

N° d'ordre :

Thèse de doctorat

Sous le sceau de

l'Université Européenne de Bretagne

pour obtenir le grade de

Docteur de l'Université Rennes 2
Discipline STAPS

par

Nicolas Vignais

Equipe d'accueil : Laboratoire Mouvement Sport Santé - EA 1274
Ecole Doctorale : Vie Agro Santé (co-accréditée avec l'Université Rennes 1)

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

soutenue le 3 Décembre 2009 devant la commission d'examen

Stéphane	Vieilledent	Rapporteur	Université de Bretagne Occidentale, Brest
Daniel	Mestre	Rapporteur	Institut des Sciences du Mouvement, Marseille
Cathy	Craig	Examinatrice	Queen's University, Belfast
Stéphane	Donikian	Examineur	INRIA, Rennes
Benoit	Bideau	Co-directeur	M2S, Rennes
Paul	Delamarche	Co-directeur	M2S, Rennes

"Au royaume des fissures, les fêlés sont rois."

Raoul Chatigré

Remerciements

Ce n'est pas une tâche facile que de remercier toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation d'une thèse et je m'excuse par avance si j'oublie quelqu'un dans ces paragraphes. Une thèse n'ayant pas vraiment d'intérêt si personne ne la parcourt, je commencerai donc par remercier chaque personne qui entreprend la lecture de ce manuscrit.

Je tiens tout d'abord à remercier Cathy Craig qui m'a fait l'honneur de présider mon jury de thèse et qui m'a également aidé dans certains moments difficiles de cette thèse, et promis, je ferai en sorte que mes prochains mails en anglais ne comportent que peu de fautes (et aucune traduction alambiquée). Je remercie ensuite Stéphane Vieilledent et Daniel Mestre pour avoir accepté de rapporter ce travail de thèse et pour leurs commentaires qui ont permis d'améliorer la qualité du manuscrit et de la présentation. Je remercie également Stéphane Donikian d'avoir fait parti de ce jury (malgré un emploi du temps très serré !) et aussi pour l'accueil chaleureux que j'ai pu recevoir au sein de l'équipe Bunraku (merci d'ailleurs à tout ceux que j'ai pu croiser là-bas durant ces années). Il est évident que sans une telle disponibilité des locaux de l'IRISA, cette thèse n'aurait pu voir le jour, alors un grand merci.

Je tiens à remercier Paul Delamarche pour avoir co-encadré ce travail de thèse. Vous avez su m'inculquer le goût pour la recherche et je vous en suis extrêmement reconnaissant. Je vous remercie également pour m'avoir accueilli au sein du laboratoire M2S de façon plus que cordiale. Malgré votre emploi du temps "ministériel", vous avez fait preuve de grandes qualités humaines en vous montrant toujours présent dans les moments importants.

Je remercie Benoit Bideau pour la qualité de son encadrement. Je sais qu'être ton premier étudiant de thèse n'a pas forcément été de tout repos (je suis persuadé que tu as été plus stressé que moi durant la soutenance !) mais pour ma part, ça me convenait parfaitement. Tu as été très disponible dans les moments cruciaux (manips, rédaction...) et tu as su me laisser beaucoup d'autonomie quand il le fallait. Au cours de ces années, j'ai été à la fois ton étudiant, parfois nous avons été collègues et pour finir je dirai que je te considère comme un ami. Merci à ta petite famille vraiment géniale qui a également été là pour moi (rappelle-toi quand tu me ramenait en stop dans le Morbihan lorsque j'étais en M2 !) et comme on dit en breton "Goude mà vezer skuizh ec'h aer c'hoazh pell" !

Pour remercier les personnes et collègues qui m'entourent au quotidien (ainsi que ceux qui sont partis), j'ai choisi un mode virtuel (tiens, c'est bizarre !), alors c'est parti pour la visite du laboratoire M2S : merci au bureau de bioméca pour sa disponibilité et ses conseils qui permettent au travail d'un doctorant d'avancer (les discussions cinématographiques aussi ! Concernant Portal, c'est un peu moins le cas...). Merci à la pause café pour cette ambiance de franche rigolade qui m'a souvent permis d'être plus efficace une fois revenu dans mon bureau. Je n'oublie pas non plus les "private jokes" du vendredi après-midi où il y avait parfois plus de larmes (de rire) que de café... Merci au blockhaus d'être aussi éclairé et aussi serviable dès que l'on y débarque. Merci au secrétariat de m'avoir toujours permis de régler les problèmes de logistique dans une ambiance conviviale. Merci au cagibi (en anglais KGB) d'avoir été pour moi une véritable fenêtre sur la recherche, je ne suis pas prêt d'oublier ces années passées en sous-marin à deviner qui se cachait derrière nous. Merci à la salle de réunion, tantôt bureau collectif, tantôt salle pour la réunion du jeudi. Cette salle reflète parfaitement le dynamisme et l'ambiance qui règne au sein du M2S. Enfin, merci à l'aquarium où je me suis senti comme un poisson dans l'eau aux côtés des so(re)les, des museaux de tanches et autres brault-chets. Nageant fièrement dans le sillage du capitaine Duliscouët et de ses (poussin) marins, nos pêches ne furent jamais aussi mémorables qu'au large du port de Sainte-(Anne)Hélène...

Je tiens à remercier tout particulièrement Julien Bilavarn pour l'ensemble de sa contribution

à ce travail de thèse. Non, ne soit pas modeste, tu m'as beaucoup aidé pendant toutes ces périodes de manips à l'IRISA (on peut le dire maintenant non ?), et au même titre qu'un Bideau a eu son Kulpa, moi j'aurai eu mon Bilavarn... Je n'oublierai pas nos débuts en salle Avalon et ces nombreuses journées obscures à bronzer sous les lumières des caméras Vicon... Un grand merci à toi. J'en profite pour remercier également les étudiants de master avec qui j'ai eu la chance de travailler au cours de ces années en salle de Réalité Virtuelle.

Je remercie tous mes amis qui, même s'ils ne comprenaient pas toujours ce que je faisais, m'ont apporté leur soutien et leur affection lors de nos soirées pluvieuses (pour ne pas dire arrosées). Merci à vous tous, que vous soyez encore présents ou bien déjà partis.

Merci à mes parents qui m'ont toujours, mais vraiment toujours, soutenu. Sans vous, je ne sais pas comment j'aurai pu traverser toutes ces années "galères". Vous avez toujours cru en moi et m'avez fait confiance. En bref, vous m'avez appris que lorsqu'on a un but, il suffit de se donner les moyens pour y arriver. Merci, je vous aime fort tous les deux. Merci à mes frangins d'avoir été là quand j'ai eu besoin d'eux, je n'ai plus qu'un seul souhait pour nous trois : qu'on joue bientôt dans la même équipe (même si ça doit signifier que vous redescendiez en B !). Merci également à ma belle famille chez qui j'ai pu trouver une écoute et une ambiance propres aux Fruchart : surtout ne changez rien !

L'expression "le meilleur pour la fin" n'a jamais été aussi vraie... Merci mon amour d'avoir toujours été là, de m'avoir écouté (même pour les répôts en anglais !), d'avoir cru en moi et de faire de moi ce que je suis aujourd'hui. Personne d'autre que la femme d'un doctorant ne peut réellement savoir par quelles étapes (de montagne !) on est passé. Les mots les plus simples sont souvent les plus justes : je t'aime. Et un grand merci pour le magnifique cadeau que tu m'as offert (et pour tous ceux qui suivront, mais non ça fait pas mal...). Mon cher Elliott, je crois que ça te fera bien sourire quand tu liras ces mots car sache que tu as contribué toi aussi, à ta manière, à la réussite de ce travail. Je n'aurai pas pu imaginer une meilleure façon de me réveiller (et ainsi de rédiger !) pendant l'été dernier qu'en allant te chercher dans ta chambre tous les matins... Merci fiston !

Table des matières

Introduction	1
1 Revue de la littérature	3
1.1 La prise d'informations visuelles	3
1.1.1 Le système visuel	4
1.1.2 La tâche d'interception	5
1.1.3 Les méthodes d'investigation de la prise d'informations visuelles	6
1.1.3.1 Les questionnaires, une mesure subjective	6
1.1.3.2 L'utilisation de la vidéo	7
1.1.3.3 L'étude du suivi du regard ou oculométrie	10
1.1.3.4 La représentation du mouvement	13
1.1.3.5 L'analyse cinématique	14
1.1.3.6 L'occultation visuelle	15
1.1.4 Conclusion générale et méthodologique	15
1.2 Les environnements virtuels	16
1.2.1 Définitions	16
1.2.1.1 Définition technologique	17
1.2.1.2 Définition conceptuelle	18
1.2.2 Notion de Présence	19
1.2.3 Les facteurs de la présence	21
1.2.3.1 Les facteurs externes	21
1.2.3.2 Les facteurs internes	22
1.2.4 Les méthodes d'évaluation de la présence	22
1.2.4.1 Les mesures subjectives du niveau de présence	23
1.2.4.2 Les mesures objectives du niveau de présence	23
1.2.5 La présence et la performance	24
1.3 L'utilisation de la réalité virtuelle dans le sport	25
1.3.1 La réalité virtuelle et la tâche d'interception	25

1.3.2	La tâche d'interception et la notion de présence	26
1.4	L'animation du mouvement	28
1.4.1	La représentation des humanoïdes de synthèse	28
1.4.2	La représentation du mouvement	30
1.4.3	La production du mouvement	31
1.4.4	Le processus d'animation	33
	Synthèse et objectifs	35
2	Analyse comparative de la vidéo et des environnements virtuels	37
2.1	Objectifs	38
2.2	Capture de mouvement, vidéo et animation des tirs en environnement virtuel .	39
2.2.1	Capture de mouvement et acquisition vidéo des actions de tir	39
2.2.2	Animation du tir et projection vidéo	42
2.3	Protocole expérimental en environnement virtuel	44
2.3.1	La tâche en jugement	45
2.3.2	La tâche en mouvement	46
2.3.2.1	Détection de collision	46
2.3.3	Analyse de la tâche en jugement	47
2.3.4	Analyse de la tâche en mouvement	48
2.3.5	Tests statistiques	49
2.4	Résultats	50
2.4.1	Résultats de la tâche en jugement	50
2.4.1.1	Pourcentage de zones correctes	50
2.4.1.2	Pourcentage de réussite	51
2.4.1.3	Erreur radiale de jugement	51
2.4.2	Résultats de la tâche en mouvement	52
2.4.2.1	Temps de Réponse Motrice	52
2.4.2.2	Pourcentage de réussite	53
2.4.2.3	Erreur radiale en mouvement	54
2.5	Discussion	55
2.5.1	L'avantage des environnements virtuels sur la vidéo : éléments de réponse	55
2.5.2	L'affichage vidéo et la perception de la hauteur	57
2.6	Conclusion	58
3	La représentation graphique du mouvement en environnement virtuel	59
3.1	Objectifs	60
3.2	De la capture de mouvement à l'animation des actions de tir en environnement virtuel	61

3.2.1	Capture de mouvement	61
3.2.2	Animation des actions de tir	62
3.3	Protocole expérimental en environnement virtuel	63
3.3.1	La tâche en jugement	64
3.3.2	La tâche en mouvement	65
3.3.3	Analyse de la tâche en jugement	65
3.3.4	Analyse de la tâche en mouvement	65
3.3.5	Tests statistiques	68
3.4	Résultats	69
3.4.1	Résultats de la tâche en jugement	69
3.4.1.1	Pourcentage de zones correctes	69
3.4.1.2	Pourcentage de réussite	70
3.4.1.3	Erreur radiale de jugement	70
3.4.2	Résultats de la tâche en mouvement	71
3.4.2.1	Temps de Réponse Motrice	71
3.4.2.2	Pourcentage de réussite	72
3.4.2.3	Erreur radiale en mouvement	73
3.4.2.4	Indice cinématique de la réponse motrice	74
3.5	Discussion	75
3.5.1	L'influence du niveau de détail graphique	75
3.5.2	L'importance de la taille du ballon	77
3.5.3	L'influence de la zone visée	78
3.6	Conclusion	81
4	Analyse de la prise d'informations visuelles en environnement virtuel	83
4.1	Objectifs	84
4.2	De la capture de mouvement à l'animation des actions de tir en environnement virtuel	85
4.3	Protocole expérimental en environnement virtuel	85
4.3.1	La tâche en jugement	87
4.3.2	La tâche en mouvement	88
4.3.3	Analyse de la tâche en jugement	88
4.3.4	Analyse de la tâche en mouvement	88
4.3.5	Analyse cinématique et tests statistiques	89
4.4	Résultats	90
4.4.1	Résultats de la tâche en jugement	90
4.4.1.1	Pourcentage de zones correctes	90
4.4.1.2	Pourcentage de réussite	91

