en suivant.



Figure 43 : Profondeurs de la tête au pic de poussée (triangles oranges) et en fin de poussée (triangles violets) en fonction de la vitesse horizontale à la limite glisse-coulée pour le groupe de nageuses expertes (EF)

Il a été démontré au chapitre précédent que la vitesse à la limite glisse-coulée des nageuses expertes est très proche de la gamme de vitesse préconisée [Lytt00]. Elle est donc suffisante pour modérer efficacement la décélération inévitable entre la fin de poussée et la reprise de nage. Toutefois l'idée que les nageuses expertes pourraient débuter leur coulée un peu plus tôt, à une vitesse de déplacement supérieure, a été proposée au vu de l'évolution de la courbe de vitesse en fin de glisse (Figure 42). Le fort coefficient de corrélation négatif entre la performance au virage et la vitesse à la limite-glisse-coulée va dans ce sens car il indique que les meilleurs virages sont réalisés par les nageuses qui débutent leur coulée à une vitesse plus élevée (Figure 41).

En complément de l'influence de la vitesse à la limite glisse-coulée sur la performance au virage, d'autres corrélations montrent que les meilleures nageuses expertes privilégient une phase de glisse réduite (Tableau 32). Le sens des corrélations des durées de glisse et de coulée indiquent que ces nageuses avancent l'instant de leur reprise propulsive au détriment du maintien d'une position profilée afin de maximiser la durée de la phase de propulsion sous-marine. Les corrélations entre le temps total au virage et la durée de la phase de coulée (r = -0,550, p = 0,10) et entre les durées de glisse et de coulée (r = -0,509) indiquent que le raccourcissement de la phase de glisse s'accompagne d'un allongement de la phase de coulée. L'apnée causée par l'immersion et le niveau hypoxique qui en résulte sont certainement les causes d'un tel phénomène. Chaque nageuse dispose d'un certain temps pour réaliser la phase sous-marine de son virage, temps limité par son aptitude à retenir sa respiration. Il s'avère ici que les meilleures nageuses préfèrent répartir ce temps de manière à augmenter la part de la phase propulsive (la coulée) par rapport à la part de glisse. Malheureusement le temps total d'apnée n'a pas été mesuré ici. En sommant les durées de retournement, de contact, de glisse et de coulée, il est possible d'obtenir une durée moyenne de 2,70 s durant laquelle les nageuses expertes de peuvent pas respirer. Il faut ajouter à cela l'intervalle de temps séparant la dernière inspiration du début de retournement puis l'intervalle de temps entre la séparation des mains en fin de coulée et la première inspiration lors de la nage. Lors d'une compétition universitaire américaine, Craig a relevé que le temps moyen d'apnée aux virages des nageuses de 500 yards nage libre (environ 457 m) était de 4,27 ± 0,09 s [Crai86]. Une étude des échanges gazeux lors des virages lui a ensuite permis de déterminer que le temps limite au-delà duquel les nageurs ressentent un besoin urgent de respirer est de 5,5 s. L'auteur conclue sur le fait qu'aucun compromis lié à cette sensation d'hypoxie ne doit conduire les nageurs à ne pas réaliser leur meilleur virage.

Une autre caractéristique des meilleurs virages est que la **reprise de nage** est effectuée à une vitesse élevée (r = -0,676, p = 0,03, Figure 41). La vitesse moyenne de la reprise de nage des nageuses expertes étudiées est légèrement inférieure à celle enregistrée par Lyttle chez trois nageurs élites [Lytt97]. Cette différence est certainement due au genre des nageurs étudiés mais aussi à la méthode de détermination de la vitesse. Alors que Lyttle calcule la vitesse moyenne au cours du premier cycle de bras, la vitesse de reprise de nage calculée ici est la vitesse instantanée à la séparation des mains en fin de coulée. Les actions propulsives de ces instants sont inégales, le calcul de Lyttle prenant en compte l'effet des bras. Il a été démontré au chapitre précédent que les nageuses expertes et les nageuses non expertes ne se distinguent pas par des moyennes de vitesses de reprise de nage différentes. Il apparait pourtant ici qu'au sein du groupe de nageuses expertes les meilleurs virages sont réalisés avec des vitesses de reprise de nage élevées. L'hypothèse avancée au chapitre précédent que les nageuses expertes auraient trop attendu avant de recommencer à nager est confirmée avec le calcul de la différence de vitesse entre l'approche (V1mR) et la reprise de nage.

En effet toutes les valeurs calculées sont positives ce qui indique que toutes les nageuses recommencent à nager en dessous de leur vitesse de nage. Il est intéressant de noter que les deux nageuses qui réalisent les meilleurs temps au virage sont également celles qui présentent une différence de vitesse minimale (< 0,08 m/s). Ce seront les deux nageuses qui auront le moins d'efforts à fournir pour retrouver leur vitesse de nage.

La tendance observée entre le temps total et la vitesse d'approche (et dans une moindre mesure la vitesse en entrée de virage, Tableau 32) pourrait montrer qu'augmenter la vitesse en **début de virage** tendrait à diminuer le temps au virage. Cette idée est bien acceptée par les nageuses et leurs entraineurs qui leur rappellent souvent « d'attaquer » le mur. De plus, une même tendance positive est observée entre le temps d'approche et le temps total au virage. Le gain de temps à l'approche (réalisé grâce à une vitesse de nage élevée) serait répercuté sur le temps au virage. Pour ce groupe de nageuses expertes, avec une durée d'approche moyenne de 1,10 s, la part de nage dans le virage est de 38%. Cette valeur peut être comparée à la part de 67% mesurée pour un 7.5mRTT et à la part de 48% mesurée pour un 5mRTT [Silv07] et indiquerait que le choix du 3mRTT comme cadre d'étude de la performance au virage serait pertinent au sens qu'il diminuerait la part de nage dans le virage. Dans le cas des définitions élargies du virage (7.5mRTT ou 5mRTT) la phase d'approche n'est plus la seule phase nagée. En effet, pour notre population de nageuses expertes, la reprise de nage se situe en moyenne à 4,50 m du mur soit avant le passage aux 7,5 ou aux 5 mètres.

L'analyse des **composantes de l'impulsion** pendant le contact renforce l'intérêt d'une analyse dynamique 3D. En effet, jusqu'ici seule la composante horizontale de l'impulsion avait été étudiée [Nico79] [Taka83] [Blan96] [Lytt97] [Coss99] [Lytt99] [Dani03] [Roes03] [Pere08]. Pour notre population de nageuses expertes, aucune relation entre la composante horizontale de l'impulsion et la performance au virage n'a été mise en évidence. Par contre, au-delà de l'influence de l'impulsion latérale pendant le placement sur la performance au virage (discutée au paragraphe précédent), les composantes verticales et latérales de l'impulsion pendant la poussée peuvent présenter une tendance avec le temps total au virage (r = -0,450 et r = 0,343, respectivement). Le sens de ces tendances montre que pour réaliser un bon temps au virage, les nageuses expertes privilégieraient d'orienter leur impulsion de poussée vers le fond plutôt que vers les côtés du couloir de nage.

Pendant le contact, la **profondeur** de la tête jouerait également un rôle important (Tableau 32 et Figure 43). En effet, les profondeurs relevées au début du contact, au début de la poussée, au pic de poussée et en fin de poussée présentent toutes une tendance positive avec la performance ce qui indique que plus la nageuse est placée profondément lors du contact, meilleur sera son temps au virage. La profondeur de la tête évolue en moyenne de -0,32 m à -0,38 m au cours de la poussée. Ces résultats sont en accord avec ceux de Lyttle qui suggéraient aux nageurs de réaliser leurs virages à 0,4 m de profondeur, particulièrement pour des vitesses au-dessus de 1,9 m/s, pour réduire au maximum les forces de trainée [Lytt98b]. En fin de poussée, les nageuses sont à 0,38 m de profondeur et ont une vitesse de 2,55 m/s.

L'absence de corrélations avec les indices d'**extension des membres inférieurs** lors du contact (|r| < 0,24, Tableau 32) n'est pas en accord avec les études antérieures [Taka83] [Blan96] [Coss99] [Pere06] qui suggèrent qu'une faible flexion des genoux lors du contact précèderait un virage rapide (notons que Blanksby relativise ses résultats en évoquant une éventuelle non-linéarité de la relation). Par ailleurs Prins et Patz [Prin06] ont démontré que le *tuck index* était relié

significativement à la vitesse de fin de poussée par une corrélation négative (indiquant que plus les nageurs viraient les jambes fléchies, plus la vitesse créée était importante) et, là aussi, les auteurs suggèrent une non-linéarité de la relation. D'après une étude où a été mesurée l'impulsion produite lors de *squat jumps* à des niveaux de flexion différents, Smith préconise de peu fléchir les jambes ce qui permettrait de réaliser un mouvement moins ample, plus rapide et qui produirait toutefois la même impulsion [Smit08]. Ces résultats contrastés démontrent que plusieurs stratégies de flexion des membres inférieurs existent et nos résultats pourraient indiquer que le groupe de nageuses expertes n'utilise pas une stratégie commune. Pour la population étudiée, la différence au virage ne semble pas être due à une flexion plus ou moins importante des jambes.

Enfin, les meilleurs virages ne sont pas réalisés selon le modèle de Klauck qui inciterait à retarder le **pic de poussée** afin de maximiser la vitesse créée en fin de poussée [Klau05]. En effet, alors que des valeurs élevées du temps nécessaire pour atteindre le pic de poussée, de la part de durée de la poussée jusqu'au pic dans la poussée totale et de la vitesse en fin de poussée devraient être observées lors des meilleurs virages, nous observons que ces trois paramètres ne sont pas corrélés avec le temps total au virage voire même que le sens des relations est opposé à cette hypothèse (r = 0,188, r = 0,138 et r = -0,066, respectivement). Toutefois de bonnes corrélations existent entre le temps nécessaire pour atteindre le pic de poussée totale et la vitesse en fin de poussée (r = 0,518) et entre la part de durée de la poussée jusqu'au pic dans la poussée totale et la vitesse en fin de poussée (r = 0,505) et confirment le bien-fondé du modèle de Klauck. De la même manière, nous observons également que la vitesse maximale est atteinte avant la fin de poussée (Figure 42) ce qui est aussi en accord avec ce modèle. Selon Lyttle, ce phénomène concernant la vitesse serait dû au fait que les forces résistives deviendraient plus importantes que les forces propulsives en fin d'extension des chevilles [Lytt99].

Chez les nageuses expertes, de par l'importance de l'impulsion latérale pendant le placement dans la variation du temps total au virage culbute crawl, la phase de placement semble être déterminante de la performance. L'impulsion latérale pourrait être représentative de la vrille exécutée. De même, la phase de glisse et particulièrement l'instant où elle se termine sont autant de points à travailler pour réaliser des virages performants.

3.2. Modèle d'optimisation de la performance au virage des nageurs experts

Le meilleur modèle obtenu par la méthode Lasso comporte trois variables : la position au début du retournement (RD), la vitesse au pic de poussée (VPe) et la longueur de la trajectoire parcourue par la tête du nageur (TD).

D'après ce modèle, il faudrait débuter le retournement plus loin du mur ou bien réduire sa vitesse au pic de poussée ou le trajet parcouru pour améliorer son temps au virage.

Dès lors, il semble légitime de se demander comment, dans quelle proportion et jusqu'à quelle limite un nageur peut-il faire varier les valeurs de ces paramètres ?

3.2.1. Origines et effets des variables explicatives constituant le modèle retenu

3.2.1.1. Position au début du retournement

La position au début du retournement est la distance horizontale qui sépare la tête du nageur du mur à l'instant où la tête commence à s'enfoncer sous l'eau.

Le signe du coefficient indique que les meilleurs virages des nageurs experts sont caractérisés par une distance tête-mur au début du retournement plus grande (Figure 44). Ce résultat peut être associé à ceux de Chow qui observait que, dans les épreuves de nage libre, la vitesse et la distance en entrée de virage avaient tendance à augmenter lorsque la longueur de l'épreuve diminuait [Chow84]. Pour des jeunes nageurs, Blanksby a également observé que la distance au retournement était un des meilleurs indicateurs de la performance au virage et que les meilleurs se retournaient plus loin du mur que les moins bons [Blan96]. Les valeurs observées par Blanksby sont toutefois moins élevées que pour notre groupe de nageurs experts ce qui permet de penser que la morphologie des nageurs testés (et notamment leur stature) jouerait un rôle sur la position au retournement. Cette idée est confirmée ici par un coefficient de corrélation élevé entre la position au retournement et la stature des nageurs experts : r = 0,818, p = 0,004. Chez des crawleurs dont la stature est identique à celle de nos experts, Lyttle retrouve des distances tête-mur au retournement élevées [Lytt97].



Figure 44 : Distance horizontale tête-mur au début du retournement en fonction de la performance au virage pour le groupe de nageurs experts (EM)

Outre sa relation avec la taille du nageur, cet indicateur de la performance au virage qu'est la distance tête-mur au retournement pourrait relever de la prise d'informations et de l'anticipation. Toutefois, aucun paramètre biomécanique étudié ici ne permet d'étayer cette hypothèse. Une étude orientée sur la quantification de tels phénomènes (prise d'informations, anticipation) permettrait certainement de mieux comprendre l'enjeu d'une distance au retournement élevée.

La variation des valeurs de position au retournement fait penser que les nageurs n'impactent pas tous le mur avec la même extension du corps. En effet, les corrélations entre variables explicatives montrent une forte relation avec l'indice d'extension du haut du corps au contact (r = 0,825, p = 0,003) et une tendance positive avec l'indice d'extension des membres inférieurs au contact (r = 0,432). L'influence de ces deux indices d'extension sur la performance au virage sera discutée en suivant.

3.2.1.2. Vitesse au pic de poussée

La vitesse au pic de poussée est la vitesse du nageur à l'instant où la composante horizontale de la force de poussée enregistrée par la plateforme de force est la plus élevée (Figure 45).



Figure 45 : Composante horizontale de la force de contact et vitesse horizontale de la tête pour l'ensemble des dix nageurs experts

La valeur moyenne de la vitesse horizontale au pic de poussée est encerclée en rouge.

Le signe positif du coefficient indique que les meilleurs virages des nageurs experts sont caractérisés par une vitesse au pic de poussée moins élevée (Figure 46). Bien qu'aucune étude jusqu'ici n'ait déterminé puis analysé la vitesse du nageur au pic de poussée, ce résultat est étonnant à l'égard d'une hypothèse commune pour laquelle les virages les plus performants sont réalisés de manière à ce que chaque vitesse instantanée de déplacement soit élevée.

En 1983 le matériel disponible ne permettait pas de mesurer la vitesse lors d'un virage [Taka83]. Toutefois la mesure était possible lors d'un simple exercice de poussée au mur (non précédée d'un demi-tour) mais les auteurs se sont intéressés alors à la vitesse maximale atteinte.

L'utilisation de caméras aériennes lors des analyses de course en compétition ne permettent pas non plus de déterminer la vitesse du nageur au cours de la poussée ni même quelques instants après, la réfraction de la lumière et les bulles d'air rendant impossible toute analyse calibrée fiable.

Blanksby est le premier à comparer la vitesse maximale atteinte au temps du virage [Blan96]. Malheureusement, concernant la valeur du coefficient de corrélation entre ces deux variables, l'auteur rapporte à la fois une valeur négative dans le texte de l'article et une valeur positive dans un tableau. Toutefois, la vitesse maximale n'est pas retenue comme principal indicateur de la performance au virage par une régression linéaire multiple pas à pas. Il semble pourtant que la vitesse maximale puisse jouer un rôle car elle est significativement plus élevée pour le groupe de nageurs qui ont réalisé les meilleurs temps au virage.

En mesurant la vitesse de déplacement moyenne en tout début de glisse, Cossor rapporte une corrélation négative (r = -0,52, p < 0,05) entre cette vitesse et le temps au virage (2.5mRTT) [Coss99]. Ses résultats sont ainsi en accord avec ceux de Blanksby lors sa comparaison de groupes.



