

Biomécanique du mouvement et interactions sportives

Benoit Bideau

▶ **To cite this version:**

Benoit Bideau. Biomécanique du mouvement et interactions sportives. Autre [q-bio.OT]. Université Rennes 2, 2012. tel-01059095

HAL Id: tel-01059095
https://theses.hal.science/tel-01059095

Submitted on 29 Aug 2014

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.



Habilitation à diriger des recherches
sous le sceau de l'Université européenne de Bretagne

présentée par
Benoit Bideau
Préparée au laboratoire Mouvement Sport Santé - EA 1274
Université de Rennes 2

Biomécanique du mouvement et interactions sportives

HDR soutenue le 19 novembre 2012

devant le jury composé de :

Benoît Bardy
Professeur d'université - Université Montpellier 1 / *rapporteur*

Eric Berton
Professeur d'université - Université d'Aix Marseille / *rapporteur*

Nicolas Benguigui
Professeur d'université - Université de Caen / *rapporteur*

Patrice Quinton
Professeur d'université - ENS Cachan / *examinateur*

Bruno Arnaldi
Professeur d'université - INSA Rennes / *examinateur*

Paul Delamarche
Professeur d'université - Université Rennes 2 /Directeur de thèse

Table des matières

Introduction **5**

I Synthèse des travaux 8

1 Interaction avec le milieu ou le matériel 9

1.1 Introduction 9

1.2 dynamique et efficacité propulsive du nageur 12

1.2.1 Conception d'un système d'évaluation de la résistance active : ADES 12

1.2.2 La résistance à l'avancement en nage avec palmes 14

1.2.3 Analyse dynamique de la performance des nageurs avec palmes 16

1.2.4 Influence de la profondeur de nage sur les paramètres dynamiques 18

1.2.5 Nouvelle méthode d'évaluation de la surface du maître couple . 21

1.2.5.1 Méthodologie 22

1.2.5.2 Résultats/discussion 23

1.3 Influence des palmes sur l'efficacité propulsive du nageur 24

1.3.1 Conception d'un automate d'évaluation de l'efficacité propulsive des palmes 24

1.3.1.1 Développement du système HERMES 25

1.3.1.2 Evaluation de l'efficacité propulsive des palmes 25

1.3.1.3 Résultats/discussion 26

1.4 Conclusion-perspectives 27

2 Interactions avec des adversaires **31**

2.1 Contexte . . . 31
2.2 Problématique . . . 34
2.3 Identification des situations de duels . . . 36
2.3.1 La feinte au rugby . . . 36
2.3.1.1 Comparaison cinématique des mouvements de feintes et des mouvements sans feintes . . . 39
2.3.1.2 Interactions entre un gardien et tireur au handball . . . 39
2.3.1.3 Description du mouvement du tireur . . . 39
2.3.1.4 Contraintes liées au duel gardien tireur en handball . . . 40
2.3.1.5 Evaluation des informations prélevées par le gardien de but en handball . . . 41
2.3.2 Coup franc au football . . . 42
2.3.2.1 Analyse cinématique du mouvement de tir . . . 42
2.4 La réalité virtuelle au service de la compréhension des duels sportifs . . . 43
2.4.1 La présence : un facteur fondamental . . . 43
2.4.1.1 Comparaison au réel . . . 45
2.4.1.2 Niveaux de détails . . . 47
2.4.1.3 Comparaison Vidéo et RV . . . 51
2.5 Analyse de la prise d'informations lors des duels . . . 53
2.5.1 La feinte au rugby : aspects perceptifs . . . 53
2.5.1.1 La feinte au rugby : relation perception-action . . . 54
2.5.2 Le duel gardien-tireur au handball . . . 56
2.5.2.1 Influence de la trajectoire du ballon et de la cinématique du tireur sur la prise d'informations . . . 56
2.5.2.2 Influence des paramètres segmentaires . . . 57
2.6 Vers des outils pratiques . . . 58
2.6.1 Simulateur au football . . . 59
2.6.1.1 Description du simulateur . . . 59
2.6.1.2 Application à l'étude de l'influence d'un mur sur la performance du gardien de but . . . 60
2.6.2 Simulateur au rugby . . . 62
2.6.2.1 Modélisation du comportement du défenseur . . . 62

2.6.3 Conclusion et perspectives 64

3 Applications pratiques et suivi de sportifs 66

3.1 Introduction 66

3.2 Analyses biomécaniques pour l'optimisation du service-volée au tennis . 67

3.2.1 Contexte 67

3.2.2 Analyse cinématique et cinétique du service-volée 68

3.3 Analyses biomécaniques pour l'optimisation de la performance en natation 69

3.3.1 Contexte 69

3.3.2 Analyses cinématiques 69

3.3.3 Analyses dynamiques 70

3.4 Analyses biomécaniques pour l'optimisation du processus de réathlétisation des footballeurs 70

3.4.1 Analyse cinématique et dynamique d'un changement d'appuis . 71

3.5 Accompagnement pour l'entraînement des capacités perceptives et attentionnelles des gardiens de but 72

3.5.1 Contexte 72

3.5.2 Mise en place d'un système de multi objects tracking pour l'accompagnement des gardiens de but 72

Bibliographie 72

II Curriculum-Vitae Détaillé 83

III Dulpicata des principaux articles internatinaux indexés publiés 104

Préambule

La rédaction d'une habilitation à diriger des recherches est un exercice qui consiste à jeter un coup d'œil dans le rétroviseur sur une tranche de vie professionnelle, mais aussi un peu plus loin sur une tranche de vie.

Alors, à la manière d'un « open A. Agassi » et sans aucune prétention, je me demande ce que pourrait penser ce nageur de 15 ans passionné de sport en regardant cet homme de 37 ans essayant de comprendre les facteurs de la performance sportive. Plus de vingt ans se sont écoulés entre le moment où, avec mon frère Nicolas, nous plongions à la fois dans la piscine et dans les ouvrages de Jacques Meslier, en espérant connaître le secret pour devenir un grand nageur comme Matt Biondi ou Alexander Popov. A cette époque, avec mes yeux d'adolescent, j'étais persuadé que cette magie était principalement associée à une maîtrise des processus physiologiques liés à l'entraînement, mais ma vision allait rapidement évoluer.

Fin 1993, l'équipe russe de Victor Advienko avec ses nageurs olympiques vient en stage à Brest et présente ses nouvelles méthodes d'entraînement. Pour cet entraîneur, la technique est le point central de toute performance en natation. Pour quantifier l'optimisation de la technique de nage, il présente une nouvelle approche, issue d'une collaboration scientifique[Kolmogorov1992] . Cette nouvelle approche permet d'évaluer les paramètres dynamiques de la performance comme la résistance à l'avancement. A cette époque sans trop comprendre la différence entre efficacité propulsive et efficience technique, je me dis que l'approche couplée de la physiologie et de la biomécanique est la clé de la performance. J'évoluerai par la suite, mais, comme toute chose dans la vie, je ne le sais pas encore. Cet épisode va me marquer et me suivra longtemps. En effet je mettrai près de dix ans pour reprendre cette méthode avec Briac Colobert et Guillaume Nicolas et créer un outil d'évaluation de la résistance à l'avancement[Bideau2003b]. Nous sommes en 1993 et ce que je viens de vivre me conforte dans mes choix d'orientation universitaire : j'irai en STAPS.

Si mon orientation en STAPS apparaît comme incontournable, elle n'est pas la priorité

numéro un. Mon objectif est de devenir le meilleur nageur avec palmes Français sur 50 et 100 mètres. Après un certain nombre de longueurs de bassin, je parviens à mon but. Dès 1992 j'intègre l'équipe de France et j'y resterai jusqu'à la fin de ma carrière en 2000. Comme je n'ai pas tenu une comptabilité précise de mon palmarès sportif je vais le résumer très brièvement. Il est composé d'un bon nombre de titres de champion de France, de plusieurs records de France, de plusieurs finales Européennes et Mondiales et de deux médailles de Bronze aux Championnats d'Europe à Montpellier en 1997. Par delà les distinctions, ces années à haut niveau m'ont permis de me confronter à différentes techniques d'entraînement, bien souvent empiriques. Ces limites m'ont ouvert les yeux sur la nécessité d'une formation scientifique pour pouvoir entraîner à haut niveau.

Ainsi, parallèlement à ma formation STAPS je passe le brevet d'état premier degré des activités de la natation puis le second degré. Mon entrée en thèse en 2000 va accélérer ma mise à la retraite sportive. Je vais à partir de ce moment me consacrer à la biomécanique et aux nouvelles technologies. L'entrée en thèse, c'est aussi le moment où on choisit un sujet. On ne mesure généralement pas la portée de ce choix et comment il va influer sur la vie professionnelle. Dans mon cas, Franck Multon qui est responsable de l'équipe biomécanique du laboratoire LPBEM me propose deux sujets bien distincts : l'étude biomécanique des figures aériennes en trampoline ou la réalité virtuelle et le sport. Comme un challenge, et comme je crois à l'émergence des nouvelles technologies, j'opte pour la réalité virtuelle et le sport. Franck vient d'être nommé maître de conférences deux ans plus tôt et l'équipe est relativement petite. La mise en oeuvre du projet est donc fastidieuse et à vrai dire les premières simulations de tireurs de handball virtuels me semblent loin des mouvements de Jackson Richardson.Comme tout doctorant je m'interroge. . . Mais après de nombreuses heures passées avec Richard Kulpa (ingénieur à l'époque) dans la salle de réalité virtuelle et avec le soutien de toute l'équipe, les avatars semblent de plus en plus réalistes et la thèse se concrétise.

Je soutiens ma thèse en décembre 2003. Entre temps je suis devenu papa de Marla et Thaïs, la logique est donc implacable : je dois trouver du travail. Alors que je teste différentes options professionnelles, un coup de téléphone va modifier mes projets. Deux chargés de missions de la ville de Cannes souhaitent me rencontrer car ils veulent développer un technopôle sur le sport. Ils m'invitent à Cannes pour rencontrer les principaux élus locaux, la direction des sports, et les membres de l'association « Cannes performance ». Au cours des différentes réunions je leur soumets l'idée qu'un projet sur la réalité virtuelle et le sport peut être un axe de développement du technopôle. Pour lancer ce projet nous décidons de regrouper la communauté scientifique française autour d'un symposium que j'ai appelé ISS (Image de Synthèse et Sport). Le congrès se déroule de manière idéale, mais la ville de Cannes ne donnera pas suite au projet. Un an plus tard, certaines personnes de Cannes me recontacteront au travers de la société « Biomecasport » pour créer une activité de consulting auprès des clubs de football professionnels. Cette activité de consulting me permettra de me confronter aux exigences

et aux limites du sport professionnel. Elle me permettra aussi de comprendre les difficultés inhérentes à la mise en place d'approches scientifiques sur le terrain, mais aussi de côtoyer des clubs de football prestigieux comme Arsenal, l'Olympique de Marseille. . .

En 2005 je suis nommé maître de conférences au laboratoire M2S de l'université de Rennes 2. L'activité de consulting dans les clubs professionnels va diminuer car elle n'est pas compatible avec la charge de travail académique.

Si j'ai pensé judicieux de présenter mon parcours personnel en préambule à cette habilitation, c'est que je pense que ces expériences ont nourri à la fois mon approche de la recherche mais aussi ma façon d'enseigner.

Introduction

« La performance sportive exprime les possibilités maximales d'un individu dans une discipline à un moment donné de son développement » (Platonov). Comprendre comment s'exprime ces possibilités maximales est un enjeu complexe tant celles-ci sont multifactorielles. Les sciences du sport approchent ce phénomène sous différents spectres, d'un point de vue des sciences humaines et sociales ou d'un point de vue des sciences biologiques et parfois avec des visions croisées. Attribuer une performance à une qualité donnée qu'elle soit d'ordre technique (mouvement), psychologique, physiologique ect., semble une approche réductrice. De ce fait, segmenter la performance sportive en champs disciplinaires est sans doute l'art du scientifique et non celle de l'entraîneur. Cependant, le scientifique doit valider ses concepts par une méthodologie qui fait rarement abstraction d'un découpage par champ. L'ensemble des travaux présentés dans ce document se focalise principalement sur une approche scientifique : l'analyse du mouvement sportif.

Le mouvement sportif est fortement contraint par les interactions possibles avec le milieu dans lequel il évolue, par les matériaux qu'il utilise, ou par ses adversaires ou partenaires. Ma recherche s'est donc orientée sur l'étude de ces interactions pour comprendre leurs influences sur l'efficacité du geste et la performance.

En fonction des différentes activités sportives cette analyse du mouvement est basée soit sur une approche purement biomécanique, soit sur une approche orientée vers le contrôle moteur. En effet l'approche biomécanique permet une compréhension précise de la performance motrice lorsque l'activité sportive peut se faire sans interactions directes avec l'adversaire. Cette notion implique que le mouvement du sportif ne soit pas modulé par celui de son adversaire. La natation, l'athlétisme font partie de cette catégorie de

sport sans interactions directes. Dans ces activités la modélisation du mouvement peut se faire sur des critères cinématiques, dynamiques ou énergétiques. Néanmoins si le mouvement n'est pas modulé par celui de l'adversaire il peut l'être par les matériaux utilisés : les chaussures en athlétisme ou les palmes en natation peuvent influer sur les critères biomécaniques.

Nous nous intéresserons également aux activités où le mouvement du sportif est modulé par celui de son adversaire. Ces activités, généralement de duels, seront considérées comme activités « avec interactions directes ». De ce fait l'approche purement biomécanique du mouvement ne permet pas de comprendre la performance. En effet, l'action du sportif est dépendante de sa capacité à prélever des informations sur la séquence motrice de son opposant. L'analyse de la prise d'informations visuelles en relation avec l'action du sportif peut se révéler essentielle pour une optimisation du processus d'entrainement.

D'une manière générale, quel que soit le type d'interaction l'objectif poursuivi est d'isoler par différentes méthodes les paramètres de l'efficacité du geste sportif. Pour isoler ces paramètres il est nécessaire de contrôler les différentes variables pour étudier leur influence sur la performance. Le contrôle de ces variables nécessite généralement la création d'outils ou de méthodes. Dans le cadre des approches purement biomécaniques, mes travaux se sont focalisés sur la natation et sur la nage avec palmes. Pour identifier les critères d'efficacité dans ces activités, j'ai tout d'abord étudié la performance du nageur en interaction avec sa palme, puis pour caractériser l'influence du matériel, j'ai développé avec Guillaume Nicolas un automate permettant de tester l'efficacité des palmes de nage « in situ » de manière standardisée.

Dans le cadre des interactions avec les adversaires différentes méthodes ont été employées pour comprendre la prise d'informations visuelles des sportifs lors des actions duels. Ces méthodologies vont de l'utilisation de questionnaires aux techniques vidéos et occulométriques. Néanmoins, pour chacune des méthodes d'évaluation, il semble apparaître une limite suffisante, nécessitant la création de nouveaux outils. L'évolution concomitante des connaissances en animation et des technologies d'affichage 3D, ouvre de nouveaux horizons à l'utilisation de la réalité virtuelle pour comprendre la prise d'informations visuelles des sportifs. En effet la réalité virtuelle permet de standardiser les situations d'études, d'avoir un contrôle important des variables (modification d'un paramètre ceteris paribus), d'adapter en temps réel le point de vue du sujet pour correspondre à sa vision sur le terrain, d'avoir une vision stéréoscopique de la situation de jeu. Le second axe de ma recherche concerne donc la compréhension des duels sportifs au travers de l'utilisation de la réalité virtuelle.

La figure 1 synthétise l'ensemble du processus de recherche. La première partie du document se focalisera sur les interactions du nageur avec le milieu dans lequel il évolue et l'incidence du matériel utilisé sur sa performance en nage avec palmes. Une seconde

partie sera consacrée à la compréhension des interactions entre deux adversaires lors de duel. Dans cette partie, en préambule de l'étude des duels, nous montrerons comment les nouvelles technologies basées sur la réalité virtuelle sont des outils valides pour l'étude des interactions entre joueurs.

Enfin, étant attaché à la mise en place des méthodes d'analyse de la performance sur le terrain, je montrerai comment j'ai pu transférer certaines techniques pour l'accompagnement d'athlètes de haut niveau. Cette partie moins scientifique permet aussi de sensibiliser le monde professionnel à l'utilisation des nouvelles technologies et participe aussi à la valorisation des STAPS

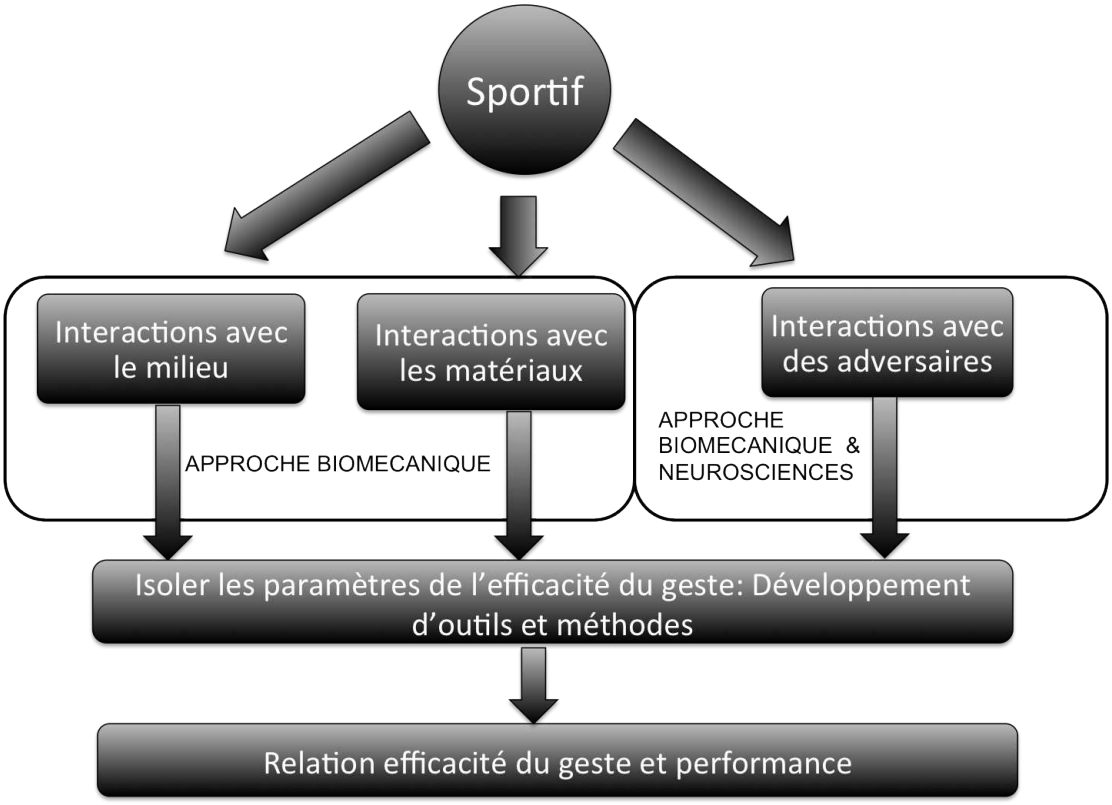


Figure 1 - Approche globale

Première partie

Synthèse des travaux

Chapitre 1

Interaction avec le milieu ou le matériel

1.1 Introduction

La natation est un exemple d'interactions complexes entre un homme et le milieu fluide, engendrant des contraintes mécaniques particulières. L'organisation segmentaire du nageur induit des écoulements complexes, composés entre autre de tourbillons dont la taille, la localisation et l'orientation varient constamment et influencent la propulsion du nageur. L'organisation segmentaire de celui-ci en fonction du niveau d'expertise, du sexe ou du type de nage, a été longuement décrite dans la littérature [Seifert2010] . Si ces études cinématiques permettent une première approche de la performance, elles ne permettent pas d'aborder les paramètres d'efficacité du geste. Ces derniers sont en lien avec les aspects dynamiques qui sont plus difficilement quantifiables. En effet, le nageur est soumis à différentes forces externes qui conditionnent la performance. Lors de son mouvement, le nageur est soumis à deux types de forces qui peuvent être classifiés selon leurs effets ; sur son avancement(forces de type propulsives ou résistives) ou son équilibre (poussée d'Archimède et poids).

Il est connu que les qualités hydrodynamiques du nageur sont des paramètres essentiels, pour l'efficacité de la nage et la détection des talents [Barbosa2012] . La résistance à l'avancement et l'estimation des paramètres dynamiques (efficacité propulsive, maitre-couple, masse additionnelle d'eau déplacée lors des mouvements du nageur. . .) nécessitent aujourd'hui une évaluation spécifique, basée sur des principes physiques de mécanique des fluides et le développement d'outils expérimentaux dédiés.

Ces aspects dynamiques ont été évalués d'un point de vue expérimental à l'aide de systèmes mécaniques variés. Les premières approches se sont attachées à mesurer les forces propulsives en nage statique à l'aide de systèmes dynamométriques [Christianson1965]. Les conditions de nage statique restent évidemment éloignées des conditions de nage réelles, et engendrent des imprécisions. D'autres recherches se sont orientées vers la conception de systèmes d'évaluation de la résistance à l'avancement en condition de nage réelle (obtention du paramètre de « résistance active »). La résistance dite « active » (par opposition à la résistance passive, évaluée en phase de traction, segments immobiles) est liée à la technique de nage (c'est-à-dire les différents mouvements nécessaires à la propulsion), et peut être mesurée par différents appareillages spécifiques. Cette mesure est très controversée, complexe à appréhender car elle est directement liée à des aspects techniques difficilement quantifiables. Par exemple, le « Mad System », développé par des chercheurs hollandais[Hollander A1986], permet la mesure de la force propulsive en crawl à chaque cycle locomoteur, à partir de capteurs de force montés sur des appuis fixes placés sur la trajectoire du nageur. La configuration du MAD-System ne permet pas une utilisation dans toutes les nages. Ce système n'est pas non plus adapté au nageur avec palmes, car celui-ci ne peut pas mettre la voilure de sa palme en contact avec le capteur. D'autres méthodes d'obtention de la résistance active et des forces propulsives ont alors du être envisagées de façon spécifique pour ces différentes nages, incluant la nage avec palme.

C'est dans ce contexte que j'ai développé un outil d'évaluation des paramètres mécaniques pour différents déplacements aquatiques : l'Active Drag Evaluation System (ADES)[Bideau2003b]. La conception de cet appareil a été à l'origine de l'ensemble du projet de recherche sur l'efficience technique que je mène au M2S avec Guillaume Nicolas. Bien que la résistance à l'avancement permette d'avoir une vision globale de la performance d'un point de vue dynamique, ce paramètre ne permet pas de prendre en compte l'efficacité propulsive du nageur.La propulsion aquatique est basée sur l'interaction des segments corporels et du fluide environnant. Pour générer une force propulsive, le nageur met des particules d'eau en mouvement, qui acquièrent une certaine énergie cinétique. Par conséquent, seule une partie de la puissance mécanique totale produite par le nageur est utilisée de manière utile pour l'avancement, l'autre partie étant dissipée dans le fluide. Etre efficace consiste donc à minimiser cette part dissipée dans le fluide. Plusieurs travaux fondamentaux et appliqués à la natation ont pu mettre en exergue que la propulsion relative au mouvement d'une surface oscillante (bras, jambes, palmes...) engendre la séparation périodique de structures formant des vortex [Lighthill1975][Toussaint2000]. Ces allées tourbillonnaires peuvent être caractérisées par une fréquence d'émission des tourbillons pouvant être quantifiée au travers du nombre de Strouhal. Ce nombre traduit le transfert de quantité de mouvement depuis un corps en mouvement vers un fluide et cela autant pour des conditions particulière de flux instables que pour des conditions classiques de suites de Karman (régulières ou in-

versées). Il permet donc a priori de caractériser l'efficacité propulsive d'un corps dans un fluide [Anderson1998] [Triantafyllou1993]. Cette hypothèse a été appliquée au domaine de la propulsion des poissons et des robots nageurs. Ces études ont mis en évidence une relation entre un intervalle particulier de strouhal et un optimum d'efficacité propulsive.

Nous avons donc souhaité étudier la relation entre les résistances à l'avancement et l'efficacité propulsive au travers de l'indice d'efficacité de Froude, ou du nombre de Strouhal, pour différentes conditions de nages (nage avec palmes ou sans palmes, immergées ou en profondeur, à vitesses variables. . .). Bien entendu le choix du matériel a une influence sur l'efficacité propulsive. Minetti et al [Minetti2004] ont ainsi pu mettre en évidence l'impact de différents systèmes propulsifs sur les paramètres énergétiques (physiologique et biomécanique) de la performance. Une difficulté dans ces précédentes approches est de différencier l'impact du nageur (et de sa technique gestuelle) du matériel utilisé. Nous avons donc décomposé ce problème en deux parties. Tout d'abord nous nous sommes intéressés à l'étude du système global « nageur/palmes » puis à l'analyse du système « palme». L'objectif est ici de comprendre l'adaptation du sportif aux contraintes mécaniques imposées par le choix du matériel. Il peut alors être possible de formuler des hypothèses quant à la manière de stimuler le système mécanique pour optimiser le rendement propulsif.

Les premiers travaux que j'ai entrepris consistaient à étudier le comportement mécanique des palmes dans l'air. La palme était alors modélisée comme un oscillateur harmonique amorti et permettait de caractériser la raideur et le coefficient d'amortissement [Bideau2003a]. Les premiers résultats ont permis de fournir des indices utiles à l'utilisateur ou à l'industriel. Cette première approche a été étendue au comportement des structures en prenant en compte les interactions avec le fluide. Dans le domaine de la nage avec palmes des premières expérimentations ont estimé les coefficients de portance et de traînées de différentes palmes en condition quasi-statique (études en souffleries [Baly2003]). Ce type d'approche ne permet pas de prendre en compte la nature de l'écoulement instationnaire autour du système considéré. Pour palier à ces limites nous avons entrepris une collaboration avec le groupe de recherche en mécanique de l'Institut de recherche en mathématiques de Rennes sur le couplage fluide-structure. Ce couplage nécessite des compétences fortes en modélisation et simulation des structures déformables et en expérimentation « in situ ». Pour la partie expérimentale, nous avons ainsi développé un Automate « HERMES » (Hydrodynamic Equipement for Research on Mechanical efficiency of Swimfins), permettant de reproduire la cinématique d'une cheville humaine et d'extraire les caractéristiques d'efficacité de palmes de manière reproductible et standardisée. Les résultats expérimentaux issus de cet automate servent à la validation des modèles en couplage fluide-structure.

1.2 dynamique et efficacité propulsive du nageur

1.2.1 Conception d'un système d'évaluation de la résistance active : ADES

L'évaluation de la résistance à l'avancement pour les nageurs et les nageurs avec palmes a été rendue possible au travers de l'Active drag evaluation system (ADES). L'ADES est une extension de la méthode de perturbation de Kolmogorov [Kolmogorov1992] . Pour obtenir la résistance à l'avancement avec cette méthode, les nageurs doivent réaliser deux passages à vitesse maximale avec et sans l'adjonction d'un corps hydrodynamique. Dans les deux cas l'hypothèse de départ est que la puissance mécanique est considérée comme constante :

$$RA_1 \ V_1 = RA_2 \ V_2 \tag{1.1}$$

Où RA_1 et RA_2 sont les résistances à l'avancement pour les deux passages, V_1 correspond à la vitesse du nageur sans charge et V_2 la vitesse du nageur avec charge (liée à l'adjonction du corps additionnel). Pour les deux cas RA vaut :

$$RA = \rho S C_d V^3 \tag{1.2}$$

En combinant les équations (1.1) et (1.2)

$$\frac{1}{2}\rho S C_d V_1^3 = \frac{1}{2}\rho S C_d V_2^3 + F_b V_2 \tag{1.3}$$

Dans cette équation F_b (N) est la force liée au corps additionnel. La résistance active s'obtient finalement de la manière suivante.

$$RA_1 = \frac{F_b V_2 V_1^3}{V_1^3 - V_2^3} \tag{1.4}$$

Si le principe théorique ne pose pas de problème sa mise en application d'un point de vue pratique entraîne un certain nombre d'imprécisions de mesure. En effet l'utilisation d'un corps hydrodynamique tracté par le nageur à l'interface air/eau (surface libre) ne permet pas d'appliquer sur le nageur une force constante. Ceci est d'autant plus vrai dans les nages où le profil de vitesse à l'intérieur du cycle fluctue de manière importante. C'est par exemple le cas de la brasse où l'on observe une modification du profil de vitesse au moment de l'enchainement entre la traction des bras et la propulsion des jambes.

Une autre source d'erreurs dans la méthode de perturbation provient de l'hypothèse de puissance mécanique constante entre les deux passages. Dans la méthode originale, les auteurs considèrent que l'utilisation de l'hypothèse de puissance mécanique constante est possible si les variations de vitesses entre le premier passage sans le corps hydrodynamique et le second passage avec le corps hydrodynamique sont inférieures à 10%. Au travers de cette faible variation de vitesse moyenne, les auteurs postulent sur le fait que la technique est conservée entre les deux passages. Cependant, la méthode développée ne permet pas d'avoir accès au profil de vitesse instantanée au cours des deux passages. Sans ce profil de vitesse il semble délicat de conclure sur la conservation de la technique de nage. De plus la méthode originale de Kolmogorov ne peut s'appliquer en nage avec palmes, où les interactions entre la monopalme et le corps hydrodynamique rendent la mesure impossible.

De manière à contourner les biais de mesure et de pouvoir appliquer la méthode de perturbation sur les déplacements en nage avec palmes, nous avons développé l'active drag evaluation system (ADES)[Bideau2003b] (fig 1.1) . Lors de l'évaluation le nageur porte une ceinture liée au système (via un cable non élastique) placé sur le bord du bassin. De ce fait, le contrôle et la modulation de la charge additionnelle (au travers d'un limiteur de couples) en dehors de l'eau permettent de minimiser les incertitudes de mesures lors du calcul de la résistance active. Le fait de contrôler cette charge en dehors de l'eau introduit une erreur mineure sur la charge horizontale appliquée sur le nageur, du fait de l'angle entre le câble et l'horizontal (cette erreur est estimée à 1.5% à 10 mètres et 0. 4% à 20 mètres). Lors des déplacements le nageur déroule une bobine placée dans l'appareil. La rotation de cette bobine peut être limitée de telle manière à appliquer une force sur le nageur de quelques newtons à 100 N. La force développée par le nageur pour déroulée la bobine est obtenue à l'aide d'un capteur de couple. Le couple est ensuite traduit en valeur de force. La force est enregistrée en temps réel et permet d'avoir accès aux fluctuations durant le cycle de nage. Les données de vitesses permettant de calculer la résistance à l'avancement sont obtenues à l'aide de caméras numériques étanches.

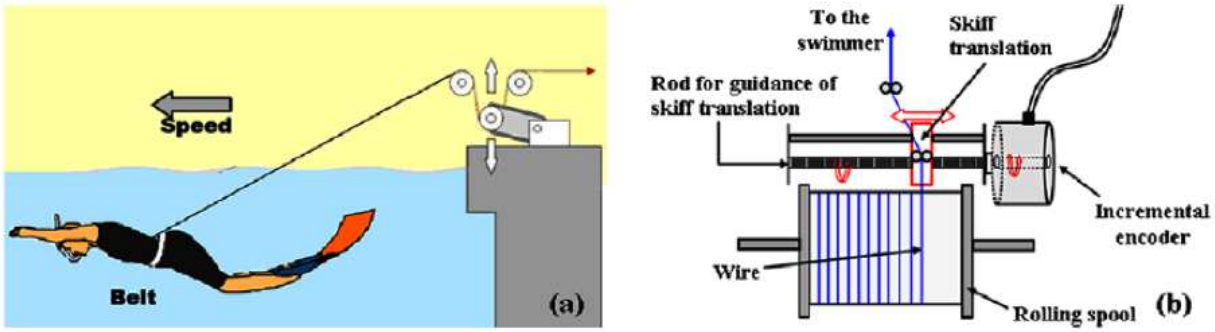


Figure 1.1 - ADES

1.2.2 La résistance à l'avancement en nage avec palmes

A l'aide du système ADES nous avons pu évaluer la résistance à l'avancement des nageurs avec palmes. Nous avons ainsi testé 12 nageurs avec palmes de l'équipe de France. Le protocole expérimental consistait à évaluer la résistance active lors d'un 25 mètres en apnée à vitesse maximale selon la méthode précédemment décrite. De manière à limiter l'influence de la traînée de vague les nageurs devaient tous réaliser le 25 mètres à une profondeur maximale de 1 mètre. Les déplacements réalisés à une profondeur supérieure à 10% étaient rejetés. Pour obtenir les vitesses nécessaires au calcul de la résistance à l'avancement, nous avons placé une caméra numérique (50Hz) à 7.5m du nageur dans le plan sagittal. L'analyse du mouvement était réalisée à partir de 10m du mur, de manière à ce que la propulsion ne soit pas liée à la poussée sur le mur. Pour caractériser plus finement le mouvement d'un point de vue hydrodynamique nous avons calculé la surface du maître couple ainsi que le coefficient de traînée. Pour obtenir la surface du maître couple nous avons placé une caméra dans le plan frontal puis utilisé la technique de planimétrie proposée par Clarys [Clarys1979][Toussaint1992]. La surface du maître couple a été calculée à des instants clés du cycle de nage (phase ascendante, phase descendante et phase de transition). Pour chaque passage nous avons conservé la surface maximale du maitre couple noté S. Le coefficient de traînée était ensuite calculé de la manière suivante :

$$C_d = \frac{F_b.V_2}{\frac{1}{2}S(V_1^3 - V_2^3)} \tag{1.5}$$

Dans notre protocole nous avons évalué la reproductibilité de la résistance active des nageurs avec palmes. La résistance active a été calculée une première fois (RA_1) puis le jour suivant (RA_2) . Les nageurs ayant des variations entre RA_1 et RA_2 supérieures à 10% étaient rejetés de l'étude.

Ces premiers résultats obtenus (tab 1.1) mettent en évidence des résistances actives de l'ordre de 78.9N en moyenne. Ces valeurs sont proches de celles obtenues pour des nageurs en crawl (84N) par Kolmogorov [Kolmogorov1992] . Même si les vitesses sont nettement plus élevées en nage avec palmes qu'en crawl ($V = 2.5m.s^{-1}$ vs $2m.s^{-1}$), la technique ondulatoire induit une diminution de la surface du maître couple ($S_{\text{palme}} = 0.053m^2$ vs $S_{\text{crawl}} = 0.09m^2$, obtenue avec une méthode similaire) et du coefficient de traînée ($C_d = 0.47$ vs 0.64). En conséquence l'effet liée à la vitesse est compensée par la réduction de la constance de proportionnalité K ($K = 0.5SC_d$) $K_{\text{palme}} = 12.7$ et $K_{\text{crawl}} = 25$.