4.4.1.3	Erreur radiale de jugement	92
4.4.2	Résultats de la tâche en mouvement	93
4.4.2.1	Temps de Réponse Motrice	93
4.4.2.2	Pourcentage de réussite	93
4.4.2.3	Erreur radiale en mouvement	94
4.5	Discussion	96
4.5.1	L'influence du mouvement de tir	97
4.5.2	Mouvements du tireur et zone visée	99
4.6	Conclusion	102
5	Discussion générale	105
5.1	Les environnements virtuels : avantages et limites pour l'analyse d'une situation sportive	106
5.1.1	Les avantages des environnements virtuels pour l'analyse d'une situation sportive	106
5.1.2	Les limites de l'immersion en environnement virtuel	106
5.1.3	Conclusion	107
5.2	Contributions pour la compréhension de la prise d'informations visuelles	109
5.2.1	La cinématique du mouvement de tir	109
5.2.2	La régulation du mouvement d'interception	110
5.2.3	Tâche de jugement et tâche en mouvement	111
	Conclusion et perspectives	113
	Apport au domaine	117
	Bibliographie	120
	Liste des figures	136
	Liste des tableaux	141
	Annexes	143
	Publications liées à la thèse	147

Introduction

"Le virtuel est ce qui nous aide à faire advenir ce que nous ne sommes pas encore."

Philippe Quéau

La perception est un phénomène psycho-physiologique qui permet à tout être vivant d'être en interaction avec son environnement. Ceci est rendu possible par l'intermédiaire des différentes fonctions sensorielles : le toucher, l'olfaction, la gustation, l'audition et la vision. En ce qui concerne cette dernière fonction, que ce soit dans la vie de tous les jours ou dans les activités physiques et sportives, la vision joue un rôle primordial pour interagir avec les éléments qui nous entourent.

La perception visuelle permet à un protagoniste sportif de sélectionner des informations dans l'action adverse afin d'anticiper son action et d'y répondre de la manière la plus adaptée possible. Cette prise d'informations visuelles se doit d'être d'autant plus efficace que la pression temporelle est élevée. C'est notamment le cas lors du duel gardien/tireur au handball : le gardien de but ne dispose que de très peu de temps pour effectuer sa parade, il est donc contraint d'anticiper le devenir de l'action adverse en prélevant des indices visuels pertinents.

La prise d'informations visuelles apparaît alors comme un déterminant de la performance lors des duels sportifs [Williams1999a]. Une analyse approfondie de celle-ci constitue un élément essentiel pour l'entraînement sportif. C'est pourquoi de nombreuses méthodes ont été utilisées pour la caractériser : questionnaires, occultation temporelles, stratégies visuelles... Cependant plusieurs critiques méthodologiques peuvent limiter leur utilisation. La réalité virtuelle apparaît alors comme une alternative intéressante pour dépasser ces limites et analyser la prise d'informations visuelles.

L'objectif de ce travail de thèse est d'évaluer et de mettre en œuvre une nouvelle méthodologie d'analyse de la prise d'informations visuelles fondée sur l'utilisation des environnements virtuels. En effet, grâce à la standardisation des situations sportives, à l'affichage stéréoscopique des animations en trois dimensions ou à l'adaptation du point de vue de l'athlète immergé, la réalité

virtuelle apparaît comme une méthode innovante et pertinente. Son intérêt pour l'analyse de la performance sportive a par ailleurs déjà été démontré [Bideau2004, Craig2006, Bideau2009].

L'état de l'art de ce mémoire s'articule de la manière suivante : il définit dans un premier temps la notion de prise d'informations visuelles. Puis les différentes méthodes permettant l'analyse de celle-ci au cours d'une tâche d'interception sont abordées. Nous démontrons enfin l'intérêt de la mise en place des environnements virtuels dans ce domaine. La partie expérimentale de ce travail se décline en trois étapes. Une première étude (chapitre 2) s'attache tout d'abord à évaluer l'efficacité de la méthode fondée sur l'utilisation des environnements virtuels, en la comparant avec la technique de l'affichage vidéo, l'une des méthodes les plus employées dans la littérature. Dans une seconde étude (chapitre 3), nous étudions l'influence du niveau de détail et de la représentation graphique du mouvement en environnement virtuel. Une fois la méthodologie d'analyse de la prise d'informations visuelles mise en place, nous l'appliquons au cours d'une troisième étude dans le but d'estimer l'importance relative des différentes informations visuelles disponibles pour le gardien de but de handball (chapitre 4). Enfin, l'ensemble des résultats des trois études sera discuté dans le dernier chapitre (chapitre 5) afin de statuer sur l'utilisation des environnements virtuels pour l'analyse de la prise d'informations visuelles des gardiens de but de handball.

Chapitre 1

Revue de la littérature

1.1 La prise d'informations visuelles

La perception correspond à l'ensemble des mécanismes de traitement des informations sensorielles extéroceptives et proprioceptives qui permet à un organisme vivant d'acquérir des connaissances sur son environnement et sur son activité propre [Bonnet2005]. Parmi les différents types de perception, la perception visuelle constitue le canal sensoriel privilégié pour explorer notre environnement et anticiper l'action à venir [Prévost2002]. Elle possède donc un intérêt très fort dans le domaine des activités physiques et sportives. Plus particulièrement, la prise d'informations visuelles (PIV) constitue une étape d'extraction et de sélection des informations, essentielle dans le processus de perception visuelle.

Dans certains sports comme le tennis, le rugby, le football ou le handball, les acteurs sportifs sont en interaction permanente. La performance d'un athlète réside alors dans sa capacité à anticiper les mouvements adverses [Williams1999a]. Pour cela, l'athlète doit extraire et sélectionner dans la situation sportive les informations visuelles pertinentes pour sa future action [Abernethy1988]. Par exemple, lorsqu'on est face à un service au tennis, l'information disponible avant l'impact entre la balle et la raquette est déterminante pour l'identification du point de chute de la balle [Keller1985, Goulet1992]. D'une manière similaire, au karaté, les combattants prennent d'abord des informations sur la tête et l'orientation du buste de l'adversaire pour anticiper l'action adverse [Williams1999b]. En ce qui concerne le gardien de but de handball, celui-ci semble prioritairement s'intéresser à la zone du bras porteur de balle lors de la préparation de son mouvement [Deridder1985].

La façon dont les athlètes prennent l'information visuelle lors d'un duel sportif apparaît donc comme un élément fondamental. Cette PIV s'effectue par l'intermédiaire du système visuel. C'est la raison pour laquelle nous décrirons dans un premier temps, le fonctionnement de ce dernier. Dans un second temps, nous montrerons en quoi la perception visuelle est particulièrement importante lors d'une tâche d'interception en situation sportive. Enfin, nous aborderons les différentes méthodes d'investigation de la PIV développées dans la littérature.

1.1.1 Le système visuel

Le système visuel correspond à l'ensemble des organes participant au processus de perception visuelle. Son rôle est de percevoir et d'interpréter une image en deux dimensions (2D) en une image en trois dimensions (3D). Il est principalement composé de l'œil, du nerf optique et du cortex visuel.

L'œil est l'un des organes les plus développés chez l'être humain. Il combine plusieurs qualités de détection tels que la brillance, la couleur, la taille, la forme, la profondeur ou encore le mouvement. Ces capacités proviennent de l'organisation même du système visuel qui permet de capter la lumière et de la transformer en une scène visuelle ayant du sens pour l'individu.

L'œil est composé de deux parties : une partie blanche et une partie teintée. Dans cette dernière, on retrouve un petit cercle noir, la pupille et une plage colorée, l'iris. Ils sont tous les deux recouverts d'une couche transparente formée par la cornée et l'humeur aqueuse (composée essentiellement d'eau). Derrière ces éléments, le cristallin, le vitré, la rétine et le nerf optique apparaissent successivement (figure 1.1).

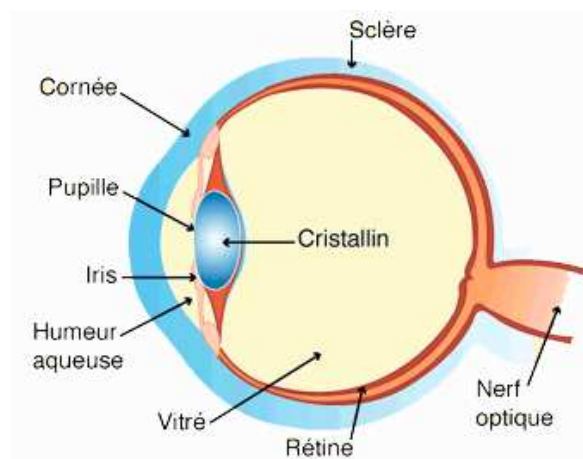


Fig. 1.1 - Description des différents éléments composant le système visuel.

Avant d'être transmise au cerveau par l'intermédiaire du nerf optique, l'image du monde extérieur doit tout d'abord apparaître parfaitement nette au niveau de la rétine. Pour cela l'œil dispose de plusieurs outils, comparables à ceux d'une caméra vidéo. L'élément responsable de l'éclairage est la cornée. Elle agit comme une fenêtre par laquelle la lumière extérieure pénètre dans l'œil. Elle assure ainsi le passage de la lumière sur la rétine. Le clignement régulier des paupières et les sécrétions lacrymales maintiennent la surface de la cornée parfaitement propre. Le rôle de diaphragme de l'œil est rempli par la pupille. Il s'agit d'une structure constituée de l'espace libre au centre de l'iris. Les muscles composant ce dernier permettent de modifier le diamètre de la pupille et donc de réguler la quantité de lumière qui rentre dans l'œil. Le cristallin, quant à lui, assure le rôle de focale. Il permet les ajustements nécessaires à la focalisation des objets à toutes les distances. Cette focalisation s'effectue par un changement de courbure du cristallin. Ce dernier se bombe pour focaliser les objets proches et s'aplatit (position de repos) pour rendre net les objets situés au loin. La lumière est ensuite transformée en signal électrique au niveau de la rétine qui agit comme un film photographique. La rétine est en effet composée de cellules nerveuses photoréceptrices : les cônes et les bâtonnets. Leur rôle est capital car ils permettent de percevoir les lumières, les couleurs, les formes ainsi que les mouvements. Ce sont les cellules nerveuses situées sur la couche de neurones la plus externe de la rétine

qui transforment l'énergie lumineuse en énergie électrique. Enfin, le nerf optique transmet la stimulation au cortex visuel qui reconstruit cette stimulation sous forme d'image. Cette image est dépendante du mécanisme d'attention visuelle. En effet, l'attention se définit comme un processus sélectif qui permet l'arrivée au niveau du cortex cognitif, ou le choix par ce cortex, d'un message privilégié parmi les innombrables et permanentes informations et stimulations qui parviennent aux organes des sens depuis l'environnement. Dans le cadre de la vision, il se pose la question de savoir si l'image reconstruite dans le cortex visuel a été filtrée dès son arrivée (filtrage précoce), ou si cette image n'apparaît qu'après que le cortex a analysé le contenu et la signification des diverses informations (filtrage tardif). Bien qu'il n'existe aucune conclusion définitive concernant le filtrage en matière de vision, l'image reconstruite au niveau du cortex visuel va ensuite permettre au cerveau de planifier le mouvement à effectuer.