Figure 46 : Vitesse horizontale de la tête au pic de poussée en fonction de la performance au virage pour le groupe de nageurs experts (EM)

En 1999 Lyttle est le premier à calculer la vitesse de déplacement tout au long de la poussée [Lytt99]. Son étude s'attache à analyser les relations de différents paramètres dynamiques et hydrodynamiques avec la vitesse en fin de poussée. Selon l'auteur, le coefficient positif de corrélation (r = 0,42) entre la durée de la poussée et la vitesse en fin de poussée suggèrerait qu'une longue poussée pourrait entrainer une grande vitesse. Cette idée se retrouve chez nos nageurs experts dans la tendance liant la vitesse au pic de poussée et le temps de poussée nécessaire pour atteindre ce pic (r = 0,576, p = 0,08). Nos résultats montrent que le sens de cette tendance est conservé en considérant également le temps total de poussée (r = 0,521) puis le temps total de contact (r = 0,414). En relevant les coefficients de corrélation de ces trois durées avec le temps au virage (r = 0,546, r = 0,516 et r = 0,479, respectivement), nous pouvons émettre l'hypothèse qu'un gain de temps au virage est plutôt lié à une réduction des temps de poussée et de contact. La stratégie adoptée par les jeunes nageurs de Blanksby et de Cossor ne se retrouve pas chez nos nageurs experts.

Comme Lyttle, Prins a étudié l'influence de quelques paramètres biomécaniques sur la vitesse de fin de poussée [Prin06]. Dans son étude, la relation entre le *tuck index* et la vitesse en fin de poussée indiquent que plus les nageurs virent avec les jambes fléchies, plus la vitesse créée est importante. Auparavant Blanksby avait démontré que les meilleurs temps au virage étaient réalisés avec les jambes tendues au contact [Blan96]. En associant les résultats de Blanksby et de Prins, il semble que fléchir les jambes permettrait d'augmenter la vitesse en fin de poussée et que tendre les jambes permettrait de gagner du temps au virage. Bien que la vitesse considérée ici soit celle au pic de poussée et non en fin de poussée, cette hypothèse explicative est alors en accord avec nos

résultats car nous observons également que le temps total au virage est corrélé négativement avec l'indice d'extension des membres inférieurs au contact.

Il est important de noter que la forte corrélation entre le temps total au virage et la vitesse à l'instant du pic de poussée diminue lorsque la vitesse devient maximale (r = 0,352) puis diminue encore en fin de poussée (r = 0,259). La tendance s'inverse ensuite : la distance parcourue lorsque la vitesse descend à 2,2 m/s (r = -0,252) puis à 1,9 m/s (r = -0,384) est plus élevée lors des meilleurs virages. Les meilleurs virages des nageurs experts sont réalisés avec une vitesse moins élevée au cours de la poussée. Ce déséquilibre de vitesse s'inverse dans la suite du mouvement.

3.2.1.3. Longueur de la trajectoire parcourue

La longueur de la trajectoire parcourue est la distance totale parcourue par la tête du nageur dans le cadre du virage c'est-à dire lors de l'aller-retour entre la ligne située 3 mètres avant le mur et le mur du virage. Ce paramètre est tridimensionnel, il rend compte de la distance parcourue le long de chacun des axes du repère d'étude : trajet aller-retour dans la direction globale du mouvement mais aussi profondeur et écarts latéraux par rapport à une trajectoire « idéalement » courte.

Le sens du coefficient indique que les meilleurs virages des hommes experts sont caractérisés par une longueur de trajectoire réduite (Figure 47).



Longueur de la trajectoire parcourue

Figure 47 : Longueur de la trajectoire parcourue en fonction de la performance au virage pour le groupe de nageurs experts (EM)

La valeur du coefficient obtenu par la méthode Lasso est à considérer avec attention. Elle indiquerait que, en gardant la position au début du retournement et la vitesse au pic de poussée constantes, il faudrait réduire le trajet parcouru de 2,19 m pour améliorer le temps au virage (3mRTT) de 0,01 s. Ce gain n'est pas réaliste car l'écart maximal de distance parcourue au sein du groupe de nageurs étudié est d'environ 1 m.

Ce paramètre apparait tout de même comme un bon indicateur de la performance au virage pour les nageurs experts, il permet de révéler des déplacements excessifs ou superflus. En comparant deux nageurs experts, avec d'une part un nageur qui réalise un bon temps au virage et dont la trajectoire parcourue est réduite et d'autre part un nageur dont le temps au virage et la distance parcourue sont plus élevés, nous remarquons que le virage le moins rapide est celui pour lequel le nageur se rapproche beaucoup du mur lors du retournement mais aussi lors duquel les déplacements latéraux du nageur sont très importants (Figure 48).



Figure 48 : Comparaisons 2D et 3D des trajectoires parcourues par deux nageurs experts En vert, une trajectoire de 4,32 m pour un temps total au virage de 2,44 s En rouge, une trajectoire de 5,18 m pour un temps total au virage de 2,78 s

3.2.2. Étude des corrélations révélées par les analyses bivariées

Le temps d'**approche** présente un coefficient de corrélation positif de 0,787 (p = 0,007) avec le temps au virage : plus la phase d'approche est rapide, meilleur est le virage. Étant donné que la phase d'approche est délimitée par le passage aux 3 mètres d'un côté et le début du retournement de l'autre, il existe une forte corrélation entre le temps d'approche et la distance tête-mur au retournement (r = -0,917, p < 0,001). Cette corrélation indique que plus le nageur se retourne loin du mur, plus le temps d'approche est réduit. De par le fait que l'approche est un mouvement totalement inclus dans le virage et de par sa grande durée (\overline{AT} = 0,99 s soit près de 38% du temps au virage pour les nageurs experts), une forte corrélation positive entre les deux temps semble évidente. Ce raisonnement, valable dans le cas de l'approche, ne l'est pas forcément pour d'autres phases du virage. Par exemple, la durée de retournement (\overline{RT} = 0,85 s soit environ 32% du temps total au virage) n'est pas du tout liée à la performance au virage (r = -0,178), la tendance voulant même qu'une diminution du temps au virage passe par une augmentation de la durée du retournement.

Au sein du groupe de nageurs experts, les variations du **niveau** sont corrélées aux variations de la performance au virage. Le groupe de nageurs experts étant plus hétérogène que le groupe de nageuses expertes (écarts-types des variables de niveau et de performance plus élevés pour les hommes), l'écart entre les meilleurs et les moins bons nageurs est plus important. Cet écart favorise l'existence d'une relation entre niveau et performance au virage.

Une autre forte corrélation avec le temps au virage est le fait de la **vitesse au contact**. À l'opposé de la vitesse au pic de poussée dont l'effet a été discuté ci-dessus, le temps au virage est meilleur lorsque la vitesse horizontale de la tête au contact est élevée (r = -0,663, p = 0,037). Ce résultat pourrait relever d'une certaine anticipation des meilleurs nageurs au virage : dès la fin du retournement, ces derniers orienteraient le déplacement de leur tête dans le sens du déplacement à venir.

Alors que cela n'a pas été démontré chez les nageuses expertes (r = -0,121), la **stature** jouerait un rôle dans la performance au virage pour les nageurs experts (r = -0,662, p = 0,037). Le sens de la corrélation montre que les plus grands nageurs effectuent leur virage plus rapidement. Étant donné que ce paramètre est également fortement lié à la longueur de la trajectoire parcourue (r = 0,818, p = 0,004), il peut être avancé que les plus grands nageurs, en parcourant moins de distance au virage, ont un virage plus performant. L'absence d'influence de la stature chez les nageuses expertes pourrait être expliquée par une moindre dispersion des tailles dans le groupe considéré.

Enfin, les dernières fortes corrélations entre les variables explicatives et le temps au virage (pour lesquelles p < 0,05) montrent que les meilleurs virages des hommes experts sont caractérisés par une plus grande **extension** des membres inférieurs et du haut du corps au début du contact. L'extension des membres inférieurs se rapporte à la notion de *tuck index* et le gain de temps au virage lorsque les jambes sont peu fléchies est un résultat qui a été discuté ci-dessus. Par contre, l'extension du haut du corps au contact est une notion introduite par cette étude. Le sens de la corrélation montre que les nageurs qui ont le haut du corps le plus aligné et le plus orienté « vers l'avant » (distance horizontale doigts-hanches élevée par rapport à la longueur segmentaire totale) sont ceux qui réussissent le mieux leur virage. Ce nouvel indice, dont l'estimation est relativement

aisée à partir d'une unique caméra sous-marine bien placée, semble être un bon indicateur de la performance au virage.

Chez les nageurs experts, les meilleurs virages sont réalisés par les grands nageurs qui débutent leur demi-tour loin du mur du virage. En minimisant le trajet parcouru, les meilleurs nageurs optent pour un déplacement efficace, orienté « vers l'avant », privilégiant l'anticipation à une focalisation sur la poussée sur le mur.

3.3. Vers un modèle unique ?

L'ensemble de la population considérée dans ce chapitre étant du même niveau, il semble pertinent de se demander si un modèle unique, indépendant du genre, peut être établi pour illustrer la performance au virage de ces 20 nageuses et nageurs experts.

Il faut remarquer dans un premier temps que l'ordre des variables explicatives, classées par valeur absolue décroissante des coefficients de corrélation avec le temps au virage, est différent pour les deux groupes d'experts (Tableau 32, Tableau 33, Figure 38 et Figure 39). *A priori* aucune variable commune aux deux groupes ne présenterait une relation forte avec la performance au virage.

Le chapitre 3 nous renseigne ensuite sur les différences significatives entre les nageuses et les nageurs de haut niveau. Les moyennes de 15 variables (sur 57) sont présentées comme différentes.

Malgré ces résultats, l'intérêt d'un modèle unique demeure : en ajoutant seulement la variable explicative « genre » dans le *pool* de données, la population d'étude serait doublée. Dès lors la méthode Lasso a été utilisée pour établir ce modèle. La sélection du meilleur modèle a été réalisée par validation croisée *leave-two-out* afin d'avoir les classes de la variable « genre » équilibrées. Sans présélection de variables, le meilleur modèle propose 13 paramètres explicatifs. Avec présélection des variables, le meilleur modèle propose 8 paramètres explicatifs. À valeurs identiques des autres variables retenues, le temps total au virage « prédit » par le second modèle est plus élevé de 0,14 s pour les nageuses.

Le nombre important de paramètres contenu dans le modèle et l'écart de prédiction élevé entre le temps au virage des nageuses et des nageurs ne rendent pas pertinent un tel modèle unique d'optimisation de la performance au virage à haut niveau.

Deux modèles principaux résultent donc de cette analyse statistique : un modèle expert féminin de la performance au virage culbute crawl et un modèle expert masculin de la performance au virage culbute crawl.

3.4. Conclusions

En conclusion, les nageuses expertes ne se distinguent pas entre elles par des caractéristiques inhérentes à la puissance musculaire (placement temporel du pic, durée du contact ou bien valeur du pic par exemple) mais par des caractéristiques techniques (orientation de l'impulsion de poussée, instant de la reprise propulsive).

Les nageurs experts se distinguent entre eux par un début de retournement anticipé pour les meilleurs qui leur permet d'aborder le contact au mur dans une position peu fléchie, favorisant ainsi une extension rapide. Le trajet total parcouru est moindre et gage de la performance au virage.

Cette étude contribue à la connaissance du mouvement complexe qu'est le virage culbute crawl à haut niveau et à l'identification des paramètres biomécaniques de la performance au virage.

L'étude s'est appuyée sur un protocole d'analyse cinématique et dynamique tridimensionnel complet qui a permis d'évaluer l'ensemble des paramètres issus de la littérature. Des paramètres nouveaux ont également pu être étudiés et différentes analyses statistiques ont révélé leur intérêt.

Une double analyse comparative a montré que le niveau d'expertise et le genre ont un effet sur la performance au virage culbute crawl. Les nageuses de niveaux différents se différencient entre-elles par des vitesses en approche et en fin de poussée plus élevées pour les expertes, l'écart de vitesse en fin de poussée étant dû à l'adoption d'une position plus profilée à chaque instant clé du contact. À haut niveau, les nageurs se différencient des nageuses au début du retournement par une vitesse plus élevée puis lors de la poussée où ils produisent un pic de force horizontale plus élevé et obtiennent un gain de vitesse en conséquence. Experts et expertes n'initient pas à la même vitesse ni leur propulsion sous-marine ni leur reprise de nage alors que c'est le cas pour les deux groupes de nageuses considérés. L'analyse des courbes de vitesses mène à penser que les nageuses expertes devraient débuter leurs ondulations plus tôt. Elles devraient également reprendre à nager plus tôt de manière à fournir moins d'effort (et ainsi perdre moins de temps) pour regagner leur vitesse maximale de nage.

L'utilisation d'une méthode statistique originale adaptée aux problèmes où le nombre de variables est plus important que le nombre d'observations a permis d'établir des modèles experts de la performance au virage culbute crawl. Bien que dans le cadre de cette étude les intervalles de confiance obtenus par la méthode Lasso soient faibles (ce qui semble dû à la faible variabilité de la réponse), cette méthode permet tout de même une sélection efficace des paramètres les plus influents. Chez les nageuses expertes, le meilleur modèle obtenu révèle l'importance de l'impulsion latérale pendant le placement, paramètre nouveau qui pourrait être représentatif de la vrille exécutée. Les phases de placement et de glisse sont autant de points à travailler pour réaliser des virages performants. Chez les nageurs experts, les meilleurs virages sont réalisés par des grands nageurs qui anticipent le retournement. Cela leur permet d'aborder le contact au mur dans une position peu fléchie, favorisant ainsi une extension rapide. En réduisant le trajet parcouru, ces nageurs optent pour un déplacement efficace, orienté « vers l'avant ».

Les résultats d'autres études menées récemment font penser que la précision de la reconstruction de la cinématique 3D sous-marine pourra être améliorée par l'utilisation d'algorithmes mieux adaptés au milieu [Elip09b] [Elip10]. Ces nouveaux algorithmes impliquent toutefois des conditions expérimentales plus sévères comme par exemple un positionnement contrôlé des mires de calibration et des caméras pour l'utilisation de la DLT « double plan ».

Des études plus anciennes avaient tenté une reconstruction conjointe du mouvement sousmarin et aérien du nageur [Capp95]. Cette idée permettrait de parfaire l'étude cinématique du retournement ; toutefois la mise en œuvre d'un tel protocole n'est pas aisée à cause notamment du nombre de caméras nécessaires. De plus, les auteurs rapportent devoir translater les coordonnées de l'épaule reconstruites dans le volume de calibration aérien pour les faire correspondre aux coordonnées sous-marines ; la double calibration du milieu d'évolution du nageur, milieu mixte aireau, semble donc une difficulté majeure à résoudre pour obtenir des résultats précis à partir d'un tel protocole.

En ce qui concerne l'étude dynamique du virage crawl, nos résultats montrent que l'utilisation d'une plateforme de force 3D parait désormais indispensable à la mesure et l'analyse des appuis sur le mur de virage. En dehors des forces de contact, une analyse spécifique des effets de la vague de corps sur les enregistrements pourra être conduite. Suite à l'étude « pilote » de Roesler [Roes03], son équipe continue d'explorer le phénomène au travers d'études récentes [DaSi09] [Pere10]. Les résultats de Daniel ont montré que la valeur du pic de force horizontale était inférieure lors d'exercices de poussée au mur, sans demi-tour préalable, et que la vitesse créée était pourtant supérieure [Dani03]. Au-delà des conclusions de l'auteur sur l'effet « freinateur » de la vague en retour de virage, nous pouvons nous demander si la vague n'aurait pas également un effet sur la valeur du pic enregistrée mais aussi sur l'ensemble des paramètres extraits de l'analyse des composantes de la force de contact.