Participants	V_1 ($m.s^{-1}$)	V_2 ($m.s^{-1}$)	% ΔV (%)	RA_1 (N)	RA_2 (N)	% ΔRA (%)	K ($N.s^2.m^{-2}$)	S (m^2)	C_d
1	2.58	2.35	8.9	74.6	73.1	2.0	11.2	0.055	0.41
2	2.55	2.36	7.6	87	89.4	2.8	13.4	0.055	0.49
3	2.35	2.19	6.8	94.8	99.1	4.5	17.2	0.058	0.59
4	2.52	2.24	11.0	59.7	58.3	2.3	9.4	0.042	0.45
5	2.62	2.37	9.5	69.6	73.5	5.6	10.1	0.052	0.39
6	2.54	2.34	7.7	86.6	84.2	2.8	13.2	0.054	0.39
7	2.45	2.24	8.5	77.6	79.9	3.0	12.9	0.053	0.48
8	2.40	2.20	8.3	79.8	78.0	2.2	13.8	0.054	0.52
9	2.57	2.32	9.7	68.3	70.7	3.5	10.3	0.049	0.42
10	2.42	2.21	8.7	76.6	73.2	4.4	13.1	0.057	0.46
11	2.63	2.39	9.1	72.8	76.0	4.4	10.5	0.048	0.44
12	2.38	2.22	6.7	99.1	103.8	4.7	17.4	0.064	0.55
Moyenne	2.50	2.28	8.6	78.9	79.9	3.5	12.7	0.053	0.47
SD	0.1	0.08	1.20	11.30	12.60	1.20	2.60	0.005	0.06
CV (%)	3.80	3.30	14.10	14.40	15.80	33.20	20.50	10.10	12.60

Table 1.1 - Résistance active

1.2.3 Analyse dynamique de la performance des nageurs avec palmes

Dans l'optique de comprendre la performance du nageur avec palmes, nous avons évalué la résistance active. Une deuxième étape d'analyse des paramètres dynamiques consiste à étudier les aspects propulsifs. D'une manière générale la propulsion en milieu aquatique est basée sur l'interaction du corps avec le fluide. Pour générer une force propulsive le nageur accélère une masse d'eau, qui acquière de l'énergie cinétique. Seule une partie de la puissance mécanique totale (P_o) est utilisée pour vaincre la résistance à l'avancement (P_d), l'autre étant dissipée dans le fluide (P_k). Le rapport de la puissance utile (Pd) sur la puissance de sortie totale ($P_o = P_d + P_k$) est défini comme l'efficacité de Froude [Lighthill1975] :

$$\eta = \frac{P_d}{P_d + P_k} \tag{1.6}$$

Il apparaît que la performance en natation ne dépend pas seulement de la capacité du nageur à délivrer une haute puissance mécanique mais aussi à sa capacité à obtenir une haute efficacité propulsive (η) : η=1 signifie que la puissance totale est égale à la puissance de poussée et η<1 signifie qu'une partie de la puissance totale est dissipée dans le fluide. Il a été démontré que l'utilisation des bi-palmes augmente l'efficacité de Froude de 15 à 20% par rapport à un déplacement pieds nus (η=0.6 sans palmes ; η=0.7 avec palmes) [Toussaint2000][Zamparo2002]. Les monopalmes par leurs surfaces propulsives plus importantes devraient augmenter significativement l'efficacité propulsive de Froude. La propulsion peut également être analysée au travers de l'écoulement induit par le nageur. Le nombre de Strouhal permet d'aborder les caractéristiques du sillage. Ce nombre adimensionnel représente le ratio entre les effets instationnaires et stationnaires [Fish1999] :

$$St = \frac{Af}{V} \tag{1.7}$$

Où f représente la fréquence d'oscillation, A l'amplitude calculée à la chute de la palme, et V la vitesse de déplacement. De nombreuses études expérimentales menées sur des foils[Triantafyllou1993] ont corrélé l'efficience hydromécanique et le nombre de Strouhal. Les résultats montrent que lorsque le nombre de Strouhal est inférieur à 0.2, l'écoulement induit, génère de faibles forces de poussées. L'efficience optimale est obtenue lorsque l'on observe l'apparition de vortex Von Karman inversé dans une gamme de nombres de Strouhal compris entre 0.2 et 0.5[Lighthill1975] [Triantafyllou1993] [Von Karman1935]. D'autres études ont également identifié ce phénomène pour des poissons et des dauphins, associant un pic d'efficience propulsive à une gamme de nombre de Strouhal comprise entre 0.25 et 0.4. De manière à étudier la relation éventuelle entre le nombre de Strouhal et l'efficience propulsive nous avons reproduit le même protocole que celui réalisé précédemment pour caractériser la résistance active.

Participants	H (m)	V_1 ($m.s^{-1}$)	A (m)	f (Hz)	St	λ (m)	c ($m.s^{-1}$)	ηf
1	1.82	2.58	0.56	1.88	0.41	2.16	4.06	0.82
2	1.77	2.55	0.72	1.79	0.50	2.46	4.40	0.79
3	1.83	2.35	0.55	2.94	0.68	1.91	5.60	0.71
4	1.66	2.52	0.41	2.17	0.35	1.98	4.29	0.79
5	1.75	2.62	0.50	1.98	0.38	2.10	4.13	0.82
6	1.71	2.54	0.65	2.01	0.51	2.04	4.11	0.80
7	1.71	2.45	0.53	2.03	0.44	2.03	4.11	0.80
8	1.80	2.40	0.54	2.40	0.54	2.00	4.8	0.75
9	1.84	2.57	0.46	1.94	0.35	2.14	4.16	0.81
10	1.71	2.42	0.51	1.93	0.41	2.04	3.94	0.81
11	1.75	2.63	0.43	2.06	0.34	2.08	4.29	0.81
12	1.93	2.38	0.74	1.93	0.60	2.45	4.73	0.75
Moyenne	1.77	2.50	0.55	2.09	0.46	2.12	4.38	0.79
SD	0.07	0.10	0.10	0.31	0.11	0.17	0.46	0.03
CV (%)	3.9	3.8	19	14.40	14.9	24	8.20	10.60

Table 1.2 - Résistance active

Les résultats (tab 1.2) montrent que les meilleurs nageurs ont les nombres de strouhal les plus bas ($R = .77$, $p < .05$), ce qui correspond aux résultats obtenus par Arellano et al [Arellano2003]. L'analyse par corrélation partielle met en évidence que la vitesse est préférentiellement corrélée à la fréquence qu'à l'amplitude. Les nageurs les plus rapides sont aussi ceux qui obtiennent des valeurs de Strouhal associés à une efficience propulsive optimale d'un point de vue théorique. Les résultats d'efficacité propulsive de Froude vont dans le même sens : les nageurs les plus rapides développent les meilleures efficacités propulsives ($R = .81$, $p < .05$).

Ces résultats sont comparables à ceux obtenus pour les animaux marins [Rohr2004] [Rohr1983]. Nos résultats sont un peu plus élevés que ceux obtenus pour des nageurs avec palmes par Zamparo [Zamparo2005] . Néanmoins, l'étude de Zamparo ayant été réalisée sur des déplacements à la surface, les amplitudes verticales sont plus faibles et peuvent expliquer ces différences. Comme les déplacements en nage avec palmes peuvent se faire sous l'eau ou à la surface nous nous sommes intéressés à l'influence de la profondeur sur ces variables d'efficacité propulsive.

1.2.4 Influence de la profondeur de nage sur les paramètres dynamiques

En nage avec palmes, on différencie les épreuves en immersion et les épreuves de surface. Quelle que soit la distance, les records du monde sont meilleurs pour les épreuves réalisées sous l'eau. Peu d'études se sont intéressées à comparer les déplacements des nageurs en palme à la surface et sous l'eau. Ces études se sont limitées à une description cinématique du mouvement. Les auteurs mettent en évidence une augmentation de l'amplitude du mouvement ondulatoire sous l'eau [Luk1999] [Szilagyi1999] en comparaison à un déplacement à la surface. Ces modifications cinématiques impactent de manière importante les paramètres de traînée.

Lors d'un déplacement à l'interface air-eau, la traînée totale est caractérisée par trois composantes : La traînée de pression ou de forme, la traînée de friction et la traînée de vague [Vogel1994]. La traînée de vague est liée au transfert d'énergie cinétique du nageur en énergie potentielle formant ainsi une vague. Le nageur rencontre donc une zone de hautes pressions créée par la vague frontale et une zone de basse pression créée par la vague à l'arrière du corps. L'augmentation de vitesse du nageur entraîne à la fois une augmentation de la longueur d'onde mais aussi de l'amplitude de vague. La traînée de vague peut se caractériser par le nombre de Froude, qui représente le rapport entre les forces d'inertie et les forces gravitationnelles. Les nageurs les plus grands bénéficient ainsi d'une diminution de nombre de Froude . Lorsque l'on s'intéresse à la comparaison

entre le déplacement juste à la surface ou sous l'eau on s'aperçoit que la traînée de vague diminue avec la profondeur [Toussaint2005]. Ainsi lorsque les nageurs en palmes se déplacent sous l'eau ils semblent limiter la trainée de vague mais dans le même temps augmentent la surface du maître couple (amplitude de mouvement plus grande). Ces contraintes cinématiques et dynamiques peuvent affecter l'efficacité propulsive du nageur. Le but de cette étude est donc de comprendre les ajustements des nageurs entre les deux types de déplacement (sous l'eau vs surface).

Comme pour les travaux menés précédemment nous avons analysé 12 nageurs de l'équipe de France de nage avec palmes. Chaque participant devait réaliser 2 déplacements de 25 mètres sous l'eau à vitesse maximum. Un déplacement sans charge additionnelle et le second avec charge additionnelle. Les mêmes épreuves étaient réalisées pour un déplacement à la surface. Nous avons ensuite adopté la procédure suivante :

- Pour les déplacements à la surface la phase de coulée était réduite à 5 mètres et n'entrait pas dans l'évaluation du nageur.
- Pour les déplacements sous l'eau, étant donné les effets de traînée de vague [Vennell2006] , les nageurs devaient réaliser les épreuves à 1 mètre de profondeur. Tous les déplacements à une profondeur supérieure à 10% étaient rejetés.

Les résultats mettent en évidence des vitesses significativement plus faibles pour les déplacements à la surface (Vsurf) que sous l'eau (Vse) (Vse=2.5m.s-1 vs Vsurf=2.36m.s-1 ; P<0.01). Le déplacement sous l'eau engendre des amplitudes verticales plus importantes comparées à celles mesurées à la surface (Vse = 0.55 m vs. Vsurf = 0.46 m ; p < .01). Les amplitudes normalisées par la taille du sujet sont de l'ordre de 20% sous l'eau et de 17% à la surface (p< .01). Les efficacités propulsives sont 6% plus faibles à la surface que sous l'eau (ηse=0.79 vsηsurf=0.74 ; p< .01) (tab 1.3). Cette baisse d'efficacité peut être associée à une augmentation de la fréquence ondulatoire à la surface (f surf = 2.15 Hz vs fse = 2.08 Hz, p < .01).

Les résultats (tab 1.3) de résistance active mettent également en évidence des valeurs 7% plus importantes pour la nage de surface (RAse=78.9N vs RAsurf=84.7N, p< .01). La surface du maître couple est aussi plus faible à la surface (Sse = 0.053 m2 vs. Ssurf = 0.044 m2, p < .01) et est liée à l'amplitude du mouvement. Nous montrons également que le coefficient hydrodynamique est plus fort (Cdse = 0.47 vs. Cdsurf = 0.69, p < .01).

Ces résultats illustrent que la performance sous l'eau n'est pas uniquement due à une réduction de la traînée de vague mais également à une technique spécifique, contrainte par la surface libre.

Participants	ηse	ηsurf	RAse (N)	RAsurf (N)	Kse ($N.S^2.m^{-2}$)	ksurf ($N.S^2.m^{-2}$)	Sse (m^2)	Ssurf (m^2)	Cse	Csurf
1	0.82	0.76	74.6	85.1	11.2	14.2	0.055	0.047	0.41	0.060
2	0.79	0.75	87	91.4	13.4	16.1	0.55	0.048	0.49	0.70
3	0.71	0.67	94.8	101.2	17.2	20.5	0.058	0.046	0.59	0.89
4	0.79	0.77	59.7	64.7	9.4	11.9	0.042	0.039	0.45	0.64
5	0.82	0.78	69.6	74.4	10.1	12	0.052	0.044	0.39	0.55
6	0.8	0.74	86.6	93.1	13.2	15.7	0.054	0.044	0.49	0.77
7	0.8	0.78	77.6	82	12.9	15.5	0.053	0.045	0.48	0.69
8	0.75	0.71	79.8	83.1	13.8	16.3	0.054	0.043	0.52	0.76
9	0.81	0.73	68.3	75.8	10.3	12.9	0.049	0.044	0.42	0.59
10	0.81	0.75	76.6	82.2	13.1	15.4	0.057	0.046	0.46	0.63
11	0.81	0.78	72.8	77.6	10.5	12.6	0.048	0.041	0.44	0.62
12	0.75	0.69	99.1	107.9	17.4	21.1	0.064	0.051	0.55	0.83
Moyenne	0.79	0.74	78.9	84.7	12.7	15.5	0.053	0.045	0.47	0.69
SD	0.03	0.04	11.3	11.9	2.61	3	0.005	0.003	0.058	0.10
CV (%)	4.3	4.9	14.4	14	20.5	19.6	10.3	7	12.4	15.2

Table 1.3 - Comparaison dynamique entre un déplacement à la surface et sous l'eau

1.2.5 Nouvelle méthode d'évaluation de la surface du maître couple

La réduction du maitre couple (S) en natation est un élément fondamental de l'optimisation des performances car elle influence fortement les valeurs de traînée passive et/ou active :

$$\frac{1}{2}\rho S C_X V^2 \tag{1.8}$$

Ce paramètre peut facilement être estimé pour des nageurs tractés dans la mesure où ils maintiennent une posture (la plus hydrodynamique possible). Cependant, S est beaucoup plus difficile à évaluer en condition de nage réelle en raison des interactions segmentaires. Par conséquent, de nombreuses méthodes se cantonnent à une approximation de la valeur de cette surface. Dans cette étape, nous proposons d'utiliser l'animation par ordinateur pour calculer S.

Dans la littérature, plusieurs méthodes ont été utilisées pour calculer la résistance active, en se basant sur différentes définitions de S. La surface du maître couple a été calculée différement selon les études :

- Le volume total du corps humain élevé à la puissance deux tiers[Kolmogorov1992] . Cette méthode reste valable uniquement pour des formes géométriques régulières, telle qu'une sphère.
- La surface mouillée, correspondant à la surface totale en contact avec le fluide. Cette méthode se base sur des équations de prédiction généralement fonctions de la longueur du corps et de la masse corporelle[Clarys1979] [takagi1999] [Kjendlie2008]. Ces équations de régression sont obtenues à partir de données sur de grandes populations et ne peuvent donc pas être totalement satisfaisantes pour un sujet donné. Cette méthode ne différencie pas les parties immergées et émergées du corps lors de la nage.
- La surface frontale basée principalement sur une technique de planimétrie et pour une posture clé (posture engendrant la plus grande surface frontale dans le cycle de nage [Toussaint1992]). D'un point de vue méthodologique, cette technique ne prend pas en compte les effets de perspectives dans l'image servant de base au calcul de S.

Ces différentes méthodes peuvent donc conduire à des divergences dans l'estimation de S [Cappaert1998] [Alexander1977] , et par conséquent dans le calcul de la résistance à l'avancement. Par ailleurs, cette surface ne peut pas être considérée comme constante pendant un cycle de nage. Ceci ne permet donc pas à l'entraîneur de juger des modifications apportées au placement de son nageur.

Afin de limiter ces imprécisions, nous avons utilisé dans les études précédentes deux

caméscopes synchronisés pour évaluer S dans un cycle ondulatoire. Cette surface a été calculée en utilisant une méthode de planimétrie [Clarys1979] [Toussaint1992]. Deux objets de calibration (à proximité de la trajectoire des nageurs) ont été utilisés : l'un situé à 10m et une autre située à 5 m du mur. A partir de ces deux calibrations, deux zones de référence peuvent être calculées. Les zones intermédiaires ont été interpolées linéairement entre ces deux zones , permettant de définir S à chaque instant du cycle de nage. Cependant, avec cette méthode, deux vues parfaitement synchronisées dans deux plans différents sont nécessaires au calcul de S, ce qui complexifie sa mise en place pratique. La reproductibilité intra opérateur de l'approche est satisfaisante (Rxx =0.96) mais elle ne permet toujours pas de prendre en compte les effets de perspectives dans l'image. Nous avons alors proposé une nouvelle méthode permettant de calculer la surface du maitre à partir d'une animation d'humains virtuels. Cette méthode permet d'obtenir instantanément la surface du maître couple lors d'un cycle ondulatoire.Les principaux objectifs et spécifications techniques de ce travail sont :

– L'utilisation d'un seul caméscope dans un plan sagittal, qui permet l'analyse concomitante de S et de la technique gestuelle ;
– S'affranchir des difficultés de calibration en espace aquatique ;
– S'affranchir des effets de perspective, qui peuvent donner lieu à des imprécisions de mesure sur S et donc sur la résistance active.

1.2.5.1 Méthodologie

L'organisation générale de validation et de comparaison de notre nouvelle méthode est présentée sur la figure suivante. Nous réalisons une capture du mouvement du nageur en 2D dans le plan frontal pour obtenir la surface du maitre couple (Sconventionnelle) à partir de la technique conventionnelle de planimétrie. D'un autre côté une acquisition de mouvement dans le plan sagittal permet d'animer un humanoïde de synthèse en 3D (en considérant le mouvement ondulatoire comme totalement en 2D). Les données anthropométriques obtenues sur le nageur réel sont ensuite appliquées au personnage de synthèse. Une fois cette adaptation morphologique réalisée nous réalisons une rotation de la scène en 3D pour calculer la surface du maître couple de l'avatar (Savatar) à l'aide d'une caméra virtuelle orthographique. Les deux surfaces peuvent être ensuite comparées (fig 1.2).

Adaptation morphologique du personnage de synthèse

La première étape du calcul du maître couple consiste à adapter la morphologie de l'humain virtuel à la morphologie du sujet réel. Pour ce faire nous utilisons une vue

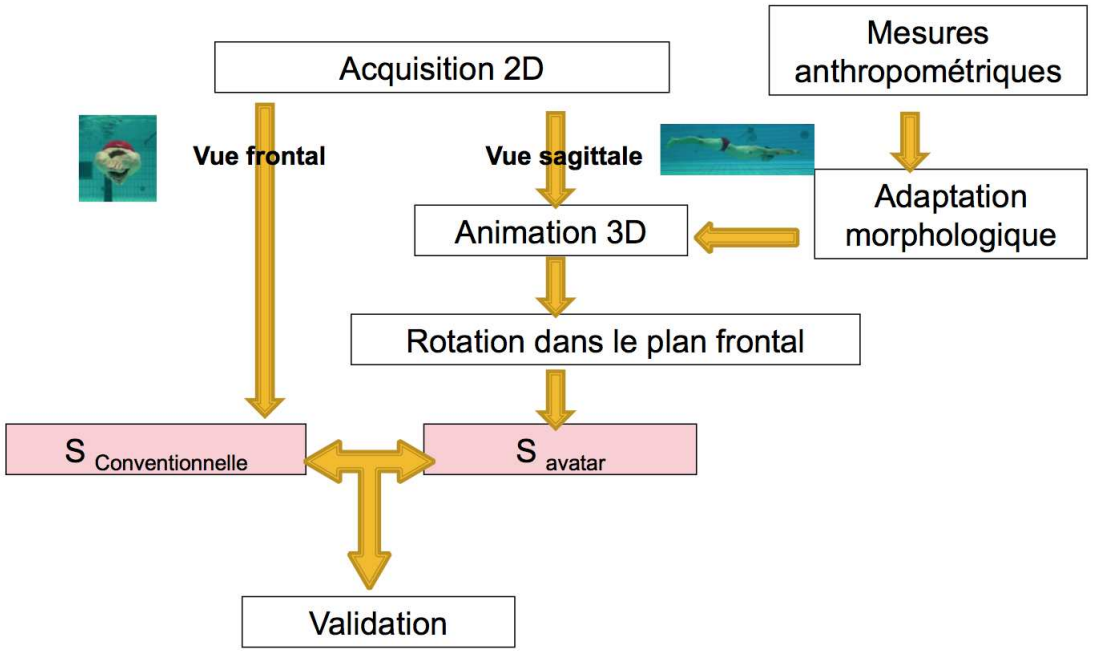


Figure 1.2 - procédure de validation de calcul du maître couple

frontale et une vue sagittale du sujet dans une posture proche de celle qu'il adopte lors du mouvement. Nous prenons ensuite en compte la longueur et la géométrie des segments réels (mesurée préalablement) pour calibrer les deux vues du sujet. A partir de cette calibration nous faisons correspondre les différents segments du sujet réel et de son avatar (fig 1.3).

Animation 3D du nageur

Une fois le personnage calibré nous avons fait correspondre la vue de la caméra dans le plan sagittal à la vue de la caméra virtuelle (nous permettant de visualiser le personnage de synthèse) en adaptant l'angle et la focale. L'animation du nageur est alors possible en appliquant les angles inter-segmentaires (en 2D) au personnage de synthèse (fig 1.4). Pour calculer la surface du maître couple du personnage de synthèse nous réalisons une rotation de l'avatar pour placer notre caméra virtuelle dans le plan frontal. La surface est ensuite obtenue par planimétrie à partir d'une vue orthographique, c'est-à-dire sans effet de perspectives. En effet, les segments du corps sont projetés dans le même plan, en appliquant un opérateur d'homothétie pour éliminer les effets de perspective (fig 1.5).

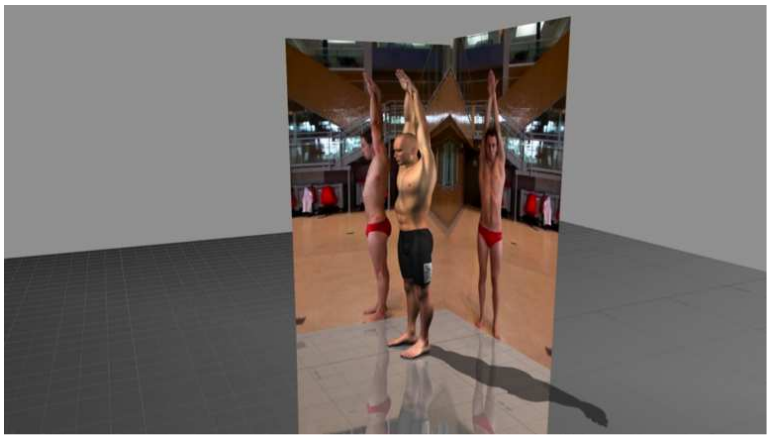


Figure 1.3 - calibration sujet réel et sujet virtuel

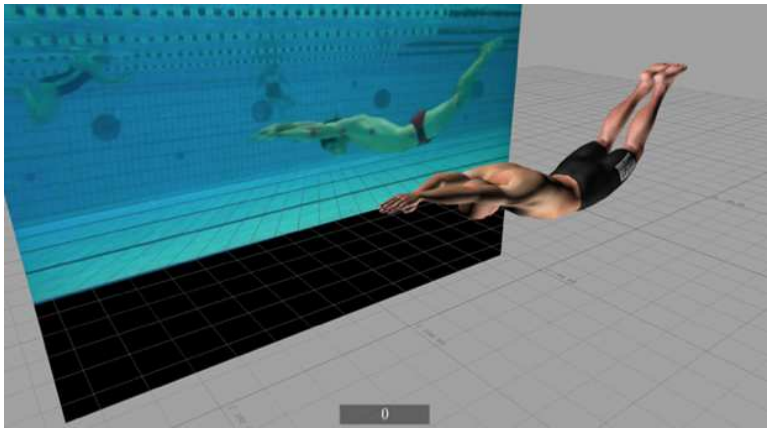


Figure 1.4 - animation 3D

1.2.5.2 Résultats/discussion

Nous avons comparé les surfaces de maîtres couples calculées de manière conventionnelle et par animation d'humain virtuel pour des mouvements ondulatoires de nageurs sans palmes lors de coulées. Nous pouvons noter que la méthode traditionnelle minimise la valeur de la surface calculée en comparaison à celle obtenue par cette nouvelle approche. L'écart minimal est de l'ordre de 6,3% lorsque l'ensemble des segments du corps sont les plus alignés possibles et peut augmenter jusqu'à 23% lorsque les pieds sont dans la position la plus haute. Ces résultats mettent en évidence une sous estimation de la surface calculée par la méthode classique due aux effets de perspectives. Les principaux avantages de notre méthode sont l'obtention d'une surface de maître couple instantanée (durant tout le cycle de nage) plus proche de sa valeur réelle, et une simplicité d'utilisation. En effet une seule caméra dans le plan sagittal est nécessaire (pas besoin de caméra immergée dans le plan frontale). On peut donc penser qu'une

intégration automatique des processus de calibration pourrait permettre son utilisation dans l'entraînement. Une des perspectives de ce travail est d'adapter notre outil à la nage avec palmes en ajoutant au personnage de synthèse une monopalme.

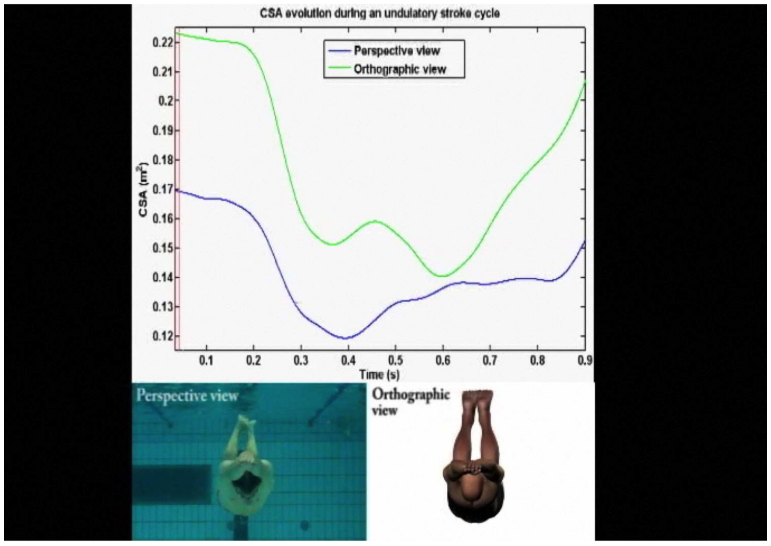


Figure 1.5 - comparaison du maître couple avec les deux méthodes

1.3 Influence des palmes sur l'efficacité propulsive du nageur

1.3.1 Conception d'un automate d'évaluation de l'efficacité propulsive des palmes

En nage avec palmes le mouvement humain peut être influencé par les aspects géométriques et la structure des palmes. Lorsqu'un nageur change de palmes les paramètres cinématiques de son déplacement sont modifiés. Il est donc extrêmement difficile d'évaluer l'efficacité propulsive de certains modèles de palmes de manière standardisée. Pour différencier les effets des palmes des effets du nageur, nous avons développé un automate HERMES (Hydrodynamic equipment for research on mechanical efficiency of swim-fins). Cet automate permet d'évaluer la palme dans un contexte réaliste (interactions fluide-structure) tout en contrôlant la cinématique du mouvement. L'objectif terminal étant de quantifier la contribution de la palme sur la performance globale (effi-

cacité propulsive) en étudiant le système « palme seul ». Ce projet a été réalisé dans le cadre d'un contrat avec la société Décathlon qui souhaitait connaître les caractéristiques mécaniques des palmes in situ.

1.3.1.1 Développement du système HERMES

L'un des points clés de l'automate est d'être en mesure de reproduire une cinématique de cheville humaine lors d'un cycle de nage. Pour ce faire nous avons acquis les mouvements de 10 nageurs avec palmes. A partir de ces mouvements nous avons extrait à chaque instant du cycle les paramètres suivants : l'amplitude, la fréquence, la vitesse linéaire de la cheville, et l'angle formé entre la jambe et le pied. Les résultats mettent en évidence pour des vitesses linéaires variant de 0.88 à $0.98 m.s^{-}1$, des variations d'amplitude de 0.41m à 0.74m, des fréquences de 0.63 à 0.90Hz et des angulations de 0.34 à 0.36 rad. Une fois les cinématiques connus nous avons développé une solution permettant de les reproduire et de les contrôler. Pour la vitesse horizontale (constante) nous avons opté pour un chariot sur un rail. Celle-ci est ajustable de 0 (propulsion générée uniquement par la palme en activant un mouvement vertical) à $1 m.s^{-}1$. L'amplitude verticale est modifiable manuellement de 0 à 0.6m par l'intermédiaire de bielles de différentes longueurs. La fréquence est ajustable de 0 à 1Hz par l'intermédiaire d'un motoréducteur. Enfin les angulations de la cheville sont obtenues par des ressorts de raideurs variables (de 30 à $85 N mm^{-}1$). L'objectif étant de caractériser les palmes d'un point de vue mécanique nous avons positionné un capteur de force à la cheville (fig 1.6). Ce capteur nous permet d'évaluer à une fréquence de 100 Hz les forces suivant les 3 axes avec un maximum de 1000N pour l'axe vertical et antéropostérieur et 500N pour l'axe médiolatéral. Une caméra numérique étanche nous permet d'obtenir de manière synchrone la cinématique réelle de la palme.

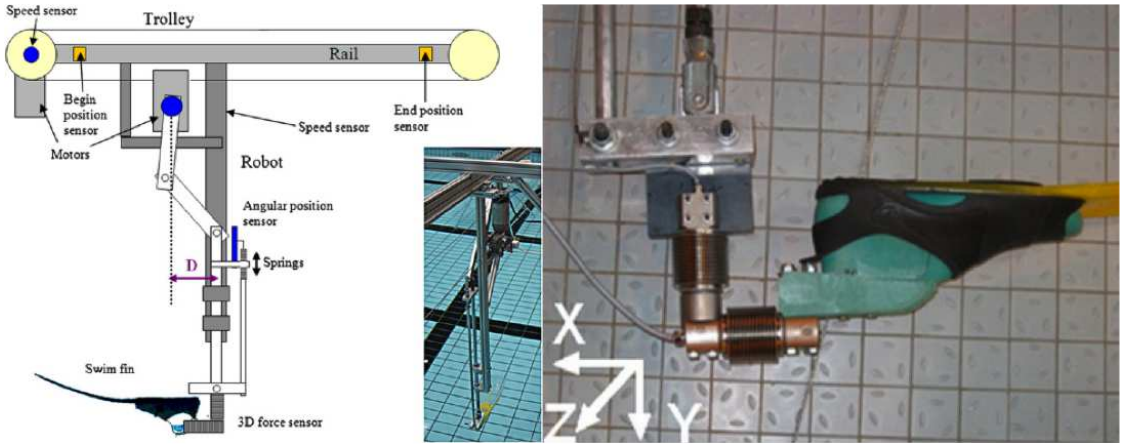


Figure 1.6 - robot HERMES

1.3.1.2 Evaluation de l'efficacité propulsive des palmes

Pour obtenir l'efficacité propulsive des palmes en lien avec les aspects géométriques nous avons adopté la procédure suivante. Tout d'abord nous avons évalué pour chaque palme (fig 1.7) sa raideur, suivant la méthodologie proposée par Zamparo et al (2005). La raideur était calculée à partir de la déflexion δ, (m) de la palme lors de l'ajout d'un poids P(N) au bord de fuite, à une distance L (m) du point d'appui :

$$EI = \frac{PL^3}{3\delta} \tag{1.9}$$

Dans un deuxième temps nous avons testé les palmes à l'aide de l'automate HERMES. Pour tous les tests, la profondeur était fixée à 0.5m en position neutre. Pour chaque palme nous avons ensuite calculé l'efficience hydromécanique de la manière suivante. Tout d'abord, il est nécessaire de calculer la puissance de sortie de la palme :

$$P_s = F_{x'}.U \tag{1.10}$$

où $\bar{F_{x'}}$ représente la force de poussée moyenne lors du cycle de nage.

$$\bar{F_{x'}} = \frac{1}{T}\int_0^T F_{x'}(t)dt \tag{1.11}$$

Puis nous obtenons la puissance d'entrée :

$$P_e = \frac{1}{T}\left(\int_0^T F_{y'}(t).\frac{dh}{dt}dt + \int_0^T M(t).\frac{d\theta}{dt}dt\right) \tag{1.12}$$

Où h représente le déplacement vertical, θ l'angle formé entre le pied et l'horizontal, $F_{y'}(t)$ la composante verticale du vecteur force et M(t), le moment de force à la cheville. Enfin l'efficacité propulsive est obtenue par le rapport entre la puissance de sortie et la puissance d'entrée du système :

$$E_P = \frac{P_s}{P_e} \tag{1.13}$$

De manière à évaluer l'efficience propulsive pour différentes conditions de nage, nous avons testé les palmes pour une gamme de nombre de Strouhal allant de 0.2 à 0.55.

1.3.1.3 Résultats/discussion

Notre automate permet d'évaluer les caractéristiques mécaniques d'une palme lors d'un cycle de nage standardisé et complètement contrôlable. A partir de données obtenues lors des expérimentations nous pouvons calculer l'efficacité propulsive des palmes. Nous

avons ainsi testé 7 palmes de conceptions différentes. Les résultats mettent en évidence des valeurs d'efficacité légèrement inférieures (fig 1.8) à celles précédemment reportées avec une méthode de calcul similaire. Ainsi les efficacités obtenues pour des foils où des nageoires de poissons sont de l'ordre de 75% à 90% [Lauder2007] [Rohr2004] [Triantafyllou1993], alors que nos valeurs fluctuent de 45% à 75%.

Plusieurs facteurs peuvent expliquer ces différences. Tout d'abord les caractéristiques de la palme d'un point de vue de sa géométrie et de sa structure sont différents des foils où des nageoires de poissons. Les automates d'évaluation sont également différents. D'une manière générale notre système permet d'identifier les paramètres fondamentaux pour la conception des palmes.



Figure 1.7 - palmes

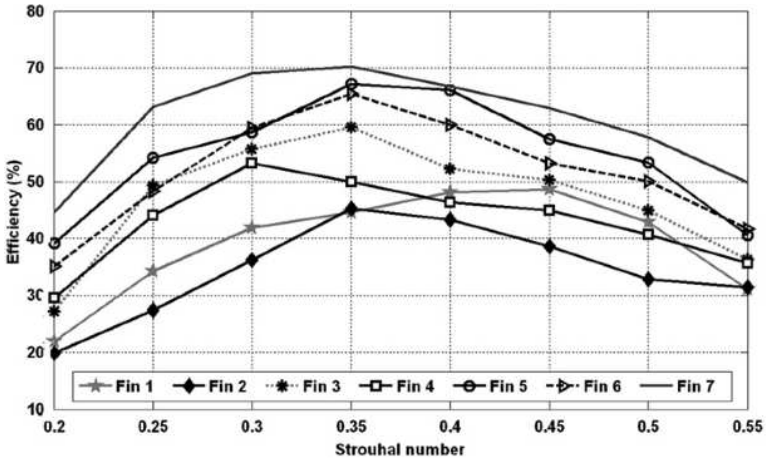


Figure 1.8 - efficacité propulsive

Une perspective intéressante est de comparer les résultats expérimentaux aux résultats issus de modèle en couplage fluide-structure. Il permet également d'évaluer des aspects plus larges sur la propulsion en milieu aquatique. Par exemple avec notre système il est

possible de tracter des nageurs à différentes profondeurs et différentes vitesses et ainsi évaluer la résistance passive des sujets.