1.1.2 La tâche d'interception

Le système visuel permet donc de percevoir les informations visuelles situées dans l'environnement. Lors des activités physiques et sportives, le système visuel a la capacité de percevoir les mouvements à l'origine d'une action sportive. Plus ces mouvements vont être perçus et interprétés rapidement, plus l'acteur sportif va être performant [Williams1999a]. La pression temporelle d'un duel sportif oblige donc les athlètes à sélectionner rapidement les indices visuels essentiels pour leur future action. C'est notamment le cas lors d'un duel entre un gardien et un tireur au handball, qui se définit comme une tâche d'interception du point de vue du gardien de but.

Les tâches d'interception se définissent comme des activités qui impliquent un mouvement entre un acteur et un objet, une surface, une cible, un outil ou un projectile [Davids2002]. Il s'agit donc avant tout d'une tâche d'anticipation/coïncidence [Belisle1963]. Le principe fondamental de ce type d'activités réside dans le fait que l'acteur (ou son prolongement) doit être au bon endroit au bon moment [Savelsbergh1994]. Le but de l'action d'interception est donc de déterminer les caractéristiques spatio-temporelles de la trajectoire d'un objet, via le système visuel, de façon à produire une réponse motrice permettant d'entrer en contact avec celui-ci [Laurent1996]. De ce fait, la PIV est une étape essentielle pour mener à bien une tâche d'interception. Si l'on prend l'exemple du gardien de but de handball lors d'un duel, celui-ci fait face à une action de tir adverse. Il perçoit donc tout d'abord les informations visuelles provenant de cette action de tir. Puis ces informations vont être extraites et sélectionnées pour permettre au gardien de but de prendre la décision la plus adaptée à la situation. Cette prise de décision est liée à la production de signaux de contrôle permettant au gardien de but de savoir si son action à venir (interception) doit être modifiée (figure 1.2).

On comprend alors pourquoi la PIV est un élément déterminant de la performance des sportifs au cours d'une tâche d'interception¹. Plusieurs méthodes ont été développées dans la littérature pour permettre l'analyse et la compréhension de cette PIV.

¹Le lecteur est renvoyé à la revue de Davids et al. sur la notion d'interception en sport [Davids2002].

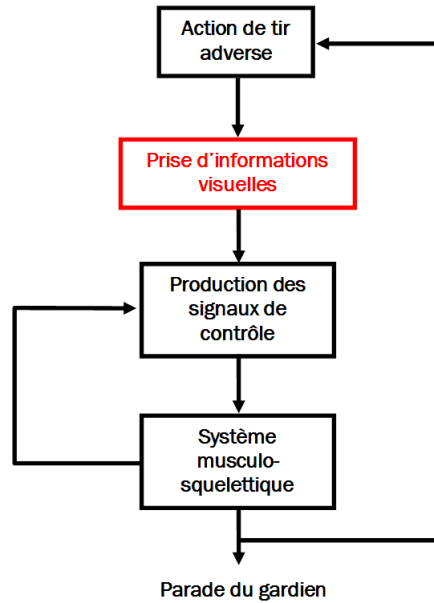


Fig. 1.2 - Processus fonctionnels mis en place lors de la tâche d'interception du gardien de but de handball. Les flèches indiquent la direction des informations (adaptée de [Tresilian1994]).

1.1.3 Les méthodes d'investigation de la prise d'informations visuelles

Historiquement, c'est la méthode d'investigation psychophysique qui s'est d'abord intéressée à la perception visuelle lors d'une tâche d'interception. Issue du courant de pensée cognitif, la psychophysique quantifie les relations existant entre une stimulation et la perception de cette stimulation. Les études psychophysiques ont principalement été menées en laboratoire, et elles reposent par exemple sur l'utilisation de la vidéo [Williams1999a]. A partir des années 1990, il s'est avéré de plus en plus nécessaire de respecter le lien fonctionnel et naturel entre la perception et l'action défini par l'approche écologique [Gibson1979]. De nombreux chercheurs ont alors procédé à une validation sur le terrain des situations expérimentales [Abernethy1993, Crognier2007].

1.1.3.1 Les questionnaires, une mesure subjective

L'une des premières méthodes utilisées pour analyser la PIV d'un protagoniste sportif consiste à interroger cet acteur pour qu'il livre ses impressions sur son action et sa prise d'informations (cette méthode est également appelée "rapport verbal" par Crognier et Féry [Crognier2007]). L'utilisation de questionnaires permet aux sportifs de formaliser et de retranscrire ces impressions. Cette méthodologie se fonde sur le ressenti du sujet après l'expérimentation, sans qu'aucune pression temporelle ne soit alors présente.

Cette méthodologie a déjà été utilisée par le passé pour comprendre le comportement du gardien de but de handball [Debanne2003]. L'auteur a mené une série d'entretiens sur quatre gardiens de but experts évoluant en première division nationale. Le but était de déterminer les indices visuels pris en compte par le gardien de but au cours d'une action de tir pour tenter d'établir les différents critères d'action de ce gardien. Il en est ressorti que le bras porteur de balle ainsi que les segments liés à cette chaîne cinématique influencent le gardien. Cependant

l'importance relative de chacun des éléments n'a pu être établie. D'une manière générale, cette technique, fondée sur des mesures subjectives de la perception, ne permet pas de caractériser objectivement la PIV du sujet. En effet, les indications verbales sur le mouvement ne constituent qu'une partie de la connaissance de ce mouvement [Féry2001a].

1.1.3.2 L'utilisation de la vidéo

Les méthodologies fondées sur la vidéo consistent à montrer au sujet un extrait d'une séquence filmée sur laquelle un (ou plusieurs) joueur adverse est en train de réaliser des séquences de jeu [Crognier2007]. Pour réaliser le film, les chercheurs disposent une caméra vidéo à la place du sujet lors d'une situation réelle de jeu. Par exemple, pour l'étude de la PIV 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 PIV 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. Bien qu'il ne soit pas toujours respecté lors de la réalisation, le positionnement de la caméra est un élément fondamental pour obtenir une séquence vidéo réaliste.

Une fois la vidéo acquise, elle est projetée sur un écran et les sujets ont alors pour consigne de prédire le résultat final de l'action visualisée. Il existe différentes techniques d'investigation : la réaction temporelle et l'occultation temporelle.

La technique de la réaction temporelle est fondée sur le délai mis par un observateur pour répondre correctement à une tâche. Autrement dit, avec cette technique, le sujet contrôle le temps de visualisation de la vidéo. 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 [Abernethy1984, Williams1994, Williams1998a]. Néanmoins cette technique ne permet pas de connaître précisément l'instant et la localisation de la PIV.

Pour pallier cette limite, les chercheurs ont utilisé la méthodologie de l'occultation temporelle. Dans cette méthodologie, la vidéo est coupée à différents instants clés afin d'obtenir plusieurs séquences comportant chacune différentes informations visuelles (mouvement de tir, trajectoire de la balle...) [Salmela1979, Jones1978, Abernethy1987]. Cette méthodologie est fondée sur le fait qu'il existe un lien entre les capacités perceptives et la performance des athlètes [Williams1992]. Expliquer l'anticipation des sportifs par leur capacité à utiliser des indices visuels plus ou moins tôt dans l'action pourrait permettre de détecter ceux qui seront performants sur le terrain. 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 [Salmela1979, Allard1980], indications écrites [Buckolz1988, McMorris1993, Williams1993, McMorris1996, Müller2006b], pression d'un bouton [Tyldesley1982, Franks1997, Féry2001b]. 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 [Savelsbergh2002, Savelsbergh2005] (figure 1.3).

L'avantage de l'occultation temporelle est donc de pouvoir étudier les processus perceptifs à certains instants clés d'une séquence motrice (figure 1.4). Il est ainsi possible de déterminer précisément à partir de quel instant le sujet visionnant le film prédit efficacement le résultat de

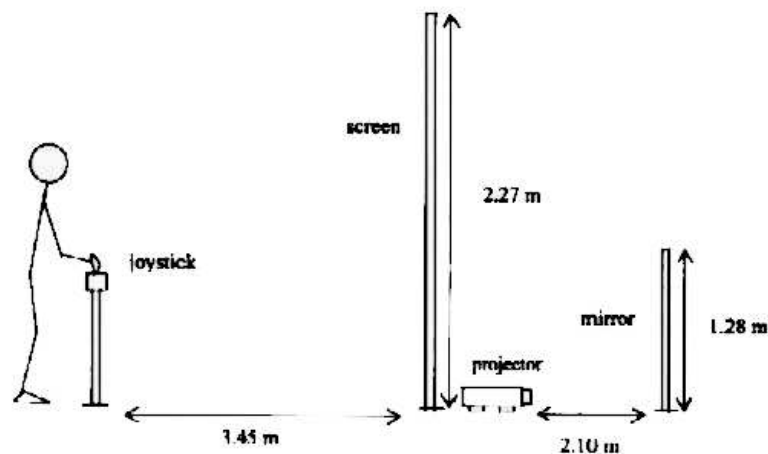


Fig. 1.3 - Protocole expérimental utilisant un joystick pour répondre à une occultation temporelle. D'après [Savelsbergh2002]

l'action. Les informations visuelles présentes à ce moment clé de l'action sont alors considérées comme pertinentes pour le sujet.

La technique de l'occultation temporelle a été utilisée dans de nombreuses disciplines sportives pour caractériser les différences de niveau d'expertise dans l'utilisation des informations visuelles issues des vidéos [Abernethy1987, Abernethy1990b, Abernethy1990a, Mori2002, Shim2005, Müller2006b]. En effet, il semble qu'en utilisant cette technique, des différences apparaissent dans les capacités d'anticipation et donc de PIV entre un joueur expert et un joueur non-expert. C'est le cas au tennis où il a été démontré que, contrairement à des joueurs novices, les joueurs experts sont capables d'utiliser les informations visuelles disponibles avant le contact entre la balle et la raquette pour anticiper leur action [Jones1978, Goulet1989, Tenenbaum1996]. Cette tendance est d'autant plus prononcée que la séquence filmée est coupée tôt dans l'action [Williams1993, McMorris1993, McMorris1996, Singer1996].

Le même constat a pu être effectué pour des gardiens de but de football [Williams1993] et des gardiens de but de hockey [Salmela1979]. Chamberlin et Coelho expliquent cette différence par le fait que les novices manquent de confiance en eux, ils ont alors besoin d'obtenir plus d'informations et donc d'attendre plus longtemps, avant de prendre une décision [Chamberlain1993].

Au cricket, Müller et ses collègues ont entrepris de caractériser tous les paramètres d'anticipation lors d'un mouvement de batte [Müller2006b]. Pour cela, ils ont conduit une série d'expérimentations où des joueurs de cricket experts, intermédiaires et novices devaient prédire le type et la longueur d'un lancer issu d'une séquence vidéo. Il résulte de ce travail que, contrairement aux joueurs novices, les joueurs experts sont capables d'utiliser des indices visuels avant le lâcher de la balle pour anticiper le lancer.

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 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].

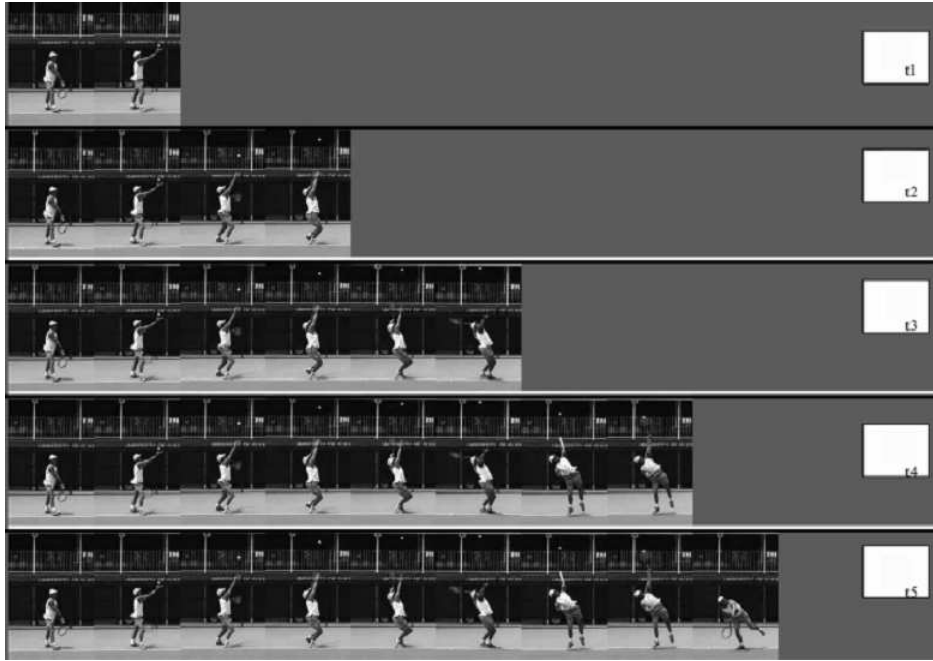


Fig. 1.4 - Représentation schématique des cinq conditions successives d'occultation (par tranche de 300ms) lors d'un service au tennis [Farrow2003].