Nos résultats ayant révélé l'importance de la distance parcourue sur la performance au virage des nageurs experts, une étude approfondie de ce nouveau paramètre, intrinsèquement lié à la tridimensionnalité du mouvement, pourra être mise en œuvre. Pour cela, un placement optimisé des mires de calibration et des caméras permettra de garantir la précision de reconstruction des déplacements latéraux du nageur, jamais étudiés jusqu'alors dans le cadre du virage. Une telle étude devra également permettre de mieux comprendre certains mouvements de la tête et notamment d'expliciter les origines et les effets de sa remontée vers la surface au début du contact.

Enfin, il sera intéressant de mener une étude spécifique consacrée au mouvement de vrille afin de déterminer le meilleur moment où elle doit être réalisée au cours du virage culbute crawl. Pour un virage performant, le nageur doit-il vriller pendant le retournement, le placement, la poussée, la glisse ou la coulée ? Au-delà de cette question, comment la vrille doit-elle être effectuée ? Est-ce une dissociation du mouvement des épaules et du bassin ? La vrille est-elle initiée par un mouvement de la tête ? Des mains ? Des pieds ? Un ensemble de questions auxquelles seule une étude 3D quantifiée du mouvement permettra de répondre.

Les spécificités relevées du mouvement de virage chez les nageuses expertes, non expertes et les nageurs experts mènent à penser que l'entrainement et le travail technique gagneraient à être adaptés à chaque groupe voire même individualisés.

Pour ce faire, tout au long de la thèse, un travail d'évaluation technique auprès des membres des Équipes de France de natation a été mené. Outre l'analyse des phases de virage, un travail particulier sur les phases de départ a également été conduit. Une plateforme de force spécifique a été conçue pour s'adapter aux plots de départ et permet une analyse dynamique 3D de l'impulsion. Cette analyse dynamique est couplée à une analyse vidéo du mouvement. De plus, une centrale inertielle a été développée pour l'évaluation des phases sous-marines et des phases nagées. Ce travail d'évaluation se poursuit aujourd'hui, fort des connaissances acquises et de l'expérience accumulée.

La répétition du protocole, utilisé à maintes reprises avec les sportifs, a permis son amélioration, à la fois dans un objectif de précision dans le cadre de la recherche comme dans un objectif de pertinence et de faisabilité pour une utilisation pratique.

La conception, le développement technique et l'utilisation de nouveaux matériels dédiés à l'analyse du mouvement en natation nous permet aujourd'hui de proposer au sportif une aide à la performance en phase avec ses objectifs, aussi ambitieux soient-ils. La conduite des évaluations fédérales auprès des nageurs tout au long de leur préparation olympique mettra toutes les chances de réussite sportive de leur côté.

De par un enrichissement de la connaissance des différentes techniques utilisées par les experts et les non-experts, cette étude devrait permettre d'améliorer l'enseignement des virages de haut-niveau. La poursuite des échanges mis en place avec les entraineurs et les Cadres Techniques Nationaux permettra, à partir des résultats apportés par ces travaux de recherche, d'imaginer des exercices nouveaux dédiés à l'apprentissage et à l'optimisation de la performance au virage crawl.

Articles et congrès

- [Abde71] Abdel-Aziz, Y. & Karara, H. (1971) Direct linear transformation from comparator coordinates into object space coordinates in close-range photogrammetry. Proceedings of the Symposium on Close-Range Photogrammetry, pp. 1-18
- [Arel94] Arellano, R., Brown, P., Cappaert, J. & Nelson, R. (1994) Analysis of 50-, 100-, and 200-m freestyle swimmers at the 1992 Olympic Games. *Journal of Applied Biomechanics* **10**(2), pp. 189-199
- [Arel00] Arellano, R., Pardillo, S., de la Fuente, B. & Garcia, F. (2000) A system to improve the swimming start technique using force recording, timing and kinematic analyses. 18th International Symposium on Biomechanics in Sports, Hong Kong, Chine
- [Aval09] Avalos, M. (2009) Sélection de variables avec lasso dans la régression logistique conditionnelle. 41èmes Journées de Statistique de la Société Française de Statistique, Bordeaux, France
- [Blan95] Blanksby, B., Gathercole, D. & Marshall, R. (1995) Reliability of ground reaction force data and consistency of swimmers in tumble turn analysis. *Journal of Human Movement Studies* **28**, pp. 193-207
- [Blan96] Blanksby, B., Gathercole, D. & Marshall, R. (1996) Force plate and video analysis of the tumble turn by age-group swimmers. *Journal of Swimming Research* **11**, pp. 40-45
- [Blan04] Blanksby, B., Skender, S., Elliott, B., McElroy, K. & Landers, G. (2004) An analysis of the rollover backstroke turn by age-group swimmers. *Sports Biomechanics* **3**(1), pp. 1-14
- [Capp95] Cappaert, J., Pease, D. & Troup, J. (1995) Three-dimensional analysis of the men's 100-m freestyle during the 1992 Olympic Games. *Journal of Applied Biomechanics* **11**(1), pp. 103-112
- [Cham07] Champely, S. & Verdot, C. (2007) Que signifie la significativité statistique ? L'apport de la taille d'effet et de la puissance statistique. *Sciences et Techniques des Activités Physiques et Sportives* **77**, pp. 49-61
- [Chen94] Chen, L., Armstrong, C.W. & Raftopoulos, D.D. (1994) An investigation on the accuracy of three-dimensional space reconstruction using the direct linear transformation technique. *Journal of Biomechanics* **27**(4), pp. 493-500
- [Chèz95] Chèze, L., Fregly, B.J. & Dimnet, J. (1995) A solidification procedure to facilitate kinematic analyses based on video system data. *Journal of Biomechanics* **28**(7), pp. 879-884
- [Chow84] Chow, J., Hay, J., Wilson, B. & Imel, C. (1984) Turning techniques of elite swimmers. Journal of Sports Sciences 2(3), pp. 241-255
- [Clot00] Clothier, P., McElroy, G., Blanksby, B. & Payne, W. (2000) Traditional and modified exits following freestyle tumble turns by skilled swimmers. *South African Journal for Research in Sport, Physical Education & Recreation* **22**(1), pp. 41-55
- [Coss99] Cossor, J.M., Blanksby, B.A. & Elliott, B.C. (1999) The influence of plyometric training on the freestyle tumble turn. *Journal of Science and Medicine in Sport* **2**(2), pp. 106-116

[Crai86] Craig, A.B. (1986) Breath holding during the turn in competitive swimming. Medicine and Science in Sports and Exercise 18(4), pp. 402-407 [Dani03] Daniel, K., Klauck, J. & Bieder, A. (2003) Kinematic and dynamographic research in different swimming turns. Swimming Science IX, Proceedings of the 9th symposium on Biomechanics and Medicine in Swimming, Saint-Etienne, France, pp. 201-206 [Elip09] Elipot, M., Hellard, P., Taïar, R., Boissière, E., Rey, J., Lecat, S. & Houel, N. (2009) Analysis of swimmers' velocity during the underwater gliding motion following grab start. Journal of Biomechanics 42(9), pp. 1367-1370 [Elip09b] Elipot, M., Houel, N., Hellard, P. & Dietrich, G. (2009) Reconstruction accuracy for visual calibration method. 27th International Symposium on Biomechanics in Sports, Limerick, Irlande [Hay83] Hay, J., Guimaraes, A. & Grimston, S. (1983) A quantitative look at swimming biomechanics. Swimming Technique 20(2), pp. 11-17 [Hay88] Hay, J. (1988) The status of research on the biomechanics of swimming. Swimming Science V, Proceedings of the 5th symposium on Biomechanics and Medicine in Swimming, Bielefeld, Allemagne, pp. 3-14 Hodgkinson, J. & Blanksby, B. (1995) A look at the tumble turn. Proceedings of the [Hodg95] Australian Swim Coaches Convention, pp. 102-109 [Jaku04] Jakubowska, M. & Kubiak, W. (2004) Adaptive-degree polynomial filter for voltammetric signals. Analytica Chimica Acta 512(2), pp. 241-250 [King04] King, M.A. & Yeadon, M.R. (2004) Maximising somersault rotation in tumbling. Journal of Biomechanics 37(4), pp. 471-477 [Klau05] Klauck, J. (2005) Push-off forces vs kinematics in swimming turns: model based estimates of time-dependent variables. Human Movement 6(2), pp. 112-115 [Kwon99] Kwon, Y.-H. (1999) Object plane deformation due to refraction in two-dimensional underwater motion analysis. Journal of Applied Biomechanics 15(4), pp. 396-403 [Kwon06] Kwon, Y.-H. & Casebolt, J.B. (2006) Effects of light refraction on the accuracy of camera calibration and reconstruction in underwater motion analysis. Sports Biomechanics 5(1), pp. 315-340 [Lint00] Linthorne, N. (2000) Optimum take-off range in vertical jumping. Book of Abstracts of the 3rd Australasian Biomechanics Conference, pp. 49–50 [Lytt97] Lyttle, A. & Mason, B. (1997) A kinematic and kinetic analysis of the freestyle and butterfly turns. Journal of Swimming Research 12, pp. 7-11 Lyttle, A., Blanksby, A., Elliott, B. & Lloyd, D. (1998) Optimising kinetics in the [Lytt98] freestyle flip turn push-off. 16th International Symposium on Biomechanics in Sports, Konstanz, Allemagne Lyttle, A., Blanksby, B., Elliott, B. & Lloyd, D. (1998) The effect of depth and velocity [Lytt98b] on drag during the streamlined glide. Journal of Swimming Research 13, pp. 15-22 [Lytt99] Lyttle, A., Blanksby, B., Elliott, B. & Lloyd, D. (1999) Investigating kinetics in the freestyle flip turn push-off. Journal of Applied Biomechanics 15(3), pp. 242-252 [Lytt00] 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(10), pp. 801-807 [Lytt04] Lyttle, A. & Benjanuvatra, N. (2004) Start right? A biomechanical review of dive start

performance. http://www.coachesinfo.com

- [Maso01] Mason, B. & Cossor, J. (2001) Swim turn performances at the Sydney 2000 Olympic Games. 19th International Symposium on Biomechanics in Sports, San Francisco, Etats-Unis
 [Miya92] Miyashita, M., Takahashi, S., Troup, J. & Wakayoshi, K. (1992) Leg extension power of elite swimmers. Swimming Science VI, Proceedings of the 6th symposium on Biomechanics and Medicine in Swimming, Liverpool, Angleterre, pp. 295-301
- [Miyo04] Miyoshi, T., Shirota, T., Yamamoto, S., Nakazawa, K. & Akai, M. (2004) Effect of the walking speed to the lower limb joint angular displacements, joint moments and ground reaction forces during walking in water. *Disability & Rehabilitation* **26**(12), pp. 724-732
- [Miyo06] Miyoshi, T., Nakazawa, K., Tanizaki, M., Sato, T. & Akai, M. (2006) Altered activation pattern in synergistic ankle plantarflexor muscles in a reduced-gravity environment. *Gait & Posture* **24**(1), pp. 94-99
- [Naka07] Nakagawa, S. & Cuthill, I. (2007) Effect size, confidence interval and statistical significance: a practical guide for biologists. *Biological Reviews* **82**(4), pp. 591-605
- [Nico79] Nicol, K. & Kruger, F. (1979) Impulses exerted in performing several kinds of swimming turns. Swimming III, Proceedings of the 3rd symposium on Biomechanics and Medicine in Swimming, Edmonton, Canada, pp. 222-232
- [Pere06] Pereira, S., Araujo, L., Freitas, E., Gatti, R., Silveira, G. & Roesler, H. (2006) Biomechanical analysis of the turn in front crawl swimming. Proceedings of the 10th symposium on Biomechanics and Medicine in Swimming, Porto, Portugal, *Portuguese Journal of Sport Sciences*, Vol **6** Suppl 2, pp. 77-79
- [Pere06b] Pereira, S., Araujo, L., Gonçalves, P. & Vilas-Boas, J. (2006) "Epidemiological" analysis of the freestyle turning techniques used in top level swimming. Book of Abstracts of the 10th symposium on Biomechanics and Medicine in Swimming, Porto, Portugal, *Portuguese Journal of Sport Sciences*, Vol 6 Suppl 1, pp. 110
- [Pere08] Pereira, S., Vilar, S., Gonçalves, P., Figueiredo, P., Fernandes, R., Roesler, H. & Vilas-Boas, J. (2008) A combined biomechanical analysis of the flip turn technique. 26th International Symposium on Biomechanics in Sports, Séoul, Corée du Sud
- [Pere10] Pereira, S., Gonçalves, P., Fernandes, R., Machado, L., Roesler, H. & Vilas-Boas, J. (2010) Graphic removal of water wave impact in the pool wall during the flip turn. Proceedings of the 11th symposium on Biomechanics and Medicine in Swimming, Oslo, Norvège, pp. 148-150
- [Prin06] Prins, J.H. & Patz, A. (2006) The influence of tuck index, depth of foot-plant, and wall contact time on the velocity of push-off in the freestyle flip turn. Proceedings of the 10th symposium on Biomechanics and Medicine in Swimming, Porto, Portugal, *Portuguese Journal of Sport Sciences*, Vol 6 Suppl 2, pp. 82-85
- [Puel08] Puel, F., Hellard, P. & Cid, M. (2008) Forces 3-D de poussée au cours du virage crawl en natation. Actes des 4èmes Journées Spécialisées de Natation, Lille, France, pp. 143-144
- [Puel10] Puel, F., Morlier, J., Cid, M., Chollet, D. & Hellard, P. (2010) Biomechanical factors influencing tumble turn performance of elite female swimmers. Proceedings of the 11th symposium on Biomechanics and Medicine in Swimming, Oslo, Norvège, pp. 155-157

[Puel10b]	Puel, F., Morlier, J., Mesnard, M., Cid, M. & Hellard, P. (2010) Dynamics and kinematics in tumble turn: an analysis of performance. Papers from the 35th congress of the Société de Biomécanique, Le Mans, France, <i>Computer Methods in Biomechanics and Biomedical Engineering</i> , Vol 13 Suppl 1, pp. 109-111
[Puel10c]	Puel, F. (2010) Analyse dynamique et cinématique de la performance du virage crawl. 2èmes Journées de la Mécanique Bordelaise, Carcans-Maubuisson, France
[Pula81]	Pulaski, P.D., Zee, D.S. & Robinson, D.A. (1981) The behavior of the vestibulo-ocular reflex at high velocities of head rotation. <i>Brain Research</i> 222 (1), pp. 159-165
[Roes03]	Roesler, H. (2003) Turning force measurement in swimming using underwater force platforms. Proceedings of the 9th symposium on Biomechanics and Medicine in Swimming, Saint-Etienne, France, pp. 243-248
[Sand00]	Sanders, R.H. & Gibson, B.J. (2000) Technique and timing in the womens forward two and one half somersault pike and mens three and one half somersault pike 3m springboard dives. <i>Journal of Science and Medicine in Sport</i> 3 (4), pp. 434-448
[Sand02]	Sanders, R. (2002) New analysis procedures for giving feedback to swimming coaches and swimmers. 20th International Symposium on Biomechanics in Sports, Caceres, Espagne
[Sand03]	Sanders, R. & Gibson, B. (2003) Technique and timing in women's backward two and one half somersault tuck (205C) and the men's backward two and one half somersault pike (205B) 3m springboard dives. <i>Sports Biomechanics</i> 2 (1), pp. 73
[Sand04]	Sanders, R. & Burnett, A. (2004) Technique and timing in women's and men's reverse one and one half somersault with two and one half twists (5335D) and men's reverse one and one half somersault with three and one half twists (5337D) 3 m springboard dives. <i>Sports Biomechanics</i> 3 (1), pp. 29-41
[Savi64]	Savitzky, A. & Golay, M. (1964) Smoothing and differentiation of data by simplified least squares procedures. <i>Analytical Chemistry</i> 36 (8), pp. 1627-1639
[Shah05]	Shahbazi, M., Sanders, R. & Tonddast, S. (2005) A mechanical modelling for human movements in water: a kinematic study of turn. <i>European Journal of Scientific Research</i> 12 (1), pp. 46-54
[Shah06]	Shahbazi, M., Sanders, R. & Tonddast, N. (2006) A mathematical simulation to study pike turn characteristics in front crawl swim. 24th International Symposium on Biomechanics in Sports, Salzburg, Autriche
[Shah08]	Shahbazi, M. & Sanders, R. (2008) A new mathematical simulation to study flip turn characteristics in front crawl swim. 26th International Symposium on Biomechanics in Sports, Séoul, Corée du Sud
[Stag05]	Staggs, J. (2005) Savitzky-Golay smoothing and numerical differentiation of cone calorimeter mass data. <i>Fire Safety Journal</i> 40 (6), pp. 493-505
[Taka83]	Takahashi, G., Yoshida, A., Tsubakimoto, S. & Miyashita, M. (1983) Propulsive force generated by swimmers during a turning motion. Proceedings of the 4th symposium on Biomechanics and Medicine in Swimming, Amsterdam, Pays-Bas, pp. 192-198
[Thay84]	Thayer, A. & Hay, J. (1984) Motivating start and turn improvement. <i>Swimming Technique</i> 20 (4), pp. 17-20
[Thor76]	Thorstensson, A., Grimby, G. & Karlsson, J. (1976) Force-velocity relations and fiber composition in human knee extensor muscles. <i>Journal of Applied Physiology</i> 40 (1), pp. 12-16