1.4 Conclusion-perspectives

La thématique que j'ai développée avec Guillaume Nicolas, et dédiée à l'analyse de la propulsion aquatique contribue à trois axes principaux de recherche. Tout d'abord, cette thématique contribue au développement d'outils et de méthodes adaptés à des milieux contraints, engendrant des interactions complexes. Le milieu fluide est un exemple d'application particulièrement complexe et contraint, nécessitant des développements très spécifiques :

- L'ADES a permis d'évaluer des paramètres dynamiques pour différentes situations de nage, ce qui n'était pas possible en utilisant les approches de type MAD-System [Toussaint2000]. Cet outil central a trouvé des applications dans le domaine de la recherche appliquée mais aussi dans le domaine du suivi d'entraînement de sportifs de haut-niveau. Une perspective à ce développement consiste à comparer les résultats expérimentaux à ceux issus de simulations numériques [von Loebbecke2009] . Cette approche couplée peut aussi permettre d'affiner la conception de notre outil (par exemple, le choix de la charge freinant le nageur, ou le système de mise en tension du fil attaché au nageur) mais aussi les principes théoriques (hypothèse de puissance mécanique utile supposée constante pour 2 passages à vitesse maximale). Pour ce dernier point, une perspective serait d'estimer la résistance active instantanée dans un cycle de nage, ce qui constituerait une contribution significative au domaine.
- Le système HERMES permet d'effectuer différents tests paramétriques (influence de paramètres géométriques et mécaniques : longueur, raideur....) sur la performance aquatique en nage avec palme. Une difficulté était ici de reproduire le mouvement d'une cheville humaine, de manière standardisée et reproductible, ce qui a été rendu possible par l'utilisation de systèmes à base de bielle-manivelle avec un entraxe spécifique. Dans cette approche, nous avons aussi fait le choix de tester la palme pour une cinématique imposée, plutôt que de laisser la palme engendrer la propulsion de manière totalement autonome. Ce dernier point constitue une perspective à notre travail, mais nécessite de redimensionner certaines pièces mécaniques engendrant des frottements (rail de guidage etc.). Dans la continuité de ce travail, nous projetons de comparer nos résultats expérimentaux à ceux obtenus à l'aide de modèles de simulation en couplage fluide-structure déjà développés au travers de la collaboration avec l'IRMAR. En particulier, nous souhaiterions tester l'influence des paramètres mécaniques sur les écoulements autour de la palme, ou l'estimation de la masse additionnelle d'eau engendrée par les accélérations segmentaires du nageur et du matériel

flexible.

– Développements logiciels et méthodologiques : Nous avons pour idée de mettre certains outils et compétences issues du domaine de l'animation au service du domaine de la propulsion aquatique. Nous avons entrepris le développement d'une méthode basée sur l'animation d'humains virtuels pour limiter les contraintes liées à l'utilisation de caméras dans le calcul du maître couple du nageur. Cette méthode encore en cours de développement offre des perspectives très encourageantes aussi bien d'un point de vue méthodologique que dans son utilisation pratique. Par exemple nous souhaiterions inclure cette méthode dans le calcul de la résistance à l'avancement et ainsi limiter certains biais expérimentaux (ex : effets de perspectives dans le plan frontal). Un autre axe de réflexion consiste également à simuler le mouvement aquatique (ex. du mouvement ondulatoire) pour déterminer quel paramètre biomécanique prédomine dans la performance produite. Pour ce développement, nous envisageons de tester des méthodes de cinématique inverse utilisant des critères issus de nos connaissances expérimentales pour les optimiser.

Dans un second temps, la thématique liée à la propulsion aquatique contribue à la l'amélioration des connaissances expérimentales. Nous avons en particulier focalisé nos analyses sur la caractérisation des facteurs d'efficacité en fonction du niveau d'expertise et du type de nage (surface Vs immersion) sur des exercices de sprint. Nous avons pu montrer par exemple que les ajustements techniques du nageur (qui conditionnent la configuration de la palme) affectent le nombre de Strouhal. Les nageurs les plus performants en sprint sont généralement ceux qui obtiennent les St les plus faibles. Pour ce type de déplacement (sprint, pour lequel une contrainte est de fournir une puissance mécanique utile la plus importante possible), nous avons également pu mettre en évidence le fait que ces St les plus faibles correspondent aux efficacités propulsives les plus importantes. Pour des distances de nage plus importantes, la contrainte de coût énergétique vient se rajouter à la contrainte purement mécanique requise pour une condition de sprint [Zamparo2002] [Toussaint2000].

Nous souhaiterions désormais vérifier la validité de l'hypothèse d'optimisation de St pour des distances de nage supérieures. Un verrou majeur consiste à identifier quels sont les critères à optimiser.S'agit il de paramètres physiologiques (en lien avec le cout énergétique par exemple), de paramètres mécaniques (en lien avec l'efficacité de Froude par exemple), de paramètres musculaires (pouvant être abordés au travers de méthodes musculo-squelettiques), ou bien d'une combinaison de ces différents critères ? Cette perspective ambitieuse pourra se faire au travers d'un projet commun entre les différentes équipes du laboratoire M2S (physiologie, biomécanique, structuration tissulaire).

Bilan et diffusion

Les travaux réalisés dans ces études ont donné lieu à plusieurs résultats importants et une large diffusion scientifique. Pour ce qui est des études sur l'interaction entre l'homme et le milieu en natation, nous avons tout d'abord créé un système de mesure des paramètres dynamiques [Bideau2003b]. Puis à l'aide de ce système nous avons mis en évidence les caractéristiques cinématiques et dynamiques du niveau d'expertise [Nicolas2007] [Nicolas2009] des nageurs avec palmes. Nous avons ensuite développé une méthode basée sur l'animation et la simulation de personnage de synthèse pour affiner la mesure des paramètres dynamiques [Bideau2010b].

Pour ce qui est des études sur l'interaction entre l'homme et son matériel nous avons tout d'abord développé, un système permettant d'évaluer simplement le coefficient de raideur et la viscoélasticité des palmes [Bideau2003a]. Plus tard dans le cadre d'un projet industriel nous avons créér un automate permettant d'évaluer les caractéristiques mécaniques des palmes in situ. Cet automate a permis d'évaluer l'efficacité mécanique des palmes en fonction des variables géométriques [Nicolas2010].

Enfin pour étudier plus précisement l'influence des paramètres mécaniques, liés à la structure de la palme nous avons développé une collaboration avec l'IRMAR. Les premiers travaux ont permis le développement d'un modèle d'interaction fluide structure en 2 dimensions [Bideau2010c].

" I'd like to change things for the younger generation of swimmers coming along."
Michael Phelps

Chapitre 2

Interactions avec des adversaires

2.1 Contexte

Dans les sports de duels où dans les activités d'interception de balle, les experts développent d'importantes qualités perceptives et une coordination motrice adaptée à la situation. Ainsi, de nombreuses études ont été menées pour tenter d'examiner la prise d'informations des sportifs[Williams1999b]. Il a été démontré que les experts ont de meilleures aptitudes que les novices à utiliser des informations visuelles précoces pour guider leur réponse [Abernethy2007] [Williams1993] . L'analyse des duels sportifs est relativement complexe, puisque le mouvement du joueur est modulé par celui de son adversaire. Comprendre comment, et sur quels critères, les joueurs adaptent leurs mouvements, nécessite la mise en place de méthodologies particulières.

L'une des premières méthodes utilisées pour analyser la prise d'informations visuelles d'un sportif consiste à l'interroger pour qu'il livre ses impressions sur son action et sa prise d'informations. L'utilisation de questionnaires permet de formaliser et de retranscrire ces impressions. Cette méthodologie se base sur le ressenti du sujet, l'importance relative des variables cinématiques dans la prise de décision est donc très difficilement quantifiable. D'une manière générale, cette technique, basée sur des mesures subjectives de la perception, ne permet pas de caractériser précisément la prise d'informations visuelles du sujet.

Dans les méthodologies basées sur la vidéo, les sujets visionnent une action de leur

adversaire. Pour réaliser le film, les chercheurs placent une caméra vidéo à la place des yeux du sujet lors d'une situation réelle de jeu. Par exemple, pour l'étude de la prise d'informations visuelles d'un joueur de tennis lors d'un service adverse, la séquence est réalisée en plaçant la caméra vidéo sur la ligne de fond de court adverse. Si l'on s'intéresse maintenant à la prise d'informations visuelles d'un gardien de but de football lors d'un penalty, la caméra vidéo est positionnée au centre du but au niveau de la ligne. Le point de vue de l'athlète est un élément fondamental, pas toujours respecté, pour obtenir une séquence vidéo réaliste. La vidéo est ensuite projetée sur un écran et les expérimentateurs ont alors pour consigne de prédire le résultat final de l'action visualisée. Il existe ensuite différentes techniques d'investigation : la réaction temporelle et l'occultation temporelle. La technique de la réaction temporelle est basée sur le délai mis par un observateur pour répondre correctement à une tâche. La durée de la réponse est ensuite mise en relation avec la précision de la réponse [Abernethy1985]. Les études utilisant cette méthode ont démontré la supériorité des experts par rapport aux novices dans la brièveté et la précision de la réponse[Williams1994]. Mais cette technique ne permet pas de connaître précisément l'instant et la localisation de la prise d'informations visuelles. La technique basée sur la vidéo, la plus répandue, est celle de l'occultation temporelle. Dans cette méthodologie, il est nécessaire de couper la vidéo à différents instants clés afin d'obtenir plusieurs séquences comportant chacune différentes informations visuelles (mouvement de tir, trajectoire de la balle,. . .) [Abernethy1987][Salmela1979]. Les consignes données aux sujets visionnant ces séquences (répétées plusieurs fois dans un ordre aléatoire) sont alors de prédire le résultat final de l'action observée [Savelsbergh2002][Mori2002]. Les moyens dont dispose le sujet pour répondre aux consignes peuvent varier d'une étude à une autre : réponses verbales [Allard1980], indications écrites[McMorris1993] [Williams1993], pression d'un bouton[Féry2001]. Ces différents outils de réponse ne permettent pas de modifier la réponse une fois qu'elle a été établie. Pour remédier à cela, certains auteurs ont privilégié l'utilisation de joystick enregistrant les modifications apportées par le sujet au cours de l'action projetée [Savelsbergh2002] [Savelsbergh2005]. L'avantage de l'occultation temporelle est donc de pouvoir étudier les processus perceptifs à certains instants clés d'une séquence motrice. Il est ainsi possible de déterminer précisément à partir de quel instant le sujet visionnant le film prédit efficacement le résultat de l'action. Les informations visuelles, présentes à ce moment clé de l'action, sont alors considérées comme pertinentes pour le sujet. La méthodologie de l'occultation temporelle est basée sur le fait qu'il existe un lien entre les capacités perceptives et la performance des athlètes [Williams1992]. Cependant un certain nombre de critiques et de désavantages, inhérents à l'utilisation de la vidéo, peuvent être formulés :

– L'affichage vidéo est un affichage en deux dimensions (2D). Par conséquent, il ne permet pas d'avoir accès à l'intégralité des informations visuelles d'une situation réelle de jeu [Williams1999a][Abernethy2001]. Or les informations stéréoscopiques, c'est-à-dire les informations sur la profondeur et le relief, peuvent être déterminantes pour

la performance[Hendrix1996] [Mazyn2004].

– Un autre désavantage lié à la bidimensionnalité de l'affichage vidéo concerne le point de vue du sujet. Celui-ci est fixe face à une séquence vidéo. Cet affichage ne permet pas d'avoir accès à des informations visuelles supplémentaires, ce sont toujours les mêmes informations qui sont représentées. Or, lorsqu'un individu se déplace dans la réalité, il peut visualiser de nouvelles informations en fonction de son angle de vue. Si l'on prend l'exemple d'un gardien de but de football, lorsque celui-ci se déplace face à un tireur, il peut voir les éléments visuels situés en arrière du tireur (orientation du pied de frappe, mouvement d'un partenaire,. . .).

– La réalisation des séquences vidéos peut également poser problème. Ces clips obtenus sur le terrain obligent les acteurs filmés à adapter leur comportement du fait de la présence d'une caméra. Par exemple, dans le cadre de l'étude sur les mouvements de feinte au rugby, des chercheurs ont filmé un joueur simulant ce type de mouvement [Jackson2006].Se pose alors la question de la pertinence d'un tel mouvement : cette feinte aurait-elle été effective en un-contre-un en situation réelle de jeu ?

– La taille des écrans de projection utilisés peut être remise en cause. Ce sont parfois de simples écrans de télévision qui ont servi à la visualisation des séquences vidéos. (Williams1999a). Cela a pour conséquence de réduire le champ visuel et de limiter l'accès aux indices de la profondeur [Crognier2007]. Au tennis, Féry et Crognier ont pu montré que la présentation de séquences vidéos sur un téléviseur entraînait une surestimation de la longueur des trajectoires de balles courtes et sous-estimation des trajectoires de balles longues. Or, ces erreurs n'apparaissent pas lors de situations réelles de jeu [Féry2001].
– Les techniques basées sur l'utilisation de la vidéo fournissent principalement des données sur l'instant où les informations visuelles sont importantes et non sur la localisation spatiale de ces informations. Ce manque peut être comblé en couplant la technique de l'occultation temporelle avec une occultation spatiale des informations visuelles [Abernethy1985] [Müller2006]. Cependant, peu d'études semblent avoir utilisé ce couplage entre l'occultation temporelle et l'occultation spatiale. Il existe en effet d'autres méthodes pour déterminer la localisation spatiale des informations visuelles. La dimension spatiale de la prise d'informations visuelles des sportifs face à une vidéo a pu être analysée grâce à la technique de l'oculométrie [Singer1996]. Cette technique consiste à analyser les centrations ou fixations visuelles d'un sujet (direction du regard) au cours d'une action. Il est alors possible de caractériser l'attention portée sur certaines informations visuelles lors de cette action. Ceci est dépendant des zones fixées, de la durée des fixations et de la fréquence de ces fixations [Savelsbergh2002]. De nombreuses études utilisant ce couplage entre oculométrie et vidéo pour l'analyse des stratégies visuelles, ont pu mettre en évidence des différences entre experts et novices au football [Williams1998] [Helsen1993] [Savelsbergh2005], au tennis [Singer1996], au baseball[Shank1987], au badminton [Abernethy1987], en sport de

combat[Ripoll1995],etc. Cependant, des conclusions contradictoires semblent émerger quant aux stratégies visuelles utilisées pour un même groupe[Williams1999a]. Il existe plusieurs limites à l'utilisation de l'oculométrie, que ce soit en laboratoire ou sur le terrain. Les principales critiques concernent le sens d'une telle démarche. Le fait d'enregistrer une fixation visuelle au cours d'une action ne signifie pas forcément que cette fixation correspond à une information prise en compte pour agir. En effet, il existe une différence fondamentale entre le fait de fixer un point et le fait de considérer ce point pour l'action à venir [Williams1999a]. La localisation du regard n'est pas forcément directement liée à la prise d'informations visuelles [Abernethy1988] [Davids1984] .

Si les méthodologies préalablement utilisées permettent de définir des relations entre la prise de décision du joueur et son niveau d'expertise, ou encore de définir l'instant où le joueur prend sa décision, il semble très difficile de différencier l'influence d'une variable cinématique par rapport à une autre. Par exemple dans le cas du duel entre un gardien et un tireur en handball, il est très difficile de mettre en évidence l'influence d'une organisation segmentaire sur la réaction du gardien. Demander à un sujet de modifier la position d'un segment au moment du tir modifie l'ensemble du mouvement. Les conditions expérimentales ne sont donc pas contrôlées.

2.2 Problématique

Comme nous venons de le souligner, pour comprendre et déterminer le poids de chaque variable cinématique du mouvement d'un adversaire dans la prise de décision d'un joueur, il est nécessaire de les contrôler. La réalité virtuelle répond à la fois aux exigences de standardisation de la situation au travers du contrôle des humanoïdes de synthèses et aux limites des méthodologies précédentes. En effet, elle permet d'avoir un affichage tridimensionnel donnant accès à un maximum d'informations visuelles, d'adapter le point de vue du sujet lorsque celui-ci se déplace dans l'environnement, de visualiser des actions qui se rapprochent au maximum d'une situation réelle de jeu.

Dans cette optique, j'ai montré au cours de ma thèse que les outils de réalité virtuelle apportent des solutions adaptées aux contraintes expérimentales, pour comprendre la prise d'informations visuelles dans le cadre de duels sportifs. Depuis, la fin de ma thèse, j'ai développé cet axe de recherche au sein du laboratoire M2S. Aujourd'hui cette recherche s'organise autour d'une chaine d'analyse (fig 2.1) composée de quatre grandes étapes. Même si la compréhension du duel sportif passe par l'accomplissement de l'ensemble des étapes, à chacune d'entre elles une recherche spécifique est réalisée.

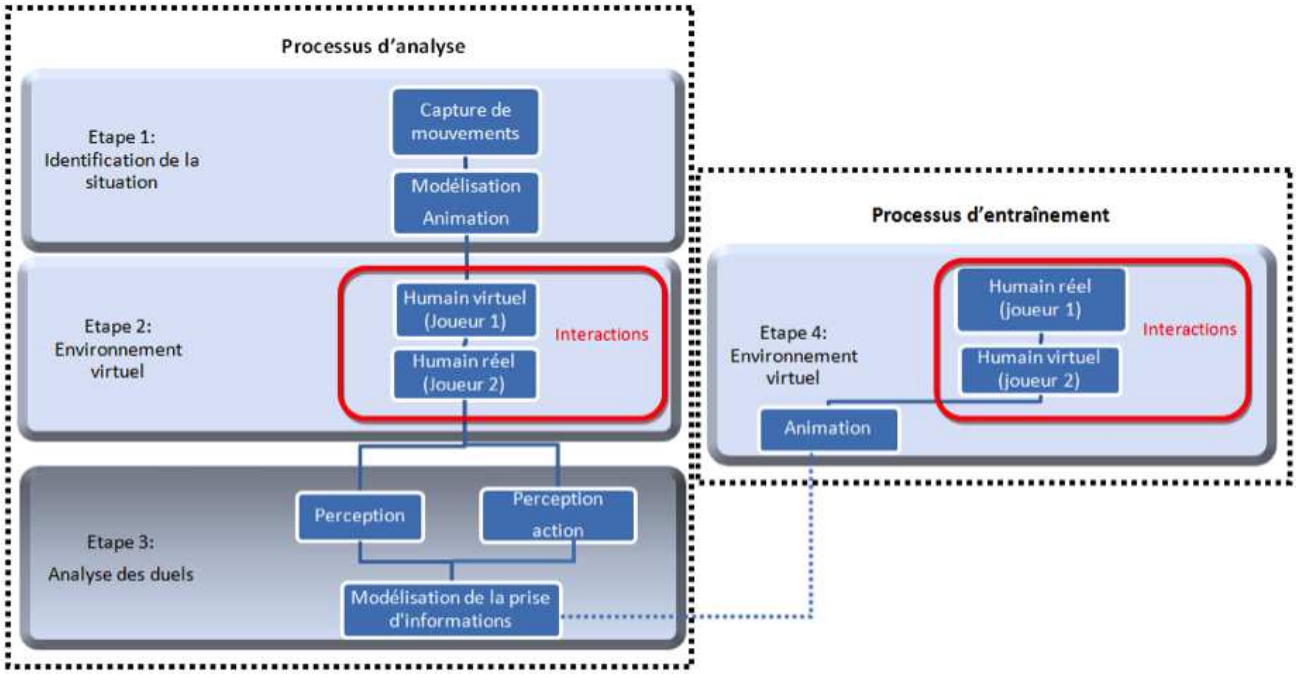


Figure 2.1 - Chaine d'analyse des duels sportifs

La première étape, concerne l'identification de la situation de duel. Par identification de la situation nous entendons la mise en évidence des informations cinématiques caractérisant le mouvement du joueur 1 en fonction du mouvement de son opposant, le joueur 2. Dans le cas d'une feinte au rugby cette étape va permettre de différencier les variables cinématiques d'un mouvement de feinte d'un mouvement sans feinte et de mettre en évidence l'organisation segmentaire permettant que la feinte soit effective. Les analyses et modélisations cinématiques réalisées au cours de cette étape s'apparentent aux travaux menés au chapitre précédent. Les données cinématiques sont ensuite intégrées à notre moteur d'animation MKM [Multon2008] pour animer un humanoïde de synthèse.

La seconde étape concerne, la mise en place du duel en environnement virtuel. Au cours de cette étape l'objectif est d'être en mesure de fournir un environnement virtuel le plus réaliste possible, mais aussi de proposer des solutions technologiques adaptées aux différentes activités sportives. La thèse de Nicolas Vignais : "Mise en oeuvre et évaluation d'une méthodologie fondée sur la réalité virtuelle pour l'analyse de la prise d'informations visuelles du gardien de but de handball", s'inscrit complètement dans cette étape de validation d'un environnement virtuel en évaluant pour différentes conditions expérimentales le niveau de présence des sujets[Slater1993]. La présence se définit comme « le sentiment psychologique d'être dans l'environnement dont la base technologique est l'immersion ». La recherche se focalise donc ici sur la relation entre le développement de système immersif et son adéquation avec l'analyse de la performance

sportive, au travers de l'évaluation du niveau de presence.

Une fois l'environnement de synthèse validé il est possible de passer à **la troisième étape** du processus d'analyse. Au cours de cette étape nous utilisons notre environnement immersif pour étudier les interactions sportives lors des duels. L'objectif étant de comprendre quelles sont les informations cinématiques prises en considération par un joueur sur son adversaire ou sur la trajectoire d'un objet pour réaliser son mouvement. Cette partie nécessitant des compétences fortes en neurosciences, j'ai développé une collaboration entre le laboratoire mouvement sport santé et le docteur Cathy Craig de la Queen's Univeristy de Belfast. Dans la mesure où nous sommes capables d'extraire certaines informations perceptives liées à la performance du joueur, nous tentons le cas échéant de créer un modèle.

Ce modèle peut être ensuite utilisé à **la quatrième étape**. Cette quatrième étape est présenté au paragraphe 2.6. L'objectif poursuivi à ce niveau est la conception de simulateur en environnement de synthèse pour l'entraînement sportif. La thèse de Sébastien Brault montre comment les résultats obtenus à l'étape 3 sont fondamentaux pour l'étape 4. En effet sa thèse avait pour but de comprendre comment un défenseur, en fonction de son niveau d'expertise, est capable de détecter une feinte de corps d'un attaquant lors d'un duel en 1 vs 1. Une fois la prise de décision modélisée (étape 3), il est possible de l'appliquer à un défenseur virtuel et d'inverser le duel. Ainsi un attaquant réel pourrait s'entraîner, en réalité virtuelle, à réaliser des feintes de corps contre un défenseur de niveau d'expertise modulable (du débutant au professionnel).

2.3 Identification des situations de duels

Déterminer le poids des informations cinématiques dans la prise de décision des sportifs lors des duels, nécessite une connaissance précise du mouvement. Cette connaissance du mouvement est à la base de notre processus d'analyse (fig 2.2). De manière à illustrer cette phase d'identification je présenterai trois situations de duels pour trois sports différents. La première concerne l'analyse d'une feinte de corps lors d'un duel entre un attaquant et un défenseur au rugby. La seconde se focalise sur le duel entre un gardien et un tireur au handball. Enfin, la dernière situation est basée sur l'étude d'un coup franc au football. Pour chacune des situations nous analysons uniquement la cinématique d'un des joueurs : celle de l'attaquant au rugby, et celle du tireur au handball et au football.

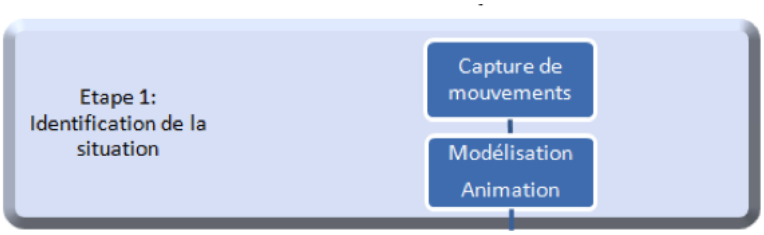


Figure 2.2 - Chaine d'analyse des duels sportifs

2.3.1 La feinte au rugby

Au rugby, ce qui est le plus important, ce n'est pas la conquête du ballon, mais bel et bien la conquête d'un terrain. Pour gagner, chaque équipe doit donc mettre en place des techniques et tactiques, collectives et individuelles. Ici, dans le cadre du duel attaquant-défenseur (1 vs. 1) ce sont les actions individuelles et plus précisément l'action de feinter qui nous intéresse. En effet, lors du duel 1 vs. 1, l'attaquant ne peut pas faire de passe et il n'a, d'un point de vue spatial, que deux options : passer à droite ou à gauche du défenseur. De nombreuses combinaisons sont possibles. Il peut essayer d'induire en erreur le défenseur en simulant un départ dans une mauvaise direction et finalement effectuer un changement de direction au dernier moment. La feinte au rugby consiste donc en un changement soudain de direction. Ce changement de direction nécessite une stratégie motrice particulière. De nombreuses études ont analysé le contrôle du mouvement et les stratégies d'organisation spatiale en examinant comment la coordination du mouvement des yeux, de la tête, des segments corporels évoluent durant des tâches motrices particulières [Crane1997][Hirasaki1999].

L'ensemble de ces études ont montré qu'au cours des mouvements de réorientation, le corps ,la tête et les yeux sont coordonnés suivant une stratégie top down, avec une priorité donnée au réalignement de la tête pour permette une stabilisation du regard dans l'espace [Pozzo1991] [Moore1999]. Ces auteurs émettent l'hypothèse que la stabilité de la tête et des yeux dans l'espace est un élément fondamental pour la coordination globale du corps. Le contrôle des mouvements de tête dans le plan horizontal lors des changements de directions est de ce fait très important [Hollands2001] [Patla1999] .

Patla et al , suggèrent également que les changements cinématiques d'organisation segmentaire, nécessaire pour cette réorientation concerne à la fois le système visuel mais aussi le contrôle du centre de masse (CM) suivant l'axe médio latéral (M/L)[Patla1999] . La régulation du centre de masse suivant l'axe médiolatéral peut se faire au travers du contrôle du pendule du corps par un placement approprié de la cheville, de la hanche et d'une action des muscles du tronc [Winter1995]. Deux théories ont été mises en avant concernant la régulation du mouvement du corps selon un pendule. La première stipule que le corps est contrôlé suivant un pendule inversé dans le plan frontal à partir

d'une stratégie d'activation musculaire à la cheville. Cependant comme ces muscles sont faibles et que l'inertie du pendule est relativement importante cette stratégie est parfois ineffective surtout lorsque la situation est contrainte temporellement [Patla1999]. La seconde théorie supporte l'idée que pour des déplacements rapides et efficients du centre de masse, le sujet adopte une stratégie à la hanche[Horak1986]. Avec cette stratégie le corps est contrôlé comme un double pendule en déplaçant le membre supérieur et le membre inférieur dans des directions opposées. Cette stratégie permet des mouvements du centre de masse vers la gauche ou vers la droite au cours de déplacements complexes [Patla1999].

Comprendre les mécanismes de changement de direction dans une situation aussi complexe que le duel entre un attaquant et un défenseur au rugby est un élément fondamental de l'analyse de la performance sportive. Ces changements de directions sont d'autant plus complexes qu'ils impliquent des stratégies motrices des deux joueurs. Pour éliminer le défenseur, l'attaquant essaye souvent de réaliser un mouvement de feinte. L'objectif étant de donner des informations cinématiques pour faire croire à un déplacement dans une fausse direction et de modifier très rapidement son organisation segmentaire pour aller dans la direction désirée. Jackson et al [Jackson2006] ont mis en évidence les situations dans lesquelles la feinte de corps de l'attaquant est effective. Pour ce faire ces auteurs ont utilisé des vidéos de mouvements de feintes, occultées à différents instants (fig 2.3). Si cette étude permet de mettre en évidence l'instant où le défenseur est capable de prédire la direction finale de l'attaquant, aucun lien n'est fait entre les informations cinématiques et la perception du défenseur.

Pour mettre en relation les informations cinématiques et la perception du joueur, la première étape consiste en une comparaison cinématique de mouvements de feintes et de mouvements sans feintes. L'objectif étant de comprendre comment certaines informations cinématiques sont masquées (ou minimisées) pour assurer que l'attaquant peut modifier tardivement son mouvement dans une direction opposée tout en préservant une stabilité globale du corps, alors que d'autres informations cinématiques sont exagérées(ou maximisées) pour laisser croire à l'attaquant à un déplacement dans une fausse direction. Dans le cas d'un mouvement de feinte le but de l'attaquant est de s'assurer que le défenseur focalise son attention sur les informations maximisées. Comparer les mouvements de feintes (DM) et les mouvements sans feintes (NDM) ne permet pas totalement de mettre en évidence les variables cinématiques maximisées où minimisées, il est également important de différencier d'un point de vue cinématique les mouvements de feintes réussis (DM+) des mouvements de feintes ratés (DM-). Les mouvements de feintes réussis correspondent à ceux ayant entraîné un déplacement du défenseur dans la mauvaise direction.

Pour obtenir ces informations cinématiques, nous avons réalisé une acquisition de mou-



Figure 2.3 - etude de jackson et al, 2006

vements lors de plusieurs duels en 1 vs 1 au rugby. L'intervalle d'étude a été défini entre le dernier contact du pied avec le sol avant le changement de direction (pied gauche si le changement direction est vers la droite) et le deuxième contact du même pied. La figure 2.4 présente l'intervalle d'étude pour un mouvement sans feinte vers la droite : LFC1 représente le dernier contact du pied gauche et LFC2 le second contact du pied gauche. En plus des contacts au sol nous avons pris en compte deux points

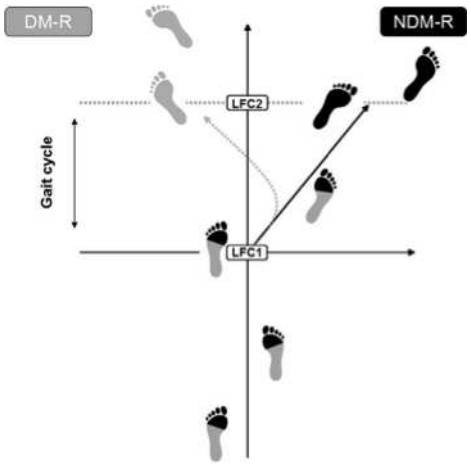


Figure 2.4 - intervalle d'étude

spécifiques : R1 qui correspond à la première réorientation du mouvement (moment où le sujet change de direction vers la droite où vers la gauche) et R2 qui correspond à la deuxième réorientation du sujet (R2 n'apparait que pour les mouvements de feintes).

2.3.1.1 Comparaison cinématique des mouvements de feintes et des mouvements sans feintes

Pour définir quels sont les éléments fondamentaux dans la réalisation de la feinte nous avons calculé les corrélations entre les paramètres cinématiques d'un mouvement sans

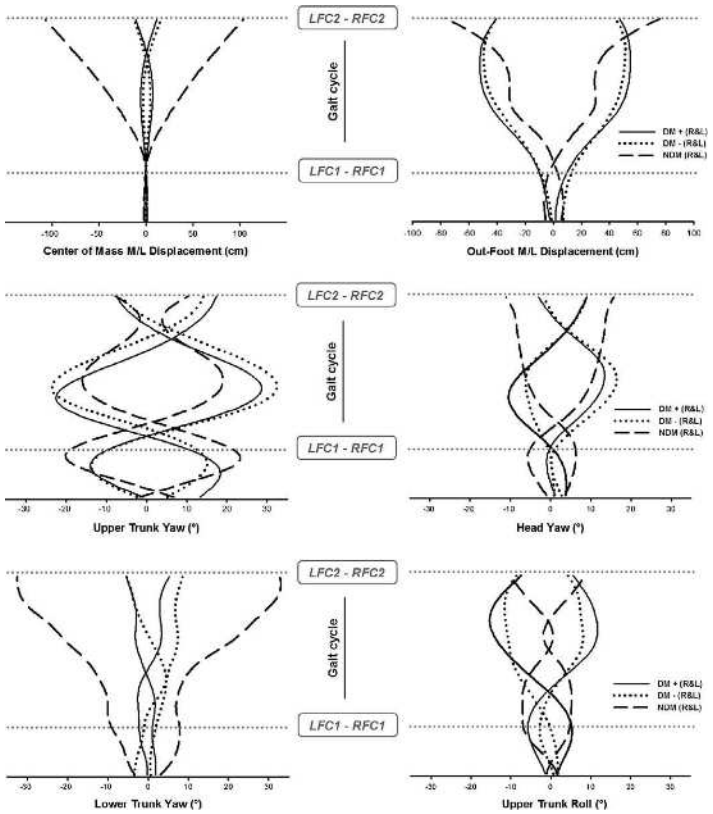


Figure 2.5 - organisation segmentaire des mouvements avec et sans feintes

feinte avec ceux d'un mouvement avec feinte dont la direction finale est identique. Une importante corrélation pour une donnée cinématique implique que ce paramètre n'est pas spécifique au mouvement de feinte. Inversement une faible corrélation pour une variable cinématique rend ce paramètre décisif.

Les résultats montrent que dans l'intervalle entre LFC1 où RFC1 et R2 l'ensemble des variables (centre de masse, déplacement du pied extérieur suivant l'axe médio-latéral, rotation du tronc suivant l'axe verticale, rotation de la tête suivant l'axe vertical, rotation du tronc suivant l'axe antéropostérieur, rotation des épaules suivant l'axe médio-latéral) évoluent de la même manière (fig 2.5).

Nous avons également calculé l'écart à chaque pas de temps pour chaque variable cinématique entre les mouvements sans feintes et les mouvements avec feintes. Les résultats mettent en évidence que le déplacement du centre de masse suivant l'axe médio-latéral est un paramètre minimisé. Par paramètre minimisé nous entendons que les écarts à chaque pas de temps entre les mouvements avec et sans feintes sont très faibles. Pour les autres paramètres, position du pied extérieur, rotation des épaules suivant l'axe vertical, rotation de la tête suivant l'axe vertical nous trouvons des écarts plus

importants entre les deux types de mouvements. Ces résultats permettent d'identifier les paramètres exagérés comme la rotation des épaules suivant l'axe médio-latéral et les paramètres minimisés comme l'orientation du centre de masse.

2.3.1.2 Interactions entre un gardien et tireur au handball

2.3.1.3 Description du mouvement du tireur

L'analyse des informations prélevées par le gardien nécessite une connaissance de l'organisation gestuelle du tireur. Les premières études des tireurs en handball ont été réalisées par Joris et collaborateurs [Jöris1985]. Ces auteurs ont analysé, en 2D, les cinématiques de la hanche, de l'épaule et du poignet. Ils montrent une contribution de la main de l'ordre de 30% pour la réalisation du tir. Le faible nombre d'articulations analysé et le fait que l'étude soit en 2D, ne permet pas de caractériser de manière précise l'action du tireur. Afin de palier à ces imprécisions Chaigneau et al[Chaigneau1992] réalisèrent une étude 3D du tir à l'aide d'un stroboscope. Cette étude met en avant l'importance de la rotation de l'humérus au cours du mouvement. Elle se limite cependant à l'analyse du bras porteur et ne permet pas de définir la cinématique globale du tireur lors de son action. Une étude cinématique plus complète a été réalisée par Wit et al [Wit1998] avec une fréquence d'acquisition plus élevée (60Hz). Ils montrent que la vitesse de balle est la résultante d'une transmission de quantité de mouvements entre le bassin et le tronc, puis entre le tronc et l'avant bras.