- 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. En d'autres termes, le sujet ne peut avoir accès à des informations visuelles supplémentaires face à ce type d'affichage, ce sont toujours les mêmes informations qui sont représentées. Or, lorsqu'un individu se déplace dans la réalité, il peut visualiser de nouvelles informations visuelles 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...). Alors que si le gardien bouge face à une action filmée, il ne peut percevoir ce type d'informations visuelles.
- 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 et du manque d'interaction avec l'adversaire. Par exemple, dans le cadre d'une étude sur le mouvement de feinte au rugby, des chercheurs ont filmé un joueur simulant ce type de mouvement [Jackson2006]. Mais il 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. En effet, 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 [Crognier2007].
- les consignes données à l'athlète face à la vidéo sont souvent éloignées de son action réelle sur le terrain. Les réponses du sujet en laboratoire peuvent en effet différer de son action naturelle². Lors d'expérimentations menées en laboratoire, les sujets doivent généralement effectuer des tâches de jugement (réponse verbale, écrite, pression d'un bouton, joystick) pour caractériser la trajectoire des éléments en mouvement. Certains auteurs ont toutefois souligné ce décalage par rapport à la réalité sportive [Williams1994,

²Une étude cependant a tenté de faire réagir les sujets face à la vidéo de la même façon que dans une situation naturelle de jeu [Williams1999b].

Tresilian1995, Farrow2003, Crognier2007].

- les techniques fondées sur l'utilisation de la vidéo fournissent principalement des données sur l'instant à partir duquel les informations visuelles sont importantes et non sur le lieu de ces informations. Ce manque peut être comblé en couplant la technique de l'occultation temporelle avec une occultation spatiale des informations visuelles présentées aux sujets [Abernethy1985, Abernethy1987, Müller2006b]. Cependant, peu d'études semblent avoir utilisées ce couplage entre l'occultation temporelle et l'occultation spatiale. Il existe en effet d'autres méthodes pour déterminer la position des informations visuelles vraisemblablement prises en compte. C'est notamment le cas de l'oculométrie.

1.1.3.3 L'étude du suivi du regard ou oculométrie

Dans les situations sportives où la pression temporelle est très forte, comme c'est souvent le cas pour le gardien de but de handball, le sujet doit focaliser son attention sur les sources d'informations visuelles les plus pertinentes pour sa future action. Cette focalisation de l'attention est appelée stratégie visuelle et permet de caractériser le niveau d'expertise d'un athlète [Williams1999a]. En effet, il a été démontré que les experts utilisaient des stratégies de recherche visuelle spécifiques au cours d'une action sportive [Bard1981].

Les stratégies de recherche visuelle des sportifs ont été analysées par 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].

L'une des principales techniques d'oculométrie utilisée dans les études perceptives est fondée sur le principe de la "pupille éclairée" [Babcock2003]. La pupille se trouve en effet éclairée lorsqu'elle est face à une lumière infrarouge. Cela vient du fait que la rétine (située au fond de l'œil) va particulièrement bien réfléchir la lumière infrarouge sur la pupille. Ainsi, lorsqu'une lumière infrarouge est alignée convenablement avec l'œil, elle est rétro-réfléchi par la rétine avant d'illuminer la pupille qui va alors "s'éclairer". La cornée, qui se trouve autour de la pupille, va aussi réfléchir cette lumière infrarouge. La réflexion cornéenne est caractérisée par le premier point de réflexion de Purkinje, P1. La technique oculométrique estime donc la direction du regard à partir d'un calcul vectoriel entre le centre de la pupille et le point de la réflexion cornéenne P1 (figure 1.5). Les systèmes oculométriques classiques utilisent donc deux caméras miniatures

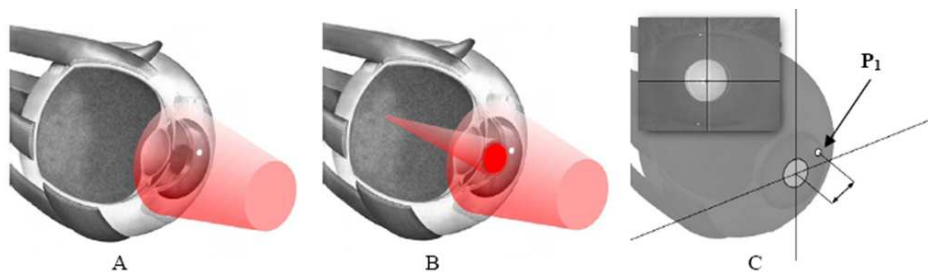


Fig. 1.5 - A) Source infrarouge illuminant l'œil. B) Lorsqu'elle est alignée avec l'axe optique, la lumière infrarouge pénètre dans l'œil, est rétro-réfléchi au niveau de la rétine puis éclaire la pupille en retour. C) Le centre de la pupille et le point de la réflexion cornéenne sont repérés, la distance qui les sépare permet alors le calcul du vecteur du regard. D'après [Babcock2003].

posées sur une monture : la première, de type infrarouge, enregistre les mouvements oculaires (centre de la pupille et point de réflexion cornéenne) et la seconde, positionnée au niveau du front, enregistre la scène, c'est-à-dire le champ de vision du sujet dans l'action. Il est alors possible de retranscrire le point du regard dans la caméra de scène (figure 1.6).

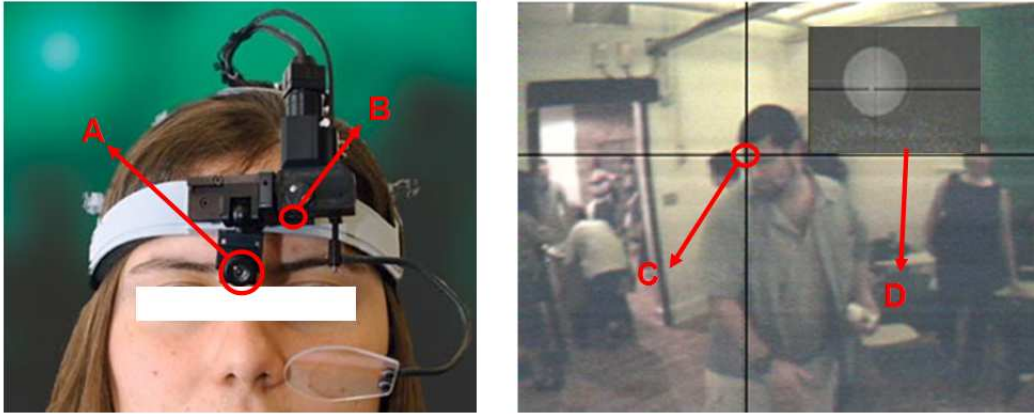


Fig. 1.6 - A) Caméra de scène. B) Source infrarouge et caméra de l'œil. C) Affichage du point du regard dans la caméra de scène. D) Rendu de la caméra de l'œil. D'après [Babcock2003].

La technique de l'oculométrie a tout d'abord été utilisée en laboratoire face à des diapositives représentant des situations types de jeu [Bard1976, Tyldesley1982]. Des études ont ainsi été menées pour déterminer les différences de stratégies visuelles chez des sujets observant ces diapositives. Des différences entre novices et experts sont alors apparues (moins de fixations et à des endroits différents pour les experts). Dans une de ces études, des gardiens de but de football (novices et experts) faisaient face à une diapositive représentant un tireur de penalty [Tyldesley1982]. Les auteurs ont pu démontrer que la stratégie préférentielle des gardiens de but experts commençait au niveau de la hanche et du membre inférieur (côté tireur) avant de s'orienter vers le haut du corps et la ligne des épaules. Cela suggère que les gardiens prennent d'abord l'information sur la direction du tir avant de déterminer la hauteur du tir. L'hypothèse de ce type de stratégie visuelle a par la suite été vérifiée [Williams1993]. Cependant, l'utilisation d'images fixes ne permet pas d'extraire la totalité des informations visuelles fournies par une situation dynamique de jeu [Williams1999a, Wright2007].

Les chercheurs ont ensuite couplé la technique oculométrique avec celles fondées sur l'utilisation de la vidéo (figure 1.7). Williams et al. ont ainsi démontré que, lors d'une passe au football, les joueurs novices fixaient fréquemment le ballon et le joueur effectuant la passe, alors que les experts se focalisaient sur la position et le mouvement des joueurs alentours [Williams1994].

De nombreuses études utilisant ce couplage entre oculométrie et vidéographie pour l'analyse des stratégies de recherche visuelle ont pu mettre en évidence des différences entre experts et novices au football [Helsen1993, Williams1994, Williams1998a, Savelsbergh2002, Savelsbergh2005], au tennis [Goulet1989, Singer1996], au baseball [Shank1987], au badminton [Abernethy1987], en sport de combat [Ripoll1995, Williams1999b]... Cependant, des conclusions contradictoires semblent émerger quant aux stratégies visuelles utilisées par un même groupe de niveau [Williams1999a]. C'est notamment le cas au tennis où certains auteurs ont montré que les experts fixent principalement la raquette et le bras de l'adversaire face à un service, alors que les novices ne fixent que la balle [Goulet1989]. Pour la même action observée (service, volée ou frappe de fond de court), d'autres chercheurs ont trouvé une différence minime entre experts et

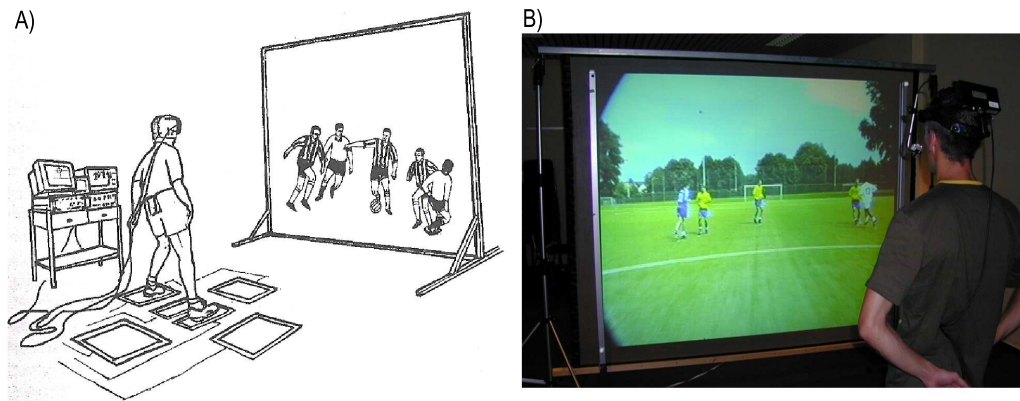


Fig. 1.7 - Exemple de couplage entre un système vidéo et un oculomètre : représentation schématique (A) et photographie (B). D'après [Williams1998a].

novices [Singer1994]. Dans une dernière étude enfin, il apparaît que les experts passent plus de temps à fixer l'épaule et le bassin lorsqu'ils observent une frappe de fond de court alors que les novices s'attardent principalement sur la raquette [Ward2002]. Il ne semble donc pas y avoir de consensus sur ces différents résultats. Cela nous permet de suggérer que les stratégies visuelles des sportifs sont dépendantes des contraintes de la tâche et de la situation de jeu étudiée.

Notons ici que la majorité des études sur les stratégies de recherche visuelle menées face à la vidéo imposaient au sujet de rester immobile, les mouvements de la tête étant contraints par une mentonnière. Cet élément montre à quel point les conditions d'enregistrement en laboratoire diffèrent des conditions naturelles de vision où le sujet peut bouger librement la tête et les yeux [Collewijn1992].