[Tibs96]	Tibshirani, R. (1996) Regression shrinkage and selection via the Lasso. <i>Journal of the Royal Statistical Society, Series B (Methodological)</i> 58 (1), pp. 267-288
[Vaip06]	Vaiphasa, C. (2006) Consideration of smoothing techniques for hyperspectral remote sensing. <i>ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing</i> 60 (2), pp. 91-99
[Venn06]	Vennell, R., Pease, D. & Wilson, B. (2006) Wave drag on human swimmers. <i>Journal of Biomechanics</i> 39 (4), pp. 664-671
[Vila03]	Vilas-Boas, J. & Fernandes, R. (2003) Swimming starts and turns: Determinant factors of swimming performance. Actes des 3èmes Journées Spécialisées de Natation, Lille, France, pp. 84-95
[Wood86]	Wood, G.A. & Marshall, R.N. (1986) The accuracy of DLT extrapolation in three- dimensional film analysis. <i>Journal of Biomechanics</i> 19 (9), pp. 781 – 785

Ouvrages de référence

- [Ae82] Ae, M. (1982) A biomechanical study on jump for height contributions, body segments and the mechanism of the take-off. Thèse, Université de Tsukuba, Japon
- [AIS00] AIS, Biomechanics Department (2000) Sydney Olympic Games: Biomechanical analysis
- [Arau00] Araujo, L. (2000) Analise dinamométrica da virada do nado crawl comparando nadadores de niveis diferentes. CEFID, UDESC, Florianopolis, Brésil
- [Barb94] Barbier, F. (1994) Modélisation biomécanique du corps humain et analyse de la marche normale et pathologique Application à la rééducation. Thèse, Université de Valenciennes, France
- [Bois06] Boisnoir, A. (2006) Le départ d'une course de vitesse : la gestion d'une double contrainte. Thèse, Université de Rouen, France
- [Chiq09] Chiquet, J. (2009) Méthodes de Lasso pour la sélection de variables en régression linéaire
- [Chol97] Chollet, D. (1997) Natation sportive : approche scientifique (2ème édition). Vigot, Paris
- [Clot04] Clothier, P. (2004) Underwater kicking following the freestyle tumble turn. Thèse, Université de Ballarat, Australie
- [Cohe88] Cohen, J. (1988) Statistical power analysis for the behavioral sciences (2nd edition). L. Erlbaum Associates, Hillsdale
- [Corn92] Cornillon, M., Fauquet, C., Meslier, J., Morin, J., Planche, M. & Sidney, M. (1992) Natation sportive - Volume II. Les techniques. Fédération Française de Natation, Paris
- [Cost94] Costill, D., Maglischo, E. & Richardson, A. (1994) La natation. Vigot, Paris
- [Coun86] Counsilman, J. (1986) La natation de compétition. Vigot, Paris
- [DaSi09] Da Silva, S. (2009) Análise e comparação da força de arrasto hidrodinâmico activo e da massa deslocada, na fase de impulso em quatro técnicas de viragens de crol. Porto, Portugal
- [Demp55] Dempster, W. (1955) Space requirements of the seated operator: geometrical, kinematic, and mechanical aspects of the body, with special reference to the limbs
- [Elip10] Elipot, M. (2010) Biomécanique et contrôle moteur en natation course : Application des nouvelles techniques de calibration de caméra à l'analyse cinématique en natation et identification des coordinations motrices lors de phases sous-marines de départs chez des nageurs de haut niveau. Thèse, Université Paris Descartes, France

- [FFN08] FFN, Équipe Fédérale d'Évaluation (2008) Analyse des finales et des demi-finales des Championnats de France de Natation
- [FINA05] FINA (2005) Réglementation FINA 2005-2009
- [FINA09] FINA (2009) Réglementation FINA 2009-2013
- [Gaut02] Gautschi, G. (2002) Piezoelectric sensorics. Springer, Berlin
- [Hopk07] Hopkins, W. (2007) Generalizing to a population. Dans : A new view of statistics. http://sportsci.org/resource/stats/
- [Hube02] Hubert, M. (2002) Influência de variaveis dinâmicas no tempo de execução da virada com rolamento do nado crawl. CEFID, UDESC, Florianopolis, Brésil
- [Magl87] Maglischo, E. (1987) Nager plus vite. FNMNS, Morzine
- [Mart01] Martins, E. (2001) Analise dinâmica da virada com rolamento no nado crawl. CEFID, UDESC, Florianopolis, Brésil
- [Mazz94] Mazza, J., Ackland, T., Bach, T. & Cosolito, P. (1994) Absolute body size. Dans : Carter, J.E.L. & Ackland, T.R., Kinanthropometry in aquatic sport: a study of world class athletes. Human Kinetics, Champaign, pp. 15-54
- [Morl99] Morlier, J. (1999) Étude dynamique tridimensionnelle du saut à la perche -Caractérisation et modélisation d'une perche de saut. Thèse, Université Bordeaux 1, France
- [Ohmi81] Ohmich, H. & Miyashita, M. (1981) Analysis of the external work derived from the kinematics of human walking. Dans : Morecki, A., Kedzior, K. & Wit, A., Biomechanics VII – B. University Park Press, Baltimore, pp. 184-189
- [Oppe77] Oppenheim, F. (1977) Histoire de la natation mondiale et française. Chiron, Paris
- [Pied08] Piednoir, F. (2008) Pédaler intelligent : la biomécanique du cycliste. FFCT, lvry-sur-Seine
- [Roes97] Roesler, H. (1997) Desenvolvimento de plataforma subaquatica para medições de forças e momentos nos três eixos coordenados para utilizarção em biomecânica. Thèse, PROMEC, UFRGS, Porto Alegre, Brésil
- [Silv07] Silveira, G. (2007) Proposição de uma metodologia para coleta de dados da virada no nado crawl. CEFID, UDESC, Florianopolis, Brésil
- [Smit08] Smith, A. (2008) Effect of tuck index on impulse produced during a squat jump in swimmers. Université de Greensboro, États-Unis
- [Wint90] Winter, D. (1990) Biomechanics and motor control of human movement (2nd edition). Wiley-Interscience, New-York

<u>Sommaire</u>

Annexe 1 : Récapitulatif des paramètres cinématiques rapportés lors de virages culbutes
crawl
Annexe 2 : Récapitulatif des résultats spécifiques à la phase de contact rapportés lors de
virages culbutes crawl126
Annexe 3 : Interface de saisie de Sportlab127
Annexe 4 : Exemple de calcul de la précision de reconstruction 3D128
Annexe 5 : Algorithme de détection des instants de retournement, de contact et de
reprise de nage129
Annexe 6 : Nomenclature des variables (classées par ordre alphabétique)130
Annexe 7 : Extraits de l'analyse de la finale du 200 m nage libre féminin des JO de Sydney
en 2000 [AIS00]132
Annexe 8 : Extraits de l'analyse de la finale du 200 m nage libre masculin des JO de Sydney
en 2000 [AIS00]133
Annexe 9 : Extraits de l'analyse de la finale du 200 m nage libre féminin des Championnats
de France de 2008 [FFN08]134
Annexe 10 : Histogrammes de répartition des variables explicatives pour le groupe de
nageuses expertes135
Annexe 11 : Relation non-linéaire entre la variable réponse (3mRTT) et chacune des
variables explicatives pour le groupe de nageuses expertes
Annexe 12 : Matrice de corrélation entre le premier groupe de variables (classées par
valeur absolue de corrélation avec la variable réponse 3mRTT) pour le groupe
de nageuses expertes139
Annexe 13 : Matrice de corrélation entre le premier groupe de variables (classées par
valeur absolue de corrélation avec la variable réponse 3mRTT) et le second
groupe de variables pour le groupe de nageuses expertes
Annexe 14 : Matrice de corrélation entre le second groupe de variables (classées par
valeur absolue de corrélation avec la variable réponse 3mRTT) pour le groupe
de nageuses expertes141
Annexe 15 : Matrice de corrélation entre le premier groupe de variables (classées par
valeur absolue de corrélation avec la variable réponse 3mRTT) pour le groupe
de nageurs experts142
Annexe 16 : Matrice de corrélation entre le premier groupe de variables (classées par
valeur absolue de corrélation avec la variable réponse 3mRTT) et le second
groupe de variables pour le groupe de nageurs experts
Annexe 17 : Matrice de corrélation entre le second groupe de variables (classées par
valeur absolue de corrélation avec la variable réponse 3mRTT) pour le groupe
de nageurs experts144

Étude	Population	Temps au virage	Vitesse d'approche	Retournement (début et durée)	tVitesse en fin de poussée	Phase sous- marine (durée et vitesse)	Reprise de nage	Vitesse en fin de virage
[Nico79]	5 nageurs universitaires (1 homme et 4 femmes)	4,19 s* (3mRTT)	1,36 ± 0,11 m/s* (de -6 m à -3 m)	/	/	/	/	1,26 ± 0,07 m/s (de +3m à +6m)
[Chow84]	8 nageurs internationaux	3,24 ± 0,34 s **	1,61 ± 0,06 m/s **	2,04 ± 0,28 m 1,28 ± 0,19 s **	/	1,96 ± 0,30 s 2,54 ± 0,14 m/s**	4,93 ± 0,48 m **	/
200 m nage libre	8 nageuses internationales	2,97 ± 0,33 s **	1,49 ± 0,11 m/s **	1,80 ± 0,21 m 1,21 ± 0,14 s **	/	1,76 ± 0,25 s 2,37 ± 0.21 m/s**	4,13 ± 0,38 m **	/
[Arel94]	Nageurs olympiques	8,28 s (7.5mRTT)	1,70 ± 0,08 m/s ***	/	/	/	/	/
200 m nage libre	Nageuses olympiques	9,14 s (7.5mRTT)	1,58 ± 0,06 m/s ***	/	/	/	/	/
[Blan96]	36 jeunes nageurs de compétition	3,70 ± 0,47 s (2.5mRTT) 7,66 ± 0,79 s (5mRTT)	/	0,62 ± 0,18 m	2,05 ± 0,29 m/s (max)	/	2,51 ± 0,58 m	1,35 ± 0,24 m/s (avant reprise de nage)
[Lytt97]	3 nageurs élites	7,98 s (7.5mRTT)	/	0,97 ± 0,05 m 0,72 ± 0,05 s	/	1,33 ± 0,24 s 1,85 ± 0,08 m/s	/	1,74 ± 0,04 m/s (1 ^{er} cycle de bras)
[Coss99]	19 jeunes nageurs de compétition (GE)	3,32 ± 0,42 s (2.5mRTT) 6,94 ± 0,67 s (5mRTT)	/	/	1,22 ± 0,29 m/s	/	/	/
[C03399]	19 jeunes nageurs de compétition (GC)	6,89 ± 0,65 s (5mRTT) 3,25 ± 0,37 s (2.5mRTT)	/	/	1,14 ± 0,26 m/s	/	/	/
[Lytt99]	30 nageurs adultes	5,07 ± 0,21 s (5mRTT)	/	/	2,75 ± 0.25 m/s	/	/	/
[Dani03]	1 nageuse	/	/	/	2,40 m/s	/	1	/
[Roes03]	1 nageur élite	/ 8,11 ± 0,09 s	/	/	2,55 m/s	/	/	/
[Prin06]	33 nageurs	(7.5mRTT) /	/	/	2,47	/	/	
[Pere06]	universitaires 38 nageurs de	9,06 ± 1,10 s	/	/	± 0,40 m/s	/	/	/
[Dara00]	Club	(7.5mRTT)	1,77		3,00	0,93 ± 0,21 s		

/

Annexe 1 : Récapitulatif des paramètres cinématiques rapportés lors de virages culbutes crawl

GE / GC : groupe expérimental / groupe contrôle

/

* Virages ouverts inclus

** Définitions particulières de début et de fin de virage

± 0,08 m/s

*** Vitesse de nage

[Pere08] 1 nageur élite

/

(glisse)

± 0,09 m/s

/

Étude	Population	Temps de contact	Temps de poussée	Pic de force horizontal	Impulsion horizontale	Flexion maximale du genou
[Nico79]	5 nageurs universitaires (1 homme et 4 femmes)	0,51 ± 0,11 s*	/	/	217 ± 28 N.s*	/
[Taka02]	3 nageurs entrainés	0,36 ± 0,08 s	/	1712 ± 464 N	302 ± 51 N.s	76 ± 25°
[така83]	3 nageurs amateurs	0,48 ± 0,08 s	/	1068 ± 234 N	224 ± 8 N.s	42 ± 8°
[Blan96]	36 jeunes nageurs de compétition	0,58 ± 0,20 s	/	693 ± 228 N	177 ± 50 N.s	56,6 ± 17,2% **
[Lytt97]	3 nageurs élites	0,29 ± 0,05 s	/	1345 ± 236 N 1,77 ± 0,28 bw	247 ± 29 N.s 0,33 ± 0,03 bw.s	/
[Coss99]	19 jeunes nageurs de compétition (GE)	0,50 ± 0,12 s	/	565 ± 152 N 1,17 ± 0,19 bw	134 ± 40 N.s	0,60 ± 0,14 **
	19 jeunes nageurs de compétition (GC)	0,49 ± 0,12 s	/	600 ± 242 N 1,31 ± 0,26 bw	124 ± 33 N.s	0,65 ± 0,16 **
[Lytt99]	30 nageurs adultes	0,32 ± 0,04 s	0,22 ± 0,05 s 67,5 ± 15,2%	1190 ± 246 N	204 ± 55 N.s	/
[Dapi02]	1 nageuse	0,38 ± 0,00 s	0,28 ± 0,01 s	1132 ± 9 N 16,9 ± 0,1 N/kg	226 ± 7 N.s	/
[Danios]	1 nageur	0,43 ± 0,02 s	0,32 ± 0,01 s	1436 ± 171 N 17,7 ± 2,1 N/kg	322 ± 9 N.s	/
[Roes03]	5 nageurs de bon niveau	De 0,47 à 0,65 s	/	De 1,6 à 2,2 (s.a.)	/	/
	1 nageur élite	0,30 ± 0,03 s	/	2,0 ± 0,2 (s.a.)	0,37 ± 0,06 s	/
[Prin06]	33 nageurs universitaires	0,28 s	74,3%	/	/	0,57 ± 0,14 **
[Pere06]	38 nageurs de club	0,41 ± 0,11 s	/	1,38 ± 0,38 (s.a.)	/	78 ± 24°
[Pere08]	1 nageur élite	0,40 ± 0,04 s	/	2,05 ± 0,14 (s.a.)	0,47 ± 0,09 s	63 ± 2°

Annexe 2 : Récapitulatif des résultats spécifiques à la phase de contact rapportés lors de virages culbutes crawl