L'ensemble des études précédentes se déroule de manière standardisée et s'éloigne d'une situation réelle de jeu. De plus ces études s'intéressent à une forme de tir, souvent en appui, et négligent les autres types de mouvements, comme ceux en suspension. Enfin une étude menée récemment sur des joueurs français de niveau national dans différentes situations de tir (en appui ou en suspension) [Fradet2003] a permis de définir précisément l'enchaînement segmentaire. Dans cette étude les vitesses linéaires de l'épaule, du coude et du poignet ont été obtenues à l'aide d'une capture de mouvement in situ.

2.3.1.4 Contraintes liées au duel gardien tireur en handball

La tâche première d'un gardien de handball est de se trouver sur la trajectoire du ballon. Comme l'a montré Belisle [Belisle1963] celui-ci doit réaliser une tâche de coïncidence entre au moins un de ses segments et le ballon. Cependant, le temps imparti au gardien pour atteindre sa cible est très réduit. Dans le cadre de ce duel la contrainte temporelle

est très importante et conditionne la préparation du gardien. Ainsi, le gardien doit anticiper, c'est-à-dire mettre en place une parade avant le déclenchement du tir. L'étude de Cottin [Cottin1989] menée sur 3 internationaux montre que la mise en action de propulsion des segments corporels vers le ballon se réalise quand ce dernier a effectué le premier tiers de la durée totale de sa trajectoire. Le temps de réaction global du gardien était défini par un abaissement du centre de gravité du corps sans déplacement latéral. Cette réaction du gardien se produisait en moyenne quarante trois millisecondes avant le lâcher du ballon. Cependant, comme le précise Cottin, cet indice ne permet pas de définir la parade réalisée mais peut être vu comme un ajustement postural qui concrétise la préparation à court terme. Cette étude confirme que le gardien de but prépare donc son action avant le déclenchement du tir.

2.3.1.5 Evaluation des informations prélevées par le gardien de but en handball

La prise d'informations des gardiens de but en handball a été étudiée dans la littérature suivant les différentes méthodes précédemment présentées. Keller et al[Keller1987] montrent que les gardiens de handball prélèvent des indices sur l'organisation segmentaire du joueur. Ces auteurs ont soumis à un gardien un ensemble de tirs à 7 mètres. Ils ont observé les différences entre la trajectoire de la balle et la trajectoire du gardien. Dans près de 90% des tirs, le gardien se trouvait sur la trajectoire du ballon. La préparation du gardien n'est donc pas aléatoire et n'est pas non plus le résultat d'un choix prédéterminé. De manière à définir les indices pris par le gardien sur le mouvement du tireur, Deridder[Deridder1985] utilise une technique vidéo. Cet auteur montre qu'en situation de pénalty, l'attention du gardien se porterait sur le bras porteur du ballon. En utilisant une méthode subjective basée sur quatre interviews de gardiens de première division, Debanne[Debanne2003] observe pour ces différentes catégories d'indices les éléments suivants :

– Les indices préalablement mémorisés : pour les uns, il s'agit de créer des contre-informations pour amener le tireur à lancer le ballon dans un espace qui sera occupé. Concrètement le gardien ferme un angle de tir pour orienter le choix du tireur vers une zone qui lui sera favorable. D'autres effectuent une préparation totale concrétisée par un choix a priori d'un type de parade parmi celles dont le gardien dispose dans cette situation.

– Les indices extéroceptifs : ils sont fonction d'indicateurs visuels sur le segment porteur de balle comme la ligne d'épaule, le coude, le poignet, le bras. Ces indices sont aussi fonction de la stratégie mise en place par le gardien, de la collaboration du contre qui va fermer des angles de tirs et des contacts entre les défenseurs et le tireur.

– Les indices de représentation : ils sont fonction du vécu du gardien en tant que joueur de champ. Ils sont donc très variables d'un gardien à un autre. Seul un des joueurs parmi ceux testés, semble avoir construit une stratégie en fonction des différentes positions et courses du tireur.

Toutes ces méthodes montrent que le bras porteur de la balle et les segments liés à cette chaîne influencent le gardien. Cependant, les auteurs ne définissent pas l'influence relative de chaque paramètre dans la réponse du gardien. Les éléments ne sont pas quantifiés, il n'est donc pas possible de définir si les informations liées au coude ont plus d'importance que les informations liées au poignet et inversement.

2.3.2 Coup franc au football

Le coup franc au football est l'une des situations de duels fréquemment rencontrée par les gardiens de buts au football. Ce duel implique des stratégies à la fois du tireur mais aussi du gardien. Du point de vue du gardien celui-ci peut tenter d'influencer le tireur en positionnant un mur composé d'un nombre variable de joueurs. En plaçant un mur l'idée est de complexifier la tâche du tireur pour une zone donnée du but. En effet, pour passer au dessus du mur et atteindre le but, le joueur doit réaliser un tir avec un effet prononcé donné au ballon. Une fois le mur placé le gardien se positionne du côté ouvert du but. Plus le nombre de joueurs est important dans le mur plus le gardien se positionne vers l'un des montants du but, de manière à toujours accéder aux informations visuelles du mouvement du tireur. Néanmoins ce choix n'est pas sans conséquences. En effet si le tireur réussit à donner suffisamment d'effets et de vitesse à son ballon pour passer le mur, le gardien se trouve en difficulté du fait d'une augmentation des contraintes spatiotemporelles.

Arrêter un tir dans cette zone nécessite une prise d'information précoce, de manière à atteindre le ballon. Cette prise d'information peut se faire soit sur la trajectoire du ballon, soit sur des éléments dans la cinématique du tireur, soit sur ces deux sources d'informations réunies. Craig et al [Craig2006] ont réalisé une étude sur la perception des trajectoires du ballon de gardiens de but de haut niveau lors d'un coup franc. Dans cette étude réalisée en environnement de synthèse, les gardiens n'avaient uniquement accès qu'à la trajectoire du ballon. Les auteurs mettent en évidence que pour des trajectoires de ballons sans effet les gardiens perçoivent très bien la position finale du ballon. Par contre ces mêmes auteurs montrent que lorsqu'il y a des effets donnés au ballon, de type « effet Magnus », les gardiens perçoivent très mal la trajectoire du ballon. Les informations cinématiques liées au mouvement du tireur pourraient donc s'avérer fondamentales dans une tâche d'interception où le ballon est soumis à un effet particulier. Néanmoins le fait que le tireur se trouve généralement à une distance relativement importante du gardien (20 mètres) minimise ses possibilités de prélever

des informations cinématiques très fines. Par contre on peut penser que les paramètres de la course d'élan du tireur peuvent fournir un certain nombre d'indices au gardien. Comme pour les activités présentées précédemment la première étape est de comprendre l'organisation segmentaire (phase d'élan et phase de tir) du tireur lors d'un coup franc avec effet du ballon et d'un coup franc sans effet du ballon.

2.3.2.1 Analyse cinématique du mouvement de tir

Pour comprendre le mouvement du tireur nous avons mis en place la situation suivante (fig 2.6). Un ballon était placé à 20 mètres du montant droit d'un but, un mur était ensuite positionné à 9.15m de ce ballon. Nous avons matérialisé deux zones (1.7m*1m) dans le but, correspondant aux deux lucarnes. Nous avons ensuite demandé aux joueurs (12 joueurs de CFA) de tirer avec le maximum de vitesse dans la zone 1 puis dans la zone 2. La zone 1 correspondait à la lucarne droite et nécessitait un tir avec effet pour passer le mur. La zone 2 correspondait à la lucarne gauche et ne nécessitait donc pas de donner un effet au ballon. Les mouvements des joueurs ont été obtenus à l'aide



Figure 2.6 - capture de mouvement lors d'un coup franc

de notre système VICON MX. Ceci nous a permis de mettre en évidence une course d'élan particulière en fonction du type de frappe. Ainsi l'angle d'approche est de 42,5 ± 10,1 °pour la frappe sans effet et de 55,5±11,4° pour la frappe avec effet (P<0 ,01). Le rayon de courbure moyen n'est pas significativement différent, il est de 28,4±5,9m lorsque le joueur ne doit pas mettre d'effets au ballon, et de 29,2± 6,3m dans l'autre cas. Par contre le rayon nous pouvons noter une différence significative pour le rayon de courbure lors du dernier pas (18,2± 6,2m tir sans effet ; 13,8± 5,3m ; P<0 ,01). Une des questions est donc de savoir si ces variations cinématiques peuvent être perçues par les gardiens de but.

2.4 La réalité virtuelle au service de la compréhension des duels sportifs



Figure 2.7 - Etape 2 du processus d'analyse

2.4.1 La présence : un facteur fondamental

L'utilisation de la réalité virtuelle pour l'analyse d'une activité sportive est soumise à un certain nombre de contraintes. La plus importante d'entre elles est de fournir un environnement qui engendre un haut niveau de présence[Slater1993] . C'est-à-dire un environnement où le sujet intègre celui-ci comme étant le sien. La sensation de présence est liée à différents facteurs, soit technologiques soit psychologiques. Ainsi Slater et Usoh [Slater1993] distinguent deux types de facteurs : les facteurs externes liés à la technologie et les facteurs internes liés aux aspects psychologiques. Les facteurs internes sont la manière d'intérioriser les expériences d'un individu. Les facteurs externes correspondent, quant à eux, aux types de technologies et de matériels utilisés pour afficher l'environnement virtuel. La mesure de la présence est un élément fondamental de la validation d'un environnement virtuel dans le cadre des activités physiques.

La mesure de la présence est très complexe puisqu'elle résulte d'un ensemble de paramètres difficilement maîtrisables. Hendrix [Hendrix1996] répartit ces mesures, en mesures objectives et mesures subjectives. Dans les mesures objectives on trouve certaines catégories d'indicateurs[Barfield1993]. Ces indicateurs sont physiologiques, c'est-à-dire qu'ils sont fonction de la tension musculaire, des réponses oculaires et cardiovasculaires aux évènements virtuels. Ils sont aussi liés à la réalisation d'une ou plusieurs tâches [Slater1998] dans le monde synthétique, c'est-à-dire à la précision des mouvements et à la rapidité de réponse. Un autre indicateur objectif concerne le degré de désorientation qui correspond au temps mis par le sujet pour ré-émerger dans le réel.

Les mesures subjectives correspondent à une évaluation psychologique, généralement réalisée à l'aide de questionnaires [Witmer1998]. Vu la nature intrinsèque et complexe de la présence, valider des mesures subjectives de la présence ne paraît pas évident. Comme le souligne Hendrix [Hendrix1996] : « L'évaluation de la présence requiert à la fois l'utilisation des mesures subjectives et objectives. Ceci représente la forme de mesure la plus appropriée. ». Dans le cas des activités physiques, il est nécessaire que le sujet puisse reproduire des gestes les plus proches possibles de la réalité. Cette condition vient s'ajouter aux autres contraintes qui déterminent la présence. Pour évaluer le degré de présence d'un sportif, il nous semble donc nécessaire d'utiliser une méthode objective, en rapport avec la réalisation de la tâche dans un environnement virtuel. Cette réalisation doit être comparée à celle rencontrée dans le réel. La comparaison des cinématiques des sportifs entre une situation réelle et une situation virtuelle peut donc être un moyen quantitatif supplémentaire d'évaluation de la présence.

Si un haut niveau de présence permet de valider un environnement virtuel, pour l'analyse des duels sportifs, d'autres questions se posent sur les facteurs influençant la réalisation de la tâche. En effet plusieurs aspects de la simulation peuvent affecter le niveau de presence des sujets immergés, comme la qualité de l'animation, le rendu graphique. . .

Ma recherche s'est donc orientée en tout premier lieu, sur la validation de la réalité virtuelle pour l'analyse du duel entre un gardien et un tireur au handball. Une fois l'environnement virtuel validé, je me suis intéressé à l'influence du rendu graphique du personnage synthétique sur le niveau de présence du sportif immergé. Enfin, comme les technologies antérieures pour analyser les duels sportifs étaient principalement basées sur des enregistrements vidéos, j'ai évalué le niveau de présence des sportifs face à une vidéo et face à un personnage synthétique dans un environnement virtuel.

2.4.1.1 Comparaison au réel

La mise en œuvre de la réalité virtuelle pour la compréhension du geste sportif nécessite de rendre l'environnement et les mouvements des personnages de synthèse les plus proches possibles d'une situation réelle. Cette contrainte est liée à la capacité des sportifs à intégrer le monde virtuel comme étant le leur. L'objectif est de pouvoir réaliser leur activité le plus naturellement possible. Cette dimension psychologique se retrouve dans la notion de présence. Comme nous l'avons souligné précédemment, la manière la plus courante d'évaluer le degré de présence est d'utiliser des questionnaires subjectifs. Cependant, dans le cas d'une activité sportive, la performance est liée aux paramètres techniques, c'est-à-dire, à la gestuelle de l'athlète. Il est donc souhaitable pour valider l'outil réalité virtuelle, d'évaluer la présence en étudiant la réalisation du mouvement d'un athlète dans un monde synthétique. Au cours de ma thèse je me suis intéressé à

cette étape fondamentale du processus de validation de l'outil réalité virtuelle. Ainsi, au cours de cette étape nous avons comparé les mouvements de gardiens de handball dans un environnement virtuel à leurs mouvements dans le réel, pour une tâche identique. Le protocole expérimental consistait en une capture du mouvement du gardien et du tireur dans différentes situations (fig 2.8) :

– Tirs à 6 mètres en appui,
– Tirs à 9 mètres en appui,
– Tirs à 9 mètres en suspension,

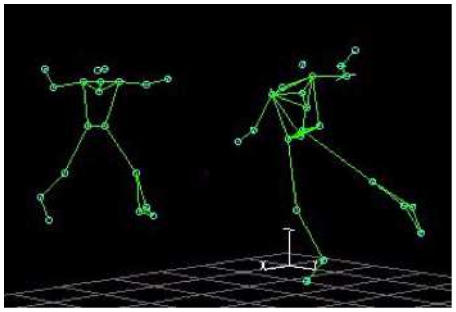


Figure 2.8 - capture de mouvement du duel gardien tireur en handball

Le mouvement du tireur est acquis dans l'objectif unique d'animer un personnage pour l'expérimentation en environnement virtuel. De plus, au niveau du mouvement du tireur, nous considérons l'instant de lâcher de la balle de manière à l'intégrer comme paramètre d'entrée à un module d'animation du ballon. Une fois les mouvements animés, les gardiens étaient immergés à l'aide d'un système de réalité virtuelle de type semi-immersif. Ce système était constitué de trois videoprojecteurs Barco 1208S contrôlés par une station graphique SGI 83 Onyx2 Infinite Reality (Silicon Graphics. L'image était projetée sur un écran semi-cylindrique de 3.80 m de rayon, de 2.38 m de hauteur, pouvant couvrir un champ de vision de 135°. Une paire de lunettes stéréoscopiques était synchronisée à 60Hz avec le système de réalité virtuelle pour permettre la stéréovision. Afin d'améliorer le sentiment de présence au cours de l'expérimentation, un vrai but de handball (3 m × 2 m) a été placé dans la salle de réalité virtuelle à l'endroit où il était virtuellement représenté dans l'environnement synthétique.

Pour chaque situation la cinématique des gardiens est analysée pour être comparée à celle obtenue pour le même mouvement en environnement virtuel. Les paramètres cinématiques étudiés étaient : la trajectoire du centre de masse, les trajectoires des centres de masse locaux des différents segments corporels, les vitesses et accélérations des centres de masses locaux. Le processus global de comparaison entre les mouvements obtenus en environnement réel et en environnement virtuel est présenté à la figure 2.9.

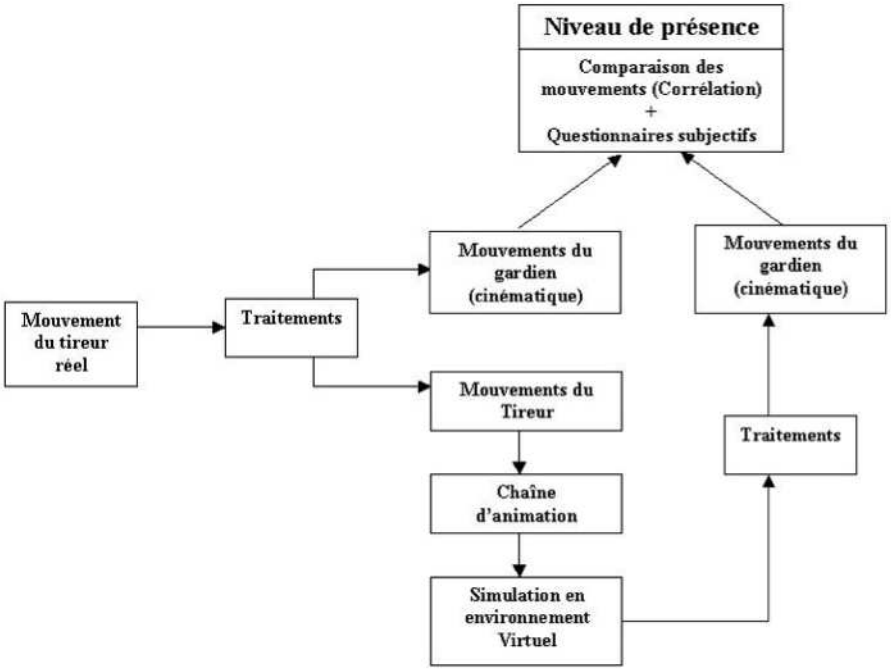


Figure 2.9 - Processus de validation de l'environnement virtuel (Bideau et al, 2003)

Les résultats mettent en évidence que les mouvements des gardiens entre l'environnement virtuel et l'environnement réel sont relativement similaires au niveau des variables cinématiques étudiées [Bideau2003c]. Le déplacement global du centre de masse du bras, ainsi que son profil de vitesse sont très proches pour un même tir en environnement virtuel et en réel. Dans cette même étude nous avons également comparé les cinématiques des gardiens (uniquement dans l'environnement réel) face à deux tirs considérés comme similaires (mêmes appuis, même forme de tir...). Nous observons ainsi des modifications dans la parade, plus importantes entre deux tirs réels considérés comme similaires, qu'entre le tir réel et sa reproduction en environnement virtuel. Ces résultats mettent en évidence l'avantage de la réalité virtuelle pour standardiser une situation d'étude. Notre évaluation des sportifs est basée sur l'analyse du mouvement dans deux environnements différents. Comme nous substituons l'environnement réel à un environnement virtuel la représentation que se fait le gardien de son activité peut en être modifiée. Ainsi pour obtenir des indices subjectifs sur la qualité de notre simulation en environnement virtuel nous avons réalisé un questionnaire. Les résultats du questionnaire montrent que les sujets ne semblent pas percevoir de façon subjective la situation virtuelle comme une situation de match ou d'entraînement réel. A l'opposé, les réponses concernant le rendu de la scène tendent à montrer que la qualité graphique et les interactions avec l'environnement virtuel ont été bien perçues. Dans cette expérimentation,

nous montrons des corrélations très importantes entre le mouvement du gardien dans le domaine réel et virtuel. Ceci tendrait donc à montrer que les informations prises par le gardien sont conservées, et de qualité suffisante, dans le monde virtuel. Ce résultat est obtenu malgré une scène virtuelle simplifiée par rapport à un environnement réel. En effet, le personnage est un système poly-articulé, sans peau déformable, sans mouvement des vêtements, sans mouvement oculaire et sans adaptation aux mouvements du gardien. Ces résultats soulèvent une question fondamentale : quel est le seuil en dessous duquel un environnement virtuel n'est plus perçu de façon suffisamment correcte pour engendrer une réaction comparable au réel. En effet Hodgins [Hodgins1998] avait montré que les sujets étaient sensibles à la qualité graphique du personnage de synthèse. Pour poursuivre ces travaux sur l'influence du niveau de détail sur la réalisation d'une tâche en environnement de synthèse, j'ai orienté une partie des travaux de thèse de Nicolas Vignais sur cette problématique.

2.4.1.2 Niveaux de détails

Définir quel est le niveau minimum de représentation graphique pour engendrer une réaction naturelle du sportif immergé, nécessite de dégrader soit l'environnement, soit le niveau de détail du personnage synthétique, soit l'ensemble. Ma et Kaber (Ma et Kaber, 2006) ont analysé l'influence de la qualité graphique de l'environnement sur le niveau de présence de sportifs immergés dans une situation de lancer-franc au basketball. Les résultats de cette étude ne montrent aucune corrélation entre le niveau graphique de l'environnement et la présence des sujets immergés. Si un environnement dégradé ne semble pas nuire à la réalisation de la tâche les auteurs n'ont pas évalué l'influence du niveau de détail du personnage de synthèse. Certaines études ont mis en évidence que la représentation graphique du personnage de synthèse est un élément prépondérant qui peut avoir une influence sur le sentiment de présence des sujets immergés[Seyama2007]. Cette question concernant la représentation du personnage synthétique, renvoie aux travaux sur la reconnaissance d'un mouvement à partir d'informations minimales.

Cette représentation minimale du mouvement humain est appelée "mouvement biologique" (ou "biological motion" dans la terminologie anglaise)[Johansson1973]. Pour obtenir une telle représentation, on affiche le mouvement sur fond noir avec uniquement des marqueurs lumineux placés au niveau des principales articulations et repères anatomiques du corps humain. C'est ce qu'on appelle la technique du PLD ("Point Light Display"). L'utilisation des techniques PLD a permis de montrer qu'il était possible de reconnaître, le genre (féminin/masculin) d'un individu [Barclay1978], et l'identité d'une personne par l'intermédiaire de sa démarche [Beardsworth1981].

Dans le domaine sportif Abernethy[Abernethy1993] suggère que cette technique peut

être utilisée pour définir les invariants visuels dans la prise d'informations. En effet en occultant certains points, les chercheurs tentent d'identifier les centres articulaires fondamentaux dans la prise de décision. Pour évaluer l'influence du niveau de détail du personnage de synthèse sur la performance du gardien de but nous avons testé 5 types de représentations graphiques d'un tireur virtuel. Comme nous avons pu le voir au chapitre précédent le niveau graphique du tireur synthétique initialement utilisé, permettait d'engendrer un mouvement naturel du gardien immergé. Nous avons donc pris cette représentation comme niveau initial et nous l'avons dégradée progressivement pour n'avoir au final qu'un mouvement en PLD. Les différents niveaux sont les suivants :

– N0 : il s'agit d'un niveau de détail texturé. Ce niveau est considéré comme le niveau de référence. En effet, nous avons démontré que son utilisation entraînait un degré de présence suffisant de la part de gardiens de but de handball immergés en EV[Bideau2003c] .

– N1 : ce second niveau de détail graphique est identique à N0 mais sans la texture de l'apparence corporelle du personnage de synthèse. Le corps du tireur virtuel est représenté en noir et les segments en bleu afin de percevoir une éventuelle superposition des membres sur le reste du corps (3D).

– N2 : ce NDG est basé sur une représentation dite en "fil de fer" du personnage de synthèse (trait noir entre les principales articulations) et du ballon (ballon transparent délimité par un cercle noir). Ce niveau est inspiré des travaux de Hodgins et al. [Hodgins1998] .

– N3 : il s'agit d'un NDG représenté en PLD. Plus précisément, 25 points lumineux sont situés au niveau des principales articulations.

– N4 : ce dernier NDG est identique à N3 mais la taille du ballon a été volontairement réduite. Cette taille correspond à celle d'un point lumineux utilisé pour la représentation en PLD.

10 gardiens de but de handball de niveau national ont participé à cette étude. Les gardiens de but étaient immergés à l'aide du système précédemment décrit. Deux tâches ont été analysées pour les différents niveaux de détails (fig 2.10). Une tâche de jugement où les gardiens devaient regarder l'action de tir virtuel en restant immobiles au centre du but avant de prédire, une fois le tir fini, la position finale du ballon dans le but à l'aide de leur main. Dans cette expérimentation, la trajectoire du ballon était coupée à 6m de la ligne de but, ce qui laissait 6m de visualisation (tir effectué à 12 mètres), le ballon était donc visible pendant 300ms. La position de la main (droite ou gauche) a été enregistrée par l'intermédiaire du système Vicon MX40. Pour cette expérimentation en jugement nous avons analysé les paramètres suivants :

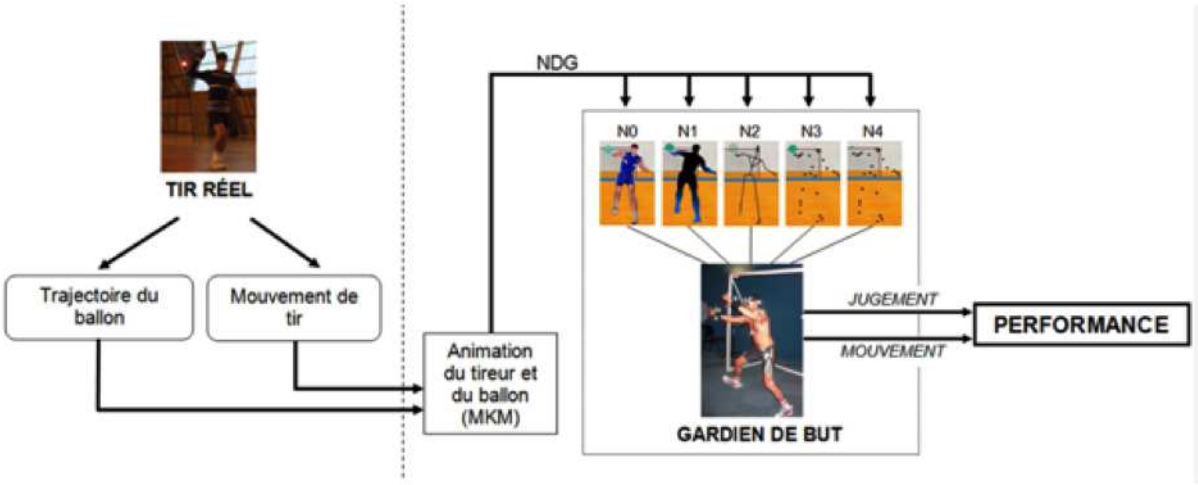


Figure 2.10 - processus d'évaluation du niveau de détails

– le pourcentage de zones correctes du gardien de but : calculé lorsque le gardien positionne sa main dans la zone où va réellement le ballon.

– le pourcentage de réussite du gardien de but : obtenu quand on a une superposition de la main du gardien de but et du ballon virtuel.

– l'erreur radiale de jugement : calculée lorsqu'il n'y a pas réussite. Elle correspond à la différence de distance en absolu entre le cercle représentant la main et le cercle représentant le ballon virtuel.

– le temps de réponse motrice (TRM) : calculé entre l'instant de lâcher du ballon virtuel et l'instant du pic d'accélération du centre de masse de l'avant-bras.

– le pourcentage de réussite du gardien de but : un essai était considéré réussi lorsque le ballon virtuel se trouvait superposé à l'un des segments du gardien de but (données obtenues à l'aide d'un module de détection de collision entre le segment de l'avatar du gardien et la balle virtuelle) .

– l'erreur radiale en mouvement : lorsqu'il n'y avait pas réussite, on a pu calculer la distance séparant le ballon virtuel du segment moteur du gardien le plus proche.

– l'indice cinématique : il correspond à l'indice de régulation de la parade obtenu à partir du déplacement du centre de masse de l'avant-bras.

Pour chacune des deux tâches une adaptation en temps réel du point de vue des gar-

diens était réalisée par l'intermédiaire d'une capture de mouvement des marqueurs de la tête. Les résultats mettent en évidence que, dans la tâche de jugement les gardiens ont des pourcentages de zones correctes significativement plus faibles pour le niveau de dégradation N4 par rapport aux autres niveaux de dégradation : NDG N0 (80.2% ±9.4), N1 (78.2% ±10.3), N2 (75.7% ±11.8) et N3 (78.9%±10.1) que pour N4 (60% ±12.7) pour l'ensemble des zones ($F(4;72) = 6:304$; $p<0.001$). L'erreur radiale concernant la position de la main par rapport au ballon est également significativement supérieure pour le niveau de dégradation N4 par rapport aux autres niveaux (Fig 2.11).

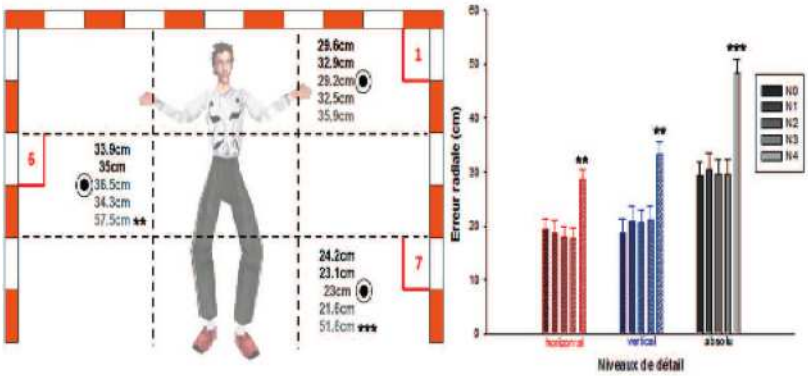


Figure 2.11 - tâche en jugement

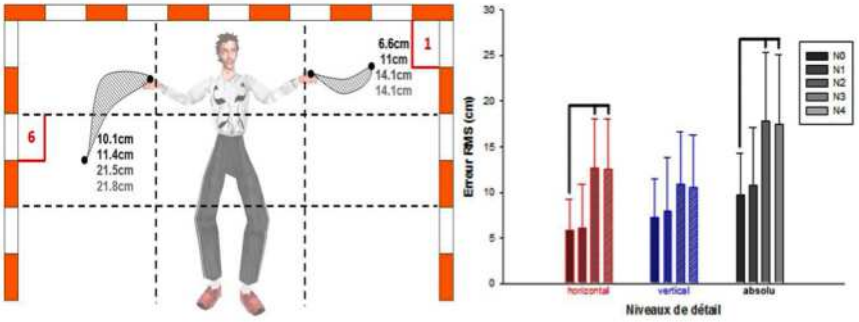


Figure 2.12 - tâche en mouvement

Pour ce qui est des résultats en mouvement, nous pouvons noter tout d'abord que le temps de réponse motrice n'est pas affecté par le niveau de détail du personnage synthétique tout comme le pourcentage de réussite et l'erreur radiale. En ce qui concerne l'indice cinématique, nous n'observons pas de différences significatives entre les niveaux de détails, si on exclu le facteur « zone visée ». Si nous prenons en compte le facteur

« zone visée », il apparaît des différences significatives d'erreur RMS en horizontal et en absolu en fonction des niveaux de détails (fig 2.12). Ces différences se situent entre les erreurs calculées pour N0 et tous les autres niveaux.

Pour ces deux tâches, il n'apparaît pas d'influence significative du NDG sur le pourcentage de réussite. Cela signifie que, quel que soit le NDG, les gardiens de but réussissent à prédire la position finale du ballon virtuel dans le but de façon efficace. Les représentations dégradées du mouvement (N1, N2, N3 et N4) ne semblent pas influencer l'efficacité des gardiens de but. Ces résultats sont en accord avec de nombreuses études qui suggèrent que les informations visuelles liées au mouvement, qui sont disponibles dans la représentation en PLD, fourniraient les informations visuelles minimales nécessaires pour effectuer une tâche de prédiction.

L'analyse cinématique du mouvement du gardien au cours de la tâche d'interception révèle qu'un niveau faible de détails graphiques peut influencer pour certains mouvements de tirs, la régulation du geste du gardien. En effet, la trajectoire du centre de masse de l'avant-bras est significativement différente pour les niveaux N3 et N4 par rapport au niveau N1. Cela signifie que certaines informations visuelles nécessaires à la régulation du mouvement d'interception du gardien de but en continu sont différentes pour N3 et N4. Or les niveaux N3 et N4 représentent le mouvement de tir virtuel en PLD. Contrairement à ce que nous avons pu voir jusqu'ici, ce type de représentation aurait donc une influence sur la performance des gardiens de but. Ce résultat est en accord avec certaines études de la littérature qui ont démontré une différence de performance entre une représentation du mouvement en PLD et une séquence filmée du mouvement[Abernethy2001] [Shim2005].

Le niveau de détails du personnage de synthèse ne semble pas affecter la réussite du gardien mais peut modifier dans certains cas la régulation de son geste. Pour ce qui est du ballon, sa taille semble un élément primordial dans la représentation graphique du mouvement de tir virtuel. Ce résultat pourrait s'expliquer par le phénomène d'expansion : lorsqu'un objet est en mouvement dans notre champ visuel, sa taille sur notre rétine va grandir ou diminuer selon qu'il s'éloigne ou qu'il se rapproche de nous[Clifford1999] . Dans cette étude, le taux d'expansion du ballon virtuel est le même entre N3 et N4 car le ballon parcourt 6m dans les deux cas. Il semble donc qu'il existe un seuil dans la représentation de la taille du ballon (entre 15cm et 5cm) en dessous duquel les informations visuelles provenant de ce dernier ne seraient plus suffisantes pour prédire sa position finale dans le but. Cette hypothèse rejoint les résultats de l'étude de Berthier et al[Berthier1996] . Dans cette expérimentation menée en environnement réel, les sujets avaient pour consigne d'attraper des objets de différents diamètres. Les auteurs ont alors démontré que la courbe de vitesse de la main se dirigeant vers l'objet, le temps total du mouvement ainsi que l'amplitude de vitesse du mouvement variaient en même temps que la taille de l'objet diminuait.

En conclusion, il apparaît donc que le NDG minimal pour induire un sentiment de présence varie selon le mode de réponse. Nous définissons donc le niveau N3 comme le NDG minimal pour engendrer un degré de présence suffisant en EV lors d'une tâche de jugement. Si la réponse est motrice et contrainte temporellement, le niveau N2 peut être considéré comme minimal.

2.4.1.3 Comparaison Vidéo et RV

Nous avons pu voir qu'il existait plusieurs méthodes d'analyses de la prise d'informations visuelles dans le domaine sportif telle que l'utilisation de questionnaires ou de séquences vidéos. Cette dernière méthode semble s'être très largement imposée dans la littérature même si elle semble comporter plusieurs limites dans son utilisation, comme le caractère bidimensionnel de l'affichage vidéo où le fait que le point de vue soit fixe. A l'inverse, l'utilisation de la réalité virtuelle dans le cadre sportif permet de se situer dans un environnement en 3D tout en adaptant le point de vue du sujet immergé à la scène virtuelle. L'une des questions fondamentales est donc de savoir si l'utilisation de la réalité virtuelle va engendrer un niveau supérieur de présence par rapport aux outils vidéos.

Pour répondre à ce questionnement nous avons réalisé les protocoles suivants dans le cadre du duel entre un gardien et un tireur au handball. Dans un premier temps nous avons capturé des mouvements de tirs à l'aide du système ViCON MX et obtenu de manière concomitante les séquences vidéos en plaçant une caméra numérique au centre du but (à hauteur des yeux du gardien). 10 gardiens ont été ensuite immergés en environnement virtuel pour faire face aux tirs d'un personnage de synthèse animé à l'aide des mouvements capturés. Ces mêmes gardiens ont été confrontés aux mêmes tirs affichés sur le même écran que celui utilisé pour la simulation virtuelle mais en format vidéo (fig 2.13).

Pour les deux situations deux tâches ont été analysées. Une tâche en jugement où nous avons étudié, le pourcentage de zones correctes prédites par le gardien, son pourcentage de réussite et l'erreur radiale (liée à la différence entre le positionnement de sa main et le positionnement final du ballon). Une tâche en mouvement où nous avons analysé, le temps de réponse motrice, le pourcentage de réussite et l'erreur radiale (qui correspondait à la différence entre la position du segment le plus proche de la trajectoire du ballon et le rayon du ballon).