Cependant d'autres auteurs ont utilisé la technique de l'oculométrie lors de situations réelles de jeu [Panchuk2006]. Bard et Fleury ont ainsi pu démontrer que les gardiens de but de hockey sur glace experts se focalisaient sur l'orientation de la crosse avant le contact avec le palet afin d'anticiper la trajectoire du tir [Bard1981]. Au golf, il a pu être démontré que des joueurs experts concentraient leur attention sur la balle et le trou durant la phase de préparation du swing [Vickers1992]. Le même auteur a mené des expérimentations sur les stratégies visuelles de joueurs de basket et de volley [Vickers1996, Vickers1997]. Au tennis, une étude a permis de mettre en relation les mouvements de joueurs experts avec leurs fixations visuelles au cours d'un retour de service [Williams1998b]. Il apparaît que les sujets regardent d'abord le bras serveur, la raquette, la balle puis le futur point de contact au cours de l'action.

Deridder s'est servi de cette technique pour analyser les centrations visuelles des gardiens de but de handball lors d'un jet de 7 mètres [Deridder1985]. Le but était ici de différencier l'activité perceptive de gardiens de but de handball experts et novices. L'auteur soutient l'hypothèse selon laquelle le gardien de but doit avoir recours à une stratégie anticipatrice afin de répondre à la pression temporelle du jet de 7 mètres. Cette stratégie serait fondée sur la recherche d'indices prédictifs chez le tireur. L'analyse des centrations visuelles a révélé que la zone du bras est significativement plus regardée en terme de durée et de nombre de fixations chez les experts que chez les novices. C'est notamment le cas lors de la phase de mouvement de bras pendant le tir. Cet auteur en a conclu que l'action de l'expert n'est pas planifiée avant le début de sa parade, mais au contraire qu'elle est orientée et déterminée dans le temps et dans l'espace par des indices pris sur le mouvement du tireur. Il faut rajouter ici qu'il s'agissait d'une étude ne portant que sur peu de sujets (5 experts, 5 débutants) et la question de la reproductibilité des

tirs dans le but n'est pas abordée.

Par ailleurs, il existe plusieurs limites à l'utilisation de l'oculométrie, que ce soit en laboratoire ou sur le terrain :

- la première critique concerne 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 (regarder) et le fait de considérer ce point pour l'action à venir (voir) [Williams1999a]. Ainsi, la localisation du regard n'est pas directement liée à la PIV [Davids1984, Abernethy1988, Williams1993]. Néanmoins, certains auteurs affirment que l'étude des mouvements oculaires permet d'avoir une idée sur la focalisation de l'attention [Babcock2003] et sur la capacité de décision des athlètes [Yarbus1967].
- on ne connaît pas réellement l'influence du port d'un oculomètre sur le comportement du sujet. Toutefois, les sujets avouent facilement que ce type de système entraîne une gêne au bout d'un certain temps.
- lorsqu'un oculomètre est utilisé en situation réelle de jeu, il est très difficile de reproduire cette situation à l'identique. Or cette reproduction est nécessaire pour obtenir une stratégie de recherche visuelle de référence de la part du sportif.

Dès lors, même si le processus de recherche visuelle permet d'acquérir des informations situées dans l'environnement afin de pouvoir réagir à tout moment à la situation de jeu [Magill1993], il semble que son enregistrement par l'intermédiaire d'un oculomètre ne permette pas de caractériser précisément la PIV.

1.1.3.4 La représentation du mouvement

Que ce soit en laboratoire ou sur le terrain, les méthodologies citées précédemment offrent au sujet une grande quantité d'informations visuelles. Une autre approche consiste donc à diminuer le nombre d'informations visuelles disponibles dans une séquence vidéo en modifiant la représentation graphique ou visuelle du mouvement. Le but de cette méthode est ainsi d'isoler les invariants de la performance. La PIV de l'acteur sportif peut alors être analysée à partir du degré de reconnaissance visuelle du mouvement visionné.

Cette méthode nécessite de représenter le mouvement humain avec un minimum d'informations afin d'isoler celles qui sont essentielles à la perception d'une action [Abernethy1993]. Cette représentation minimale du mouvement humain est appelée "mouvement biologique" [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 (figure 1.8). C'est ce qu'on appelle la technique du PLD ("Point Light Display").

En sport, cette méthodologie a été utilisée pour tenter de mettre en évidence le lien entre les capacités anticipatoires des sportifs et les propriétés cinématiques du mouvement. En effet, en manipulant l'affichage de ces points lumineux, les chercheurs peuvent estimer l'importance relative de tel ou tel indice cinématique dans la prédiction d'une action.

La représentation en PLD a été utilisée en squash pour analyser l'importance relative des indices visuels d'un mouvement de smash [Abernethy1989]. Les sujets de cette étude devaient prédire la direction d'un smash face à un film représentant un adversaire modélisé en PLD. Les auteurs ont alors démontré que les sujets étaient capables de percevoir les informations cinématiques leur permettant de prédire la direction et la force de la frappe, malgré la représen-

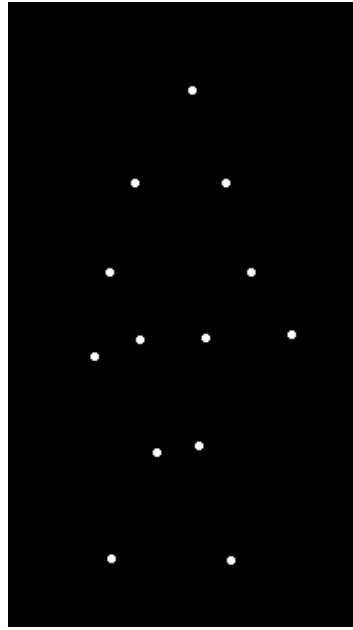


Fig. 1.8 - Exemple de représentation d'un mouvement de marche sous forme de PLD.

tation dégradée de l'adversaire. Mais cette méthodologie a aussi permis d'analyser les capacités de reconnaissance d'un schéma de jeu au basket [Didierjean2005] et au football notamment [Williams1995, Ward2003, Williams2000]. Il apparaît que les experts sont à la fois plus précis et plus rapides que les novices pour reconnaître des schémas de jeu affichés en PLD [Williams2006].

Cependant, les études impliquées dans la reconnaissance du mouvement biologique reposent sur la projection de séquences vidéos, ce qui peut conduire à certaines limites vues précédemment (cf. chapitre 1.1.3.2, p7).

1.1.3.5 L'analyse cinématique

Afin de se rapprocher au maximum d'une situation réelle de jeu, certains auteurs ont proposé d'enregistrer le mouvement des athlètes lors d'une action sportive pour caractériser leur PIV. Des analyses cinématiques du mouvement fondées sur des enregistrements vidéo à haute fréquence ont alors pu être menées. Ainsi, il a été démontré qu'au squash, les joueurs experts effectuaient des mouvements anticipatoires significativement plus tôt que des joueurs novices [Howarth1984]. De plus, dans cette même étude, les auteurs ont prouvé que, contrairement aux joueurs novices, les joueurs experts commençaient leur mouvement avant que la balle ne soit frappée. Cela implique que ces joueurs orientaient leur PIV sur le mouvement de frappe de la balle.

Keller et ses collègues ont également utilisé une analyse cinématique du mouvement pour caractériser l'organisation spatio-temporelle de l'activité du gardien de but de handball et de football [Keller1987]. Les mouvements du gardien de but et du tireur lui faisant face ont donc été filmés puis analysés de façon simultanée. La trajectoire du ballon au cours du mouvement a également été prise en compte. Les auteurs en ont donc conclu que les indices signifiants pour le gardien de but se situent au niveau de l'orientation du tronc (différente suivant le type de tir), de la tête et de la position de la jambe motrice.

Néanmoins, le problème de la standardisation des situations réelles de jeu est présent lorsqu'on

effectue une analyse cinématique du geste sportif. Le protagoniste sportif n'est en effet pas capables de reproduire deux fois le même mouvement. . .

1.1.3.6 L'occultation visuelle

D'autres chercheurs ont tenté de reprendre sur le terrain le principe de l'occultation temporelle. Les scientifiques ont alors utilisé une paire de lunettes à cristaux liquides afin de masquer la fin d'une action réelle de jeu [Starkes1995, Fery2001b]. Ainsi, il a été démontré que des joueurs de tennis experts sont capables d'effectuer un coup droit en se basant uniquement sur les informations visuelles avant le contact entre la raquette et la balle [Day1980].

Abernethy et al. ont aussi utilisé cette technique pour caractériser la perception de joueurs de squash experts dans une situation naturelle de jeu [Abernethy2001]. Les sujets de l'étude participaient à une action de squash au moment où une occultation (avant et après le contact avec la balle) du mouvement de leur adversaire leur était imposée (par l'intermédiaire de lunettes à cristaux liquides). Les sujets avaient pour consigne de terminer leur coup comme s'il n'y avait pas eu d'occultation. Les qualités perceptives des sujets étaient alors évaluées selon leur capacité à se diriger vers l'endroit du terrain où allait la balle.

Au cricket, l'équipe de Müller s'est intéressée aux aspects temporels et cinématiques d'un mouvement de batte réussi [Müller2006a]. Pour cela, ces auteurs ont demandé à des joueurs de différents niveaux d'effectuer un mouvement de batte alors que leur vision était volontairement masquée (par l'intermédiaire de lunettes à cristaux liquides) à différents moments clés de l'action. Seuls les sujets experts sont alors capables de débiter leur action avant le lâcher de la balle.

Une fois de plus, la question de la reproductibilité de la situation réelle de jeu pose problème. Sans une standardisation des situations d'étude, il semble difficile d'isoler les variables visuelles pour comprendre leur influence respective.

1.1.4 Conclusion générale et méthodologique

L'exposé des différentes méthodes d'analyse de la PIV nous conduit tout d'abord à un constat simple : il n'existe pas aujourd'hui de protocole expérimental capable d'isoler l'ensemble des variables visuelles d'une situation sportive. Chacune des méthodes décrites précédemment laisse en effet apparaître certaines limites remettant en cause son utilisation. L'ensemble de ces critiques nous amène à penser qu'il est nécessaire de concevoir une nouvelle méthode d'analyse de la PIV. Cette méthode devra respecter les contraintes suivantes :

- utiliser un affichage tridimensionnel afin d'avoir accès à un maximum d'informations visuelles,
- adapter le point de vue du sujet lorsque celui-ci se déplace dans l'environnement,
- visualiser des actions qui se rapprochent au maximum d'une situation réelle de jeu (réalisme de la scène, taille des personnages),
- pouvoir dissocier chacune des informations visuelles disponibles dans la scène afin de connaître leur influence relative,
- et permettre une standardisation des situations d'étude pour reproduire les essais et contrôler l'influence des variables visuelles sur le sujet. Cela implique de ne pas réaliser ces situations dans un environnement réel de jeu.

Les environnements virtuels (EV) répondent aujourd'hui à toutes ces exigences. Ils représentent un avantage considérable par rapport à l'utilisation de la vidéo du fait d'un affichage stéréoscopique des informations visuelles ainsi que de l'adaptation du point de vue du sujet au cours de l'action. De plus, il est possible de manipuler et de contrôler les informations visuelles transmises au sujet d'étude, ce qui répond au problème de la standardisation des situations.

Nous allons donc maintenant exposer la manière dont les EV peuvent être utilisés pour analyser la PIV de sportifs. Nous aborderons ensuite plus particulièrement l'analyse de la PIV du gardien de but de handball en EV.

Un autre point reste à éclaircir aux vues de la littérature sur la PIV. Il s'agit de la tâche d'exécution au cours de la situation d'étude. Nous avons vu que les études utilisent aussi bien des tâches de jugement que des tâches motrices dans leur protocole expérimental. Même s'il apparaît important de respecter le couplage entre perception et action au cours de la situation d'étude (cohérence avec la pratique), il n'existe pas aujourd'hui de consensus sur cette notion [Milner1995, Prinz1997, Lorenceau1997, Milner2007]. Nous proposons donc de prendre en considération ces deux tâches de réalisation au sein de notre situation d'étude en EV.