GE / GC : groupe expérimental / groupe contrôle

* Virages ouverts inclus

** Tuck index

s.a. : sans unité

S SILab Fichier Images Saisie Aide D:\Reconstruction 3D du virage NL\2008-04-29_Agen\Images\Virages\Maureen Poillong (Ler flash PF +125343 +125618)\ C8 29-3\00188.jpg D:\Reconstruction 3D du virage NL\2008-04-29_Agen\Images\Virages\Maureen Poillong (Ler flash PF +125343 +125618)\ C8 29-3\00189.jpg D:\Reconstruction 3D du virage NL\2008-04-29_Agen\Images\Virages\Maureen Poillong (Ler flash PF +125343 +125618)\ C8 29-3\00190.jpg D:\Reconstruction 3D du virage NL\2008-04-29_Agen\Images\Virages\Maureen Poillong (Ler flash PF +125343 +125618)\ 12 Cible 1 хy 700 600 500 400 300 200 100 0-50 75 100 125 150 176 25 0 42 , 516 Saisir 1 Annuler 177 275 D:\Reconstruction 3D du virage NL\2008-04-30_Agen\

Annexe 3 : Interface de saisie de Sportlab

Miro	Coordo	oordonnées réelles (m)Coordonnées reconstruites (m)					Écarts de position (m)			
wine	x ₀	Уo	Z ₀	x	У	Z	Δx	Δу	Δz	Δ3D
1	0	-0,5	0,2	0,0026	-0,5209	0,2125	0,0026	-0,0209	0,0125	0,0245
2	0,265	-1,1	0,9275	0,2575	-1,1018	0,9284	-0,0075	-0,0018	0,0009	0,0077
3	2,12	-1,1	0,9325	2,1263	-1,0951	0,9336	0,0063	0,0049	0,0011	0,0080
4	4,12	-1,1	0 <i>,</i> 9475	4,1188	-1,1026	0,9471	-0,0012	-0,0026	-0,0004	0,0028
5	2,12	-1,1	-0,9375	2,1246	-1,1091	-0,9383	0,0046	-0,0091	-0,0008	0,0102
6	0,56	-1,1	-0,9325	0,5553	-1,0850	-0,9339	-0,0047	0,0150	-0,0014	0,0158
7	0	-0,5	-0,2	-0,0002	-0,5265	-0,2111	-0,0002	-0,0265	-0,0111	0,0287
8	0	0	0,2	-0,0010	-0,0009	0,2049	-0,0010	-0,0009	0,0049	0,0051
9	0,265	-0,53	0,9275	0,2698	-0,5190	0,9246	0,0048	0,0110	-0,0029	0,0123
10	2,12	-0,53	0,9325	2,1157	-0,5257	0,9305	-0,0043	0,0043	-0,0020	0,0064
11	4,12	-0,53	0,9475	4,1183	-0,5248	0,9472	-0,0017	0,0052	-0,0003	0,0055
12	2,12	-0,53	-0,9375	2,1144	-0,5423	-0,9320	-0,0056	-0,0123	0,0055	0,0146
13	0,56	-0,53	-0,9325	0,5665	-0,5064	-0,9330	0,0065	0,0236	-0,0005	0,0245
14	0	0	-0,2	-0,0008	0,0124	-0,2048	-0,0008	0,0124	-0,0048	0,0133

Annexe 4 : Exemple de calcul de la précision de reconstruction 3D

Dans cet exemple, le volume de calibration avait pour dimensions 4,12 x 1,1 x 1,885 m. Quatorze mires et cinq caméras ont été utilisées.

```
Annexe 5 : Algorithme de détection des instants de retournement, de contact et de reprise de nage
```

```
//Début du retournement
     SEUIL1 = mean(DATA1(1:80)) - 4 * stdev(DATA1(1:80));
     POINT1 = find(DATA1 < SEUIL1, 1);</pre>
     //Début du contact
     SEUIL2 = mean(DATA2(1:NBVAL2)) - 4 * stdev(DATA2(1:NBVAL2));
     POINT2 = find(DATA2 < SEUIL2, 1) ;</pre>
     for i = POINT2:NBVAL3
       TEST = DATA3(i+1) - DATA3(i);
       if (DATA3(i+1) > 0 \& TEST > 0) then
         POINT3 = i+1;
         break
       end
     end
     //Reprise de nage
     SEUIL3 = mean(DATA4(FinDePoussee:FinDePoussee+80)) + 4 *
stdev(DATA4(FinDePoussee:FinDePoussee+80));
     POINT4 = find(DATA4(FinDePoussee:$) > SEUIL3, 1);
```

Pour le début de retournement, le programme détecte la première valeur de position verticale de la tête (DATA1) pour laquelle la différence avec la moyenne est supérieure à quatre fois l'écart-type ; moyenne et écart-type étant calculés sur les 80 premières valeurs enregistrées, soit une période d'au moins 0,4 s, période durant laquelle le sujet s'approche du mur de virage en nageant à vitesse maximale.

Pour le début de contact, le programme détecte la première valeur de force verticale (DATA2) pour laquelle la différence avec la moyenne est supérieure à quatre fois l'écart-type ; moyenne et écart-type étant calculés sur une période d'enregistrement d'une durée d'au moins 1 s (NBVAL2) et précédant le contact, période durant laquelle les seuls efforts enregistrés sont ceux dus aux faibles mouvements de l'eau. À partir de là, le programme détecte la première valeur croissante et positive de la force horizontale (DATA3).

La reprise de nage en crawl est marquée par l'augmentation de la distance horizontale entre les doigts du nageur (DATA4). Le programme détecte la première valeur pour laquelle la différence avec la moyenne est supérieure à quatre fois l'écart-type ; moyenne et écart-type étant calculés sur les 80 valeurs suivant la fin de poussée (FinDePoussee), soit une période d'environ 0,4 s, période durant laquelle le sujet s'éloigne du mur de virage en conservant une position profilée, bras tendus devant et mains jointes.

Ces détections sont suivies d'un contrôle visuel systématique où les instants de retournement, contact et reprise de nage observés au préalable sont également proposés. L'expérimentateur choisit alors entre l'instant détecté et l'instant observé lequel sera conservé pour marquer la limite de phase.

	Variable	Unité	Description
3mRTT	3 metres Round Trip Time	S	temps au virage
А	Age	ans	âge en date de l'expérimentation
AT	Approach Time	S	temps d'approche
BH	Body Height	m	stature
BM	Body Mass	kg	masse corporelle
BP	Brake Proportion	%	part de placement dans le contact
BT	Brake Time	S	temps de placement
CDe	Contact Depth	m	profondeur au contact
CLLei	Contact Lower Limb extension index		indice d'extension des membres inférieurs au contact
CT	Contact Time	S	temps de contact
CUBei	Contact Upper Body extension index		indice d'extension du haut du corps au contact
D19	Distance at 1.9 m/s	m	position à 1,9 m/s après la fin de poussée
D22	Distance at 2.2 m/s	m	position à 2,2 m/s après la fin de poussée
GDe	Glide Depth	m	profondeur en fin de poussée
GLLei	Glide Lower Limb extension index		indice d'extension des membres inférieurs en fin de poussée
GT	Glide Time	S	temps de glisse
GUBei	Glide Upper Body extension index		indice d'extension du haut du corps en fin de poussée
HPel	Horizontal Peak Impulse	N.s	impulsion horizontale jusqu'au pic de poussée horizontale
HPeIP	Horizontal Peak Impulse Proportion	%	part d'impulsion horizontale avant le pic dans l'impulsion horizontale durant toute la poussée
HPol	Horizontal Push-off Impulse	N.s	impulsion horizontale lors de la poussée
I	Inertia	kg.m²	moment d'inertie transverse minimal lors du retournement
L	Level	%	niveau au 200 m nage libre
IA	lateral Angle	o	angle latéral de poussée au pic
LBI	Lateral Brake Impulse	N.s	impulsion latérale lors du placement
LLLm	Lower Limb Length	m	longueur maximale d'extension des membres inférieurs
LPol	Lateral Push-off Impulse	N.s	impulsion latérale lors de la poussée
nPe	normalized Peak		pic de force horizontale normalisée par le poids du sujet
Pe	Peak	Ν	pic de force horizontale
PeDe	Peak Depth	m	profondeur au pic de poussée horizontale

Annexe 6 : Nomenclature des variables (classées par ordre alphabétique)

	Variable	Unité	Description
PeLLei	Peak Lower Limb extension index		indice d'extension des membres inférieurs au pic de poussée horizontale
PeP	Peak Proportion	%	part de poussée juqu'au pic dans la poussée totale
РеТ	Peak Time	S	temps nécessaire pour atteindre le pic de poussée horizontale lors de la poussée
PeUBei	Peak Upper Body extension index		indice d'extension du haut du corps au pic de poussée horizontale
PoDe	Push-off Depth	m	profondeur en début de poussée
PoLLei	Push-off Lower Limb extension index		indice d'extension des membres inférieurs en début de poussée
РоТ	Push-off Time	S	temps de poussée
PoUBei	Push-off Upper Body extension index		indice d'extension du haut du corps en début de poussée
RD	Rotation Distance	m	position au début du retournement
RT	Rotation Time	S	temps de retournement
SD	Swim resumption Distance	m	position à la reprise de nage
TD	Total Distance	m	longueur de la trajectoire parcourue par la tête du nageur
UBLm	Upper Body Length	m	longueur maximale d'extension du haut du corps
UD	Underwater propulsion Distance	m	position à la limite glisse-coulée
UT	Underwater propulsion Time	S	temps de coulée
V1mR	Velocity 1 metre before Rotation	m/s	vitesse d'approche
vA	vertical Angle	o	angle vertical de poussée au pic
VC	Velocity at Contact	m/s	vitesse au contact
VG	Velocity at Glide	m/s	vitesse en fin de poussée
VIn	Velocity In	m/s	vitesse en entrée de virage, 3 m avant le mur
Vmax	Velocity max	m/s	vitesse maximale atteinte lors du virage
VOut	Velocity Out	m/s	vitesse en sortie de virage, 3 m après le mur
VPe	Velocity at Peak	m/s	vitesse au pic de poussée horizontale
VPo	Velocity at Push-off	m/s	vitesse en début de poussée
VPol	Vertical Push-off Impulse	N.s	impulsion verticale lors de la poussée
VR	Velocity at Rotation	m/s	vitesse au retournement
VS	Velocity at Swim resumption	m/s	vitesse à la reprise de nage
VU	Velocity at Underwater propulsion	m/s	vitesse à la limite glisse-coulée
ΔVPo	Δ Velocity during Push-off	m/s	gain de vitesse pendant la poussée

			Tomps pagó	
Nageuse	Temps total		(dénant inclue)	
		7.5MKTT	(depart inclus)	
Susie O'neill	1'58"24 (1)	25"28 (1)	1'32"96 (5)	
Martina Moravcova	1'58"32 (2)	25"40 (2)	1'32"92 (4)	
Claudia Poll	1'58"81 (3)	26"00 (5)	1'32"82 (3)	
Nadejda Tchemezova	1'58"86 (4)	26"28 (8)	1'32"58 (1)	
Kerstin Kielgass	1'58"86 (4)	26"16 (6)	1'32"70 (2)	
Natalya Baranobskay	1'59"28 (6)	25"68 (4)	1'33"60 (7)	
Camelia Potec	1'59"46 (7)	26"16 (6)	1'33"30 (6)	
Luna Wang	1'59"55 (8)	25"44 (3)	1'34"11 (8)	

Annexe 7 : Extraits de l'analyse de la finale du 200 m nage libre féminin des JO de Sydney en 2000 [AISO0]

Le temps aux virages est la somme des temps aux trois virages de l'épreuve. Le temps d'un virage est le temps mis par la nageuse pour parcourir les 7,5 mètres qui précèdent le mur et les 7,5 mètres suivants (7.5mRTT).

Le temps nagé est la différence entre le temps total et le temps aux virages.

	[/		
Nagour	Tompstotal	Temps aux virages	Temps nagé
Nageur	Temps total	7.5mRTT	(départ inclus)
Pieter van den Hoogenband	1'45"35 (1)	22"88 (3)	1'22"47 (1)
Ian Thorpe	1'45"83 (2)	22"68 (2)	1'23"15 (2)
Massimiliano Rosolino	1'46"65 (3)	22"56 (1)	1'24"09 (4)
Josh Davis	1'46"73 (4)	23"00 (5)	1'23"73 (3)
Paul Palmer	1'47"95 (5)	23"36 (8)	1'24"59 (5)
James Salter	1'48"74 (6)	23"32 (7)	1'25"42 (6)
Rick Say	1'48"76 (7)	23"08 (6)	1'25"68 (7)
Grant Hackett	1'49"46 (8)	22"96 (4)	1'26"5 (8)

Annexe 8 : Extraits de l'analyse de la finale du 200 m nage libre masculin des JO de Sydney en 2000 [AIS00]

Le temps aux virages est la somme des temps aux trois virages de l'épreuve. Le temps d'un virage est le temps mis par la nageuse pour parcourir les 7,5 mètres qui précèdent le mur et les 7,5 mètres suivants (7.5mRTT).

Le temps nagé est la différence entre le temps total et le temps aux virages.
		Temps aux virages	Temps nagé
Nageuse	Temps total	5mRTT	(départ inclus)
Aurore Mongel	1'57"63 (1)	15"64 (1)	1'41"99 (4)
Ophélie-Cyrielle Etienne	1'58"18 (2)	17"56 (8)	1'40"62 (1)
Camille Muffat	1'58"36 (3)	16"60 (5)	1'41"76 (3)
Alena Popchanka	1'58"46 (4)	17"16 (7)	1'41"30 (2)
Coralie Balmy	1'58"65 (4)	16"28 (3)	1'42"37 (6)
Céline Couderc	1'58"97 (6)	16"40 (4)	1'42"57 (7)
Sopie Huber	1'59"31 (7)	17"12 (6)	1'42"19 (5)
Mylène Lazare	2'00"85 (8)	15"84 (2)	1'45"01 (8)

Annexe 9 : Extraits de l'analyse de la finale du 200 m nage libre féminin des Championnats de France de 2008 [FFN08]

Le temps aux virages est la somme des temps aux trois virages de l'épreuve. Le temps d'un virage est le temps mis par la nageuse pour parcourir les 5 mètres qui précèdent le mur et les 5 mètres suivants (5mRTT).

Le temps nagé est la différence entre le temps total et le temps aux virages.







Les classes des histogrammes ont été obtenues grâce à la formule de Sturges. Pour garantir la pertinence des résultats (éviter les histogrammes creux), un nombre minimal de classes a été défini (n = 3).

La variable I n'est pas représentée ici.

Les variables TD, vA, L, PeP, IA et Δ VPo sont notées respectivement TT, VA, L200, X.PeT, LA et X.VPo.

Annexe 11 : Relation non-linéaire entre la variable réponse (3mRTT) et chacune des variables explicatives pour le groupe de nageuses expertes





La relation entre la variable réponse 3mRTT et chacune des variables explicatives est estimée avec des splines cubiques ; le paramètre de lissage est estimé par validation croisée généralisée.

Les variables I, AT, BH et BM ne sont pas représentées ici.

Les variables TD, vA, L, PeP, IA et Δ VPo sont notées respectivement TT, VA, L200, X.PeT, LA et X.VPo.