Les résultats (fig 2.14) mettent en évidence un avantage significatif de la réalité vir-

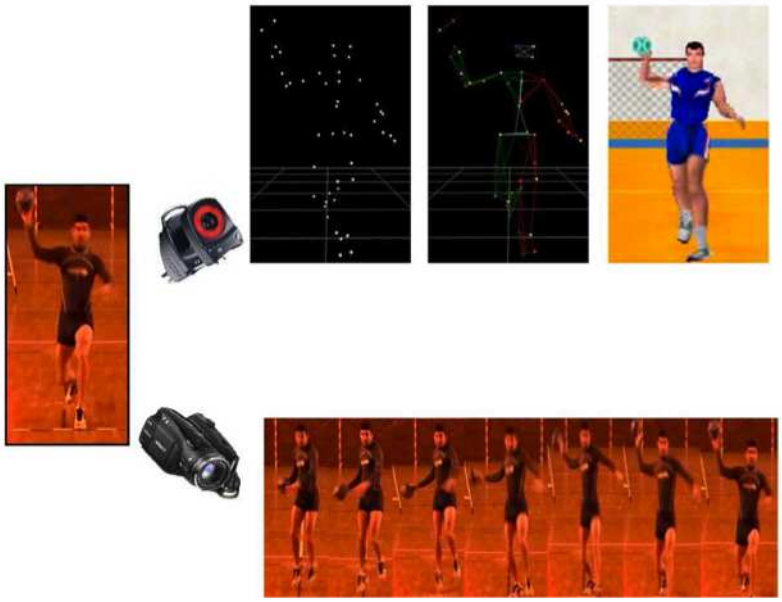


Figure 2.13 - animation et vidéo d'un tir au handball

tuelle sur le pourcentage de zones correctes prédites par les gardiens (RV=91.6% ±2 ; vidéo=78.1% ±8) pour l'ensemble des zones (F(1 ;27) = 27,279 ; p<0.001) lors de la tâche de jugement. Pour cette même tâche, l'erreur entre le positionnement de la main du gardien et celle du ballon met également en avant un avantage significatif de la réalité virtuelle. En effet l'erreur absolue est de 15±2.5cm en moyenne pour la condition vidéo alors qu'elle n'est que de 10.3±0.8cm pour la condition en environnement virtuel (p<0.001).

Pour la tâche en mouvement nous pouvons noter que les gardiens de but déclenchent leur réponse motrice plus rapidement face à l'animation de tir virtuel que face à la vidéo (RV=355.9 ±14 :3ms ; vidéo=382.1±15 :7ms). Ces résultats sont obtenus pour l'ensemble des zones (F(1 ;27) =76,396 ; p<0.001). Le pourcentage de réussite des gardiens de but lors de la tâche de mouvement est également plus important face à l'action de tir virtuel (37.1±7.6) que face à l'action de tir filmée (26.3±8.9). L'erreur entre la position du segment le plus proche et la ballon (lorsque le gardien n'était pas totalement sur la trajectoire) est plus important pour la condition vidéo (erreur absolue = 17.1±6.5cm) que pour la condition en réalité virtuelle (erreur absolue = 9.7 ± 2.2cm).

Quels que soient le mode de réponse et la variable analysée les gardiens de but de handball sont plus performants lorsqu'ils se trouvent immergés en environnent virtuel que lorsqu'ils sont face à une vidéo. Ces désavantages pourraient provenir du manque

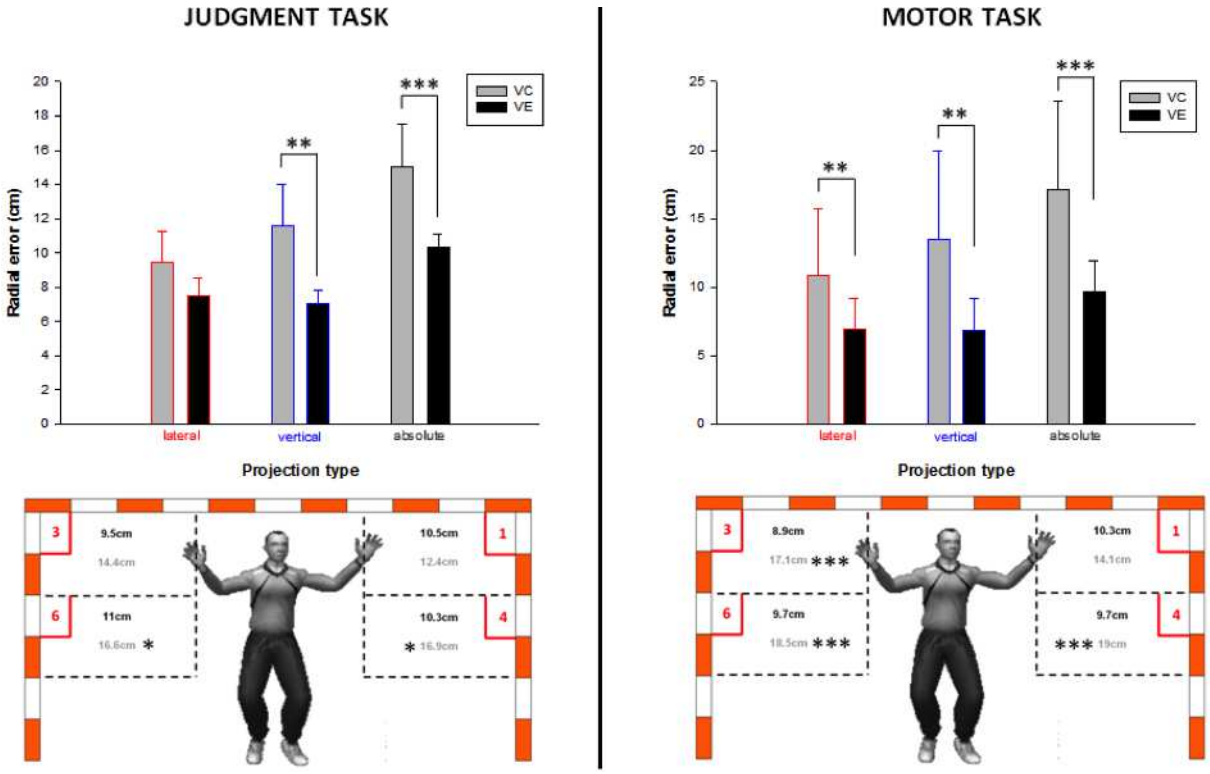


Figure 2.14 - résultats video vs RV

d'informations stéréoscopiques, de la réduction du champ visuel, ou de la taille de l'image et de sa résolution.

2.5 Analyse de la prise d'informations lors des duels

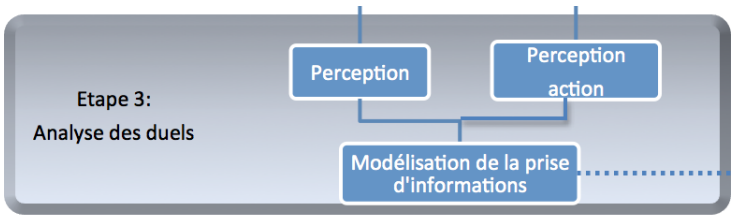


Figure 2.15 - Etape 3 du processus d'analyse

2.5.1 La feinte au rugby : aspects perceptifs

Comme nous l'avons souligné précédemment, la feinte de corps au rugby, consiste à la fois à masquer certaines informations cinématiques et à en exagérer d'autres. L'objectif étant d'initier un mouvement de l'adversaire dans la mauvaise direction et de ce fait prendre un avantage sur le joueur. Lors de l'étape 1 de notre chaîne d'analyse, nous avons montré que le déplacement du centre de masse suivant l'axe médio-latéral (COM-ML) et l'orientation des hanches dans le plan transversal, étaient des paramètres minimisés lors d'un mouvement de feinte, alors que la position du pied extérieur dans le plan médio-latéral, ainsi que l'orientation des épaules et de la tête dans le plan transversal sont des paramètres exagérés. Ces résultats cinématiques tendent à penser que ces informations influencent de manière importante la perception des défenseurs. Une des questions fondamentales est donc de savoir si ces paramètres cinématiques sont des informations prospectives permettant aux joueurs experts de détecter de manière précoce le mouvement de feinte. Pour tenter de répondre à cette question nous avons évalué 14 joueurs de rugby novices et 14 joueurs professionnels de l'équipe d'Ulster Rugby. L'expérience consistait en la visualisation en environnement de synthèse de mouvements de feintes et de mouvements sans feintes (fig 2.16). Pour chacun des mouvements, 4 occultations temporelles étaient réalisées :

- T0 dernier contact du pied avec le sol avant le changement de direction (pied gauche pour un changement de direction vers la droite et pied droit pour un changement de direction vers la gauche)

- T1 à 100 ms après T0

- T2 à 200 ms après T0

- T3 à 300 ms après T0

Pour chaque mouvement le défenseur devait spécifier à l'aide d'un joystick la direction finale de l'attaquant.

Les résultats mettent tout d'abord en évidence que le pourcentage de bonnes réponses est très important lorsqu'il n'y a pas de mouvements de feintes. Lorsque les sujets sont soumis à un mouvement de feinte, les experts commencent à bien le détecter à partir de 100ms alors que les sujets débutants ont besoin de 200ms (fig 2.17). Ces premiers éléments confirment la prise d'information précoce des joueurs experts. Dans un deuxième temps nous avons évalué la stratégie perceptive des joueurs débutants et experts. Pour cela nous avons couplé les résultats de jugement avec l'évolution de certains paramètres cinématiques. Ce couplage permet d'analyser la sensibilité pour les deux groupes aux différentes variables. Nous avons fait l'hypothèse que le taux de

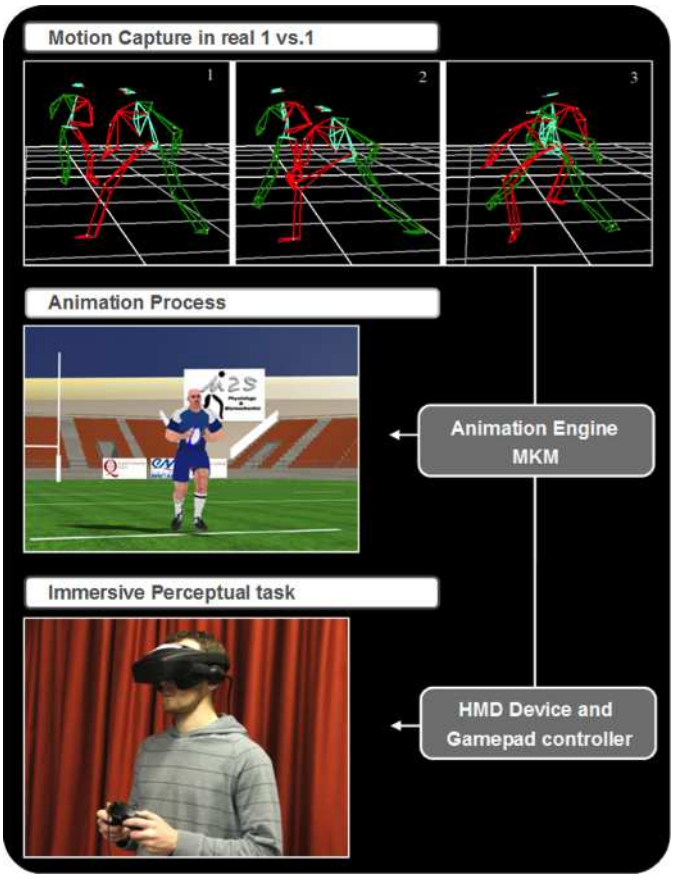


Figure 2.16 - Procédure d'analyse des feintes au rugby en environnement de synthèse

fermeture de l'intervalle (τ) jusqu'au pic de réorientation de chaque paramètre pouvait être une variable prospective pour déterminer la direction finale du joueur. Pour chaque variable τ était calculé de la manière suivante :

$$\tau = \frac{X}{\dot{X}} \tag{2.1}$$

Ou x représente la taille de l'intervalle et $\dot{X}$ son taux de fermeture. Nous avons donc calculé τ pour le déplacement du centre de masse suivant l'axe médio-latéral, pour l'orientation de la tête et du tronc dans le plan transversal et pour le déplacement du pied extérieur suivant l'axe médio-latéral.

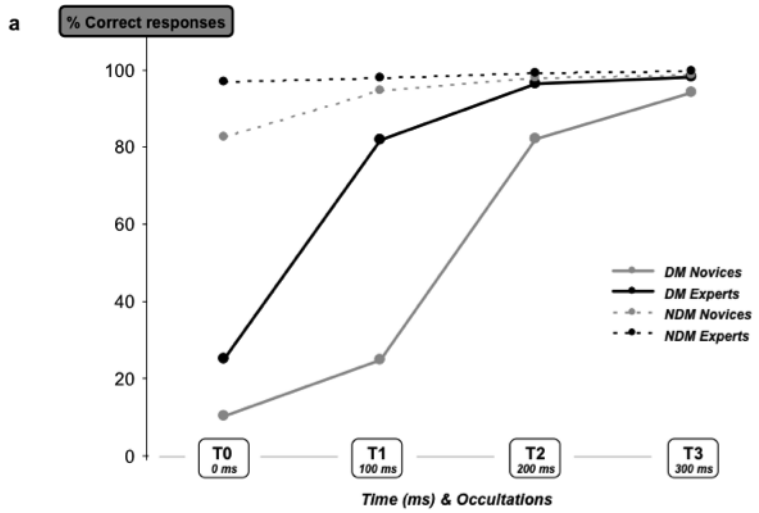


Figure 2.17 - Pourcentage de bonnes réponses en fonctions des instants d'occultations

2.5.1.1 La feinte au rugby : relation perception-action

Pour les deux groupes nous avons mis en relation le Tau de chaque variable cinématique avec le pourcentage de bonnes réponses au travers du R^2. Les résultats montrent que les experts sont plus sensibles aux paramètres minimisés comme le déplacement du centre de masse R^2=0,738 qu'aux paramètres exagérés comme l'orientation de la tête R^2=0,522 ou l'orientation des épaules R^2=0,533. Inversement les novices sont plus sensibles au paramètres exagérés comme l'orientation de la tête R^2=0,603 ou l'orientation des épaules R^2=0,672 qu'aux paramètres minimisés comme le déplacement du médio-latéral du centre de masse R^2=0,512. A partir de la régression logistique nous avons également évalué la valeur de τ pour laquelle le pourcentage de bonnes réponses était supérieur à 50% . Cette valeur permet de définir le moment à partir duquel, le paramètre influence la réponse de manière positive.

Dans un deuxième temps nous avons étudié les mouvements des défenseurs experts et novices face à des mouvements de feintes. Comme pour l'étude précédente, de manière à standardiser le stimulus nous avons placé les joueurs dans un environnement virtuel (fig 2.19). Les défenseurs avaient pour consigne d'intercepter l'attaquant virtuel. Les mouvements des défenseurs étaient obtenus à l'aide du système de capture de mouvement « Qualisys Proreflex motion capture system » (Qualisys, Gothenburg, Sweden). A partir de ces mouvements nous avons analysé le moment où le défenseur initiait son déplacement en fonction des mouvements de feintes et des mouvements sans feintes. Pour obtenir cette valeur, nous avons calculé le pic d'accélération du centre de masse.

Les résultats mettent en évidence que les experts initient leurs mouvements significativement plus tard que les défenseurs (267.74ms±36.18 vs 192 .71ms±63.82, p=0.002),

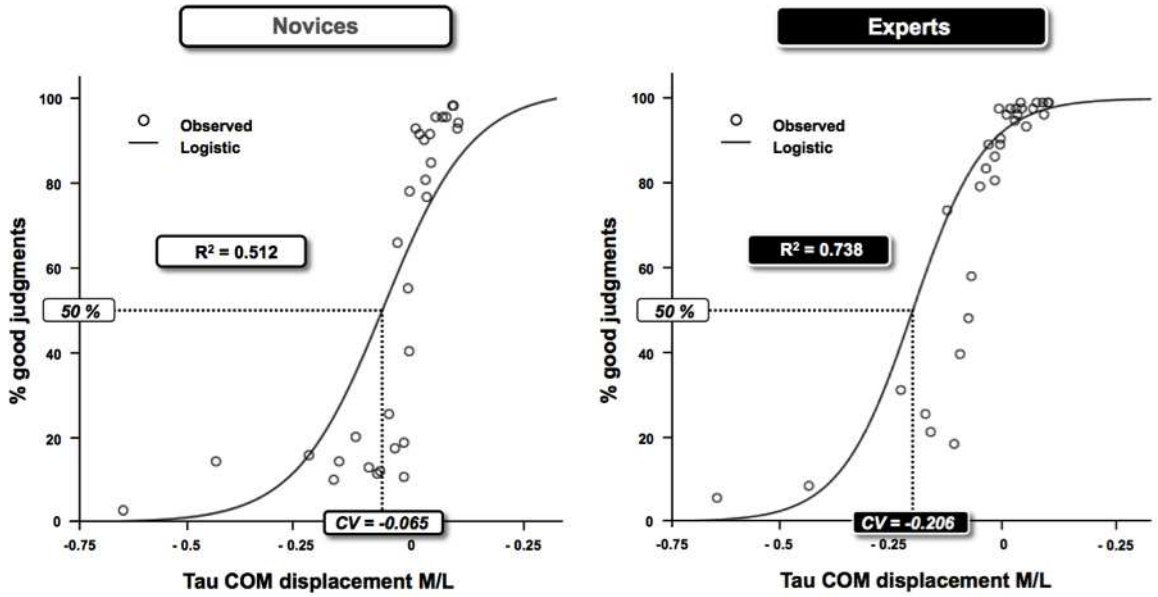


Figure 2.18 - régression logistique

en moyenne 75 ms. Cette initiation du mouvement plus précoce pour les novices est associée à un déplacement dans la mauvaise direction. En effet les novices ont 41,87% de mauvais déplacements contre 14,16% les experts. L'amplitude de ces déplacements dans la mauvaise direction est également plus important pour les novices que pour les experts (novices=15,5cm ; experts=12,8cm). Ces résultats permettent de mettre en évidence les différences entre les experts et les novices lors d'une tâche d'interception. Ils permettent également de fournir des informations temporelles sur le moment où les défenseurs déclenchent leur mouvement.

Par ailleurs, afin d'analyser dans quelle mesure la perception de la dynamique du mouvement d'attaque est à même de guider l'action du défenseur, nous avons procédé à une analyse en "Tau-coupling". Le but étant de tester les corrélations potentielles entre les différentes valeurs de Tau des différentes variables et la valeur Tau de l'intervalle qui est en train de se fermer entre l'attaquant et le défenseur pendant le duel. Le Tau de ce dernier est calculé sur l'intervalle entre la position courante du COM de l'attaquant et celle du COM du défenseur (fig 2.18 ci-dessous). Nous avons testé ces corrélations sur les deux principaux paramètres pris en compte par les experts et les novices, à savoir respectivement le déplacement du COM et l'orientation des épaules. Les résultats montrent que chez les experts le Tau du COM de l'attaquant est mieux corrélé au Tau de l'intervalle se fermant entre l'attaquant et le défenseur (R2 = 0.94±0.05). En revanche en ce qui concerne le Tau-coupling chez les novices, c'est entre le Tau de l'orientation des épaules de l'attaquant et le Tau de l'intervalle se fermant entre l'attaquant et le défenseur que l'affinité est la plus importante (R2 = 0.76±0.09). Ces données vont dans le même sens que les résultats de la première étude et témoignent cette fois « en action

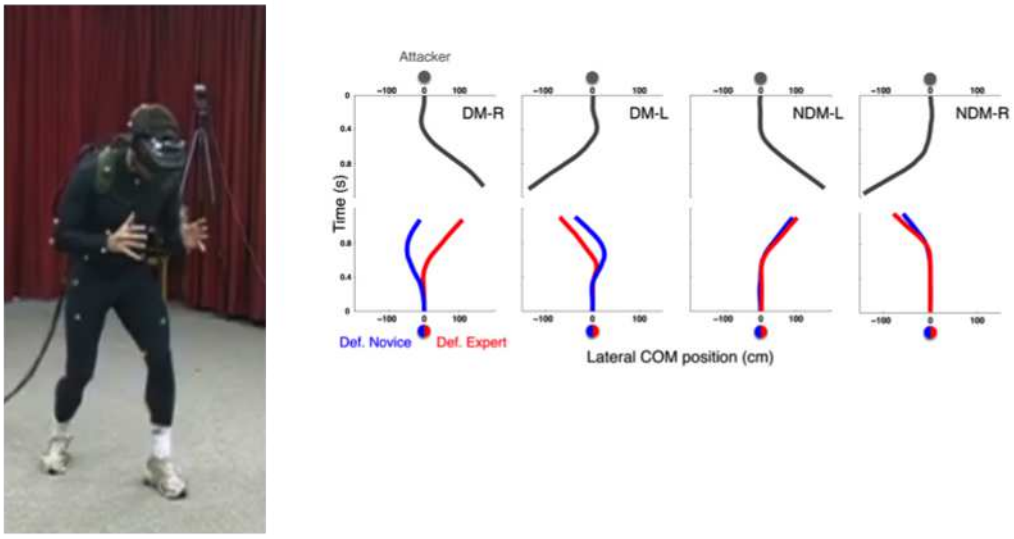


Figure 2.19 - duel en environnement de synthèse

» que les novices sont préférentiellement influencés par les informations « trompeuses » que donne à voir l'attaquant alors que les experts sont en mesure de s'informer sur des variables informationnelles « honnêtes ».

2.5.2 Le duel gardien-tireur au handball

2.5.2.1 Influence de la trajectoire du ballon et de la cinématique du tireur sur la prise d'informations

Le principal objectif de cette étude est de comprendre la prise d'informations visuelles des gardiens de but de handball. Dans cette optique nous devons séparer les informations visuelles provenant de la trajectoire du ballon de celles issues du mouvement de tir du joueur.

Une population de 10 gardiens de but de handball de niveau national a participé à cette étude. Au cours de l'expérimentation les gardiens étaient soumis à 3 conditions expérimentales en environnement virtuel (fig 2.20). La première consistait à évaluer la performance du gardien lors d'une tâche en jugement et d'une tâche en mouvement

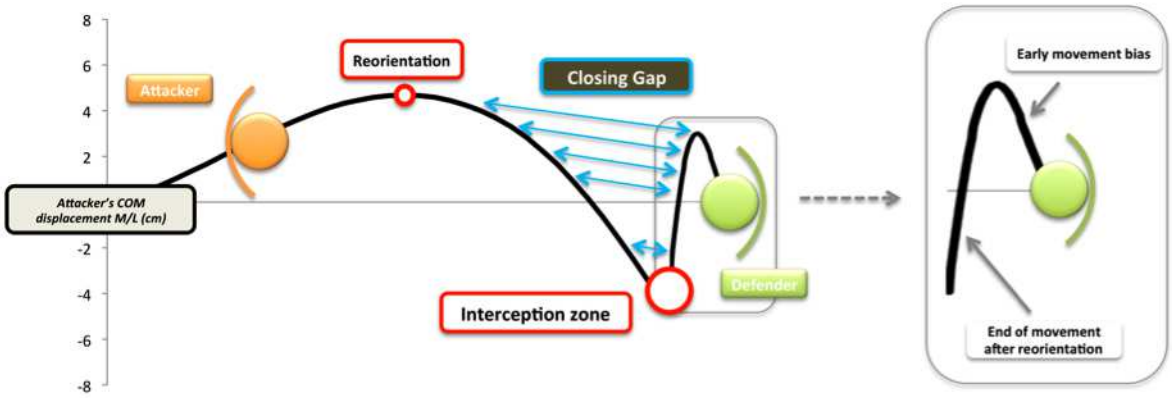


Figure 2.20 - intervalles pour le calcul du tau-coupling (Brault et al, 2012)

face à la trajectoire d'une balle seule (BS). La seconde condition consistait en l'analyse de ces mêmes variables lorsque le gardien était uniquement soumis au mouvement du tireur sans le ballon (TS). Dans ce cas le ballon était visible pendant le déroulement du mouvement de tir et disparaissait au moment du lâcher. La dernière condition consistait en une action de tir complète, c'est-à-dire que le gardien avait accès à la cinématique du joueur et à la trajectoire du ballon (BT). Ces trois conditions expérimentales ont été crées à partir d'un même mouvement de tir capturé en condition réelle.

Comme pour les études précédentes concernant l'analyse du duel entre un gardien et un tireur au handball nous avons évalué pour la tâche de jugement, le pourcentage de zones correctes prédites par le gardien, son pourcentage de réussite et l'erreur radiale liée à la différence entre le positionnement de sa main et le positionnement final du ballon. Pour la tâche en mouvement nous avons analysé le temps de réponse motrice, le pourcentage de réussite, l'erreur radiale en mouvement qui correspondait à la différence entre la position du segment le plus proche de la trajectoire du ballon et la ballon.

Les résultats obtenus dans cette étude montrent la difficulté des gardiens à utiliser uniquement les informations visuelles liées à la cinématique du mouvement de tir. Pour tous les paramètres calculés, sauf le TRM, il apparaît une plus faible performance pour la condition TS. Le pourcentage de zones prédites correctement est plus faible pour la condition visuelle TS (36.5% ±34) que pour les conditions visuelles BS (77.3%±18) et BT (83.2% ±14). Cela signifie que les gardiens de but ont beaucoup plus de mal à estimer la zone dans laquelle se dirige le ballon virtuel lorsqu'ils ne voient que le mouvement de tir. Par contre le fait de ne laisser que les informations visuelles concernant la trajectoire du ballon (BS) ne modifie pas l'efficacité des gardiens de but par rapport

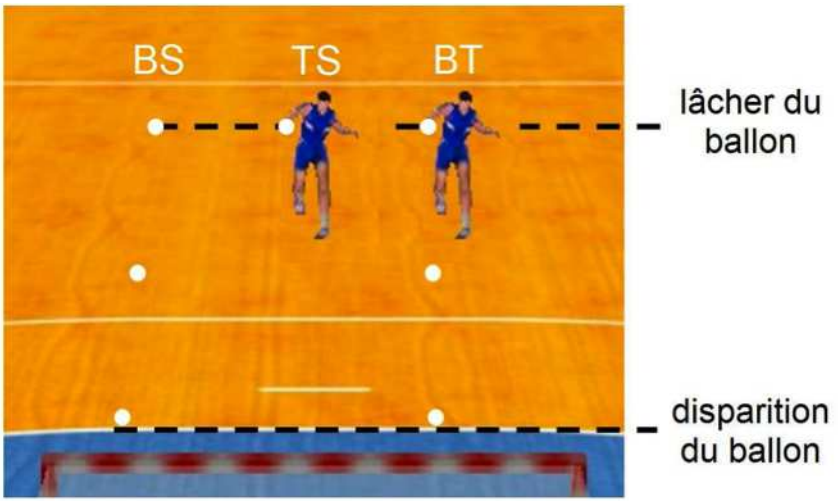


Figure 2.21 - conditions de tirs

à la condition visuelle complète (BT). La condition visuelle BS semble donc suffisante pour produire une performance efficace lors de la tâche de jugement.

Même si d'une manière générale, les informations visuelles issues de la trajectoire du ballon semblent primordiales, certains résultats de notre étude peuvent nuancer ce constat. Lorsqu'on s'intéresse à l'influence de la condition visuelle en fonction de la zone visée par le tireur virtuel, on s'aperçoit que pour certaines d'entre elles le pourcentage de réussite est pratiquement identique pour les 3 conditions. Ceci tendrait à suggérer, que certains mouvements fournissent des informations cinématiques perceptibles par le gardien de but.

2.5.2.2 Influence des paramètres segmentaires

Les études antérieures basées soit sur des analyses cinématiques[Cottin1989] soit sur des questionnaires [Debanne2003] , ont montré qu'une multitude de paramètres pouvaient influencer la parade du gardien. Ces paramètres peuvent être liés simplement aux mouvements du tireur, ou à la combinaison entre les mouvements du tireur et le positionnement de la défense.

Dans notre étude, nous centrons uniquement l'analyse de la réaction du gardien face aux mouvements du joueur, sans défense. De plus, dans les paramètres liés uniquement à la cinématique, il semblerait que le bras porteur du ballon ait une importance dans la prise de décision du gardien tout comme l'orientation du buste et l'instant de lâcher

de la balle. Nous nous proposons donc de vérifier si ces paramètres obtenus par les méthodes utilisées par le passé sont aussi visibles avec notre système.

Nous avons donc choisi de modifier trois paramètres : la position du poignet à l'instant de lâcher : pour ce paramètre, nous avons fait varier sa position cartésienne de 15 centimètres suivant l'axe vertical par rapport à un mouvement de référence. L'orientation de la ligne des épaules : pour faire varier ce paramètre nous avons joué sur l'inclinaison médio-latérale du buste. Nous avons ajouté une rotation de 0.4 rad par rapport au mouvement de référence. L'instant de lâcher de balle : ce paramètre fait varier essentiellement la trajectoire de la balle en retardant ou en avançant le mouvement de lâcher.

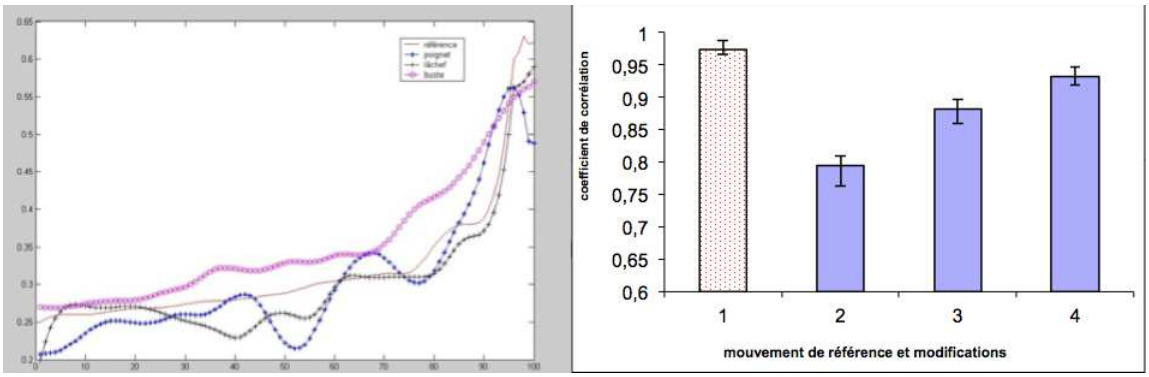


Figure 2.22 - cinématique des gardiens (Bideau et al, 2004)

Les résultats (fig 2.22) mettent en évidence (pour les modifications apportées) que la variable la plus sensible est liée à la modification de la hauteur du poignet. Pour cette variable, nous observons une modification importante de la parade du gardien. La variable qui entraîne la plus faible modification de la parade est l'inclinaison du buste [Bideau2004]. L'intérêt principal de cette étude est de montrer qu'il est possible d'isoler une variable cinématique et de montrer son influence sur la réalisation du mouvement.

2.6 Vers des outils pratiques

Pour les entraîneurs la réalité virtuelle peut représenter un outil intéressant et prometteur pour optimiser la performance et tester des résultats scientifiques. En effet, la réalité virtuelle permet de reproduire sans détérioration un stimulus et d'assurer des interactions de hautes qualités. Comme nous avons pu le voir, ces simulateurs permettent le contrôle total des variables comme la vitesse du ballon ou la cinématique du joueur. Outre les

simulateurs présentés dans les études précédentes d'autres systèmes ont été créés pour différents sports. Au tennis, Noser et al [Noser1997] ont développé un système permettant une interaction temps réel entre un joueur virtuel et un joueur réel. Dans cette étude seul le bras et la raquette étaient animés au travers d'une capture de mouvement temps réel (système filaire) alors que le reste du mouvement était animé au travers d'un modèle comportemental. La principale limite de cet outil est liée au fait que les joueurs ne peuvent pas se déplacer comme sur un vrai court. Se rapprocher des conditions réelles de jeu est un élément fondamental dans l'utilisation de la réalité virtuelle pour l'entraînement. Certains simulateurs comme celui de conduite de bobsleigh[Huffman1996] ou celui utilisé pour les études au handball permettent d'avoir un mouvement proche de celui obtenu en réalité. Néanmoins, les technologies de pointes utilisées dans ces études engendrent un coût important et nécessitent une maîtrise technique. De ce fait il semble très dur de les mettre en œuvre dans les centres d'entraînement.

Les études proposées dans cette partie ont pour objectif de mettre en place un outil de réalité virtuelle à bas coût et de proposer des situations d'entraînements pour les gardiens de but au football et des défenseurs au rugby. Dans la première étude nous illustrons ce simulateur en analysant le comportement d'un gardien de but au football face à différentes configurations de murs lors d'un coup franc. Dans la deuxième étude nous proposons une situation d'entraînement au duel en rugby. Cette étude s'inscrit à l'étape 4 de notre chaîne d'analyse des duels sportifs (fig. 2.22).Les étapes d'analyses réalisées précédement permettent le développement d'un défenseur virtuel interactif.

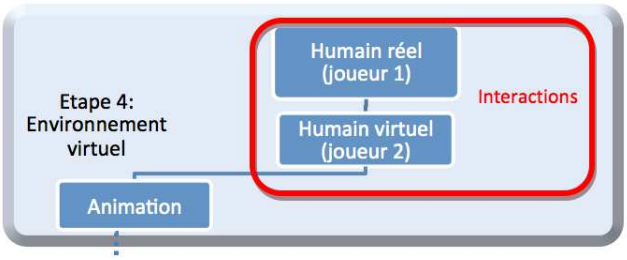


Figure 2.23 - Etape 4 du processus d'analyse

2.6.1 Simulateur au football

La première étude nécessite la création d'une situation de duel entre un tireur de coup-francs virtuels en football et un gardien de but réel. Le simulateur doit permettre au gardien de but de conserver une motricité identique dans l'environnement virtuel. Cela

nécessite de développer et de mettre en commun de multiples outils : (i) un système léger et peu contraignant permettant une vision stéréoscopique de la scène (ii) l'animation d'un tireur de coups-francs virtuels (iii) la génération de trajectoires de balles, crédibles et cohérentes avec les courses d'élans de l'attaquant (iv) et un environnement virtuel, dans lequel le gardien sera immergé. Ces différents modules sont présentés dans cette section.