1.2 Les environnements virtuels

La réalité virtuelle est aujourd'hui utilisée dans des domaines aussi divers et variés que la chirurgie (opération chirurgicale à distance [Mondada2004]), le traitement des phobies (gestion de la claustrophobie [Malbos2008]), l'aide aux personnes handicapées (outil de navigation pour personnes aveugles [Simonnet2009]), l'architecture (représentation de futurs espaces d'urbanisation [Thomas1999]), l'aérospatiale (simulation d'une mission spatiale [Boccaro2000]) ou l'éducation (EV pour l'apprentissage [Taxén2001]). Dans le domaine sportif, et plus précisément l'analyse de la PIV du gardien de but de handball, la réalité virtuelle doit nous permettre de contrôler entièrement l'action du tireur (humanoïde de synthèse) pour pouvoir analyser les différents paramètres visuels qui déclenchent la parade du gardien (gardien réel). Ce type de méthodologie permet donc d'analyser l'activité d'un sujet lors d'une situation standardisée, autrement dit lorsque tous les paramètres spatio-temporels en EV sont maîtrisés [Tarr2002]. Nous débuterons ce chapitre par le rappel des différentes définitions de la réalité virtuelle. Certaines notions clés comme la présence seront ensuite abordées. Enfin nous expliciterons l'utilisation de la réalité virtuelle pour notre support d'étude, l'analyse de la PIV du gardien de but de handball.

1.2.1 Définitions

Le terme "réalité virtuelle" est un oxymore bien connu dans la société actuelle. Cette association de deux termes en apparente opposition est très largement employée de nos jours, bien que de nombreuses interrogations subsistent encore sur son usage et ses limites [Fuchs2006]. Il semble que deux types de définitions émergent de la littérature : l'une d'un point de vue technologique et l'autre d'un point de vue conceptuel.

1.2.1.1 Définition technologique

Historiquement, c'est Morton Heilig qui développa le premier environnement cinématographique multisensoriel, le "Sensorama" [Heilig1962]. Le but était d'optimiser l'immersion pendant le visionnage d'un film grâce à l'implication d'un maximum d'organes sensoriels. Mais ce sont les travaux de Ivan Sutherland, dans les années 60, qui ont mené à la première définition de la réalité virtuelle. Ce scientifique américain a créé le premier système stéréoscopique en 3D, le "Head Mounted Display" (HMD) ou visiocasque dans la terminologie française. Ce système, composé de lunettes stéréoscopiques, permettait au sujet d'évoluer dans un monde virtuel en tournant la tête. Sutherland présenta son système comme la possibilité "de placer un utilisateur à l'intérieur d'un monde en 3D engendré par ordinateur" [Sutherland1968]. Il est à noter que les systèmes HMD peuvent être couplés à d'autres interfaces sensorielles comme des gants haptiques capables de transmettre des retours d'effort (figure 1.9).



Fig. 1.9 - Système de réalité virtuelle utilisant un HMD et des gants haptiques.

Il fallut attendre 20 ans après les travaux précurseurs de Sutherland pour voir apparaître les termes de "réalité virtuelle". C'est Jaron Lanier qui utilisa le premier cette expression dans les années 80 pour décrire une expérimentation visuelle programmée par ordinateur [Lanier1984]³. C'est à cette période aussi qu'apparut le premier gant haptique ("data glove") et le premier casque de réalité virtuelle (système "VIVED", NASA). Les premières définitions de la réalité virtuelle ne tardèrent pas à arriver, toutes en accord avec leur époque. En 1992, dans leur livre *"Silicon Mirage : The Art and Science of Virtual Reality"*, Aukstakalnis et Blatner écrivent "pour les hommes, la réalité virtuelle est un moyen de visualiser, manipuler et interagir avec des ordinateurs et des données extrêmement complexes." [Aukstakalnis1992]. On perçoit alors surtout la notion d'interaction entre l'homme et l'ordinateur.

Puis cette définition a évolué pour laisser la place aux EV : "les techniques de la réalité virtuelle sont fondées sur l'interaction en temps réel avec un monde virtuel, à l'aide d'interfaces comportementales permettant l'immersion pseudo-naturelle de l'utilisateur dans cet environnement." [Fuchs2001]. Le monde virtuel correspond donc à une restitution en temps réel d'un environnement synthétique où les tâches semblent réelles. Une définition complète doit donc intégrer à la fois les outils qui permettent de créer le monde virtuel et la nature de l'interaction

³Il ne faut pas perdre à l'esprit qu'en anglais "virtual" signifie "pratiquement". Une traduction plus aboutie aurait donc été "réalité vicariante" (qui se supplée à une autre) [Fuchs2006]

avec ce monde. La réalité virtuelle correspond donc à "une simulation informatique d'environnements qui utilisent des images en 3D et des équipements externes, comme des gants de données et des casques, pour permettre à l'utilisateur d'interagir avec la simulation. Les utilisateurs se déplacent au travers des environnements de réalité virtuelle comme s'ils se déplaçaient dans le vrai monde, marchant à l'intérieur de structures et interagissant avec des objets dans cet environnement dans un temps réel." [Thalmann2004].

Tous ces éléments nous permettent de définir une boucle en EV interactif (figure 1.10). L'utilisateur agit sur l'EV par l'intermédiaire d'interfaces motrices qui enregistrent les actions. Puis cette activité modifie l'EV grâce au calculateur du système d'immersion. Le calculateur définit alors les modifications et les restitutions sensorielles à apporter à l'EV à travers les interfaces sensorielles.

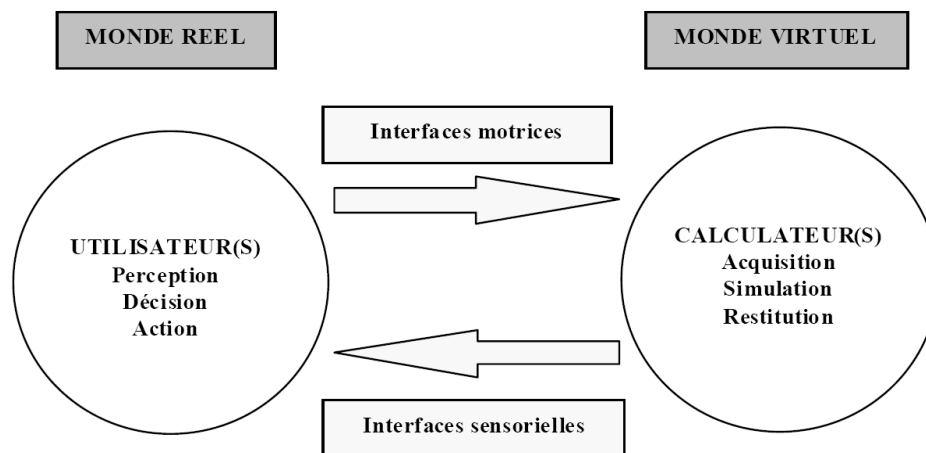


Fig. 1.10 - Boucle perception/cognition/action dans le cadre des EV [Fuchs2006].

Cette boucle perception/cognition/action peut être perturbée par une contrainte majeure : la latence du système immersif. Le terme de latence correspond au laps de temps qui s'écoule entre une action de l'utilisateur sur les interfaces motrices et la perception des conséquences de cette action sur l'EV [Fuchs2006].

1.2.1.2 Définition conceptuelle

Les psychologues et les philosophes se sont aussi intéressés à la réalité virtuelle. Certains auteurs ont ainsi développé des notions plus conceptuelles pour décrire l'expérience au sein d'un EV, comme le réalisme simulé [Pragier1995] ou le sentiment d'immersion lié à la manipulation [Quéau1993]. Dans le même ordre d'idée, Ellis a défini la virtualisation comme "le processus par lequel un individu interprète une impression sensorielle comme étant un objet appartenant à un environnement autre que dans celui où il (l'individu) existe physiquement." [Ellis1995]. Cet auteur définit trois niveaux de virtualisation :

- l'image virtuelle : qualité de perception relativement faible, perception d'un objet en profondeur,
- l'espace virtuel : qualité moyenne, perception d'un objet en profondeur au moyen de textures,
- l'environnement virtuel : qualité de perception élevée, champ de vision plus large, parallaxe

du mouvement.

Il existe donc un lien entre virtualisation et qualité de l'environnement : la virtualisation dépend de la perception de l'objet, or plus la qualité d'un EV est élevée, plus la perception des objets dans cet environnement est accrue. Pour Hand, nous nous situons en EV lorsque "nous interagissons avec quelque chose qui n'est pas réel, mais qui peut être considéré comme étant réel pendant qu'on l'utilise" [Hand1996].

Pour conclure sur la définition de réalité virtuelle, cette notion désigne des mondes synthétiques générés par des ordinateurs, avec lesquels l'interaction est rendue possible grâce à des interfaces diverses (HMD, gants haptiques, son, etc.). Ce degré d'interaction entre l'EV et l'individu nécessite d'être évalué. En particulier lorsqu'on travaille dans le domaine du sport. L'athlète immergé va avoir besoin de se sentir totalement en interaction avec l'environnement pour reproduire la gestuelle d'une situation sportive de compétition. La quantification de la présence en EV va nous permettre de connaître le degré d'implication psychologique et sensorielle de l'individu.

1.2.2 Notion de Présence

Deux termes se posent et s'opposent régulièrement lorsqu'il est question d'EV, il s'agit des notions d'immersion et de présence [Mestre2006]. L'immersion se définit comme "une technologie, une technique d'interface entre l'homme et l'ordinateur qui ne concerne pas l'état psychologique du sujet" [Vianin1995]. A l'inverse, la présence correspond au sentiment psychologique d'être "là" [Sanchez-Vives2005]. Il s'agit en fait de l'implication psychologique de l'individu, appelé opérateur ou utilisateur au sein d'un EV.

L'immersion concerne donc principalement l'aspect technologique de l'interaction entre l'environnement synthétique et l'opérateur. Elle se définit plus précisément comme "la capacité technique du système à délivrer un environnement persuasif avec lequel l'utilisateur peut interagir" [Sanchez-Vives2005]. De ce fait, le degré d'immersion d'un système de réalité virtuelle peut être mesuré indépendamment de l'expérience qu'il engendre chez un utilisateur.

L'immersion correspond donc à une entrée sensorielle multimodale pour l'opérateur placé dans un EV [Bystrom1999]. Toutes ces informations sensorielles (vision, ouïe, odorat, kinesthésie, etc.) mettent en jeu des interfaces comportementales. Ces interfaces peuvent être motrices (acquisition du mouvement de l'opérateur par le biais de marqueurs optoélectroniques par exemple), sensorielles (son spatialisé, lunettes stéréoscopiques pour induire la stéréovision, etc.) ou sensorimotrices (bras à retour d'efforts, [Fuchs2001]). L'immersion va donc dépendre de la qualité de ces interfaces sensorielles.

Dans le même ordre d'idée, Slater et Wilbur ont défini l'immersion comme étant la capacité d'un système informatique à offrir des illusions de la réalité étant à la fois [Slater1997] :

- inclusive : lorsque la réalité physique est totalement coupée de l'EV,
- vaste : lorsqu'il y a adaptation et stimulation d'une série d'entrées sensorielles,
- environnante : lorsque le point de vue de l'opérateur semble panoramique plutôt qu'étroit,
- vive : lorsque le degré de résolution et de fidélité des stimuli sensoriels est suffisant.

L'immersion se définit donc comme une description objective et quantifiable de ce que le système informatique offre à l'opérateur. Ainsi, plus le degré d'immersion d'un système est élevé, plus le sentiment psychologique de présence a des chances d'apparaître chez l'utilisateur, tant que ce dernier reste concentré [Sadowski2002].

Il existe cependant une autre approche pour aborder la notion d'immersion en EV. Cette approche multidimensionnelle ne considère pas l'immersion comme un élément isolé et indépendant de la réaction de l'être humain en EV [Bowman2007]. L'immersion est alors le produit de plusieurs composantes, chacune d'entre elles pouvant être bénéfique pour l'application. La mesure de la présence n'a alors plus lieu d'être, on parle plutôt des effets de l'immersion. En effet, certaines applications ne nécessitent pas forcément que le sujet se sente "là" pour pouvoir effectuer une tâche efficacement [Bowman2007].