	LBI	VS	٧U	GT	UT	D19	V1mR	ΠD	VPol	AT	SD	RT	PoDe	TD	GDe	٨٨	٩	۲IN	LPol	A	CDe	PeDe	_	HPel	PeLLei	HPeIP	CUBei	РеТ
3mRTT	-0,76	-0,68	-0,67	0,56	-0,55	-0,47	0,47	0,47	-0,45	0,44	-0,40	0,40	0,38	0,38	0,37	-0,35	-0,35	0,35	0,34	0,32	0,32	0,31	-0,31	0,26	0,23	0,20	-0,20	0,19
LBI		0,60	0,48	-0,61	0,53	0,11	-0,45	-0,55	0,33	-0,09	0,34	-0,58	-0,31	-0,36	-0,25	0,39	0,55	0,08	-0,55	-0,33	-0,36	-0,21	0,13	-0,27	0,11	-0,06	0,32	-0,22
VS			0,57	-0,40	0,74	0,61	-0,37	-0,30	0,43	-0,28	0,69	-0,14	-0,60	-0,36	-0,47	0,38	0,40	-0,49	-0,46	-0,13	-0,68	-0,45	0,51	-0,27	-0,35	-0,34	0,29	-0,17
VU				-0,70	0,71	0,55	-0,05	-0,52	0,72	-0,57	0,57	0,06	-0,57	-0,46	-0,79	0,25	0,58	-0,41	0,03	-0,52	-0,54	-0,75	0,55	0,39	0,08	0,37	0,39	0,45
GT					-0,51	0,13	0,01	0,97	-0,53	0,38	-0,12	0,30	0,38	0,36	0,48	-0,54	-0,29	-0,19	0,24	0,09	0,20	0,50	-0,34	-0,01	-0,04	-0,11	-0,48	-0,16
UT						0,56	-0,31	-0,36	0,57	-0,36	06'0	0,04	-0,45	-0,35	-0,57	0,40	0,47	-0,52	-0,50	-0,35	-0,57	-0,52	0,66	0,12	0,04	0,15	0,57	0,16
D19							-0,30	0,32	0,46	-0,31	0,77	0,24	-0,39	-0,16	-0,49	-0,01	0,40	-0,88	0,03	-0,47	-0,55	-0,42	0,53	0,25	-0,16	0,08	0,13	0,23
V1mR								-0,06	0,08	-0,21	-0,36	0,64	-0,18	-0,51	-0,33	-0,08	-0,05	0,64	0,74	0,33	-0,09	-0,34	0,08	0,46	-0,26	0,34	0,13	0,37
UD									-0,41	0,35	0,06	0,31	0,27	0,34	0,32	-0,59	-0,16	-0,34	0,24	-0,13	0,04	0,35	-0,22	0,14	0,05	0,04	-0,43	-0,01
VPol										-0,26	0,42	0,03	-0,45	-0,31	-0,78	0,69	0,61	-0,22	0,16	-0,25	-0,42	-0,72	0,77	0,51	-0,08	0,41	0,84	0,59
AT											-0,23	-0,54	0,00	0,58	0,26	-0,16	-0,31	0,43	-0,24	-0,17	-0,02	0,17	-0,04	-0,01	0,21	0,08	-0,03	0,11
SD												0,18	-0,41	-0,24	-0,50	0,10	0,46	-0,72	-0,40	-0,48	-0,64	-0,44	0,59	0,20	0,08	0,18	0,36	0,19
RT													0,07	-0,38	-0,20	-0,20	0,12	-0,33	0,59	0,24	-0,05	-0,13	0,07	0,43	-0,13	0,23	-0,01	0,23
PoDe														0,51	0,83	-0,05	-0,11	0,06	0,03	0,38	0,91	0,88	-0,74	-0,23	0,39	-0,16	-0,30	-0,38
TD															0,58	-0,14	-0,37	-0,16	-0,20	-0,04	0,51	0,52	-0,30	-0,11	0,41	-0,10	-0,28	0,00
GDe																-0,24	-0,44	0,16	-0,24	0,44	0,79	0,98	-0,83	-0,61	0,18	-0,52	-0,59	-0,68
vA																	0,33	0, 10	-0,21	0,36	0,03	-0,19	0,44	-0,11	-0,25	-0,16	0,81	-0,01
А																		-0,21	0,10	-0,35	-0,36	-0,33	0,17	0,37	0,36	0,40	0,45	0,27
VIn																			0,16	0,32	0,20	0,10	-0,27	-0,08	0,01	0,09	0,11	-0,06
LPol																				0,07	0,09	-0,21	-0,06	0,59	-0,10	0,40	-0,08	0,48
IA																					0,48	0,44	-0,28	-0,51	-0,52	-0,63	-0,02	-0,53
CDe																						0,80	-0,68	-0,29	0,22	-0,24	-0,30	-0,36
PeDe																							-0,83	-0,59	0,19	-0,49	-0,54	-0,70
L																								0,42	-0,33	0,29	0,73	0,56
HPel																									0,38	0,93	0,39	0,95
PeLLei																										0,58	-0,06	0,32
HPeIP																											0,36	0,87
CUBei																												0,45

Annexe 12 : Matrice de corrélation entre le premier groupe de variables (classées par valeur absolue de corrélation avec la variable réponse 3mRTT) pour le groupe de nageuses expertes

Annexe 13 : Matrice de corrélation entre le premier groupe de variables (classées par valeur absolue de corrélation avec la variable réponse 3mRTT) et le second groupe de variables pour le groupe de nageuses expertes

	ст	D22	LLLM	nPe	GUBei	РеР	BH	VPo	вт	Pe	PeUBei	PoT	CLLei	GLLei	PoLLei	RD	VPe	Ŋ۵	UBLm	Vmax	ΔVΡο	VR	HPol	ВР	BM	PoUBei	VC	Vout
3mRTT	0,18	0,17	0,16	0,15),14	0,14	0,12	0,11	60'0	0,09	60'0	60'0	60'0	60'0	0,07	0,07	0,07	0,07	0,06	0,05	0,05	0,05	0,05	0,04	0,03	0,03	0,02	0,00
LBI	0,23 (0,30 (0,01 -	0,08 -	0,18 (0,04 (0,14 -	0,26 -	0,13 (- 00'0	0,15 (0,37 (0,14 (0,03 (0,19 (0,03 -	0,04 (0,19 -	0,35 -	- 60'0	0,27 (- 70,07	0,26 (0,22 (0,11 (0,35 -	0,22 (0,12 (
VS	0,00	0,08 -	-0,04	-0,13	0,18	-0,27 -	0,31 -	-0,17	-0,11	-0,04	0,08	0,12 -	0,03	0,01 -	-0,01	0,07	-0,19	0,14 -	0,10 -	0,11 -	0,17 -	0,12 -	- 0,03 -	-0,15	0,13 -	0,10	-0,14	0,41 -
VU	0,37	-0,02	-0,14 .	0,45 .	0,30	0,44 .	0,54	-0,50 .	-0,02 .	0,51 .	0,41	0,39	-0,35	0,05	-0,33 .	0,31	0,26	0,61	0,26	0,48	0,57	-0,06	0,49	-0,15 -	0,34	0,35	-0,59 .	0,26
GT	0,23	0,69	0,42	-0,06	-0,63	-0,17	0,13	-0,07	0,26	0,10	-0,49	-0,03	-0,16	0,25	0,21	-0,60	0,17	-0,17	0,28	00'00	-0,02	0,67	0,10	0,22	0,30	-0,61	-0,07	0,02
UT	0,20	0,11	-0,22	0,23	0,42	0,17	0,37	-0,32	0,03	0,21	0,43	0,17	-0,33	0,18	-0,14	0,06	0,24	0,38	-0,19	0,36	0,35	0,09	0,20	-0,05	0,08	0,55	-0,30	0,33
D19	0,54	0,71	0,24	0,29	-0,35	0,12	0,81	-0,57	0,07	0,51	-0,09	0,48	-0,57	0,35	-0,22	-0,31	0,31	0,46	0,52	0,46	0,56	0,64	0,58	-0,11	0,61	-0,22	-0,66	0,47
V1mR	-0,04	-0,17	0,27	0,03	0,35	0,31	0,25	-0,44	-0,31	0,13	0,52	0,28	-0,24	-0,66	-0,48	0,69	-0,24	0,09	0,33	-0,14	0,37	-0,37	0,33	-0,35	0,22	0,23	-0,36	-0,14
UD	0,43	0,84	0,41	0,12	-0,64	-0,02	0,32	-0,26	0,34	0,31	-0,42	0,09	-0,30	0,39	0,17	-0,69	0,35	0,01	0,36	0,19	0,17	0,80	0,28	0,23	0,44	-0,58	-0,26	0,15
VPol	0,15	-0,02	-0,01	0,08	0,17	0,46	0,58	-0,37	-0,44	0,19	0,55	0,60	-0,54	-0,05	-0,70	0,33	0,02	0,13	0,03	-0,08	0,35	-0,26	0,53	-0,56	0,31	0,51	-0,38	0,24
AT	-0,03	0,18	0,00	-0,02	-0,21	0,10	-0,25	0,18	-0,09	-0,17	0,03	0,06	0,14	0,35	0,04	-0,57	0,06	-0,38	-0,47	-0,30	-0,26	0,12	-0,08	-0,10	-0,30	0,01	0,39	0,35
SD	0,47	0,52	-0,05	0,34	0,16	0,19	0,57	-0,53	0,22	0,41	0,26	0,25	-0,47	0,39	-0,06	-0,25	0,44	0,47	0,02	0,53	0,52	0,49	0,37	0,06	0,33	0,29	-0,49	0,46
RT	0,37	0,34	0,14	0,06	0,19	0,16	0,52	-0,58	0,12	0,34	0,18	0,25	-0,42	-0,21	-0,18	0,35	0,12	0,41	0,55	0,33	0,55	0,14	0,44	00'0	0,57	-0,02	-0,65	-0,10
PoDe	-0,11	-0,09	0,22	-0,35	-0,24	: -0,26	-0,51	0,63	0,42	-0,30	-0,55	-0,54	0,27	0,22	0,52	-0,22	0,15	-0,36	: -0,22	-0,15	: -0,61	-0,02	, -0,43	0,54	-0,08	-0,28	0,43	-0,70
TD	0,18	0,18	-0,49	-0,18	0,35	-0,08	-0,33	0,33	0,13	0,25	-0,46	0,05	0,31	0,71	0,29	: -0,64	0,19	; -0,1C	, -0,28	0,01	-0,28	0,11	-0,17	0,11	-0,24	-0,33	0,37	0,19
GDe	-0,31	-0,12	-0,16	-0,44	-0,31	-0,58	-0,74	0,78	0,37	- 0,50	-0,73	-0,69	0,60	,0,18	0,72	-0,38	-0,08	-0,48	-0,27	-0,23	-0,76	0,08	-0,72	, 0,55	-0,36	-0,49	0,67	-0,50
vA	-0,48	-0,48	-0,19	-0,55	0,27	-0,15	-0,07	3 0,40	-0,56	-0,54	0,29	0,08	3 -0,01	-0,27	-0,37	0,44	-0,45	-0,45	-0,41	-0,55	-0,43	-0,61	-0,20	-0,47	-0,20	0,50	0,34	5 -0,13
А	3 0,38	t 0,17	0,01	5 0,13	0,17	0,37	L 0,46	-0,28	5 0,34	9 0,42	0,29	3 0,04	-0,28	9 0,16	5 0,02	0,10	5 0,41	5 0,07	7 0,11	9 0,16	3 0,20	0,10	9 0,32	9 0,24	0,67	0,31	-0,39	3 -0,16
VIn	-0,58	9'0- 9	⊧ 0,1C	-0,16	9 0,34	0,06	-0,61	7 0,42	4 -0,25	-0,39	0,36	-0,33	3 0,32	9 -0,59	4 -0,05	0,43	-0,35	-0,55	-0,87	-0,59	-0,48	7 -0,6(-0,39	2 -0,09	-0,6(3 0,42	5 0,60	5 -0,38
LPol	7 0,25	8 0,16	5 0,34	6 0,13	-0,19	8 0,35	5 0,48	-0,4	7 -0,1	0 0,35	0 0,10	0 0,44	1 -0,38	8 -0,29	3 -0,4	0,36	7 0,01	5 0,15	8 0,68	3 0,02	5 0,42	2 -0,0	0 0,58	8 -0,2!	1 0,55	1 -0,23	-0,5!	2 -0,1!
IA	2 -0,6	6 -0,48	5 -0,0	8 -0,8(2 0,17	0 -0,6	4 -0,4	3 0,53	0, 3	5 -0,8(2 -0,2(6 -0,3(5 0,42	3 -0,5	t 0,08	3 0,50	-0'- 6	7 -0,5!	4 -0,0	8 -0,6	2 -0,5	9 -0,5	9 -0,6(9 -0,18	3 -0,3	7 -0,1	t 0,51	7 -0,4
CDe	9 -0,33	7 -0,3(9 -0,2	4 -0,3	5 -0,2	8 -0,3(8 -0,6	9 0,68	L 0,13	6 -0,4!	5 -0,5	2 -0,4(L 0,36	7 0,03	0,34	7 -0,0	4 -0,0	.e'o- c	3 -0,2	3 -0,2	8 -0,6	2 -0,2	8 -0,4	9 0,29	6 -0,3	8 -0,2	3 0,54	9 -0'6
PeDe	3 -0,2	3 -0,0	3 -0,0	1 -0,4	9 -0,3	5 -0,5	2 -0,6	2 0,79	9 0,4	7 -0,4	1 -0,7	4 -0,7	1 0,53	6 0,17	9 0,7:	5 -0,3	6 -0,0	3 -0,5	2 -0,2	3 -0,2	-0,7	6 0,12	9,0- 6	4 0,59	7 -0,2	1 -0,4	0 0,63	5 -0,5
L	3 0,13	3 0,18	t 0,08	0,21	3 0,19	1 0,36	9 0,62	5 -0,6	0-0,5	0,17	2 0,64	0,72	3 -0,6	0,0- 6	7 -0,7	7 0,16	0,0- 7	L 0,28	-0,0-	3 0,03	0,60	0,0- 8	0,56	4 -0,7	0,07	3 0,51	5 -0,4	0,66
HPel	5 0,65	4 0,35	0 0,02	1 0,6(7 0,15	20,94	1 0,65	6 -0,7	1 0,0(1 0,72	9 0,62	5 0,65	4 -0,7.	9 0,15	1 -0,5	8 0,07	2 0,57	5 0,51	2 0,25	7 0,38	0,72	3 0,08	3 0,9(1 -0,2,	5 0,55	3 0,38	8 -0,7.	4 0,2(
PeLLei	1 0,5(5 0,14	0 -0,51	2 0,42	0,17	9 0,55	9 -0,1	0-0'0	7 0,72	3 0,42	5 0,05	5 -0,1.	4 0,04	4 0,65	1 0,4:	1 -0,3	0,8	5 0,25	1 -0,3	0,47	3 0,1(7 0,1:	5 0,13	3 0,62	9 0,1(1 0,25	0-0'0	3 -0,1,
HPeIP	2 0,61	8 0,26	5 0,00	8 0,72	3 0,20	36'0 9	9 0,45	2 -0,61	9 0,17	9 0,75	2 0,65	3 0,45	9'0- 9	6 0,24	3 -0,4	1 -0,0	7 0,70	6 0,45	1 -0,0	3 0,40	5 0,58	1 0,07	7 0,76	3 -0,0	0,35	0,51	5 -0,6	l 0,13
CUBei	0,12	0,18	0,0(30'0	0,38	0,36	0,29	0,12	0,45	0,05	0,72	0,38	0,46	0,16	0,63	0,34	0,07	0,16	0,41	0,35	0,05	0,43	0,27	0,53	0,00	0,80	0,05	0,11