2.6.1.1 Description du simulateur

Une situation stéréoscopique bas coût

Pour obtenir un affichage stéréoscopique léger, nous avons choisi le système Nvidia 3D vision (Nvidia, Santa Clara, California). Ce système est composé d'un émetteur infrarouge qui permet aux lunettes de fonctionner sans fil. Son ultra-portabilité et sa légèreté lui confèrent donc un aspect très pratique pour notre utilisation. Ces lunettes ne viennent en aucun cas perturber la motricité du gardien et ses possibilités d'action. Le point de vue stéréoscopique est géré via le logiciel MotionBuilder en translatant une caméra virtuelle d'un œil à l'autre à une fréquence de 120 Hz. Pour l'affichage nous avons utilisé le vidéoprojecteur Acer H5360 (1280*720 pixels, 2500 Ansi Lumens). Ce dernier propose un affichage haute fréquence (120Hz) permettant le couplage avec le système Nvidia 3D vision. Enfin, nous avons opté pour un écran de projection « par l'arrière » dans le but d'éviter les ombres des joueurs pouvant apparaître avec une projection par l'avant.

animation du tireur virtuel et du ballon

Pour l'animation du tireur virtuel nous avons utilisé des captures de mouvements de coups-francs. Nous exploitons ici les données issues de la première série d'expérimentations relatives à l'analyse cinématique du mouvement du tireur. Les mouvements ont ensuite été animés à l'aide du logiciel Motionbuilder (Autodesk, USA) (fig 2.23). Au regard de la distance parcourue par le ballon de foot lors des coups-francs il n'était pas envisageable de capturer l'ensemble de la trajectoire. Ainsi, nous avons placé deux marqueurs (adhésif réfléchissant) diamétralement opposés sur la surface du ballon pour obtenir les données cinématiques initiales (vitesse initiale, vitesse angulaire initiale). La trajectoire complète de la balle a ensuite été modélisée en prenant en compte l'ensemble des forces externes s'appliquant à un instant donné [Bray2003]. Les valeurs des coefficients de traînée et de portance ont été choisies en s'inspirant des valeurs couramment mentionnées dans les modélisations de trajectoires de projectile [Bray2003]. Par la suite celles-ci ont été affinées de manière à ce que la position de la balle simulée dans le but

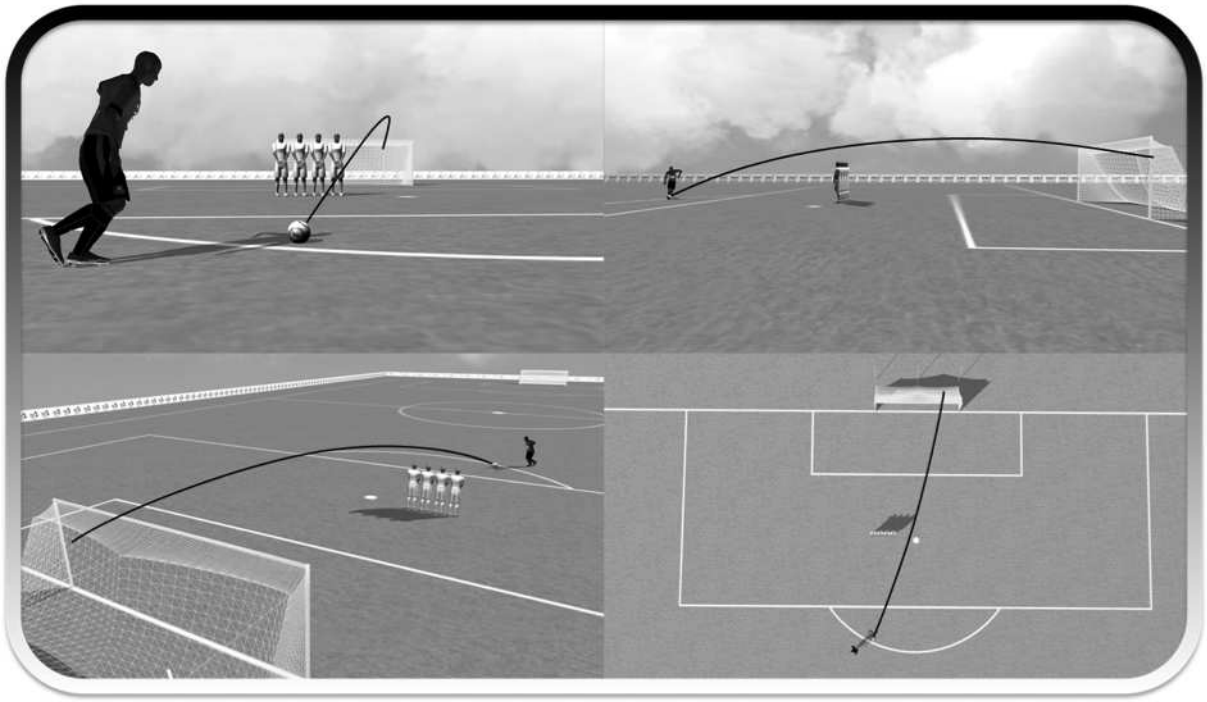


Figure 2.24 - Animation du tireur virtuel

corresponde à la position de la balle réelle enregistrée.

2.6.1.2 Application à l'étude de l'influence d'un mur sur la performance du gardien de but

Le simulateur développé est tout autant utilisable comme moyen d'investigation scientifique que comme outil d'entraînement. Pour tester notre simulateur, nous avons mis en place une expérimentation visant à tester lors d'un coup franc, les conditions d'organisation du mur (placement, nombre de joueurs) les plus adéquates pour le gardien. Dans cette situation deux paramètres peuvent être impliqués : le placement du mur et le nombre de joueurs dans le mur. Couramment, l'un des joueurs extérieurs du mur est aligné avec le ballon et l'un des poteaux du but. Concernant le nombre de joueurs, au regard de la situation que nous testons ici (coup-francs situés à 20m environ et quasiment dans l'axe du but), il est envisageable de placer 4 ou 5 joueurs. L'objectif de notre étude est donc à la fois de tester les différentes conditions possibles (nombre de joueurs dans le mur et position du mur) et leurs effets sur la performance du gardien de but.

La figure 2.24 présente, pour chaque condition, les distances minimales entre le centre

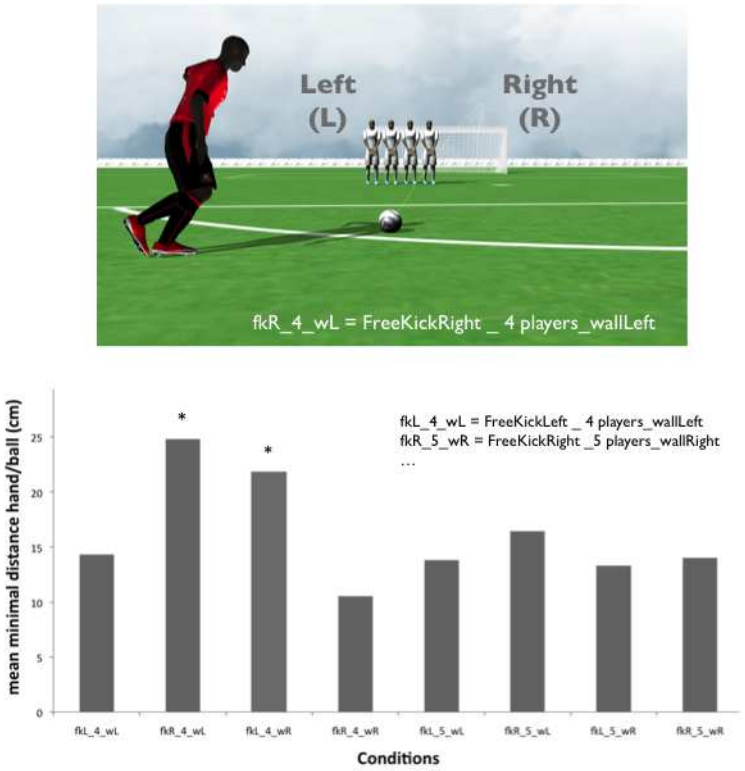


Figure 2.25 - Erreur de poistion des mains des gardiens de but

de la balle et la main la plus proche du ballon durant le coup-franc. Une analyse de variance à trois voies (2 (zone d'arrivée du coup franc : droite, gauche) x 2 (alignement du mur : avec le poteau droit, gauche) x 2 (nombre de joueurs dans le mur : 4, 5) nous a permis de mettre en évidence des différences significatives. Les cotés « droit » et « gauche » sont relatifs à la position du tireur. Nous observons un effet principal pour la variable « nombre de joueur dans le mur » ($F(1,352) = 11.05$, $p<.001$, $^2 = 1069.49$) avec une performance significativement meilleure lorsqu'il y a 5 joueurs dans le mur .

Un autre effet majeur à également pu être observé pour la variable "alignement du mur" ($F(1,352) = 11.05$, $p<.001$, $^2 = 1069.49$) avec des performances meilleures lorsque le but est aligné avec le poteau droit . Aucune différence significative n'est apparue entre les coups-francs tirés sur la droite et sur la gauche du mur.

Une analyse croisée des variables (post-hoc test - Tuckey HSD) a permis de mettre en évidence deux conditions avec une performance significativement moindre, à savoir, la condition avec 4 joueurs dans le mur – coup-franc à droite – mur aligné à gauche ($p>0.01$) et la condition avec 4 joueurs dans le mur – coup-franc à gauche – mur aligné à droite (figure 2.24). Ces deux situations présentent seulement 4 joueurs dans le mur

et des coups-francs tirés dans la zone libre du but (pas dans la zone couverte par le gardien). En d'autres termes, la performance moindre pour ces deux conditions s'expliquerait par le fait qu'avec seulement 4 joueurs dans le mur la zone libre à couvrir se trouve être trop grande et donc plus difficilement défendable par le gardien. Il apparaît donc que les situations à 5 joueurs sont plus pertinentes, et ce, par le fait qu'elles permettent au gardien d'observer une position plus centrale dans le but. Cela lui permet d'être potentiellement aussi performant des deux cotés. Ces résultats mettent en avant tout l'intérêt du simulateur. Il permet en effet de tester différentes situations et d'en resortir les conditions les plus favorables pour la performance. Dans notre étude, il apparaît très clairement que l'alignement du mur avec le coté droit ou gauche n'est pas important mais qu'en revanche il n'est pas judicieux de positionner seulement 4 joueurs dans le mur.

2.6.2 Simulateur au rugby

La seconde application de notre simulateur concerne le duel en 1 vs 1 au rugby. Au cours de l'expérimentation en environnement virtuel nous avons mis en évidence que les novices n'étaient pas en mesure de détecter un mouvement de feinte et d'y réagir de manière aussi performante qu'un expert. Nous avons démontré que cela pouvait s'expliquer par différents facteurs. Tout d'abord, d'un point de vue purement perceptif, nous avons vu que novices et experts présentaient des stratégies perceptives différentes (prise en compte différente des paramètres exagérés/minimisés) ainsi qu'une sensibilité différente face à une même quantité d'informations. D'un point de vu moteur, nous avons également pu constater que les stratégies étaient différentes entre experts et novices.

En somme, les experts prennent des informations différentes des novices, ils sont en mesure de mieux prédire le devenir de l'action avec moins d'informations et donc plus tôt, et enfin ils ont une stratégie motrice intégrant une initiation de déplacement plus tardive.

En intégrant ces résultats, l'idée est de proposer un défenseur virtuel interactif, répondant aux tentatives de dépassement (en 1 vs 1) d'un attaquant. Pour cela, il est indispensable que nous prenions en compte les facultés perceptives, décisionnelles et motrices du défenseur et que nous soyons en mesure de les appliquer en temps réel. Si ce travail n'est pas encore totalement abouti et nécessite du développement , nous sommes néanmoins en mesure de préciser la démarche que nous poursuivons et les premières avancées .

Pour parvenir à un défenseur interactif, nous devons modéliser son comportement puis

l'appliquer à un personnage de synthèse.

2.6.2.1 Modélisation du comportement du défenseur

Pour animer un défenseur en fonction du niveau d'expertise, il est nécessaire que l'on soit à même de déterminer, dans un premier temps, le moment d'initiation de son déplacement et l'éventuel moment où il change de direction.

Initiation du mouvement de défense

Les résultats que nous avons obtenus lors de l'expérimentation en mouvement (voir section 2.5.1.1), nous permettent de préciser au défenseur virtuel le moment d'initiation de son mouvement, en fonction de son niveau d'expertise. Les résultats avaient mis en évidence un déclenchement plus tardif pour les experts ainsi qu'une absence de différence significative entre les DM et NDM (EXP : DM=288.7 NDM=246.8 ; NOV : DM=206.7 NDM=178.7). Dès lors il est possible de moyenner par population cet instant d'initiation du mouvement. Les résultats sont les suivants : EXP = 267.75ms ; NOV = 192.7ms. Pour l'animation nous déclencherons le mouvement du défenseur soit à 267.75ms si le défenseur est expert soit à 192.7ms si le défenseur est novice, après la détection d'un appui initiant une première orientation.

Modélisation du changement de direction

Pour modéliser le changement de direction du personnage de synthèse nous devons prendre en considération les aspects perceptifs et décisionnels du comportement du défenseur. Pour cela nous proposons une méthode qui nous permette, à partir des régressions logistiques (chapitre 2), de retrouver un pourcentage de chance de probable réorientation à chaque pas de temps. L'objectif est d'être en mesure de prédire le moment où le défenseur a détecté la réorientation de l'attaquant et engage lui aussi une réorientation. Pour cela nous choisissons le moment où les pourcentages de bonnes réponses dépassent les 50% sur les régressions logistiques. Comme nous disposons de différentes régressions logistiques pour chaque paramètre cinématique et pour chaque niveau (expert vs. novice), nous pondérons l'influence de chacun de ces paramètres. Cette pondération, différente en fonction du niveau d'expertise, est basée sur un coefficient équivalent au R^2 liant le tau du paramètre considéré et le pourcentage de bonnes réponses (chapitre 2).

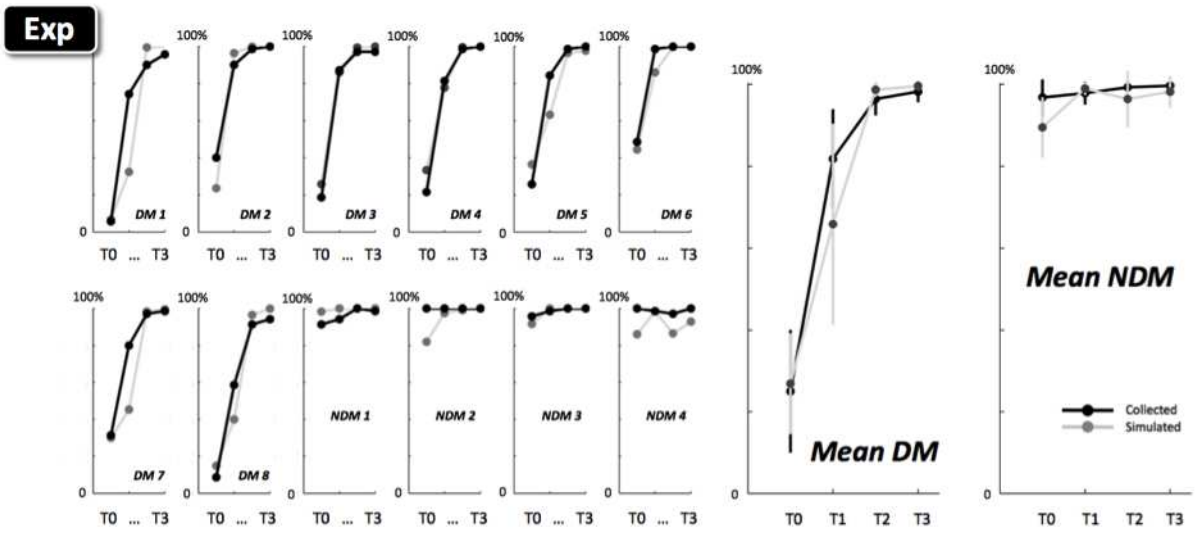


Figure 2.26 - modélisation du comportement expert

Plus précisément, à chaque instant du mouvement de l'attaquant et pour chaque paramètre cinématique nous sommes en mesure de déterminer sa valeur tau. Cette dernière nous permet de déterminer un pourcentage de chance de probable réorientation de l'attaquant (par projection sur les régressions logistiques). Chaque pourcentage probable obtenu pour chaque paramètre est ensuite pondéré, comme nous l'avons expliqué précédemment, par son R2. Au final, nous obtenons un pourcentage global et probable de réorientation de l'attaquant à chaque instant. La différence entre expert et novice s'opère à deux niveaux. Le premier changement intervient au niveau des pondérations, les paramètres exagérés étant davantage pris en compte par les novices que les experts et inversement pour les paramètres minimisés. Le second niveau de variation est incorporé dans les régressions logistiques en elles-mêmes et est lié à la différence de sensibilité face à une même quantité d'information entre experts et novices. En effet, les régressions logistiques étant toute décalées « vers la droite » pour les novices, le pourcentage probable de réorientation sera plus petit, pour une même valeur tau .

Avant d'appliquer cette modélisation au personnage de synthèse, nous avons testé notre approche. Les figures 2.25 et 2.26 présentent les résultats obtenus.Le trait foncé représente les réponses des défenseurs réels et le trait clair représente les réponses du modèle, face à différents mouvements de feintes. Notre modélisation semble être à même de prédire(en fonction des informations cinématiques de l'attaquant), ce qui pourrait être interprété comme la prise de décision du défenseur.

La poursuite de ce travail passe maintenant par un couplage avec un avatar virtuel, à même de réagir de manière réaliste à la modélisation de son comportement.

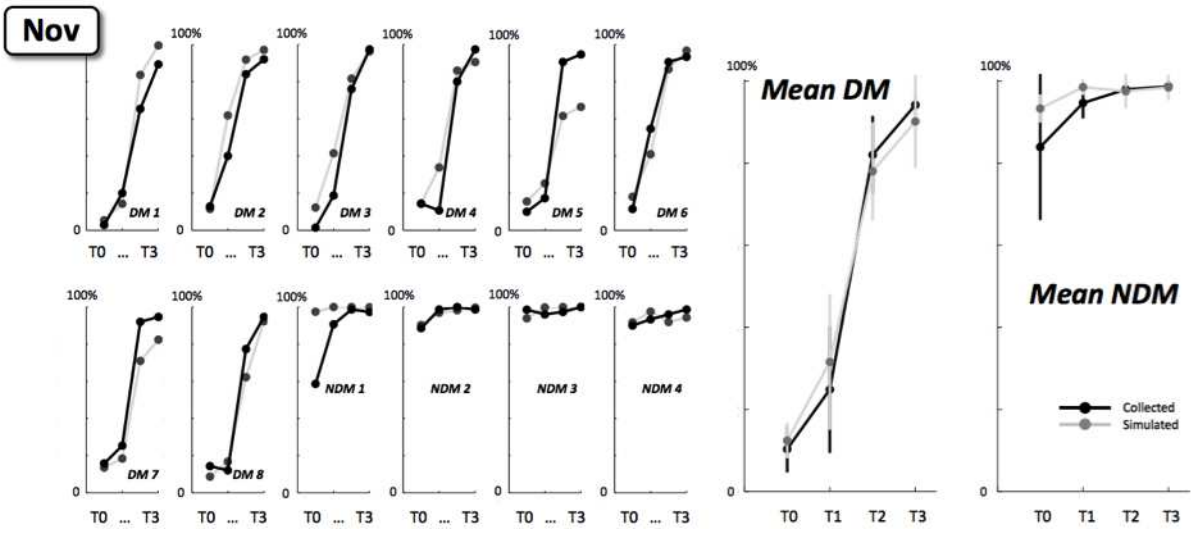


Figure 2.27 - modélisation du comportement débutant

2.6.3 Conclusion et perspectives

Les travaux sur l'utilisation de la réalité virtuelle dans l'analyse des duels sportifs représentent une part considérable de mon travail de recherche, initié dès ma thèse en 2000. Deux thèses ont été réalisées sur ces travaux permettant ainsi d'optimiser notre chaîne d'analyse. La première s'est intéressée à comparer les outils de réalité virtuelle et les méthodologies basées sur des vidéos pour étudier la prise de décision des sportifs. Ces études ont permis de mettre en évidence un avantage notable des dispositifs de réalité virtuelle. Néanmoins, il semble possible d'améliorer d'un point qualitatif la réponse du sujet immergé pour qu'elle se rapproche encore plus de sa réponse sur le terrain, en développant par exemple un environnement immersif en réalité augmentée. L'avantage de la réalité augmentée est de fournir une représentation fidèle de l'environnement tout en contrôlant le mouvement de l'humanoïde de synthèse. Le développement, la mise en place et la validation de tels environnements pour répondre aux exigences de l'étude des interactions sportives est un axe de recherche à investiguer. La deuxième thèse avait pour objectif d'évaluer la prise de décision de joueurs de rugby lorsqu'ils étaient confrontés à des mouvements de feintes. Ces études ont permis, à la fois, de comprendre la prise de décision de joueurs experts, mais aussi de modéliser l'influence de certaines variables cinématiques dans leur réponse.

Dans l'avenir, nous allons poursuivre les investigations sur l'étude d'autres duels sportifs. Néanmoins une part considérable de notre recherche va se porter à présent sur l'intégration de modèles comportementaux (issus de l'étude des duels) sur des humains virtuels. En effet dans l'ensemble des études présentées précédement, excepté celle sur le simulateur au rugby,le mouvement du sujet réel n'était pas pris en compte par son adversaire virtuel. Créer des interactions réalistes en temps réel nécessite de lever un cer-

tain nombre de verrous scientifiques, à la fois conceptuels (variable perceptive à prendre en considération pour animer l'avatar) mais aussi techniques (adapter les modèles pour qu'ils puissent être utilisables en temps réel).

Bilan et diffusion

Les travaux réalisés dans ces études ont donné lieu à plusieurs résultats importants et à une large diffusion scientifique. Comme nous l'avons présenté, la première étape pour étudier les interactions entre adversaires consiste à identifier, d'un point de vue biomécanique, les situations de duels en 1vs 1. Les publications majeures sur l'analyse biomécanique des duels sont :[Brault2009] et [Brault2010]. La seconde étape de notre processus d'analyse des duels sportifs concerne l'évaluation de la présence en environnement virtuel. Pour cela nous avons étudié le niveau de présence nécessaire pour pouvoir utiliser la réalité virtuelle. Les publications majeures associées à ces études sur la presence sont [Bideau2003c] [Bideau2004] [Multon2008] [Vignais2009][Vignais2010b] [Vignais2010a] [Bideau2010a]. Une fois les environnements de synthèse validés nous avons analysé la prise d'information des sportifs dans différentes activités. Ces études ont donné lieu aux publications suivantes : [Bideau2004] [Brault2010] [Brault2012].

Chapitre 3

Applications pratiques et suivi de sportifs

3.1 Introduction

Un des souhaits des maitres de conférences en STAPS est de mettre leur recherche au service des hommes de terrain (athlètes et entraîneurs). Si cette finalité peut apparaître comme une évidence, sa mise en application est parfois difficile. Cette difficulté peut provenir d'une incompréhension de langage entre la terminologie de terrain et la terminologie scientifique. Les objectifs parfois divergents entre la volonté de respecter une démarche scientifique pour l'un et une volonté de performance pour l'autre, peuvent également être un frein à la collaboration.

Ma sensibilité d'homme de terrain associée à ma connaissance du domaine scientifique m'ont amené à tenter d'appliquer certaines des méthodes présentées aux chapitres précédents, pour le suivi et l'entraînement des athlètes de haut niveau. Comme je l'ai précisé, pour répondre aux attentes des entraîneurs ou de l'équipe médicale, j'ai adapté les outils et les méthodes aux problématiques de terrain. De ce fait cette partie n'a pas forcément la rigueur scientifique nécessaire au formalisme de publication, elle n'en n'a pas la vocation. Néanmoins elle participe à la sensibilisation du domaine professionnel, à l'importance des aspects scientifiques dans la préparation de l'athlète. Cette démarche d'accompagnement du monde sportif participe à la professionnalisation des étudiants

et à la valorisation de la filière STAPS.Elle permet également d'échanger avec les entraîneurs et athlètes en vue d'améliorer ou de renforcer des axes de recherches.

Pour illustrer ces aspects je prendrai quatre types d'exemples, avec pour chacun d'entre eux des finalités différentes. Le premier concerne la mise en place d'analyses biomécaniques pour l'optimisation du service-volée au tennis. Le second exemple concerne l'utilisation des analyses cinématiques et dynamiques en natation pour l'optimisation de la performance de nageurs olympiques. Le troisième exemple concerne l'utilisation de la biomécanique pour le suivi du processus de réathlétisation de joueurs de football de haut niveau. Enfin je montrerai comment il est possible de fournir des nouvelles technologies pour le développement des capacités perceptives et attentionnelles pour des gardiens de but au football.

3.2 Analyses biomécaniques pour l'optimisation du service-volée au tennis

3.2.1 Contexte

Une question généralement posée par l'entraîneur de tennis est de savoir quelle technique de service doit adopter le joueur pour réaliser un enchaînement service-volée optimal. En effet les joueurs de tennis professionnels peuvent utiliser deux techniques principales [Elliott1983]. Ainsi, certains joueurs effectuent un relais d'appuis (< foot-up technique >, FU) alors que d'autres gardent leurs pieds écartés (< foot-back technique >, FB). Lors de la < FU technique >, les joueurs ramènent le pied arrière au niveau du pied avant, avant de pousser vers le haut et l'avant pour atteindre la balle. Pour la < FB technique >, le joueur droitier décolle du sol le talon de son pied droit au début du mouvement puis balance ce pied vers l'avant lors de l'impact. Le but de cette étude était donc de comprendre dans quelle mesure la technique influence le temps mis pour monter au filet ainsi que la vitesse de balle. Pour cela nous avons testé les services-volées de 15 joueurs experts, dont 9 étaient professionnels et classés à l'ATP ou à la WTA. L'ensemble de la procédure expérimentale est décrite dans l'article de Martin [Martin2012]

3.2.2 Analyse cinématique et cinétique du service-volée

Dans notre étude nous avons analysé le moment cinétique transversal du tronc et du bras portant la raquette, le temps mis pour monter au filet ainsi que la vitesse de balle. Les résultats (fig 3.1) mettent en évidence que le temps mis pour monter au filet est significativement (p<0,001) plus court pour la technique sans relais d'appuis (1,49 ± 0,22 s) que pour la technique avec relais d'appuis (1,56 ± 0,21 s). De la même façon, la durée du 1er appui après le service lors de la montée au filet est significativement plus courte avec la technique sans relais d'appuis. Par contre, la vitesse de balle est significativement plus élevée lorsque les joueurs utilisent la technique de relais d'appuis pour réaliser le service-volée (p<0,001). Ces résultats peuvent être expliqués au travers des différentes quantités de moment cinétique transversal du tronc et du bras obtenues avec les deux techniques de service.

Table II. Average trunk angular momentum (L_{trunk}) about the transverse axis between events of the "serve-and-volley".

	L_{trunk} ($kg \cdot m^2 \cdot s^{-1}$)			
Events	FU	FB	*P*	Effect size
BT – MEF	0.05 ± 0.17	0.04 ± 0.21	$P = 0.859$	0.019
MEF – RLP	−3.92 ± 1.62	−3.53 ± 1.11	$P = 0.004$	0.297
RLP – MER	−8.14 ± 2.59	−7.23 ± 2.02	$P < 0.001$	0.511
MER – IMP	−4.81 ± 1.87	−4.16 ± 1.61	$P < 0.001$	0.562
IMP – END	−1.89 ± 0.84	−1.65 ± 0.79	$P < 0.001$	0.422
SPRINT	0.84 ± 0.27	0.78 ± 0.23	$P = 0.027$	0.232

Positive values indicate counterclockwise (backward) angular momentum and negative values clockwise (forward) angular momentum viewed with the positive X-axis pointing toward the observer. Values are mean ± s, n=15. BT: ball toss, MEF: maximal elbow flexion, RLP: racket lowest point, MER: maximal external rotation of the shoulder, IMP: impact, END: end of the serve.

Table III. Average arm angular momentum (L_{arm}) about the transverse axis between events of the "serve-and-volley".

	L_{arm} ($kg \cdot m^2 \cdot s^{-1}$)			
Events	FU	FB	*P*	Effect size
BT – MEF	−0.28 ± 0.34	−0.25 ± 0.42	$P = 0.952$	0.007
MEF – RLP	−2.02 ± 0.90	−1.98 ± 0.93	$P = 0.581$	0.059
RLP – MER	−9.89 ± 2.64	−9.53 ± 2.52	$P = 0.122$	0.163
MER – IMP	−13.85 ± 3.06	−12.75 ± 3.50	$P < 0.001$	0.615
IMP – END	−6.04 ± 1.83	−5.73 ± 1.92	$P = 0.024$	0.237
SPRINT	0.16 ± 0.25	0.16 ± 0.91	$P = 0.105$	0.171

Positive values indicate counterclockwise (backward) angular momentum and negative values clockwise (forward) angular momentum viewed with the positive X-axis pointing toward the observer. Values are mean ± s, n = 15. BT: ball toss, MEF: maximal elbow flexion, RLP: racket lowest point, MER: maximal external rotation of the shoulder, IMP: impact, END: end of the serve.

Figure 3.1 - Moments cinétiques pour deux techniques de services (Martin et al, 2012)

En effet, notre analyse met en évidence qu'avec la technique de relais d'appuis, les joueurs produisent des valeurs maximales de moment cinétique du tronc et du bras significativement supérieures à celles atteintes avec l'autre technique (p<0,001). L'excès de moment cinétique du tronc et du bras vers l'avant avec la technique de relais d'appuis (en comparaison avec celle sans relais d'appuis) contribuerait à la perte de temps mesurée lors de la montée au filet. En effet, avec la technique de relais d'appuis, le joueur doit réduire et contrecarrer son importante rotation vers l'avant à la fin du service en freinant son tronc et en se redressant pour conserver un équilibre dynamique optimal et suivre la balle des yeux avant d'enchaîner sa course vers le filet dans de bonnes conditions.

Cette étude démontre que le choix de la technique de service (avec ou sans relais d'appuis) a une influence sur la rapidité du déplacement au filet lors de la réalisation d'un service-volée. Les entraîneurs de tennis devraient orienter le choix de la technique en fonction du style de jeu de leurs joueurs. En effet, au regard de nos résultats, la technique sans relais d'appuis apparaît la plus propice à un déplacement rapide du joueur au filet. Ainsi, elle serait à privilégier dans la formation du joueur possédant un style de jeu porté vers l'attaque et intéressé par la pratique du double.Cette technique possède deux avantages biomécaniques majeurs : la stabilité du serveur et la propension à « propulser » le joueur vers l'avant en cas de service-volée. De son côté, la technique avec relais d'appuis permet d'augmenter la vitesse de balle et devrait être préconisée chez les joueurs de fond de court.

3.3 Analyses biomécaniques pour l'optimisation de la performance en natation

3.3.1 Contexte

Dans le cadre de la préparation des nageurs du pôle France de Poitiers nous avons développé entre 2002 et 2004 un suivi scientifique de la performance. Pour ce suivi nous avons utilisé l'ADES.

Ce projet a été réalisé en collaboration avec Marc Brisoual entraîneur au club. Au cours du projet nous avons évalué plusieurs nageurs de niveau national, et une nageuse ayant participé aux jeux d'Athènes en 2004. L'objectif poursuivi était de fournir des informations cinématiques et dynamiques permettant d'orienter la préparation technique. Pour illustrer ce travail je prendrai l'exemple d'Elsa N'guessan qualifié pour le relais 4*200 mètres nage libre.

3.3.2 Analyses cinématiques

Le test consistait en deux 25 mètres nage libre à vitesse maximale, le premier sans charge additionnelle et le second avec une charge imposée par le système ADES. Les protocoles de mesures étaient identiques à ceux utilisés pour les recherches scientifiques (présentées au chapitre 1). La première analyse en 2002 met en évidence un temps de cycle de nage de 1.2 seconde. La répartition temporelle (fig 3.2) entre le $\frac{1}{2}$ cycle du bras

droit et le $\frac{1}{2}$ cycle du bras gauche est équilibrée. Ce paramètre reste constant entre les deux évaluations. Nous avons noté pour la nageuse une légère élévation de la fréquence (0.81 en 2002 et 0.91Hz en 2004) et une élévation des vitesses de déplacement. Le point principal concerne les profils de vitesse entre le bras droit et le bras gauche. Nous pouvons noter qu'en 2002 la nageuse présentait un profil dissymétrique avec des pics de vitesse nettement plus importants pour le bras droit que pour le bras gauche. A partir de ce constat l'entraîneur a mis en place une préparation spécifique visant à rééquilibrer le bras gauche. Les résultats de 2004 montrent une amélioration du profil de vitesse du bras gauche, c'est à dire que l'écart entre les pics de vitesse des deux segments s'est réduit. Néanmoins, nous pouvons noter qu'une légère différence subsiste toujours.

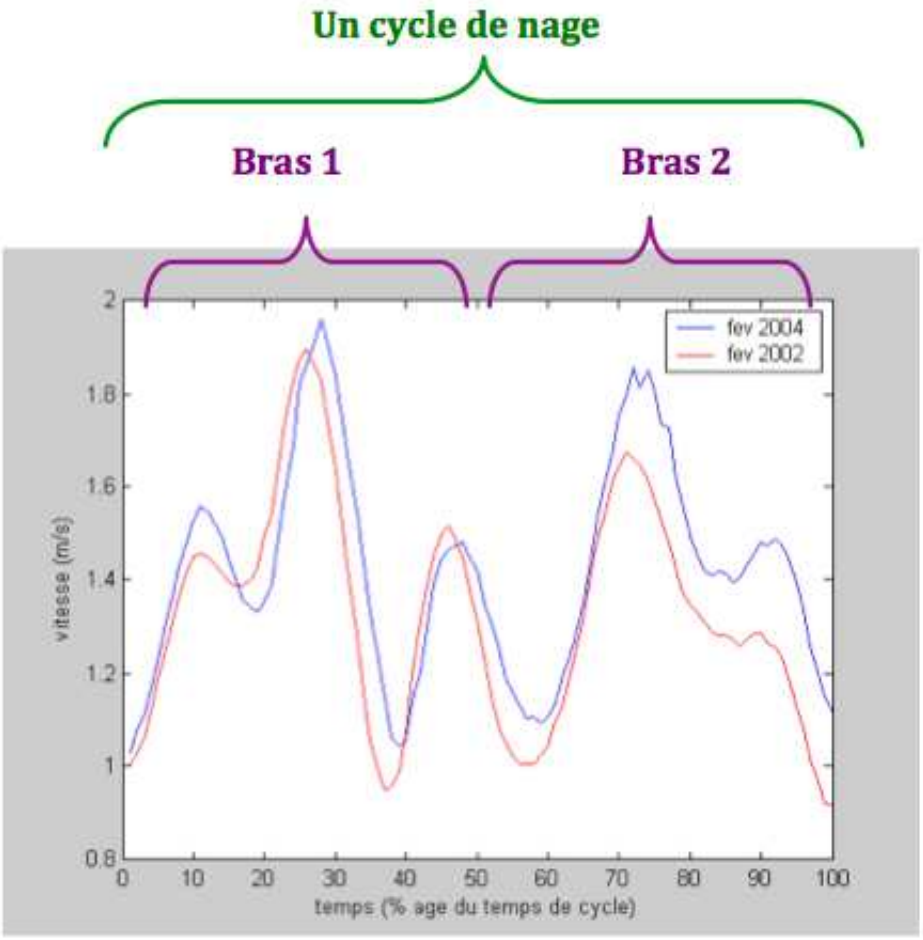


Figure 3.2 - cycle de nage

3.3.3 Analyses dynamiques

A partir des deux passages à vitesse maximale, nous avons pu établir les paramètres mécaniques de résistance active, de coefficient hydrodynamique et de puissance mécanique utile. Les valeurs de résistances actives sont dans les normes obtenues pour une population similaire [Kolmogorov1992] . La valeur de 2004 est légèrement supérieure à celle obtenue en 2002. La vitesse ayant augmenté entre les deux années il semble logique d'observer une augmentation de la résistance active. Par contre le Cx est supérieur à celui trouvé précédemment et peut témoigner d'un maître couple plus élevé qu'il y a 2 ans du fait de la modification de positionnement dans l'eau, ou bien encore des modifications morphologiques liées au travail de renforcement musculaire.