Dans l'approche traditionnelle, la présence se définit comme "le sentiment psychologique d'être dans l'environnement dont la base technologique est l'immersion... n'importe quel système d'immersion n'induit pas nécessairement de la présence chez tout le monde." [Slater1993a]. La présence reflète la sensation subjective d'être "là", à l'intérieur de l'environnement dans lequel l'opérateur est immergé⁴. La présence n'est pas forcément un concept propre aux environnements de synthèse, ce phénomène peut se retrouver dans de nombreux domaines comme le théâtre ou la lecture par exemple [Barfield1995b]. Certains auteurs ont ainsi distingué la présence dans le monde physique et la présence dans un EV comme le fait de croire que l'on se trouve dans un endroit différent de l'endroit où l'on se trouve physiquement [Barfield1995a].

De son côté, Sheridan décrit deux types de présence : la présence en EV et la téléprésence. Le premier type décrit le sentiment d'être ailleurs que dans l'endroit physique où l'on se trouve alors que le second désigne le même phénomène de présence lors de téléopérations, c'est-à-dire des actions d'interaction avec l'EV où des systèmes technologiques étendent la portée de nos sens [Sheridan1992]. Dans le domaine des réalités virtuelles, le terme "présence" se réfère donc à l'activité humaine alors que la "téléprésence" correspond au contrôle humain de téléopérateurs dans des environnements de synthèse. Ces deux variantes se rejoignent pour ne former qu'une seule définition : la présence est le sentiment d'être transporté dans un endroit synthétique ou créé par ordinateur et ce par l'intermédiaire d'interfaces variées [Sheridan1996]. Cette définition de la présence nous semble la plus acceptable, même si de nombreux autres auteurs ont pu y ajouter quelques nuances [Heeter1992, Kim1997, Lombard1997, Zahorik1998, O' Brien1998, Schubert1999].

En résumé, le sentiment de présence semble être le produit de deux principaux éléments : l'immersion, représentée par l'ensemble des interfaces comportementales permettant l'interaction avec l'environnement, et l'implication, caractérisée par le niveau d'attention de l'individu immergé (figure 1.11).

Il est alors aisé de comprendre pourquoi cette notion de présence prend autant d'importance lorsque l'on s'intéresse à l'analyse de situation sportive en EV : un athlète immergé qui ressent un faible degré de présence ne va pas établir d'interaction "naturelle" avec le monde synthétique. Tous les résultats issus de cette expérience seront alors biaisés et inexploitable, dû au manque d'interaction entre l'opérateur et l'environnement. Par conséquent, un degré de présence optimal est l'objectif recherché lors de la création de tout EV [Hendrix1994]. La connaissance des facteurs d'influence de ce phénomène va nous permettre de nous rapprocher de ce degré optimal.

⁴Le lecteur est renvoyé à la revue détaillée publiée par Schuemie et al. sur les définitions majeures de la présence [Schuemie2001].

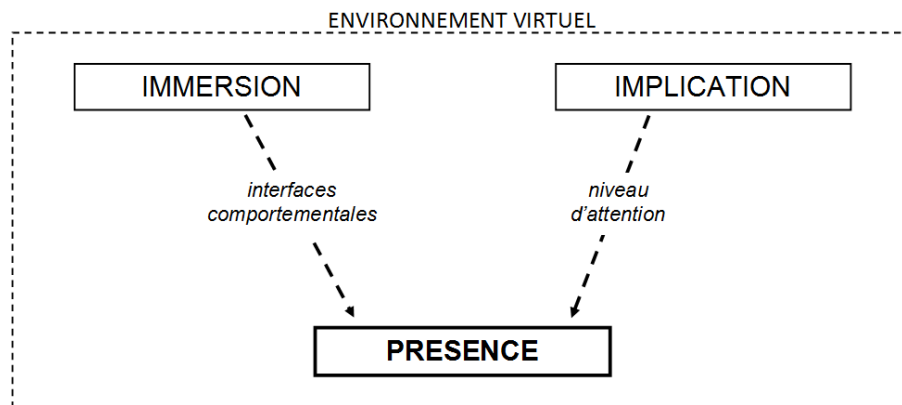


Fig. 1.11 - La présence vue comme le sous-produit des propriétés d'immersion et d'implication de l'EV (d'après [Singer1997]).

1.2.3 Les facteurs de la présence

En se basant sur le même modèle que la figure 1.11, il est possible de distinguer deux catégories de facteurs d'influence de la présence : les facteurs externes et les facteurs internes [Slater1993a]. Les premiers ont un rapport avec la technologie et le matériel employé pour créer l'EV, alors que les seconds caractérisent l'aspect psychologique de l'opérateur.

1.2.3.1 Les facteurs externes

Selon Steuer, deux variables principales peuvent caractériser l'aspect technologique d'un EV : la vivacité et l'interactivité des stimuli sensoriels [Steuer1992]. La vivacité d'un EV correspond à la façon dont les informations sensorielles sont présentées à l'opérateur et à ses sens. L'interactivité, quant à elle, représente l'ampleur avec laquelle un opérateur peut modifier le fond et la forme de l'environnement en temps-réel. Ces deux variables dépendent de plusieurs facteurs (figure 1.12) :

Intéressons-nous maintenant à l'ensemble des facteurs qui contribuent à la vivacité et l'interactivité d'un environnement :

- la variété : ce qui est sous-entendu ici, c'est le nombre d'entrées sensorielles simultanément présentes dans l'environnement,
- la qualité : il s'agit de la résolution correspondante à chacun des canaux perceptifs. Il existe par exemple une relation positive entre le réalisme de l'image et le sentiment de présence [Welch1996],
- la rapidité : cela fait référence à la vitesse d'intégration d'une entrée sensorielle dans l'EV considéré,
- les possibilités : cela correspond au nombre de potentialités d'action à n'importe quel moment de l'expérience,
- l'adaptabilité : cela montre la capacité du système à adapter les actions de l'opérateur à ses effets dans l'EV.

En ce qui concerne l'interactivité de l'environnement, certains auteurs ont démontré qu'il existait une corrélation entre la facilité de l'interaction utilisateur/interface et l'augmentation du sen-

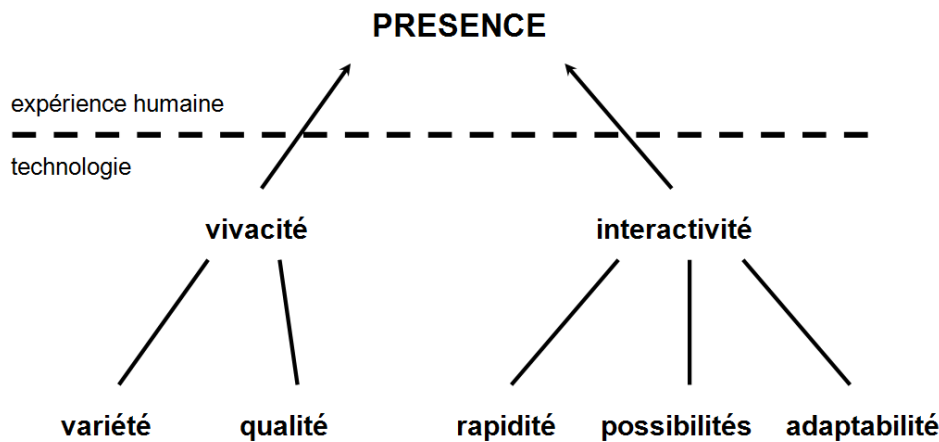


Fig. 1.12 - Les variables technologiques qui influencent le sentiment de présence (d'après [Steuer1992]).

timent de présence [Billinghurst1995, Welch1996]. D'autres facteurs externes peuvent être évoqués comme la fidélité de la reproduction des avatars. Il a en effet été prouvé qu'une corrélation existait entre des répliques détaillées et réalistes, et le sentiment de présence [Wilson1997]. La vision stéréoscopique possède aussi un effet positif sur le sentiment de présence [Hendrix1996]. A l'inverse, certains facteurs supposés influents, n'ont pas forcément l'effet escompté. C'est le cas de la durée d'exposition en EV. Le sentiment de présence n'est pas amélioré pour des durées d'exposition prolongées [Kennedy2000]. Un EV étant uniquement perçu comme tel dans la conscience de l'individu, la contribution relative de chacun des facteurs externes va donc varier d'un individu à un autre.

1.2.3.2 Les facteurs internes

Ces facteurs sont liés à la manière d'intérioriser l'expérience de l'individu en EV [Slater1993b]. Il y a donc une part subjective du sentiment de présence. Cette variabilité subjective de l'expérience virtuelle a été mise en évidence par Psothka [Psothka1995]. L'étude d'Hodgins et al. confirme ce constat [Hodgins1998]. Ces auteurs ont étudié l'influence de différents modèles géométriques sur la perception d'un mouvement de course à pied. Ils se sont alors aperçus que la perception du mouvement de certains sujets était plus réaliste pour un modèle texturé que pour un modèle en "fil de fer", alors que d'autres sujets ne voyaient pas de différence (figure 1.13). Le sentiment de présence va donc en partie dépendre de la capacité des sujets à compléter l'environnement de synthèse par leur propre représentation du monde.

1.2.4 Les méthodes d'évaluation de la présence

Après avoir cité les différents facteurs d'influence de la présence en EV, nous pouvons à présent aborder les méthodes qui permettent d'obtenir une mesure fiable de ce phénomène. Bien que les études qui se sont penchées sur ce problème aient pu rencontrer certaines difficultés,

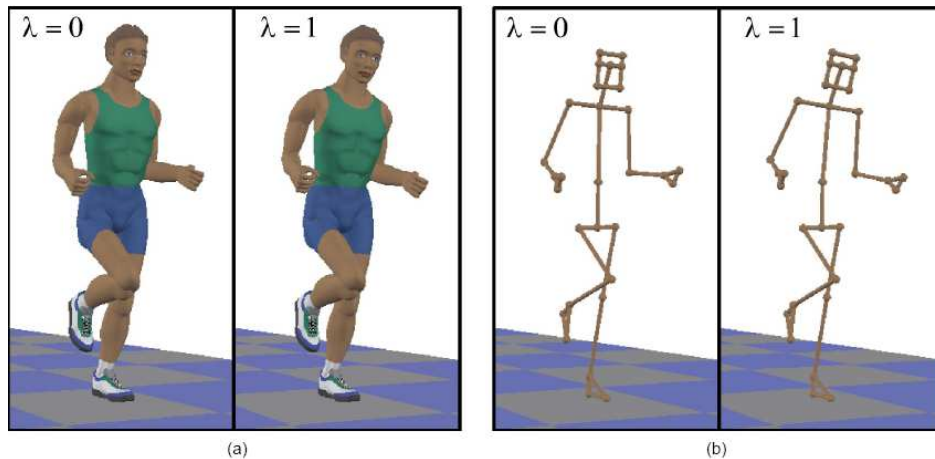


Fig. 1.13 - Les images de l'animation du mouvement du joggeur. (a) Deux mouvements de course issus du modèle texturé. (b) Les mêmes mouvements animés avec le modèle en "fil de fer". Les modifications du mouvement étaient contrôlées par l'intermédiaire du paramètre λ : pour le mouvement initial, $\lambda = 0$; pour le mouvement modifié, $\lambda = 1$ (d'après [Hodgins1998]).

Hendrix distingue deux types d'évaluation de la présence : les mesures subjectives et les mesures objectives [Hendrix1994].

1.2.4.1 Les mesures subjectives du niveau de présence

Les mesures subjectives du niveau de présence sont généralement issues de questionnaires qui tentent d'évaluer le degré d'implication psychologique de l'individu immergé [Witmer1998, Slater1999, Usoh2000]. Ces méthodes impliquent une retranscription, qu'elle soit orale ou écrite, du niveau de présence ressenti après ou pendant l'expérimentation en EV [Riley2004]. Les questions qui sont posées peuvent alors être du type [Bideau2003b] :

- "Votre interaction avec l'environnement vous a-t-elle semblé naturelle ?"
- "L'aspect visuel vous a-t-il encouragé à participer au jeu ?"
- "Votre expérience dans le monde virtuel est-elle proche de celle vécue dans le monde réel ?"