	СТ	D22	LLLm	nPe	GUBei	РеР	ВН	VPo	BT	Ре	PeUBei	PoT	CLLei	GLLei	PoLLei	RD	VPe	NG	UBLm	Vmax	Δνρο	VR	IPOI	ВР	BM	PoUBei	VC	VOut
PeT	0,62	0,28	0,10	0,55	0,17	0,92	0,64	: -0,74	-0,19	0,59	0,66	0,82) -0,62	0,23	-0,67	0,08	0,44	0,52	0,14	0,32	0,73	-0,05	0,87	-0,43	0,38	0,42	-0,65	0,46
СТ		0,73	-0,19	0,59	-0,05	0,63	0,66	-0,84	0,52	0,80	0,11	0,48	t -0,40	0,69	0,02	, -0,39	0,80	0,75	0,43	0,81	0,85	0,56	0,73	0,24	0,70	90,0-	-0,79	0,42
D22			0,30	0,38	5 -0,48	t 0,24	0,68	1 -0,63	7 0,36	0,60	7 -0,16	2 0,38	9 -0,54	5 0,57	00'0 6	5 -0,67	2 0,57	7 0,36	0,43	7 0,49	0,56	0,89	0,60	3 0,14	0,65	5 -0,36	9 -0,60	40,45
LLLm				0,18	1 -0,55	-0,02	0,33	2 -0,14	-0,17	0,25	-0,0-	-0,02	5 -0,49	-0,46	7 -0,29	5 -0,05	-0,12	-0,27	0,37	-0,27	0,01	0,41	0,24	-0,13	0,27	-0,26	2 -0,19	-0,1
nPe					-0,02	0,74	4 0,42	5 -0,62	2 0,34	0,88	0,32	2 0,26	-0,55	3 0,29	1 -0,17	-0,2(7 0,74	0,68	5 0,17	0,70	0,67	3 0,44	1 0,64	3 0,18	0 0,23	0,17	3 -0,62	0,26
GUBei						0,19	- 0,1	3 -0,16	-0,02	-0,11	0,69	-0,02	1 0,22	-0,23	5 -0,01	0,61	-0,0-	0,23	-0,35	0,12	0,19	F -0,58	-0,11	1 -0,03	, -0,20	0,75	1 -0,03	0,03
PeP							0,51	8 -0,63	7 0,10	0,74	0,66	0,54	8 -0,62	3 0,26	5 -0,4(2 0,00	t 0,67	1 0,50	2 0,02	0,42	0,62	t 0,04	0,80	2 -0,11	0,37	0,45	0,0-0	3 0,24
BH								-0, 8	.0'0- 9	3 0,70	0 0,32	6 0,74	s -0,7	6 0,13	5 -0,5!	5 -0,0	6 0,34	9 0,52	7 0,62	7 0,41	8 0,82	3 0,42	9 0,90	7 -0,3	7 0,75	2 0,01	5 -0,9	0 0,48
VPo									-0,2	S,-0,8	2 -0,5	9 -0,8	5 0,63	4 -0,1	3 0,7(5 -0,0	3 -0,5	7 -0,7	7 -0,5	1 -0,7	6'0- 8	5 -0,4	6 -0,8	0,67	9 -0,6	1 -0,1	1 0,9 5	9 -0,6
BT										0,4(4 -0,3	5 -0,4	2 0,1	2 0,5	4 0,78	2 -0,4	8 0,73	0,2	8 0,0	4 0,6	2 0,33	7 0,5!	0'0- 0	ie,0 8	7 0,3(1 -0,2	5 -0,1	2 -0,2
Pe											0,2,	3 0,31	1 -0,6	6 0,3	9 -0,1	7 -0,2	0,7	3 0,7	6 0,4	2 0,7	5 0,8:	8 0,5	5 0,8(2 0,2	1 0,6	8 0,0	3 -0,8	7 0,23
PeUBei												0,4	6 -0,4	5 -0,2	8 -0,5	7 0,4	7 0,1	8 0,2	7 -0,2	0,0 0	5 0,4	1 -0,3	1 0,4	3 -0,4	5 0,0	2 0,8	2 -0,3	3 0,2
РоТ													-0,5	3 0,1	7 -0,7	8 0,0	2 0,0	2 0,4	3 0,3	2 0,2	7 0,8	7 0,0	12 0,8	2 -0,7	7 0,3	5 0,1	7 -0,6	1 0,7
CLLei														-0,0	5 0,6	0,0 6	1 -0,4	4 -0,3	.1 -0,2	4 -0,2	2 -0,5	2 -0,3	1 -0,8	8 0,3	1 -0,4	.7 -0,2	4 0,6	7 -0,2
GLLei															0,3	8 -0,7	1 0,7	2 0,3	4 -0,1	2 0,5	1 0,2	8 0,5	3 0,2	9 0,3	7 0,2	7 -0,1	7 -0,1	6 0,3
PoLLei																-0,3	4 0,2	0 -0,1	2 -0,1	7 0,2	7 -0,7	7 0,2	5 -0,6	8 0,8	9(-0,0	0 -0,3	6 0,3	9 -0,3
RD																	-0,5	2 0,0	0 0,1	2 -0,2	8 0,0	7 -0,7	1 -0,0	4 -0,3	4 -0,0	1 0,4	0-0,0	6 -0,2
VPe																		0,5	5 0,0	2 0,7	0 0,5	8 0,5	2 0,5	5 0,5	4 0,4	3 0,1	8 -0,5	7 0,0
VG																			0,4	∂ 0,9	∂ ′0 ∠	7 0,2	9 0,6	0,0 0	0 0,3	1 0,0	6,0- 6	3 0,4
UBLm																				0,3	8 0,5	1 0,3	7 0,4	1 -0,0	9 0,7	0- 80	59 -0,6	2 0,1
Vmax																					0,8	8 0,5	6 0,4	51 0,4	8 0,3	.1 -0,(94 -0,(1 0,3
ΔVPo																						0,3	3 0,8	μ2 -0,(18 0,5	18 0,1	42 -0,9	6 0,6
VR																							0,3	33 0,4	6 0,4	.3 -0,4	39 -0,4	6 0,2
HPol																								0-	.5 0,6	23 0,1	3 ' 0- 6(t9 0,4
BP																									0,1	23 -0,2	78 0,C	14 -0,4
BM																										-0,2	01 -0,7	0,C
VC.																											-0'	,37 0,C

Annexe 14 : Matrice de corrélation entre le second groupe de variables (classées par valeur absolue de corrélation avec la variable réponse 3mRTT) pour le groupe de nageuses expertes

	Q	Pe	ч		p	Ų	Ŧ	Bei	Lei	e	4	LLei	Σ	еT	elP	oT	еР	/Po	P	ŗ	JBei	Ро	Е	19	۲m	De	лах	Lei
	~	>	4		F	>	B	C	С С	<u>а</u>	_	Pol	8	ď	ЧН	ď	ď	Ā		0	Pol	>	H		UB	Pe	2 N	GL
3mRTT	-0,88	5 0,82	2 0,79	0,71	6 0,68	9 -0,66	2 -0,66	3 -0,65	3 -0,65	4 -0,61	9 -0,60	9 -0,60	3 -0,60	1 0,55	3 0,54	8 0,52	3 0,49	5 0,48	6 -0,48	3 0,48	6 -0,48	8 -0,46	3 -0,44	9 -0,38	7 -0,36	5 -0,35	2 0,35	9 -0,33
RD		-0,6	3 -0,9	19 0, 8	8 -0,5	78 0,5	8 ' 0 6t	54 0,8	73 0,4	51 0,6	54 0,6	72 0,3	t2 0,8	8 -0,3	0 -0,3	2 -0,2	9 -0,2	-0,3	59 0,2	1 -0,2	t1 0,6	₊1 0,2	22 0,6	0,3	15 0,4	39 0,1	-0,4	50 0,1
VPe			0,6	73 -0,4	7 0,5	52 -0,7	6 -0,4	50-0,5	28 -0,7	57 -0,5	57 -0,6	23 -0,7	71 -0,4	.6 0,5	0 0,6	8 0,5	8 0,5	6 0,4	16 -0,5	02 0,4	t4 -0,4	22 -0,4	71 -0,2	29 -0,0	59 -0,1	1 -0,3	2 0,4	0, -0, 6
AT				0,0	22 0,3	9.0-9	8 -0,6	0 -0,6	4 -0,2	7 -0,6	0 -0,6	:0 -0,2	-0,1	48 O,1	33 0,3	13 0,0	33 0,1	58 0,2	5 -0,1	32 -0,0	-0, ⁷	7 -0,2	-0,1	1 -0,2	:e -0,E	0-0,1	31 0,3	0,0- 0;
L					-0,2	38 0,5	46 0,5	47 0,7	91 0,1	35 0,5	11 0,9	36 0,2	43 0,6	5 -0,2	-7 -0,3	0- 09	7 -0,3	6 -0,5	36 0,4	0 - O	42 0,6	13 0,5	0,4	36 0,2	.6 0,2	16 0,4	6 -0,9	53 0,2
ID						-0	70 -0, ²	56 -0, ^z	5'0- 6t	34 -0,3	58 -0,5	3'0- 69	52 -0,2	78 0,3	38 0,1	56 0,5	33 0,1	77 0,2	72 -0,3	54 0,6	57 -0,4	72 -0,2	37 -0,0	6 -0'	27 0,1	1 -0,2	50 0,6	54 -0,5
VC							0,7	0,0,6	9 0,4	F, 0, 3	8 0,5	1 0,5	7 0,6	30 -0,	3 '0- 6t	24 -0,6	32 -0,8	35 -0,7	0,0	22 -0,5	2 0,5	1°0 9	2 0,3	5 0,2	4 0,2	7 0,7	44 -0, ⁵	5 0,5
BH								3,0	38 0,2	20 0,4	56 0,4	13 0,3	34 0,5	44 -0,3	36 -0,	43 -0,2	34 -0,3	55 -0,3	19 0,2	32 -0,2	92 0,7	ł2 0,2	16 0,7	0,5	L8 0,5	27 0,2	65 -0,4	30 0,1
CUBel									0,9	24 0,2	15 0,6	97 0,4	22 0,8	53 -0,	33 -0,	65 -0,	39 -0,	37 -0,	56 0,4	70 -0,	32 0,9	27 0,4	15 0,4	13 0,0	27 0,1	24 0,2	60 -0,	76 0,3
CLLEI										0,2	53 0,3	18 0,9	49 0,2	02 -0,	13 -0,	0- 20,	01 -0,	02 -0,	i'0 60	0- 00	13 0,3	0 00	52 -0,	50 0,	45 -0,	10 0,2	17 -0,	11 0,7
Pe											0	21 0,3	52 0,4	42 -0,	30 -0,	35 0,(31 0,(48 -0,	45 -0,	18 0,(56 0,3	44 0,0	28 0,5	08 0,(15 0,4	30 0,3	35 -0,	33 0,3
A												0,0	24 0,5	67 -0,	42 -0,	77 -0,	51 -0,	53 -0,	70 0,4	79 -0,	41 0,6	42 0,4	18 0,2	11 -0,	34 0,3	40 0,3	68 -0,	83 0,3
POLLEI													0	19 -0,	34 -0,	15 -0,	18 -0,	32 -0,	14 0,	12 -0,	77 0,	21 0,	77 -0,	50 0,	48 -0,	24 0,	55 -0,	0 20
DIVI														-0,	30 -0,	96 -0,	91 -0,	92 -0,	95 0,	88 -0,	43 0,	93 0,3	13 0,	i'0 60	14 0,4	79 0,2	33 -0,	66 0,(
															Ő	63 0,	96 0,	74 0,	68 -0,	53 0,	23 -0,	78 -0,	30 0,	31 -0,	37 0,	77 -0,	13 0,	33 -0,
Рот																0,0	78 0,9	. 0 88	94 -0,	96 0,	47 -0,	85 -0,	27 -0,	05 -0,	35 -0,	72 -0,	46 0,	74 -0,
PoP																	°,	84 0,	84 -0,	66 0 ,	25 -0,	88 -0,	06 0,	12 -0,	12 0,	82 -0,	18 0,	46 -0,
																		Ő	93 -0,	75 0,	53 -0,	,97 -0,	,05 -0,	,07 -0,	11 -0,	,88 -0,	48 0,	,48 -0,
RP																			o,	82 0,	49 -0,	89 -0,	20 -0,	,15 -0,	32 0,	77 -0,	50 0,	68 -0,
СТ																				o,	,39 0,	,73 0,	32 -0,	,20 -0,	38 -0	,61 0,	41 -0,	,73 0,
Pol IRei																					0-	9 000000000000000000000000000000000000	26 0,	,01 -0	,08 0,	28 -0	,70 0,	40 -0
VPo																						, O	02 0,	0- 60	,03 -0	87 0,	,26 -0	40 0,
lllm																							Ó	56 0,	82 -0	.16 0,	,13 -0	,46 0,
D19																								, O	54 0,	,24 0,	,01 -0	,10 -0
UBLm																									0	,05 0,	,36 -0	,47 -0
PeDe																										0-	,39 0,	,28 -0
Vmax																											0	0,52 0

Annexe 15 : Matrice de corrélation entre le premier groupe de variables (classées par valeur absolue de corrélation avec la variable réponse 3mRTT) pour le groupe de nageurs experts

Annexe 16 : Matrice de corrélation entre le premier groupe de variables (classées par valeur absolue de corrélation avec la variable réponse 3mRTT) et le second groupe de variables pour le groupe de nageurs experts