3.4 Analyses biomécaniques pour l'optimisation du processus de réathlétisation des footballeurs

Un des problèmes majeurs du sport de haut niveau est la gestion et la prévention des blessures. Dans le football le poids économique des indisponibilités ou des retards dans la préparation physique des joueurs est très important. Une étude épidémiologique réalisée par Otzekin et al [Oztekin2008] met en évidence que les entorses de la cheville entraînent de 8 à 28 jours d'arrêt pour des atteintes faibles et une moyenne de 61 jours pour des atteintes sévères. Une des premières dispositions prises par les clubs de haut niveau est de développer de manière importante la préparation athlétique. En effet, si on prend le cas de l'entorse de la cheville (non liée à une faute subie) les études montrent que la fatigue impacte l'apparition du traumatisme, puisque les joueurs se blessent principalement dans les 5 dernières minutes de chaque mi temps [Woods2004] . De plus il a été montré que la gravité de ces entorses est liée à de faibles qualités proprioceptives [Kanus1991]. La préparation athlétique vise donc à optimiser ces qualités pour le footballeur professionnel. Néanmoins, la préparation athlétique ne prend pas réellement en charge les problèmes d'organisation posturale lors du mouvement qui ont elles aussi été associées à la gravité de l'entorse [Murphy2003].

Ces problèmes d'organisation posturale en phase de course ou lors des changements d'appuis, sont encore plus importants lorsque le joueur a été blessé, et son rarement évalués à la sortie du processus de rééducation. Le travail que j'ai réalisé dans des clubs de Premier League Anglaise ou de Ligue 1 avait pour objectif d'aider l'équipe technique (préparateurs physiques) ou médicale (médecins et Kinésithérapeute) à optimiser le processus de rééducation.

3.4.1 Analyse cinématique et dynamique d'un changement d'appuis

Dans cet exemple nous devions analyser le mouvement du joueur dans la première période de la phase de réathlétisation. Le joueur avait subi une faute grave entraînant une dislocation de la cheville gauche. Une fois les étapes chirurgicales, de kinésithérapie et de préparation physique réalisées (8 mois), le problème était de savoir s'il ne subsistait pas une mauvaise organisation posturale. J'ai ainsi développé un protocole expérimental permettant d'évaluer la course et les changements d'appuis in situ. Ce protocole a été utilisé dans de nombreux clubs professionnels. Une zone de 4*4m2 matérialisée par des plots de couleurs a été créée. Le joueur devait courir à vitesse maximale et lorsqu'il arrivait au niveau du plot central devait changer de direction vers un plot d'une couleur donnée. Un système de 8 caméras, à une fréquence de 50HZ nous permettait d'obtenir le mouvement en 3D (fig 3.3). Le joueur était également équipé de semelles de pression (Pedar system) permettant d'évaluer le trajet du centre de pression et la composante verticale de la force de réaction au sol. Parmi l'ensemble des mouvements nous avons ciblés l'analyse sur deux courses ou la vitesse du centre de masse était sensiblement identique avant le changement de direction

– Course et changement de direction à 90 degrés vers la droite (sollicitation cheville gauche)

– Course et changement de direction à 90 degrés vers la gauche (sollicitation cheville droite)

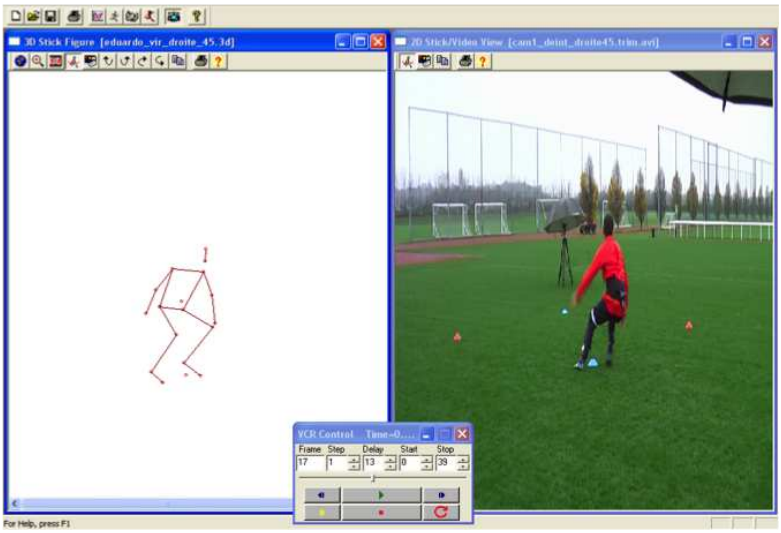


Figure 3.3 - capture de mouvement in situ

L'analyse cinématique porte sur le premier appui lors du changement de direction.Les résultats cinématiques mettent en évidence une flexion du genou plus grande au niveau du membre pathologique que du membre sain lors de l'entrée dans l'appui précédant le changement de direction. Cette flexion est également associée à un abaissement du centre de masse plus important. Les données dynamiques issues du pedar system nous ont permis d'analyser la répartition des pressions sous les deux pieds. Ainsi lors de l'entrée dans l'appui nous pouvons observer des pressions majoritairement sous le talon pour le membre sain et une répartition sous l'ensemble du pied pour le membre pathologique.

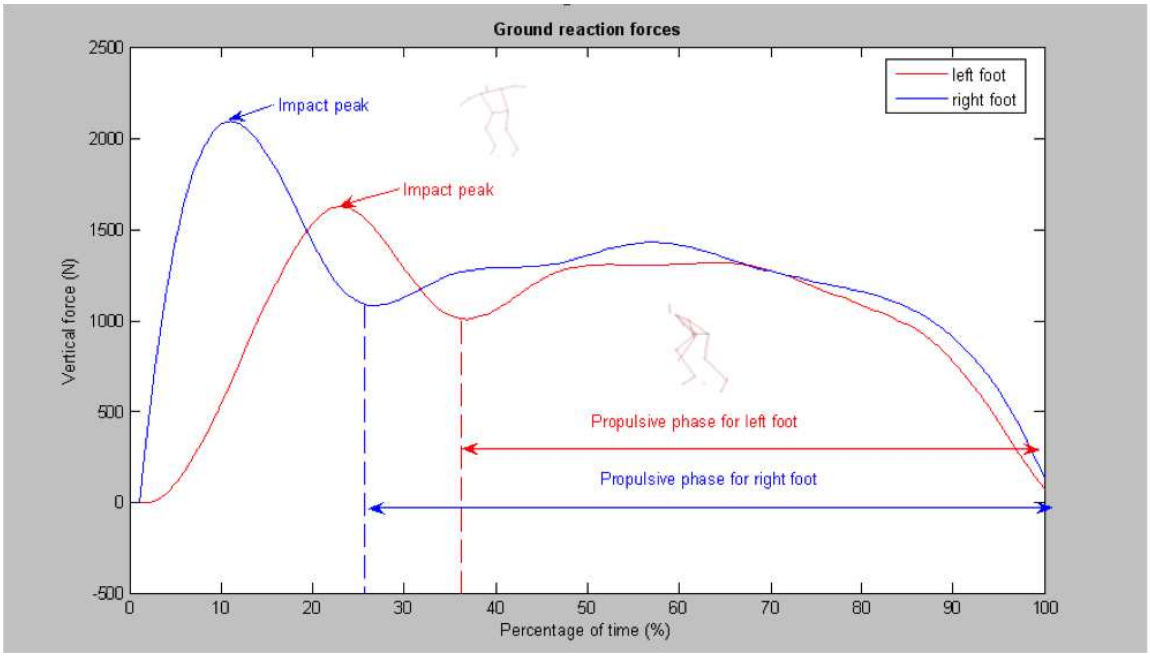


Figure 3.4 - capture de mouvement in situ

3.5 Accompagnement pour l'entraînement des capacités perceptives et attentionnelles des gardiens de but

3.5.1 Contexte

Le laboratoire M2S travaille en collaboration avec le Stade Rennais Football Club sur un accompagnement scientifique des joueurs. Les projets liés à la biologie sont encadrés par Hassane Zouhal et les projets liés au mouvement sont encadrés par moi même. Dans ce contexte, une des orientations choisies par l'équipe technique du club à été l'optimisation de l'accuité visuelle dynamique des gardiens de but. Nous avons ainsi développé en collaboration avec Nicolas Benguigui et Richard Kulpa un logiciel de suivi de cibles (Multi objects tracking suivant la terminologie anglaise). Ce projet a permis la conception d'un logiciel adapté aux exigences du terrain mais aussi utilisable d'un point de vue plus fondamental pour la recherche.

3.5.2 Mise en place d'un système de multi objects tracking pour l'accompagnement des gardiens de but

Le logiciel de suivi de cibles permet de faire varier le nombre d'objets à suivre, leurs vitesses et leurs accélérations. Il est également possible de modifier le point de vue, pour diversifier les situations. 3 gardiens professionnels du Stade Rennais Football Club ont participé à la mise en place du projet. Les gardiens ont réalisé 14 séances de 15 minutes avant la séance sur le terrain, à raison de deux séances par semaine. La première séance a permis de mettre en évidence les difficultés individuelles sur le nombre d'objets à suivre, sur la vitesse des objets ou sur les deux réunis. Nous avons ensuite proposé des séances individuelles avec une augmentation progressive du niveau de difficulté.

Les résultats obtenus à la fin du cycle d'entraînement mettent en évidence des améliorations d'un point de vue du nombre d'objets à suivre mais aussi d'un point de vue des vitesses de déplacements. Néanmoins d'un point de vue scientifique ces résultats doivent être confortés par des mesures plus précises. Ainsi, nous allons pour la saison 2011-2012 coupler nos résultats de performance à des mesures oculométriques.

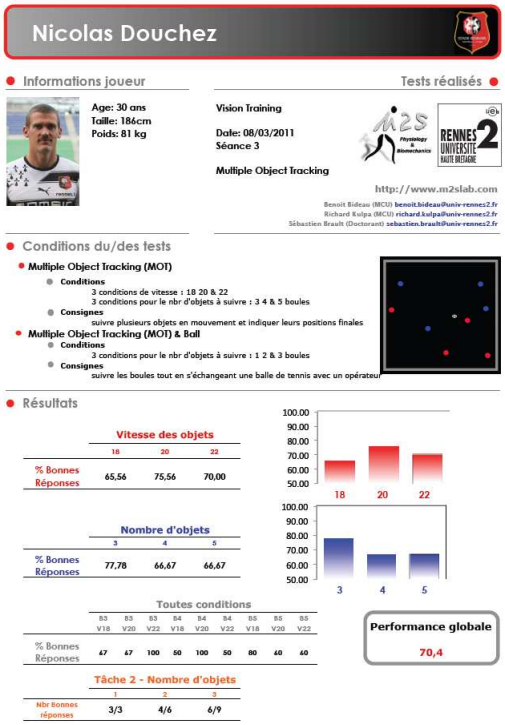


Figure 3.5 - fiche synthèse

Bibliographie

[Abernethy1985] Abernethy, B. *Cue usage in open motor skills : A review of available procedures in Motor Memory and Control*, 1985.

[Abernethy1987] Abernethy, B. *Anticipation in sport : A review*. Physical Education Review, vol. 10, n° 1, pages 5–16, 1987.

[Abernethy1988] Abernethy, B. *Visual search in sport and ergonomics : its relationship to selective attention and performer expertise*. Human Performance, vol. 1, n° 4, pages 205–235, 1988.

[Abernethy1993] Abernethy, B. *Searching for the minimal essential information for skilled perception and action*. Psychological Research, vol. 55, n° 2, pages 131–138, 1993.

[Abernethy2001] Abernethy, B., Gill, D., Parks, S. et Packer, S. *Expertise and the perception of kinematic and situational probability information*. Perception, vol. 30, n° 2, pages 233–252, 2001.

[Abernethy2007] Abernethy, B. et Zawi, K. *Pickup of Essential Kinematics Underpins Expert Perception of Movement Patterns*. Journal of Motor Behavior, vol. 39, n° 5, pages 353–367, 2007.

[Alexander1977] Alexander, R, M. *Mechanics and energetics of animal locomotion*. Swimming. In R. M. Alexander G. Goldspink (Eds.), pages 222–249, 1977.

[Allard1980] Allard, F. et Starkes, J. *Perception in sport : Volleyball*. Journal of Sport Psychology, vol. 2, n° 1, pages 22–33, 1980.

[Anderson1998] Anderson, J. M., Streitlien, K. et Barrett, D. S.and Triantafyllou, M. S. *Oscillating foils of high propulsive efficiency*. Journal of Fluid Mechanics, vol. 360, pages 41–72, 1998.

[Arellano2003] Arellano, R., Pardillo, S. et Gavilan, A. *Usefulness of the Strouhal number in evaluating human underwater undulatory swimming*. Biomechanics and medicine in swimming, vol. IX, pages 33–38, 2003.

[Baly2003] Baly, L. *Modélisation biomécanique et aérohydrodynamique du geste sportif du nageur avec monopalme. Optimisation de la performance*. .These de Doctorat, Université de la Méditerranée, Aix Marseilles II, 2003.

[Barbosa2012] Barbosa, T., Costa, M., Morais, J., Moreira, M., Silva, A. et Marinho, D. *How Informative are the Vertical Buoyancy and the Prone Gliding Tests to Assess Young Swimmers' Hydrostatic and Hydrodynamic Profiles ?* Journal of Human Kinetics, vol. 32, pages 21–32, 2012.

[Barclay1978] Barclay, C., Cutting, J. et Kozlowski, L. *Temporal and spatial factors in gait perception that influence gender recognition.* Percept Psychophys, vol. 23, n ° 2, pages 145–52, 1978.

[Barfield1993] Barfield, W. et Weghorst, S. *The sense of presence within virtual environnements : a conceptual framework*. In Proceedings of the 5th International Conference on Human-Computer Interaction, pages 699–704, 1993.

[Beardsworth1981] Beardsworth, T. et Buckner, T. *The ability to recognize oneself from a video recording of one's movements without seeing one's body.* Bulletin of the Psychonomic Society, 1981.

[Belisle1963] Belisle, J. *Accuracy, reliability, and refractoriness in a coïncidence-anticipation task*. Research Quaterly, vol. 34, n ° 1, pages 271–281, 1963.

[Berthier1996] Berthier, N., Clifton, R., Gullapalli, V., McCall, D. et Robin, D. *Visual information and object size in the control of reaching*. Journal of Motor Behavior, vol. 28, n ° 3, pages 187–197, 1996.

[Bideau2003a] Bideau, B., Colobert, B., Nicolas, G., Fusco, N., a. C. A. M. F. et Delamarche, P. *How to compute the mechanical parameters of monofins ?* Biomechanics and Medicine in Swimming, vol. IX, page 505–511, 2003.

[Bideau2003b] Bideau, B., Colobert, B., Nicolas, G., Le Guerroué, G., Multon, F. et Delamarche, P. *Development of an Active Drag Evaluation System (A.D.E.S.)*. Biomechanics and Medicine in Swimming, vol. IX, page 51–56, 2003.

[Bideau2003c] Bideau, B., Kulpa, R., Ménardais, S., Fradet, L., Multon, F., Delamarche, P. et Arnaldi, B. *Real Handball Goalkeeper vs. Virtual Handball Thrower*. Presence : Teleoperators and Virtual Environments, vol. 12, n ° 4, pages 411–421, 2003.

[Bideau2004] Bideau, B., Multon, F., Kulpa, R., Fradet, L., Arnaldi, B. et Delamarche, P. *Using virtual reality to analyze links between handball thrower kinematics and goalkeeper's reactions*. Neuroscience letters, vol. 372, n ° 1-2, pages 119–122, 2004.

[Bideau2010a] Bideau, B., Kulpa, R., Vignais, N., Brault, S., Multon, F. et Craig, C. *Using virtual reality to analyze sports performance*. IEEE Computer Graphics and Applications, vol. 30, n° 2, pages 14–21, 2010.

[Bideau2010b] Bideau, B., Nicolas, G., Sanders, R. et Kulpa, R. *A New Method to Evaluate Cross-Sectional Area Based on Computer Animation of Swimming.* Biomechanics and Medicine in Swimming, vol. XI, pages 53–65, 2010.

[Bideau2010c] Bideau, N., Razafimahery, F.and Monier, L., Mahiou, B. et Nicolas, G.and Bideau, B. R. L. *3D computational fluid-structure interaction model for the estimation of propulsive forces of a deformable monofin.* Biomechanics and Medicine in Swimming, vol. XI, page 52–54, 2010.

[Brault2009] Brault, S. *How the global body displacement of a rugby player can be used to detect deceptive movement in 1 vs. 1*. In Proceedings of the 11th Virtual Reality International Conference, Laval, France, pages 161–166, 2009.

[Brault2010] Brault, S., Bideau, B., Craig, C. et Kulpa, R. *Balancing deceit and disguise : How to successfully fool the defender in a 1 vs. 1 situation in rugby*. Human movement science, vol. 29, n° 3, pages 412–425, 2010.

[Brault2012] Brault, S., Bideau, B., Kulpa, R. et Craig, C. *Detecting deception in movement : The case of the side-step in rugby*. PlosOne, vol. 7, 2012.

[Bray2003] Bray, K.and Kerwin, D. *Modelling the flight of a soccer ball in a direct free kick.* Journal of Sports Sciences, vol. 21, pages 75–85, 2003.

[Cappaert1998] Cappaert, J, M. et Gordon, B, J. *Frontal surface area measurements in national calibre swimmers*. sports Engineering, vol. 1, pages 51–55, 1998.

[Chaigneau1992] Chaigneau, F., Delamarche, P. et Levasseur, M. *Stroboscopic computerized determination of humeral rotation in overarm throwing.* British Journal of Sport Medecine, vol. 26, page 59–62, 1992.

[Christianson1965] Christianson, R., Weltman, G. et Egstrom, G. *Thrust forces in underwater swimming.* Human factors, pages 561–568, 1965.

[Clarys1979] Clarys, J, P. *Human morphology and hydrodynamics*. n J. Terauds E. W. Bedingfield (Eds.), International series on sport sciences – Swimming III, pages 3–43, 1979.

[Clifford1999] Clifford, C., Beardsley, S. et Vaina, L. *The perception and discrimination of speed in complex motion*. Vision research, vol. 39, n° 13, pages 2213–2227, 1999.

[Cottin1989] Cottin, J. *Handball : la préparation à agir du gardien de but : analyse chronométrique des actions de parade en situation de terrain*. Mémoire INSEP, 1989.

[Craig2006] Craig, C., Berton, E., Rao, G., Fernandez, L. et Bootsma, R. *Judging where a ball will go : the case of curved free kicks in football*. Naturwissenschaften, vol. 93, n° 2, pages 97–101, 2006.

[Crane1997] Crane, B. et Demer, J. *Human gaze stabilization during natural activities : translation, rotation, magnification, and target distance effects*. Journal of neurophysiology, vol. 78, n° 4, page 2129, 1997.

[Crognier2007] Crognier, L. et Fery, Y. *40 Years of Research on Anticipation in Tennis : A Critical Review*. Science et Motricité, vol. 62, page 9, 2007.

[Davids1984] Davids, K. *The role of peripheral vision in ball games : Some theoretical and practical notions*. Physical Education Review, vol. 7, n° 1, pages 26–40, 1984.

[Debanne2003] Debanne, T. *Activité perceptive et décisionnelle du gardien de but de handball lors de la parade : les savoirs d'experts*. Staps, vol. 62, n° 2003/3, pages 43–58, 2003.

[Deridder1985] Deridder, M. *Enregistrement et analyse des comportements exploratoires visuels du gardien de but en situation de penaltu*. Recherches en Activités Physiques et Sportives I, pages 259–272, 1985.

[Elliott1983] Elliott, B.and Wood, G. *The biomechanics of the footup and foot-back tennis serves techniques.* The Australian Journal of Sport Sciences, vol. 3, pages 3–6, 1983.

[Féry2001] Féry, Y. *Que savons-nous de nos mouvements ?* Staps, vol. 55, n° 2001/2, pages 7–22, 2001.

[Fish1999] Fish, F, E. R. J. J. *Review of Dolphin Hydrodynamics and Swimming Performance*. Technical Report 1801. US Navy, SanDiego, CA, 1999.

[Fradet2003] Fradet, L. *Analyse biomécanique, modélisation et simulation du tir au handball*. Thèse, PhD thesis, Université Rennes 2 - France, 2003.

[Helsen1993] Helsen, W. et Pauwels, J. *The relationship between expertise and visual information processing in sport*. Cognitive issues in motor expertise, pages 109–134, 1993.

[Hendrix1996] Hendrix, C. et Barfield, W. *Presence within virtual environments as a function of visual display parameters*. Presence : Teleoperators and Virtual Environments, vol. 5, n° 3, pages 274–289, 1996.

[Hirasaki1999] Hirasaki, E., Moore, S., Raphan, T. et Cohen, B. *Effects of walking velocity on vertical head and body movements during locomotion*. Experimental brain research, vol. 127, n° 2, pages 117–130, 1999.

[Hodgins1998] Hodgins, J., O'Brien, J. et Tumblin, J. *Perception of human motion with different geometric models*. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, vol. 4, n° 4, pages 307–316, 1998.

[Hollander A1986] Hollander A, P., De Groot, G., Ingen Schenau G, J., Toussaint H, M., Best H, D., W., P., A., M. et Schreuers A, W. *Measurement of active drag forces during swimming*. Journal of Sports Sciences, vol. 4, pages 21–30, 1986.

[Hollands2001] Hollands, M., Sorensen, K. et Patla, A. *Effects of head immobilization on the coordination and control of head and body reorientation and translation during steering*. Experimental brain research, vol. 140, n° 2, pages 223–233, 2001.

[Horak1986] Horak, F. et Nashner, L. *Central programming of postural movements : adaptation to altered support-surface configurations*. Journal of Neurophysiology, vol. 55, n° 6, page 1369, 1986.

[Huffman1996] Huffman, K. et Hubbard, M. *A motion based virtual reality training simulator for bobsled drivers.* The engineering of sport, pages 195–203, 1996.

[Jackson2006] Jackson, R., Warren, S. et Abernethy, B. *Anticipation skill and susceptibility to deceptive movement*. Acta psychologica, vol. 123, n° 3, pages 355–371, 2006.

[Johansson1973] Johansson, G. *Visual perception of biological motion and a model for its analysis*. Perceiving events and objects, 1973.

[Jöris1985] Jöris, H., Van Muyen, A., Van Ingen Schenau, G. et HCG., K. *Force, Velocity and energy flow during the overarm throw in female handball players*. Journal of biomechanics, vol. 18, page 409–414, 1985.

[Kanus1991] Kanus, P. et Renstrom, P. *Current concept review. Treatment for acute tears of the lateral ligament of the ankle*. Journal Bone Joint Surgery, vol. 73, pages 305–317, 1991.

[Keller1987] Keller, D., Goetz, M. et Henneman, M. *Ajustements duels spécifiques en sports de balle*. STAPS, vol. 15, pages 31–38, 1987.

[Kjendlie2008] Kjendlie, P. et Stallman, R, K. *Drag Characteristics of Competitive Swimming Children and Adults*. Journal of Applied Biomechanics, vol. 24, pages 35–42, 2008.

[Kolmogorov1992] Kolmogorov, S. et Duplisheva, O. *Oscillating foils of high propulsive efficiency*. Journal of Biomechanics, vol. 25, pages 311–318, 1992.

[Lauder2007] Lauder, G, V., Anderson, E, J., angorra, J. et Madden, P, G. A. *Fishbiorobotics :kinematics and hydrodynamics of self-propulsion*. Journal of Experimental Biology, vol. 210, pages 2767–2780, 2007.

[Lighthill1975] Lighthill, M. J. *Mathematical biofluiddynamics*. Philadelphia : Society for Industrial and Applied Mathematics, 1975.

[Luk1999] Luk, T., Hong, Y., P, C. et Li, S. *Kinematic characteristics of lower extremity during 50 m breathhold of finswimming*. In R. Sanders J. Listen (Eds.), Scientific proceedings of the XVII international symposium on biomechanics in sports, pages 77–80, 1999.

[Martin2012] Martin, C., Bideau, B., Nicolas, G., Delamarche, P. et R., K. *The biomechanics of the footup and foot-back tennis serves techniques.* Journal of Sports Sciences (In press), 2012.

[Mazyn2004] Mazyn, L., Lenoir, M., Montagne, G. et Savelsbergh, G. *The contribution of stereo vision to one-handed catching*. Experimental Brain Research, vol. 157, n° 3, pages 383–390, 2004.

[McMorris1993] McMorris, T., Copeman, R., Corcoran, D., Saunders, G. et Potter, S. *Anticipation of soccer goalkeepers facing penalty kicks*. Science and Football II, pages 250–254, 1993.

[Minetti2004] Minetti, A. E. *Passive tools for enhancing muscle-driven motion and locomotion*. Journal of Experimental Biology, vol. 207, pages 1265–1272, 2004.

[Moore1999] Moore, S., Hirasaki, E., Cohen, B. et Raphan, T. *Effect of viewing distance on the generation of vertical eye movements during locomotion*. Experimental brain research, vol. 129, n° 3, pages 347–361, 1999.

[Mori2002] Mori, S., Ohtani, Y. et Imanaka, K. *Reaction times and anticipatory skills of karate athletes*. Human Movement Science, vol. 21, n° 2, pages 213–230, 2002.

[Müller2006] Müller, S., Abernethy, B., Farrow, D. et Barras, N. *Which visual cues do world-class cricket batsmen use to anticipate bowlers' deliveries ?*, 2006. Rapport présenté à la fédération australienne de cricket.

[Multon2008] Multon, F., Kulpa, R. et Bideau, B. *MKM : A Global Framework for Animating Humans in Virtual Reality Applications*. Presence : Teleoperators and Virtual Environments, vol. 17, n° 1, pages 17–28, 2008.

[Murphy2003] Murphy, D., Connolly, D. et Beynnon, B. *Risk factors for lower extremity injury : a review of the literature*. British Journal of Sport Medecine, vol. 37, pages 13–29, 2003.

[Nicolas2007] Nicolas, G., Bideau, B., Colobert, B. et Berton, E. *How are Strouhal number, drag, and efficiency adjusted in high level underwater monofin swimming ?* Human Movement Science, vol. 26, pages 426–442, 2007.

[Nicolas2009] Nicolas, G. et Bideau, B. *A kinematic and dynamic comparison of surface and underwater displacement in high level monofin swimming*. Human Movement Science, vol. 28, pages 480–493, 2009.

[Nicolas2010] Nicolas, G., Bideau, B., Bideau, N., Colobert, B., Le Guerroue, G. et Delamarche, P. *A new system for analyzing swim fin propulsion based on human kinematic data.* Journal of biomechanics, vol. 43, page 1884–1889, 2010.

[Noser1997] Noser, H., Pandzic, I., Capin, T., Thalmann, N. et Thalmann, D. *Playing Games through the Virtual Life Network*. In Artificial Life V : Proceedings of the Fifth International Workshop on the Synthesis and Simulation of Living Systems. MIT Press, 1997.

[Oztekin2008] Oztekin, H., Zeren, B., Boya, H., Ozcan, O. et Pinar, P. *Foot and ankle injuries and time lost in professional soccer players*. The Foot, vol. 19, pages 22–28, 2008.

[Patla1999] Patla, A., Adkin, A. et Ballard, T. *Online steering : coordination and control of body center of mass, head and body reorientation*. Experimental brain research, vol. 129, n° 4, pages 629–634, 1999.

[Pozzo1991] Pozzo, T., Berthoz, A., Lefort, L. et Vitte, E. *Head stabilization during various locomotor tasks in humans*. Experimental brain research, vol. 85, n° 1, pages 208–217, 1991.

[Ripoll1995] Ripoll, H., Kerlirzin, Y., Stein, J. et Reine, B. *Analysis of information processing, decision making, and visual strategies in complex problem solving sport situations*. Human Movement Science, vol. 14, n° 3, pages 325–349, 1995.

[Rohr1983] Rohr, J, J. F. F. E. *Hydromechanics of body and caudal fin propulsion*. In P. W. Webb D. Weihs (Eds.), Fish biomechanics. New York : Praeger, 1983.

[Rohr2004] Rohr, J, J. F. F. E. *Strouhal numbers and optimization of swimming by odontocete cetaceans*. Journal of Experimental Biology, vol. 207, pages 1663–1642, 2004.

[Salmela1979] Salmela, J. et Fiorito, P. *Visual cues in ice hockey goaltending.* Canadian Journal of Applied Sport Sciences, vol. 4, n° 1, pages 56–9, 1979.

[Savelsbergh2002] Savelsbergh, G., Williams, A., Van Der Kamp, J. et Ward, P. *Visual search, anticipation and expertise in soccer goalkeepers*. Journal of Sports Sciences, vol. 20, n° 3, pages 279–287, 2002.

[Savelsbergh2005] Savelsbergh, G., Van der Kamp, J., Williams, A. et Ward, P. *Anticipation and visual search behaviour in expert soccer goalkeepers*. Ergonomics, vol. 48, n° 11, pages 1686–1697, 2005.

[Seifert2010] Seifert, L., Toussaint, H., Alberty, M., Schnitzler, C. et Chollet, D. *Arm coordination, power, and swim efficiency in national and regional front crawl swimmers*. Human Movement Science, vol. 29, pages 426–439, 2010.

[Seyama2007] Seyama, J. et Nagayama, R. *The uncanny valley : effect of realism on the impression of artificial human faces*. Presence : Teleoperators & Virtual Environments, vol. 16, n° 4, pages 337–351, 2007.

[Shank1987] Shank, M. et Haywood, K. *Eye movements while viewing a baseball pitch*. Perceptual and Motor Skills, vol. 64, n° 3, pages 1191–1197, 1987.

[Shim2005] Shim, J., Carlton, L., Chow, J. et Chae, W. *The Use of Anticipatory Visual Cues by Highly Skilled Tennis Players*. Journal of Motor Behavior, vol. 37, n° 2, pages 164–175, 2005.

[Singer1996] Singer, R., Cauraugh, J., Chen, D., Steinberg, G. et Frehlich, S. *Visual search, anticipation, and reactive comparisons between highly-skilled and beginning tennis players*. Journal of Applied Sport Psychology, vol. 8, n° 1, pages 9–26, 1996.

[Slater1993] Slater, M. et Usoh, M. *Presence in immersive virtual environments*. In Conference, I., éditeur, Virtual Reality Annual International Symposium, pages 90–96, 1993.

[Slater1998] Slater, M., Steed, A., McCarthy, J. et Maringelli, F. *The influence of body movement on subjective presence in virtual environments*. Human Factors, vol. 40, n° 3, pages 469–478, 1998.

[Szilagyi1999] Szilagyi, T., Kocsis, L., Thukral, R., Lelovics, Z. et Barabas, A. *Kinematic analysis of surface and underwater fin swimming*. In R. Sanders J. Listen (Eds.), Scientific proceedings of the XVII international symposium on biomechanics in sports, pages 73–76, 1999.

[takagi1999] takagi, H., Shimizu, Y. et Kodan, N. *A hydrodynamic study of active drag in swimming*. JSME International Journal, vol. 42, pages 171–177, 1999.

[Toussaint1992] Toussaint, H, M., De Groot, G., Savelberg, H., Vervoorn, K., Hollander, A, P. et Van Ingen Schenau, G, J. *Active drag related to velocity in male and female swimmers*. Journal of Biomechanics, vol. 21, pages 435–438, 1992.

[Toussaint2000] Toussaint, H, M., Hollander, A, P., Van den Berg, C. et Vorontsov, A. *Biomechanics of swimming*. In W. E. Garrett, D. T. Kirkendall (Eds.), Exercise and sport science, pages 639–660, 2000.

[Toussaint2005] Toussaint, H, M. et Truijens, M, J. *Biomechanical aspects of peak performance in human swimming*. Animal Biology, vol. 55, pages 17–40, 2005.

[Triantafyllou1993] Triantafyllou, G, S., Triantafyllou, M, S. et Grosenbaugh, M, A. *Optimal thrust development in oscillating foils with application to fish propulsion*. Journal of Fluid Mechanics, vol. 7, pages 205–224, 1993.

[Vennell2006] Vennell, R., Pease, B. et Wilson, B. *Wave drag on human swimmers*. Journal of Biomechanics, vol. 39, pages 664–671, 2006.

[Vignais2009] Vignais, N. *Virtual environments for sport analysis : perception-action coupling in handball goalkeeping*. In Proceedings of the 11th Virtual Reality International Conference, Laval, France, pages 147–153, 2009.

[Vignais2010a] Vignais, N. et Bideau, B.and Craig, C. B. S. K. R. *Virtual thrower vs. real goalkeeper : influence of different visual conditions on performance.* Presence : Teleoper. Virtual Environ., vol. 19, page 281–290, 2010.

[Vignais2010b] Vignais, N., Kulpa, R., Craig, C., Brault, S., Multon, F. et Bideau, B. *Influence of the Graphical Levels of Detail of a Virtual Thrower on the Perception of the Movement*. Presence : Teleoperators and Virtual Environments, vol. 19, n° 3, pages 243–252, 2010.

[Vogel1994] Vogel, S. *Life in moving fluids : The physical biology of flow*. Princeton : Princeton University Press, 1994.

[Von Karman1935] Von Karman, T. et Burgers, J. M. *Optimal thrust development in oscillating foils with application to fish propulsion*. Aerodynamic theory, vol. 2, 1935.

[von Loebbecke2009] von Loebbecke, A., Mittal, R.and Fish, F. et Mark, R. *A comparison of the kinematics of the dolphin kick in humans and cetaceans*. Human Movement Science, vol. 28, pages 99–112, 2009.

[Williams1992] Williams, A., Davids, K., Burwitz, L. et Williams, J. *Perception and action in sport*. Journal of Human Movement Studies, vol. 22, pages 147–204, 1992.

[Williams1993] Williams, A. et Burwitz, L. *Advance cue utilization in soccer*. Science and football II, pages 239–244, 1993.

[Williams1994] Williams, A., Davids, K., Burwitz, L. et Williams, J. *Visual search strategies in experienced and inexperienced soccer players.* Research Quarterly on Exercise and Sport, vol. 65, n° 2, pages 127–35, 1994.

[Williams1998] Williams, A. et Davids, K. *Visual search strategy, selective attention, and expertise in soccer.* Research Quarterly for Exercise and Sport, vol. 69, n° 2, pages 111–28, 1998.

[Williams1999a] Williams, A. Visual Perception and Action in Sport. E & FN Spon, 1999.

[Williams1999b] Williams, A., Davids, K. et Williams, J. Visual perception and action in sport. 1999.

[Winter1995] Winter, D. *Human balance and posture control during standing and walking*. Gait & Posture, vol. 3, n° 4, pages 193–214, 1995.

[Wit1998] Wit, A. et Eliasz, J. *A three-dimensional kinematic analysis of handball throws.* International symposium on biomechanics in sports, vol. 1, pages 281–284, 1998.

[Witmer1998] Witmer, B. et Singer, M. *Measuring Presence in Virtual Environments : A Presence Questionnaire*. Presence, vol. 7, n° 3, pages 225–240, 1998.

[Woods2004] Woods, C., Hawkins, R., Maltby, S., Hulse, M., Thomas, A. et Hodson, A. *The Football Association Medical Research Programme : an audit of injuries in professional football – analysis of hamstring injuries*. British Journal of Sport Medecine, vol. 38, pages 36–41, 2004.