	PeLLei	nPe	вт	VR	GDe	DV	D22	QN	VOut	VPol	VS	A	GUBei	RT	LBI	PeUBei	HPel	٧U	PoDe	۲IN	INPOI	UT	٨٨	SD	GT	CDe	LPol	V1mR
3mRTT	0,33	0,33	0,32	0,30	0,27),26	0,25	0,22	0,22	0,21	0,20	0,20	0,20	0,18	0,15	0,14),14),13	0,11	0,11	0,11	0,08	0,07	0,06	0,05	0,03	0,03	0,02
RD	0,25 -(0,19 -(0,26 -(0,29 (0,08 -(0,36 (0,35 -(0,21 -(0,28 -(0,25 -(0,32 -(0,08 -(0,22 -(0,48 -(0,01 -(0,29 -(0,07 (0,05 (0,02 -(0,37 (0,27 -(0,07 0	0,03 -()- 60'C	0,01 -(0,07 -(0,03 -(0,17 0
VPe	0,44	0,35 (0,54 (0,14 -	0,26	0,40 -	0,15 (0,42	0,14	0,21 (0,23 (0,25 (0,06	0,08	0,15 -	0,02	0,25 (0,56 (- 70,07	- 60'0	0,01	0,04 -	0,14 -	0,13	0,33 -	0,01 -	0,01	0,35 -
AT	- 0,07	-0,30 -	-0,35 -	0,44	-0,12 -	0,26	- 0,44 -	-0,41 -	-0,42 -	-0,21 -	-0,24	0,17 -	-0,01 -	- 0,64 -	-0,15 -	- 0,08 -	-0,27	0,04	- 90'0	0,56	-0,48	0,18	0,20 -	- 0,04 -	-0,22 -	- 90'0	-0,02 -	0,36
L	0,11 .	0,23	0,52 .	-0,57	0,41 .	-0,27	0,56	0,36	-0,14 -	-0,15	0,35 .	0,12	-0,10	0,39 .	. 60,0	-0,01	-0,08 -	0,12	0,32	-0,35	0,15 .	-0,48	-0,37	-0,42 .	0,22	0,27	0,01 .	-0,26
TD	-0,76	-0,16	0,09	-0,31	-0,04	0,57	0,31	0,37	-0,33	-0,15	-0,14	-0,10	-0,76	0,13	0,32	-0,62	0,11	0,06	0,12	0,07	0,13	-0,49	-0,20	-0,54	0,48	0,26	0,21	-0,39
VC	0,20	0,02	0,63	0,11	0,52	-0,49	0,29	0,30	0,24	0,02	-0,33	0,11	-0,11	0,40	-0,25	-0,07	-0,50	-0,12	0,53	-0,13	-0,18	0,04	0,03	0,17	0,16	0,48	-0,43	-0,39
BH	0,06	-0,10	0,15	0,12	0,13	-0,44	0,37	0,12	0,35	0,33	0,15	0,07	0,20	0,58	-0,41	0,37	-0,09	0,22	0,20	-0,29	0,13	0,13	0,18	0,28	-0,11	0,16	-0,16	-0,26
CUBei	0,30	-0,32	0,51	0,02	0,11	-0,65	0,05	0,01	0,13	-0,09	-0,08	0,20	0,34	0,44	-0,23	0,48	-0,30	-0,01	0,16	-0,27	-0,17	0,21	-0,14	0,26	-0,15	0,11	-0,22	-0,17
CLLei	0,84	0,18	0,12	0,31	0,06	-0,52	-0,40	-0,27	0,21	0,12	-0,17	0,25	0,57	-0,27	-0,15	0,38	-0,33	-0,33	-0,10	0,12	-0,31	0,46	0,27	0,49	-0,32	-0,23	-0,22	0,29
Pe	0,11	0,81	-0,07	-0,44	0,22	-0,06	0,71	0,50	0,26	0,44	0,61	-0,24	-0,10	0,37	0,02	-0,07	0,52	0,06	-0,07	-0,54	0,72	-0,48	-0,01	-0,26	0,35	-0,10	0,21	-0,38
А	0,17	0,25	0,67	-0,56	0,29	-0,32	0,52	0,58	-0,29	-0,08	0,10	0,25	-0,20	0,30	0,21	-0,06	-0,09	-0,27	0,18	-0,32	0,13	-0,53	-0,28	-0,45	0,50	0,14	0,18	-0,55
PoLLei	0,84	0,11	0,25	0,36	0,20	-0,61	-0,37	-0,28	0,16	-0,02	-0,26	0,24	0,52	-0,23	-0,26	0,34	-0,46	-0,28	0,08	0,10	-0,43	0,45	0,18	0,45	-0,31	-0,05	-0,36	0,24
BM	0,06	-0,11	0,17	0,07	0,15	-0,55	0,38	0,12	0,39	0,20	0,21	-0,10	0,25	0,68	-0,47	0,45	0,04	0,27	0,18	-0,49	0,21	0,12	-0,03	0,27	-0,11	0,14	-0,22	-0,30
PeT	-0,35	0,06	-0,64	-0,06	-0,59	0,31	0,01	0,02	0,13	0,32	0,35	-0,35	0,06	0,09	0,08	0,17	0,81	0,08	-0,65	-0,28	0,59	-0,03	0,04	0,02	0,05	-0,56	0,45	-0,09
HPeIP	0,08	0,02	-0,56	-0,08	-0,59	0,13	-0,26	-0,28	-0,24	0,00	0,41	-0,12	0,31	-0,26	0,07	0,34	0,61	0,07	-0,67	-0,15	0,26	0,00	-0,12	-0,11	-0,18	-0,65	0,42	0,22
РоТ	-0,56	0,07	-0,52	-0,15	-0,52	0,43	0,18	0,23	0,17	0,39	0,28	-0,37	-0,17	0,23	0,17	-0,02	0,79	0,05	-0,55	-0,28	0,67	-0,16	0,06	-0,05	0,23	-0,42	0,47	-0,27
PeP	-0,06	0,08	-0,67	-0,08	-0,62	0,18	-0,10	-0,18	-0,06	0,20	0,51	-0,23	0,26	-0,07	0,01	0,35	0,76	0,15	-0,70	-0,26	0,46	-0,02	-0,02	-0,05	-0,14	-0,67	0,45	0,11
ΔVPo	-0,22	0,14	-0,75	-0,01	-0,74	0,48	-0,09	-0,01	0,02	0,56	0,31	-0,07	0,05	-0,16	0,19	0,11	0,69	-0,06	-0,78	0,03	0,49	-0,01	0,38	0,03	0,04	-0,71	0,62	0,00
BP	0,44	-0,14	0,76	0,07	0,58	-0,48	-0,16	-0,04	-0,15	-0,50	-0,47	0,30	0,05	-0,12	-0,06	-0,06	-0,80	-0,23	0,59	0,18	-0,65	0,11	-0,22	0,04	-0,03	0,50	-0,49	0,06
СТ	-0,62	0,03	-0,27	-0,26	-0,42	0,36	0,25	0,40	0,13	0,27	0,14	-0,37	-0,29	0,33	0,26	-0,10	0,72	-0,08	-0,45	-0,35	0,65	-0,24	-0,08	-0,12	0,41	-0,31	0,44	-0,45
PoUBei	0,38	-0,36	0,45	0,10	0,12	-0,73	0,03	-0,07	-0,13	-0,19	-0,05	0,31	0,39	0,26	-0,38	0,56	-0,36	0,02	0,20	-0,20	-0,31	0,16	-0,13	0,14	-0,18	0,12	-0,19	-0,15
VPo	0,09	-0,09	0,72	-0,11	0,74	-0,25	0,16	0,07	-0,07	-0,51	-0,27	0,12	-0,22	0,12	-0,04	-0,30	-0,70	0,10	0,80	0,09	-0,46	-0,11	-0,34	-0,16	0,02	0,75	-0,54	0,02
LLLm	-0,46	0,08	0,06	-0,20	0,23	-0,13	0,61	0,41	0,61	0,26	0,31	-0,45	-0,06	0,81	-0,15	0,13	0,39	0,27	0,19	-0,61	0,60	-0,11	-0,15	0,14	0,18	0,24	-0,08	-0,40
D19	-0,10	0,37	-0,44	0,10	0,27	0,05	0,48	-0,06	0,54	0,42	0,57	-0,35	0,04	0,40	-0,45	0,03	0,25	0,65	0,24	-0,25	0,42	-0,01	0,21	0,12	-0,25	0,20	-0,24	0,11
UBLm	-0,60	0,17	-0,06	-0,30	-0,01	0,37	0,63	0,47	0,51	0,56	0,24	-0,23	-0,42	0,69	0,16	-0,30	0,34	0,24	0,02	-0,24	0,62	-0,26	0,18	, -0,02	0,28	0,11	0,14	-0,40
PeDe	-0,01	0,02	0,61	0,04	0,94	-0,39	0,26	0,17	0,09	-0,52	-0,23	-0,15	-0,14	0,15	-0,26	-0,19	-0,55	0,08	0,93	-0,11	-0,32	-0,08	-0,39	-0,07	0,12	0,88	-0,63	-0,08
Vmax	0,62	0,13	0,35	0,38	0,29	66'(),22),18	0,23),32	0,17),15	0,62	0,18),58	0,66),18),12	0,17	0,47),23	0,44	0,30	0,47),24	0,08),51	0,06

	PeLLei	nPe	ΒТ	VR	GDe	٥N	D22	DD	VOut	VPol	VS	A	GUBei	RT	LBI	PeUBei	HPel	٧U	PoDe	۲IN	HPol	UT	٨A	S	GT	CDe	LPol	V1mR
GLLei	0,84	0,11	0,32	0,31	0,07	-0,48	-0,28	-0,17	-0,19	0,00	-0,36	0,43	0,20	-0,29	-0,22	0,08	-0,53	-0,33	0,03	0,22	-0,50	0,22	0,25	0,16	-0,13	-0,10	-0,24	0,01
PeLLei		0,12	0,02	0,31	-0,16	-0,55 -	-0,51 -	-0,45 -	- 60'0-	-0,02	- 0,08 -	0,31	0,62	- 0,39 -	-0,23 -	0,46	-0,24 -	-0,24 -	-0,29	0,09	-0,38 -	0,41	0,16	0,32	-0,41 -	-0,43 -	-0,14 -	0,33
nPe			-0,16	-0,52	0,20	0,25 .	0,53 .	0,48 .	0,07	0,35 .	0,52 .	-0,23	-0,27	-0,03	0,31 .	-0,38	0,52 .	-0,12	-0,15 -	-0,29	0,65 .	-0,58	0,00	-0,44	0,46	-0,18 -	0,32 .	-0,21
ВТ				-0,27	0,52	-0,38	0,13	0,44	-0,19	-0,52	-0,55	0,15 .	-0,29 .	0,20	0,23	-0,24 -	-0,53	-0,43	0,50	-0,11	-0,33	-0,21	-0,46	-0,18 -	0,45	0,52 .	-0,26	-0,44
VR					-0,17	-0,43 -	-0,59	-0,64	0,33 -	0,05 -	-0,46 -	-0,03	0,47 -	-0,08	-0,76	0,45 -	- 0,34 -	0,13 -	0,02	0,18 -	- 0,49 -	0,86	0,38 -	0,80	-0,62	-0,02	-0,55 -	0,27 -
GDe						-0,27	0,42 .	0,30	0,09	-0,56	-0,02 -	-0,35 -	-0,23	0,19 .	-0,16 -	-0,27	-0,28 -	0,14	06'0	-0,29	- 0,07	-0,28	-0,57	-0,26	0,26	0,87	-0,52 -	-0,13
VG							0,24	0,19	-0,21	0,37	0,25	0,14	-0,59	-0,20	0,61	-0,66	0,23	0,12	-0,20	0,45	0,29	-0,47	0,31	-0,48	0,24	-0,13	0,53	0,10
D22								0,74	0,03	0,22	0,48	-0,26	-0,62	0,55	0,10	-0,46	0,37	0,23	0,33	-0,44	0,66	-0,79	-0,19	-0,61	0,62	0,37	0,19	-0,62
UD									-0,09	0,19	0,01	-0,06	-0,66	0,32	0,48	-0,51	0,25	-0,44	0,13	-0,30	0,53	-0,74	-0,14	-0,53	0,97	0,21	0,40	-0,84
VOut										0,24	0,01	-0,70	0,17	0,62	-0,37	0,13	0,34	0,28	00'00	-0,51	0,40	0,46	-0,03	0,66	-0,25	0,04	-0,51	-0,02
VPol											0,23	0,20	-0,09	0,10	0,08	-0,04	0,37	-0,08	-0,57	0,14	0,47	-0,03	0,81	0,15	0,09	-0,56	0,50	-0,21
VS												-0,22	0,12	0,10	0,01	0,14	0,64	0,53	-0,17	-0,33	0,62	-0,43	-0,11	-0,40	-0,09	-0,21	0,35	0,20
IA													0,06	-0,59	0,32	0,05	-0,58	-0,41	-0,17	0,78	-0,56	-0,05	0,56	-0,17	-0,01	-0,24	0,49	0,13
GUBei														-0,27	-0,41	0,93	-0,03	0,03	-0,28	-0,05	-0,27	0,70	0,06	0,63	-0,70	-0,38	-0,15	0,58
RT															-0,30	-0,07	0,33	0,39	0,20	-0,72	0,51	-0,06	-0,32	0,13	0,14	0,28	-0,36	-0,53
LBI																-0,50	0,10	-0,51	-0,29	0,30	0,18	-0,54	-0,01	-0,51	0,54	-0,23	0,67	-0,09
PeUBei																	0,05	0,05	-0,27	-0,18	-0,17	0,61	0,04	0,58	-0,57	-0,35	-0,08	0,33
HPel																		0,17	-0,52	-0,62	0,91	-0,28	-0,15	-0,13	0,20	-0,46	0,36	-0,21
VU																			0,29	-0,21	0,15	0,06	-0,17	-0,01	-0,55	0,28	-0,41	0,37
PoDe																				-0,05	-0,32	-0,15	-0,42	-0,19	0,09	0,98	-0,60	-0,06
VIn																					-0,64	0,13	0,62	-0,04	-0,20	-0,09	0,28	0,44
HPol																						-0,47	-0,11	-0,24	0,42	-0,24	0,35	-0,42
UT																							0,25	0,95	-0,76	-0,19	-0,52	0,47
vA																								0,29	-0,16	-0,45	0,37	0,09
SD																									-0,60	-0,21	-0,48	0,27
GT																										0,18	0,44	-0,81
CDe																											-0,58	-0,15
LPol																												0,16

Annexe 17 : Matrice de corrélation entre le second groupe de variables (classées par valeur absolue de corrélation avec la variable réponse 3mRTT) pour le groupe de nageurs experts

ANALYSE CINÉMATIQUE ET DYNAMIQUE TRIDIMENSIONNELLE DE LA PERFORMANCE AU VIRAGE CULBUTE CRAWL. INFLUENCES DU NIVEAU ET DU GENRE.

De nos jours la culbute est la technique de virage crawl unanimement employée par les nageurs de compétition. Elle se décompose en cinq phases principales : l'approche, le retournement, le contact avec le mur (composé du placement et de la poussée), la phase sous-marine (composée de la glisse et de la coulée) et la reprise de nage.

Dans le cadre d'une première collaboration entre le Laboratoire de Mécanique Physique de Bordeaux et le service recherche de la Fédération Française de Natation, cette étude s'est appuyée sur un protocole complet d'analyse sousmarine 3D qui a permis d'évaluer l'ensemble des paramètres cinématiques et dynamiques de la performance.

Une double analyse comparative a montré que le niveau d'expertise et le genre ont un effet sur la performance au virage. Les nageuses de niveaux différents se différencient entre-elles par des vitesses en approche et en fin de poussée plus élevées pour les expertes qui adoptent une position plus profilée tout au long du contact. À haut niveau, les nageurs se différencient des nageuses au début du retournement par une vitesse plus élevée puis lors de la poussée où ils produisent un pic de force horizontale plus élevé et obtiennent un gain de vitesse en conséquence.

L'utilisation de la méthode Lasso a permis d'établir deux modèles experts de la performance au virage. Chez les nageuses expertes, le modèle a révélé l'importance de l'impulsion latérale pendant le placement, paramètre nouveau qui pourrait être représentatif de la vrille exécutée. Chez les nageurs experts, les meilleurs virages sont réalisés par anticipation du retournement. Le mur est impacté dans une position corporelle peu fléchie ce qui favorise une extension rapide mais crée peu de vitesse. Le trajet parcouru par les meilleurs est court et optimisé.

Cette étude illustre l'intérêt d'une analyse 3D du virage culbute crawl : en dynamique d'une part, l'utilisation d'une plateforme de force 3D permettant de distinguer les phases de placement et de poussée et probablement aussi le mouvement de vrille ; en cinématique d'autre part, avec l'importance de la trajectoire parcourue sur la performance au virage des nageurs experts.

Par delà cette étude du virage, la conception, la réalisation et l'utilisation de nouveaux outils dédiés à l'analyse du mouvement en natation permet aujourd'hui de proposer au sportif une aide à la performance en phase avec ses objectifs. De part un enrichissement de la connaissance des différentes techniques utilisées par les experts et les non-experts, cette étude devrait également permettre d'améliorer l'enseignement des virages de haut-niveau.

Mots-clés Biomécanique, Cinématique, Dynamique, 3D, Virage, Niveau, Genre, Natation

THREE-DIMENSIONAL KINEMATIC AND DYNAMIC ANALYSIS OF THE CRAWL TUMBLE TURN PERFORMANCE. EXPERTISE AND GENDER EFFECTS.

Nowadays the tumble turn is the turn technique embraced by all freestyle competitive swimmers. It consists of five main phases: the approach, the rotation, the wall contact (with braking and push-off sub phases), the underwater phase (with glide and underwater propulsion sub phases), and the resumption of swimming.

Within the first collaboration between the *Laboratoire de Mécanique Physique* of Bordeaux and the research department of the *Fédération Française de Natation*, this study relied on a comprehensive protocol for 3D underwater analysis that allowed assessing all kinematic and dynamic variables of performance.

A double comparative analysis showed that both the level of expertise and the gender have effects on the turn performance. Female swimmers of various levels differ by higher approach and push-off speeds for the experts who are more streamlined throughout the contact. At a high level, male swimmers differ from female swimmers first by higher speed at the beginning of the rotation and also by producing more horizontal force at the push-off peak, directly resulting in a higher speed.

The use of the Lasso method made it possible to establish two models for the expert turn performance. For female swimmers, the model revealed the role of lateral momentum during the braking phase, a new parameter that could be representative of the twist executed. For male swimmers, the best turns are swum when the rotation is anticipated. The wall is reached with a slightly flexed posture that results in a fast extension but also creates a slow speed. The best swimmers' trajectories are short and optimized.

This study showed the importance of a 3D analysis of the crawl tumble turn: on one hand the dynamic analysis, with the use of a 3D force platform that makes easier the distinction between the braking and the push-off phases, and probably also gives insights into the twist movement; on the other hand the kinematic analysis, with the importance of the length of the swum path on the turn performance.

Beyond this study of the turn, the design, the implementation and the use of new tools devoted to motion analysis in swimming can now offer athletes assistance in line with their objectives. By increasing the knowledge of different techniques used by experts and non-experts swimmers, this study should also improve the teaching of high-performance turns.

Keywords Biomechanics, Kinematics, Dynamics, 3D, Turn, Level, Gender, Swimming