[Zamparo2002] Zamparo, P., Pendergast, D. R., Termin, B. et Minetti, A. E. *How fins affect the economy and efficiency*. Journal of Experimental Biology, vol. 205, pages 2665–2676, 2002.

[Zamparo2005] Zamparo, P., Pendergast, D, R. et Termin, B.and Minetti, A. E. *Economy and efficiency of swimming at the surface with fins of different size and stiffness*. European Journal of Applied Physiology, vol. 96, pages 459–470, 2005.

Deuxième partie

Curriculum-Vitae Détaillé

Curriculum-Vitae

Benoit Bideau

Né le 29 mars 1975 à Quimper (Finistère)
Père de 3 enfants : Marla, Thaïs, Evy

Adresse personnelle :
26 rue de la Bobinais
35170 Bruz

Adresse professionnelle
Laboratoire M2S-UFRAPS
Université Rennes 2
Rue Pierre-Jean Gineste
CS 24307

Diplômes universitaires

- **1997 DEUG en sciences et techniques des activités physiques et sportives.**UFRSTAPS de Rennes2. Mention assez bien.
- **1998 Licence en sciences et techniques des activités physiques et sportives**.UFRSTAPS de Rennes2.Mention assez bien.
- **1999 Maîtrise en sciences et techniques des activités physiques et sportives.**UFRSTAPS de Rennes2. Mention bien.
- **2000 DEA STAPS** mention bien
  Intitulé : Conditions matérielles de la pratique sportive : biomécanique et physiologie de l'entraînement.

Titre : Déterminants cinématiques et cinétiques du niveau d'expertise en trampoline.
Directeur : Franck Multon, Maître de Conférences de l'Université de Rennes 2.

– **2003 Doctorat en STAPS**, mention très honorable
Thèse soutenue le 10 décembre 2003 à Rennes 2
Titre : La réalité virtuelle pour l'analyse des duels sportifs : application au duel entre un gardien et un tireur au handball
Directeurs : Paul Delamarche, Professeur de l'Université de Rennes 2 ; Franck Multon, Maître de Conférences de l'Université de Rennes 2.
Membres du Jury :
Président : Mr Arnaldi Bruno, Professeur IRISA Rennes 1
Rapporteurs :
Mr Gorce Philippe, Professeur, Université de Toulon et du Var
Mr Mestre Daniel, Directeur de Recherche CNRS, Université de Marseille

Diplômes extra-universitaires

– **1996 Brevet d'état d'éducateur sportif premier degré des activités de la natation(BEESAN).**

– **2001 Brevet d'état d'éducateur sportif deuxième degré des activités de la natation (BEESAN 2°)**

Divers

Athlète de haut niveau en nage avec palmes sur les listes du ministère Jeunesse et Sports dans la catégorie élite de 1993 à 2002

Parcours professionnel

2000-2003 : Doctorant au LPBEM (Université de Rennes 2)

Sujet de recherche

La réalité virtuelle pour l'analyse des duels sportifs : application au duel entre un gardien et un tireur au handball

La compréhension des duels sportifs est une tâche complexe, car elle nécessite de maîtriser une interaction entre deux individus. Dans des conditions rélles de jeu, il est impossible de contrôler tous les paramètres. Ainsi aucune relation ne peut être effectuée entre un mouvement d'un joueur et la réponse de l'adversaire. La réalité virtuelle offre de nouvelles perspectives pour faire interagir des sportifs dans des environements entièrement sous contrôle. Dans cette thèse nous proposons de développer et de valider un processus d'analyse des duels sportifs, pour une application précise : le duel entre un gardien et un tireur au handball. Dans un premier temps, nous montrons que les réactions des gardiens sont identiques, pour un même tir, dans un environnement réel et virtuel. Une fois notre outil validé nous modifions à l'aide d'un modèle de mouvement la gestuelle d'un tireur humanoïde. Ceci nous permet de définir l'influence des variations de mouvements du tireur sur la réaction du gardien. Nous quantifions ainsi l'influence du poignet de l'inclinaison du buste et de l'instant de lâcher du ballon sur la parade du gardien.

Activités d'enseignement

En tant qu'attaché temporaire vacataire à l'UFRSTAPS de Rennes, mon activité d'enseignement consistait à encadrer des travaux dirigés et des travaux pratiques en biomécanique pour les licences 1,2,3 STAPS.

2002-2003 : ATER (Université de Nantes)

Sujet de recherche

Influence du niveau de pratique sur les propriétés mécaniques des rotateurs de l'épaule en volley-ball
De nombreuses pathologies de l'épaule sont associées à la pratique du volley-ball de haut niveau. Le projet de recherche mené au cours de cette année avait pour but d'évaluer la relation entre le niveau d'activation des muscles rotateurs de l'épaule et les aspects dynamiques (forces et moments de forces). Pour cela une population très experte (Professionnels) et une population de joueurs amateurs ont été testées sur machine isocinétique. Les résultats ont permis de mettre en évidence un ratio de couple entre les rotateurs externes et rotateurs internes plus faible pour les professionnels que pour les amateurs. Ces résultats montrent qu'un niveau de pratique élevé de volley-ball induit un fort déficit des rotateurs externes de l'épaule.

Activités d'enseignement

- Cours magistraux et travaux dirigés de biomécanique en licence 1 APS : analyse cinématique du mouvement en translation et en rotation
- Cours magistraux et travaux dirigés de biomécanique en licence 2 APS : analyse dynamique du mouvement en translation et en rotation
- Cours magistraux et travaux dirigés de biomécanique en licence 3 APS : analyse enérgétique de la motricité humaine

2004-2005 : ATER au M2S (Université de Rennes 2)

Sujet de recherche

Evaluation du niveau de présence des sportifs en environnement virtuel
Une des problématiques majeures liée à l'utilisation de la réalité virtuelle dans le domaine du sport est d'être en mesure d'assurer un haut niveau de présence des sujets immergés. La présence étant associée au sentiment d'intégrer le monde virtuel comme un monde réel. Dans cette optique ma recherche s'est focalisée sur les élements de rendu graphique pouvant influencer ce niveau de présence. Nous avons donc évalué pour différentes conditions visuelles (différents niveaux de détails d'un joueur virtuel) les réponses du gardiens de handball. Au cours de cette année j'ai encadré le master de Nicolas Vignais qui a ensuite poursuivi sa thèse sur cette thématique.

Activités d'enseignement

- Cours magistraux et travaux dirigés de biomécanique en licence STAPS
- Cours magistraux et travaux dirigés de biomécanique en Master 1
- Cours magistraux et travaux dirigés de biomécanique en Master 2

Depuis 2005 : Maître de conférences (Université de Rennes 2)

Sujet de recherche

Comme j'ai pu le présenter dans la première partie du document la recherche que je mène au sein du laboratoire M2S porte sur l'analyse des interactions sportives. Quel que soit le type d'interaction l'objectif poursuivi est d'isoler par différentes méthodes les paramètres de l'efficacité du geste sportif. Pour isoler ces paramètres il est nécessaire de contrôler les différentes variables pour étudier leurs influences sur la performance. Le contrôle de ces variables nécessite généralement la création d'outils ou de méthodes. Pour les interactions avec le milieu (aquatique) ou les matériaux j'ai développé des outils dédiés : ADES (Active Drag Evaluation System) et HERMES (Hydrodynamic Equipment for Research on Mechanical Efficiency of Swim-fins). Pour

les interactions avec des adversaires j'ai principalement mis en place des méthodologies basées sur l'utilisation de la réalité virtuelle.

Activités d'enseignement

- Cours magistraux et travaux dirigés de biomécanique en Licence 1 STAPS : analyses cinématiques du mouvements, bases mathématiques.
- Cours magistraux et travaux dirigés d'anatomie en Licence 1 STAPS
- Cours magistraux et travaux dirigés de biomécanique en licence 2 entraînement sportif ainsi qu'en licence 2 ergonomie du sport et de la performance motrice : analyse dynamique du mouvement en translation et en rotation.
- Cours magistraux et travaux dirigés en licence 2, ergonomie du sport et de la performance motrice : méthodes et outils de mesure du mouvement humain
- Cours magistraux et travaux dirigés en licence 2 entraînement : méthodologie d'optimisation de la performance sportive
- Cours magistraux et travaux dirigés de biomécanique en licence 2 entraînement sportif ainsi qu'en licence 2 ergonomie du sport et de la performance motrice : analyse énergétique de la locomotion humaine
- Cours magistraux et travaux dirigés de biomécanique en Master 1
- Cours magistraux et travaux dirigés en Master 2 : Ergonomie du geste, analyse biomécanique du geste sportif

D'une manière générale, mon enseignement est en étroite relation avec mes activités de recherche. La modélisation et la simulation de mouvement sont donc au centre de l'enseignement dispensé. Un de mes objectifs pédagogiques est de mettre en relation les compétences pratiques des étudiants dans les APS avec les connaissances biomécaniques. Les résultats de recherche obtenus pour les différentes activités sportives permettent d'illustrer cette relation. Pour former les étudiants aux aspects pratiques, et qu'ils soient en mesure d'appliquer leurs connaissances, nous avons créé un enseignement dirigé vers une utilisation des nouvelles technologies sur le terrain.

Différents projets menés en relation avec l'industrie m'ont permis de réaliser des outils d'évaluation de sportifs, ou de matériaux sportifs. L'ingénierie du sport est actuellement en pleine expansion et les sociétés orientées sur la conception de matériaux sportifs sont intéressées par des profils d'étudiants ayant ces compétences. Nous avons donc développé un axe d'enseignement orienté vers l'ergonomie des matériaux sportifs pour répondre à des problèmes pratiques dans la licence « ergonomie du sport et de la performance motrice ».

Encadrement

Thèses soutenues

Nicolas Vignais 2005-2009

Mise en œuvre et évaluation d'une méthodologie fondée sur la réalité virtuelle pour l'analyse de la prise d'informations visuelles du gardien de but de handball

Thèse co-encadrée avec Paul Delamarche

La perception visuelle est un élément déterminant pour interagir avec notre environnement. Lors des activités physiques et sportives, la prise d'informations visuelles permet notamment à un athlète d'extraire et de sélectionner les indices visuels nécessaires pour anticiper le mouvement adverse. L'analyse de cette prise d'informations visuelles a fait l'objet de nombreuses recherches dans le domaine sportif, cependant toutes les méthodes employées semblent limitées sur le plan fonctionnel ou matériel. Ce travail a pour objectif l'évaluation et la mise en œuvre d'une nouvelle méthodologie d'analyse de la prise d'informations visuelles fondée sur l'utilisation des environnements virtuels. Cette méthodologie est appliquée à l'activité du gardien de but de handball en situation de duel. Dans un premier temps, nous comparons les performances des gardiens de but face à notre méthodologie avec ceux obtenus face à une séquence filmée afin de démontrer l'intérêt des environnements virtuels dans ce domaine. Puis, nous abordons la mise en place de notre méthodologie en nous focalisant sur l'influence du niveau de détail et de la représentation graphique de l'action de tir sur la performance du gardien de but de handball. Enfin, nous utilisons notre méthodologie pour étudier la prise d'informations visuelles du gardien de but de handball. Plus précisément, nous estimons l'importance relative des informations visuelles issues de la trajectoire du ballon et du mouvement de tir.

Devenir du docteur

Nicolas Vignais est en post-doc à l'université technologique de Compiègne depuis 2009

Sebastien Brault 2007-2011

La feinte de corps au rugby : déterminants biomécaniques, processus de détection et action de défense. Pourquoi l'expert est-il meilleur ?

Thèse co-encadrée avec Paul Delamarche et Cathy Craig

Ce travail est issu de plusieurs constats. Premièrement, il est admis aujourd'hui que la capacité à percevoir et à retirer les informations visuelles les plus pertinentes d'une action adverse, est un facteur déterminant de la performance sportive (Shim et coll. 2005) et ce d'autant plus si l'action est incertaine et faussée. Le second constat, découlant du premier, est que la tromperie est mise en jeu dans bon nombre d'intéractions humaines, mais qu'elle est particulièrement déterminante et prépondérante dans le cadre des stratégies sportives. Et enfin que l'exploration de la performance sportive, pour des raisons méthodologiques ou théoriques, ne permet pas dans certain cas d'expliquer pourquoi un expert est meilleur qu'un novice. L'objectif de notre travail va être de comprendre ces déterminants (perceptivo-moteurs) de l'expertise lors d'un duel 1 vs. 1 en rugby présentant une tentative de feinte de l'attaquant. Nous résumons ce travail en trois question concrètes auxquelles nous répondons : Comment réaliser une feinte de corps en rugby ? Comment la détecter ? Comment y faire face ? D'un point de vue conceptuel, nous poursuivons une démarche écologique, nous permettant de comprendre quelles informations dynamiques de l'organisation corporelle de l'opposant semblent être utilisées « online » par les participants pour détecter et faire face aux mouvements de feinte. D'un point de vue méthodologique maintenant, nous investissons un outil pointu et pertinent à notre sens : la réalité virtuelle. Le degré de présence qu'elle peut engendrer ainsi que sa qualité à pouvoir reproduire fidèlement une situation (Tarr et Warren, 2002) sont des atouts indispensables à l'étude du domaine perceptif en situation sportive. Notre démarche s'organise en trois temps. Le premier temps s'attache à analyser les différences biomécaniques observables entre un mouvement de simple changement de direction et un mouvement de feinte de corps en rugby. La seconde étape, en immersion virtuelle, met en lien les informations prospectives émanant des mouvements de feinte et la prise de décision du défenseur de rugby (expert ou novice). Enfin, en se basant sur une méthodologie quasi-similaire, la troisième étape vient immerger les participants dans une situation complète de défense, nous permettant d'explorer la stratégie perceptivo-motrice des participants. L'ensemble de ce processus nous permet de témoigner de l'effet de

l'expertise mais surtout d'expliquer pourquoi l'expert est meilleur en dressant les différences de stratégie perceptivo-motrice le caractérisant, comparativement au novice. Si les implications concernent majoritairement le domaine du rugby (connaissances fondamentales et entrainement), elles présentent au sens plus large, un éclairage justifié et démontré des processus mis en jeu lors de toute interaction, humaine ou animale, sollicitant la tromperie. Nous en sommes persuadés ; un prédateur animal, un joueur de poker, un défenseur de basket... se doivent de présenter des stratégies quasi similaires pour détecter l'intention de feinte chez l'opposant.

Devenir du docteur

Sebastien sera ATER à l'Ecole Normale Supérieure de Cachan (antenne de bretagne).

Thèses en cours

Caroline Martin

Modélisation et simulation du mouvement sportif : application à l'optimisation du service au tennis

Comité de Thèse Paul Delamarche, Richard Kulpa, Benoit Bideau

La thèse a pour objectif la création d'un outil de simulation du mouvement humain visant à optimiser une technique sportive complexe (le service au tennis) comprenant une interaction entre un individu et un objet en mouvement. Plus précisément, nous proposons d'utiliser cet outil pour étudier et d'optimiser, d'un point de vue biomécanique, l'efficacité des joueurs de tennis. La réussite de ce projet suppose la réalisation de différentes étapes indispensables : extraction des déterminants biomécaniques du service de haut niveau (étape 1), création d'un modèle incluant les lois biomécaniques du service comprenant les relations entre les paramètres segmentaires et la performance (étape 2), test d'hypothèses pertinentes au sein d'un outil de simulation en vue d'optimiser la performance d'un joueur donné (étape 3). Au travers du développement d'un simulateur du mouvement sportif de tennis, nous espérons :

- Identifier et comprendre les déterminants et les lois biomécaniques régissant l'efficacité du service au tennis chez des joueurs de haut niveau
- Proposer un modèle d'animation à l'origine d'une simulation réaliste du mouvement sportif
- Fournir au monde sportif un outil permettant d'optimiser la gestuelle et d'entrainer des athlètes Pour mener à bien ce projet de thèse, différents champs de compétences doivent être mis en jeu, ceux de la modélisation et de la simulation du

mouvement humain, de l'informatique et de la compréhension biomécanique du geste du service au tennis.

Encadrement de Master 2

Nicolas Vignais 2005

Développement d'un outil de comparaison de mouvement : application à l'analyse de la parade du gardien de handball en environnement virtuel
La comparaison de trajectoires pose un réel problème étant donné qu'aucun consensus n'existe sur l'utilisation privilégiée d'une méthode. Cela signifie qu'il n'y a pas d'outil pertinent et adapté à l'évaluation de la ressemblance entre deux trajectoires de mouvement. L'objet de cette étude est le développement d'une méthode de comparaison de trajectoires fiables et adaptées aux mouvements sportifs. La création de cet outil passe par une analyse des méthodes existantes. Une fois l'outil de comparaison de trajectoires développé et validé, nous l'utilisons pour étudier la parade du gardien de handball en environnement virtuel.

Thibault David 2006

Influence des semelles sur les contraintes articulaires des membres inférieurs lors d'une phase d'appui durant la course
L'objectif de cette étude est le développement de techniques de dynamiques inverses pour l'évaluation des contraintes articulaires. Une fois validées, ces méthodes sont appliquées à l'étude de différentes semelles de chaussures lors d'un cycle de course.

Sebastien Brault 2007

Apport de la réalité virtuelle pour l'étude du duel en 1 vs. 1 en rugby
L'objectif de cette étude est la conception et la validation d'une situation en environnement virtuel pour l'analyse des interactions au rugby. La situation étudiée est celle du duel entre un attaquant virtuel réalisant une feinte et un défenseur réel tentant de l'intercepter. La finalité du projet est d'étudier la prise d'information du défenseur sur la cinématique de son opposant.

Benjamin Maihou 2008

Analyse et modélisation mécanique de la palme in situ
Dans ce travail nous proposons une méthode théorique d'étude mécanique de la palme basée sur le formalisme des poutres. Ce modèle nous permet d'extraire les modes et fréquences de résonance de la palme dans le milieu fluide pour différentes vitesses. Cette analyse fréquentielle permet d'extraire les fréquences utiles et néfastes à l'efficacité de la structure.

Julien Lardy 2009

Comparaison des environnements réel et virtuel par une analyse de paramètres dynamiques lors d'une tâche d'évitement d'obstacle
L'objectif de cette étude est la validation d'une protocole en environnement virtuel dans une situation d'évitement de collision. Cette validation est basée sur la comparaison des variables dynamiques issues d'une plateforme de forces, lors d'un évitement de balle dans une situation réelle et lors d'un évitement de balle dans une situation virtuelle.

Caroline Martin 2010

Identification de lois biomécaniques du service-volée au tennis pour le développement d'un outil de simulation par cinématique inverse
Le but de cette étude est d'identifier des lois biomécaniques régissant la performance du service-volée au tennis. Au service, les joueurs de tennis peuvent utiliser deux techniques principales : la technique de relais d'appuis (FU) et la technique des pieds écartés (FB). Les résultats concernant les variables cinématiques et cinétiques montrent que la FU permet aux joueurs d'augmenter la vitesse de la balle. Ces résultats doivent permettre d'alimenter un modèle de simulation par cinématique inverse pour optimiser le mouvement de service.

Damien Goyat 2012

Mise en place et validation d'un entraînement de poursuite de cibles multiples
L'objectif de cette étude est le développement d'une situation d'entraînement à la poursuite d'objets multiples. Cette étude passe par la validation des conditions d'entraînement : vitesse des objets, nombre d'objets à suivre.

Responsabiltés collectives et animation scientifique

Direction adjointe du laboratoire mouvement sport santé

Depuis 2010 j'ai été nommé directeur adjoint du laboratoire Mouvement sport santé dirigé par Paul Delamarche. J'ai été reconduit dans mes fonctions en septembre 2011 par le conseil du laboratoire, pour le nouveau contrat quinquénal.

Présentation du laboratoire M2S

Le laboratoire Mouvement Sport Santé est composé de 3 grandes équipes. Les deux premières sont basées sur Rennes la troisième est basée sur Brest.

Analyse modélisation et simulation du mouvement humain
Cette équipe dirigée par Franck Multon, a développé une approche originale couplant analyse et synthèse du mouvement pour identifier les paramètres fondamentaux de la performance motrice.Parmi les grands thèmes portés par l'équipe, nous pouvons noter, entre autre : le développement de nouveaux systèmes d'analyse du mouvement reposant sur des modèles, l'usage de la réalité virtuelle pour la compréhension de la performance motrice, la recherche des fondamentaux de la marche humaine à partir de simulations. Cette équipe est composée de 1 professeur, 1 habilitation à diriger des recherches, 4 maîtres de conférences et 1 ingénieur d'étude.
Physiologie et Biologie de l'Exercice
Cette équipe, dirigée par Arlette Delamarche explore l'axe "Sport, Santé, Nutrition selon une approche intégrative et fondamentale. Les travaux réalisés étudient les interactions de l'entraînement et de la nutrition sur la performance et la santé. D'un point de vue mécanistique, ils analysent les interactions de l'entraînement et des antioxydants exogènes sur l'homéostasie redox et le statut pro-antioxydant. D'un point de vue pratique, les résultats conduisent à des recommandations en matière d'activité

physique et de nutrition pour les populations actives ou sportives, pour les sujets âgés et pour les populations à risques ou pathologiques (maladies métaboliques, cardio-vasculaires...). Cette équipe est composée de 6 professeurs, 1 habilitation à diriger des recherches, 5 maîtres de conférences, 1 technicienne, et 1 ingénieur de recherche

Facteurs nerveux et structuration tissulaire

Cette équipe dirigée par Marie-Agnès Metgès, travaille sur le rôle des éléments nerveux dans la structuration des tissus musculaires et cutanés, ainsi que dans les altérations observées dans les pathologies neuromusculaires et dermatologiques. Ces axes de recherches sont axés sur les adaptations du muscle et de sa commande nerveuse à une modification des contraintes mécaniques d'utilisation (immobilisation, transfert tendineux).

Missions de direction

Ma mission de directeur adjoint est d'assister Paul Delamarche dans toutes ses fonctions :

– Représentation de la structure à l'extérieur
– Promotion et valorisation de la structure
– Coordination des programmes de recherche
– Coordination des équipes de recherche

Une de mes missions a été la mise en place d'une structure fédérative de recherche, "Sciences Sport Santé Société". Cette structure qui regroupe actuellement 6 laboratoires de recherches sur le grand ouest doit se développer et intégrer prochainement 4 autres laboratoires.

Responsable de la licence ergonomie de la performance sportive

Depuis 2008 je suis responsable de la licence STAPS, "ergonomie du sport et de la performance motrice". J'ai mis en place cette licence, pour répondre à un réel besoin du milieu industriel et offrir des nouvelles perspectives aux étudiants en STAPS. L'ouverture de cette licence a nécessité la création de nouvelles unités d'enseignement pour répondre aux exigences d'une licence générale (poursuite des études vers un master) mais aussi aux attentes du milieu professionnel, en lien avec les prérogatives du registre national de certification professionnelle. L'un des points majeurs dans la construction de ce diplôme a été la recherche de partenaires industriels pour la mise en stage des étudiants. Celle-ci a été favorisée dans le cadre du projet Martin Hirch

par une action intitulée : « les appreunariales, je pense donc j'agis ». L'objectif de cette action était de créer les conditions favorables d'une mise en alternance des étudiants entre l'entreprise et l'université. Les étudiants de L3 ont bénéficié de ce dispositif qui leur a permis une vraie insertion dans le milieu professionnel.

Autres fonctions administratives

Outre mes fonctions de directeur adjoint et de responsable de la licence ergonomie du sport et de la performance motrice je suis également impliqué dans les conseils suivants :
– Membre élu du conseil de l'UFRSTAPS depuis 2010.
– Membre nommé de plusieurs comité de sélection à Rennes et à Nantes.

Animation scientifique

Editeur invité pour le numéro spécial "Virtual reality and sports", dans la revue international "Presence : Teleoperators and virtual environments".

Evalutions d'articles scientifiques pour :
– Neuroscience letters
– Human movement science
– Presence : Teleoperators and virtual environments
– Journal of Sports Sciences
Organisation du symposium réalité virtuelle et sport au congrès de l'ACAPS en 2011

Projets scientifiques

Projet ADES
Le projet ADES avait comme objectif de développer un système d'évaluation des paramètres dynamiques lors de déplacements aquatiques en natation ou en nage avec palmes. Ce projet impliquait le laboratoire M2S et la Fédération Française d'Etude des Sports Sous Marins. Sa durée était d'un an (2003). Le montant de ce projet dont j'était le porteur était de 10K€ pour l'université Rennes 2. 50% du projet a été financé par le fédération et 50% par l'ANVAR.

Projet HERMES-Décathlon
Le projet HERMES avait comme objectif d'évaluer les caractéristiques hydrodynamiques de voilures de palmes. Ce projet à permis de developper un automate pouvant reproduire in situ la cinématique d'une cheville humaine lors d'un mouvement de palmage. Ce projet impliquait le laboratoire M2S et la société Décathlon France. Sa durée était de deux ans (2005-2006). Le montant de ce projet dont j'était le porteur était de 35K€ pour l'université Rennes 2.

Projet PHC Egide : Developing a virtual reality sports simulator to train perceptual skills in sport
Ce projet a été développé dans le cadre de partenariats Hubert Curien. L'objectif était d'initier une collaboration entre deux laboratoires Européens au travers d'échanges de chercheurs et d'étudiants.Les laboratoires impliqués étaient le laboratoire M2S de l'université Rennes 2 et la Queen's University de Belfast (UK). La durée de se projet était de 2 ans (2007-2008). Le montant de ce projet dont j'était le porteur était de 8K€.

Autres projets
En tant que membre de l'équipe M2S j'ai participé aux projets RIAM-Semocap (2004-2007) et RNTL-Perf RV2 (2006-2009). Le projet RIAM-Semocap portait sur le développement de systèmes economiques de capture de mouvement et le projet RNTL-Perf RV2 portait sur la conception de modules de reconnaissances de gestes. Le porteur des projets était Franck Multon.

Publications

Articles dans journaux internationaux indexés

1. Brault, S., Kulpa, R., Multon, F., Bideau, B. (2012) Analysis of deception in sports using immersive environments.IEEE Intelligent Systems (2012) (in press)
2. Brault, S., Bideau, B., Kulpa, R. Craig, C. (2012). Detecting deception in movement : The case of the side-step in rugby. PlosOne, Volume 7 ; Issue 6
3. Martin C., Bideau B , Nicolas G, Delamarche P, Kulpa R. How does the tennis serve technique influence the serve-and-volley ? (2012) Journal of Sports Sciences DOI :10.1080/02640414.2012.695079.
4. Martin C, Kulpa R, Bideau B. Professional tennis players' serve : correlation between segmental angular momentums and ball velocity. (2012) (in press). Sports Biomechanics
5. Watson, G, Brault, S, Kulpa, R, Bideau, B, Butterfield, J Craig C. (2011) Judging the 'Passability' of Dynamic Gaps in a Virtual Rugby Environment. Human Movement Science, 30, 5, 942-95
6. Brault, S., Bideau, B., Craig, C. Kulpa, R. (2010). Balancing Deceit and Disguise : How to successfully fool the defender in a 1 vs. 1 situation in rugby. Human Movement Science, 29(3), 412-425.
7. Bideau, B., Kulpa, R., Vignais, N., Brault, S., Multon, F. Craig, C.(2010). Virtual reality, a serious game for understanding behavior and training players in sport. IEEE Computer Graphics and Applications, vol. 99, 65-71
8. Nicolas, G., Bideau, B., Bideau, N., Colobert, B., Le Guerroue, G., Delamarche, P. A new system for analyzing swim fin propulsion based on human kinematic data. (2010) Journal of biomechanics. Vol 43, 1884–1889
9. Vignais, N., Kulpa, R., Craig, C., Brault, S., Multon, F. Bideau, B. Influence of the graphical levels of detail of a virtual thrower on the perception of the movement. (2010). Presence : Teleoper. Virtual Environ., vol 19(3), 243-252
10. Vignais, N., Bideau, B., Craig, C., Brault, S., Kulpa, R.,, Virtual thrower vs. real goalkeeper : influence of different visual conditions on performance. (2010) Presence : Teleoper. Virtual Environ., Presence, Vol. 19, (4), 281–290

11. Nicolas G. Bideau B. (2009). A kinematic and dynamic comparison of surface and underwater displacement in high level monofin swimming. Human Movement Science 28, 480-493
12. Cornu, C., Nordez, A., Bideau, B. (2009). Shoulder rotators electro-mechanical properties change with intensive volleyball practice : a pilot study. International Journal of Sports Medicine, 30, 857-862
13. Vignais, N., Bideau, B., Craig, C., Brault, S., Multon, F., Delamarche, P. Kulpa, R. (2009). Does the level of graphical detail of a virtual handball thrower influence a goalkeeper's motor response ? Journal of Sports Science Medicine, vol 8(4), pp. 501-508
14. Nicolas G., Bideau B., Colobert B., Berton E. (2007). How are Strouhal number, drag, and efficiency adjusted in high level underwater monofin swimming ? Human Movement Science 26, 426-442
15. Multon, F., Kulpa, R. Bideau, B. (2008) MKM : a global framework for animating humans in virtual reality applications. Presence : Teleoper. Virtual Environ., Vol. 17(1), pp. 17-28. 411-421
16. Bideau, B., Multon, F., Kulpa, R., Fradet, L., Arnaldi, B. Delamarche, P. (2004). Using virtual reality to analyze links between handball thrower kinematics and goalkeeper's reactions. Neuroscience letters, Vol. 372(1-2), pp. 119-122
17. Bideau, B., Kulpa, R., Ménardais, S., Fradet, L., Multon, F., Delamarche, P. Arnaldi, B. (2003) Real handball goalkeeper vs. virtual handball thrower. Presence : Teleoper. Virtual Environ., MIT Press, Vol. 12(4), pp. 411-421

Chapitre de livre avec comité de lecture international

1. Bideau, B., Kulpa, R. Brault (2012) Displacements in Virtual Reality applications for sports.Human Walking in Virtual Environments. Springer edition

Editeur invité dans journal international indexé

1. Bideau, B., Kulpa, R. Multon, F. (2011). Special Issue : Virtual Reality and Sports Guest Editors' Introduction. Presence : Teleoperators and Virtual Environments, 20(1)

Articles courts dans journaux internationaux indexés

1. Brault S., Kulpa R., Bideau B., and Craig C.(2008). 1 Vs. 1 : How do we anticipate the direction in which a player will run ? International Journal of Sport Psychology. special Issue EWEP p50
2. Bideau N., Mahiou B., Monier L., Bideau B., Nicolas G., Razafimahery F., Rakotomanana L. (2009). 2D dynamical efficiency of a swimfin : a fluid-structure interaction approach. Computer Methods in Biomechanics and Biomedical Engineering 12 (S1), 53-54.
3. Nicolas G., Bideau B., Colobert B., Le Guerroue G., Multon F., Baly L., Delamarche P. (2006). Dynamic evaluation of swim-fins. Journal of Biomechanics 39, Suppl. 1, page S458

Articles dans journaux internationaux et articles complets dans conférences informatiques

(Les articles complets publiés dans les conférences informatiques ont des taux d'acceptation qui varient entre 30 et 60%. Ces articles ont même valeur que les articles de revues dans la communauté Sciences et Techniques de l'information et de la Communication)

1. Vantorre, J., Seifert, l., Bideau, B., Nicolas, G., Fernandes, J., Vilas-Boas, J.P., Chollet, D. (2010). Infuence of Swimming Start Styles on Biomechanics and Angular Momentum. In Kjendlie P.L., Stallman R.K., Cabri J. (Eds), Biomechanics and Medicine in Swimming XI, 180-182.
2. Bideau, N., Razafimahery, F., Monier, L., Mahiou, B., Nicolas, G., Bideau, B., Rakotomanana, L.. (2010). 3D computational fluid-structure interaction model for the estimation of propulsive forces of a deformable monofin. In Kjendlie P.L., Stallman R.K., Cabri J. (Eds), Biomechanics and Medicine in Swimming XI, 52-54.
3. Vignais, N., Bideau, B., Craig, C., Brault, S., Multon, F. Kulpa, R. Virtual Environments for Sport Analysis : Perception-Action Coupling in Handball Goalkeeping. International Journal of Virtual Reality, International Journal of Virtual Reality, 2009 , pp. 43-48
4. Brault S., Bideau B., Kulpa R., Craig C. (2009) : Detecting deceptive movement in 1 vs. 1 based on the global body displacement of a rugby player. International Journal of Virtual Reality, vol. 8(4), pp. 31-36
5. Vignais, N., Bideau, B., Kulpa, R., Craig, C., Brault, S. Multon, F. Handball

goalkeeping and the analysis of the perception-action coupling in virtual environment. Virtual Reality and Graphical Interaction, Rennes, France, 2009

6. Bideau, B., Multon, F., Kulpa, R., Fradet, L. Arnaldi, B. Virtual reality applied to sports : do handball goalkeepers react realistically to simulated synthetic opponents ? VRCAI '04 : Proceedings of the 2004 ACM SIGGRAPH international conference on Virtual Reality continuum and its applications in industry ACM, 2004, pp. 210-216
7. Bideau B., Colobert B., Nicolas G., Le Guerroué G., Multon F., Delamarche P. (2003). Development of an Active Drag Evaluation System (A.D.E.S.), In Chatard J.C. (Eds.) "Biomechanics and Medecine in Swimming IX", p.51-56.
8. Bideau B., Colobert B., Nicolas G., Fusco N., Cretual A., Multon F., Delamarche P. (2003). How to compute the mechanical parameters of monofins ? In Chatard J.C. (Eds.) "Biomechanics and Medecine in Swimming IX", p.505-511

Conférences internationales

1. Bideau, B. Vignais N. Kulpa R. Craig C. and Delamarche P. (2012) Does the Kinematic of the Throwing Action in Handball Influence Goalkeeper's Judgement ?. Proceeding of EHF. Vienne.
2. Delamarche, P. and Bideau, B.(2012) Relevance of Biological and Biomechanical Analysis in Handball Performance. Proceeding of EHF. Vienne.
3. Bideau B, Nicolas G, Sanders RH, Kulpa R (2010). A New Method to Evaluate Cross-Sectional Area Based on Computer Animation of Swimming. In Kjendlie P.L., Stallman R.K., Cabri J. (Eds), Biomechanics and Medicine in Swimming XI, O-053, p.65.
4. Nicolas, G., Bideau, B., Kulpa, R., Rué, O., Billien, M., Vignais, N. Delamarche, P. Biomechanical evaluation for the identification of free kick determinants in soccer. Proceedings of European Workshop On Movement Science (EWOMS), Lisbon, Portugal, 2009.
5. Bideau, B., Kulpa, R., Vignais, N., Brault, S. Craig, C. Virtual Reality to investigate sport performance. Proceedings of European Workshop On Movement Science (EWOMS), Lisbon, Portugal, 2009.
6. Kulpa, R., Bideau, B. Craig, C. MKM : An Animation Engine For Sport Performance Analysis In Virtual Reality. Proceedings of European Workshop On Movement Science, 2009
7. Vignais, N., Badier, E., Marin, A. Bideau, A. In situ evaluation of the cushioning characteristics of different sport shoe midsoles. Proceedings of Computer Methods in Biomechanics and Biomedical Engineering (CMBBE), Valencia, Spain, 2010.

8. Fradet L., Kulpa R., Bideau B., Multon F., Delamarche P., (2003) Kinematic simulation of handball throwing. European simulation multiconference. Nottingham 9-11 june 2003 pp 323-328.

Troisième partie

Dulpicata des principaux articles internatinaux indexés publiés