Certaines de ces méthodes subjectives ont pu être validées comme des mesures fiables du sentiment de présence au travers de quelques études empiriques [Witmer1994, Draper1996, Draper1996, Sas2003, Sheik-Nainar2005]. Cependant les mesures subjectives semblent limitées pour de multiples raisons : l'incapacité des sujets immergés à retranscrire précisément le vécu de l'expérience en EV, les difficultés pour les sujets à comprendre et interpréter le sens des questions ou encore le manque de standardisation des items pour les différents questionnaires établis [Riley2004]. Il apparaît donc difficile de comparer les résultats émanant de ces questionnaires car chacun d'entre eux utilisent des mesures subjectives distinctes [Barfield1993].

1.2.4.2 Les mesures objectives du niveau de présence

Pour dépasser ces limites, des mesures objectives du sentiment de présence ont été conçues. Celles-ci utilisent des indicateurs concrets pour rendre compte du degré d'implication de l'individu

immergé. Lors d'expérimentations en EV, il est ainsi possible de mesurer un certain nombre d'indices physiologiques (tension musculaire, réponses oculaires, rythme cardiovasculaire. . .) ou physiométriques (réponses corticales, diamètre de la pupille. . .) [Barfield1993].

Mais l'évolution d'indices physiques plus simples peut aussi être mesurée [Slater1997]. Slater et Steed ont mis au point une méthodologie permettant de mesurer le nombre de transitions nécessaires aux sujets pour passer du monde virtuel au monde réel. Cette donnée de transition est alors utilisée comme mesure de la présence [Slater2000]. D'autres auteurs ont formulé le concept de présence en fonction du niveau d'attention requis pour effectuer une tâche en EV [Draper1998]. A ce propos, Riley et Kaber ont démontré que l'augmentation de l'attention visuelle en EV était significativement corrélée à l'élévation du niveau de présence [Riley2001].

Il existe deux manières de valider les mesures objectives du sentiment de présence : soit en établissant des corrélations entre les mesures objectives et subjectives [Nichols2000, Riley2001] ; soit en comparant des mesures objectives en EV à des mesures réelles pour une situation donnée. Dans ce dernier cas, le sentiment de présence ressenti est suffisant lorsque la réponse de l'environnement par rapport aux actions de l'utilisateur est équivalente à la réponse offerte dans le monde réel [Zahorik1998].

1.2.5 La présence et la performance

L'étude de la relation entre présence et performance est un enjeu important de la recherche en réalité virtuelle. Connaître les facteurs de présence qui améliorent la performance lors de tâches diverses ou de téléopérations a une incidence directe dans la conception des environnements de synthèse. En effet, l'analyse du lien entre présence et performance implique d'établir une liste des interfaces comportementales qui pourront améliorer la réalisation d'une tâche donnée [Draper1998]. Le problème n'est pas tant de savoir si la présence influence la performance, mais de déterminer quelle combinaison de médias d'interaction va engendrer une réaction identique à celle rencontrée lors d'une situation de la vie courante [Slater1996]. Une fois cette combinaison établie, un entraînement dans l'EV permettra à l'individu de répondre plus efficacement aux contraintes du monde réel. Par exemple, ce type d'entraînement peut permettre à un chirurgien d'être plus efficace lors de ses opérations [Freysinger2002].

Une performance en EV similaire à celle effectuée dans le monde réel permet donc de caractériser le niveau de présence. Plus précisément, lorsqu'un individu réalise correctement une tâche en EV, cela indique que son degré de présence est suffisant, au même titre que le sentiment subjectif de se sentir présent dans l'EV [Slater2009]. En fait, la définition classique du sentiment de présence ("le sentiment d'être là") est fondée sur la performance de l'utilisateur dans l'EV ("la capacité à agir là") [Sanchez-Vives2005].

Cet état de fait rejoint les problématiques du domaine sportif. De notre point de vue, le sentiment de présence perçu au cours d'une situation sportive en EV peut donc être considéré comme optimal lorsque la performance de l'individu dans le monde virtuel est identique à la performance pour la même tâche dans le monde réel [Zahorik1998, Sanchez-Vives2005, Slater2009].

Il existe cependant une autre manière de concevoir les notions de présence et de performance en EV. L'efficacité d'une simulation peut être évaluée à partir du degré de "fidélité" du système de réalité virtuelle [Stoffregen2002]. Ce degré correspond à la différence entre le comportement de l'utilisateur dans la simulation et le comportement de celui-ci dans le monde réel. Dès lors, la fidélité d'un système de réalité virtuelle peut être séparée en deux parties : la fidélité de l'expérience vécue et la fidélité de l'action réalisée au sein du système. La première catégorie

(fidélité de l'expérience) peut être assimilée à la notion de présence. Il s'agit en fait de l'efficacité du système à engendrer le sentiment d'être présent dans l'environnement. Évaluer ce type de fidélité revient en fait à évaluer le degré de présence d'un sujet immergé en EV. La seconde catégorie de fidélité (fidélité de l'action) se réfère à la performance de l'utilisateur à l'intérieur du système de réalité virtuelle. De ce fait, la fidélité de l'action d'un système sera considérée comme élevée si la performance d'un individu dans l'EV est proche de la performance de ce même individu dans une situation réelle (on parle également de fidélité fonctionnelle dans ce cas) [Morice2008].

1.3 L'utilisation de la réalité virtuelle dans le sport

Au vu des différentes notions liées à la réalité virtuelle, l'utilisation de cet outil pour l'analyse de la tâche d'interception du gardien de but de handball semble soumise à de nombreuses contraintes, comme la création d'un environnement engendrant un haut degré de présence. Nous examinerons dans un premier temps les études qui ont permis l'analyse d'une tâche d'interception en EV, puis nous nous intéresserons particulièrement à celles qui ont intégré la notion de présence.

1.3.1 La réalité virtuelle et la tâche d'interception

Dans le domaine sportif, les tâches d'interception ont souvent lieu à la suite d'une course ou d'un déplacement locomoteur. Chardenon et al. ont ainsi étudié le contrôle visuel et la capacité d'interception d'un opérateur se dirigeant vers une balle en marchant [Chardenon2002]. Les sujets de cette étude étaient pour cela immergés dans un EV couplé à un tapis roulant. Ce type de protocole (monde synthétique et tapis roulant) a aussi été utilisé par de Rugy et al. pour analyser le couplage perception/action d'un utilisateur se dirigeant vers une cible virtuelle [de Rugy2000].

Au tennis, l'interception consiste à placer sa raquette au bon endroit au bon moment pour pouvoir renvoyer la balle. Cette tâche d'interception a été simulée par Noser et al. grâce à l'interaction entre un avatar (bras et raquette uniquement) et un joueur virtuel [Noser1997]. Le mouvement du joueur réel était capturé puis rejoué par l'intermédiaire de son avatar. Il faut noter que certains détails du geste, comme les effets donnés à la balle ou les déplacements du joueurs sur le cours, n'étaient pas pris en compte. Le même type de protocole a été utilisé pour faire interagir deux joueurs de tennis [Capin1997].

Au football, la réalité virtuelle a permis d'analyser la perception des effets donnés au ballon [Craig2006]. Dans cette étude, des gardiens de but devaient prévoir la position finale du ballon d'après des trajectoires avec et sans effet. Placés au centre du but, les gardiens devaient alors dire si oui ou non le ballon rentrait dans le but. Les résultats ont montré que l'application d'un effet Magnus sur le ballon provoquait chez les gardiens un jugement erroné sur sa position finale.

Par ailleurs, Ranganathan et Carlton ont utilisé la réalité virtuelle au baseball. Ces auteurs se sont intéressés à la capacité des batteurs à distinguer le type de jet d'un lanceur en EV. Les batteurs devaient prédire le type de lancer pour deux modes de réponse. Dans un cas, les joueurs avaient pour consigne d'effectuer un mouvement de frappe avec leur batte face à

une balle virtuelle (mouvement). Dans un second cas, les batteurs devaient simplement prédire verbalement le type de lancer (jugement). Les auteurs ont démontré que les joueurs de baseball prédisaient avec plus d'efficacité le type de lancer lors de la condition de jugement. Toutefois, la littérature sur ce sujet n'est pas unanime [Farrow2003, Vignais2009].

La principale critique que l'on peut émettre à l'égard de cette étude concerne la notion de présence. Les auteurs n'ont pas comparé le geste de frappe (dans la condition couplée) avec le même geste dans le monde réel. Sans cette comparaison et cette validation du degré de présence, il est possible d'imaginer que les sujets ne réagissent pas de la même manière face à un lancer réel et face à l'animation en EV.

1.3.2 La tâche d'interception et la notion de présence

Comme nous venons de le voir, de nombreuses études menées en EV se sont intéressées à l'analyse d'une tâche d'interception. Cependant peu d'entre elles ont validé un degré de présence suffisant des sujets. Or, nous avons précédemment défini que, pour l'analyse d'une situation sportive, le sentiment de présence est optimal lorsque la performance de l'individu dans le monde virtuel est identique à la performance pour la même tâche dans le monde réel [Zahorik1998]. Il est donc impératif que cette comparaison de performance en EV et en environnement réel précède l'analyse de la PIV lors de la tâche d'interception.

En ce qui concerne l'évaluation de la présence en EV, Ma et Kaber ont analysé un échantillon de facteurs pouvant influencer la présence et la performance au cours d'une situation virtuelle de lancer-franc au basket (figure 1.14) [Ma2006].

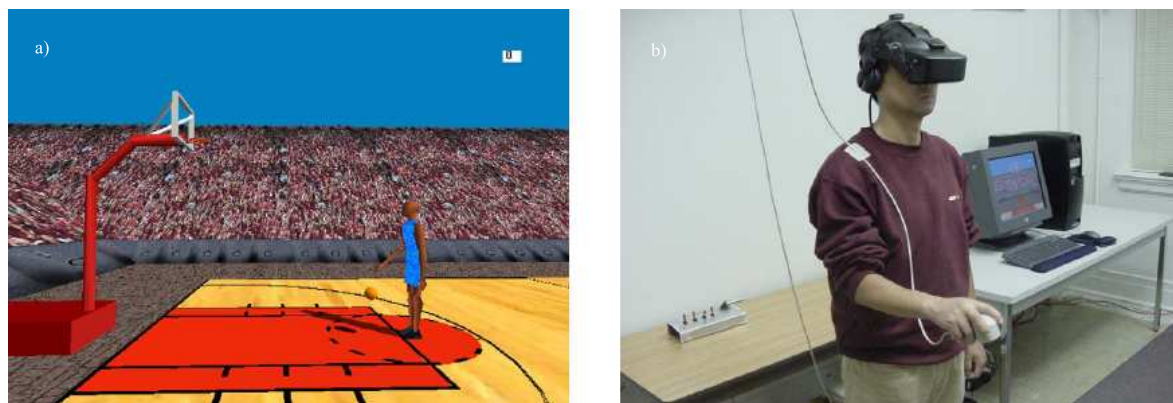


Fig. 1.14 - Evaluation de la relation entre présence et performance en EV. a) Simulation d'un lancer-franc au basket avec point de vue exocentré (sur la ligne de touche). b) Photo de l'opérateur immergé dans la tâche de lancer-franc virtuel (d'après [Ma2006]).

Le point de vue du sujet, les signaux auditifs ainsi que la qualité graphique de l'arrière-plan ont été manipulés pour voir leur influence réciproque sur la présence et la performance. Les résultats montrent que le point de vue et les signaux auditifs influent sur la mesure subjective de la présence des sujets alors qu'aucune corrélation n'apparaît entre présence et performance. De plus, il n'y a pas d'effet significatif de la qualité de l'arrière-plan sur l'évaluation de la présence. Les auteurs remarquent que leurs conclusions sur ce point ne confirment pas les données de Barfield et al. qui avaient montré que l'augmentation du réalisme visuel d'un environnement de

synthèse augmentait la présence des sujets immergés [Barfield1995b]. Ma et Kaber suggèrent alors qu'il existe un seuil de réalisme visuel à partir duquel la présence est suffisante. Au-delà de ce seuil, il apparaîtrait difficile de quantifier des différences dans la mesure de la présence. Il faut ajouter ici que les auteurs n'ont pas comparé la performance des sujets en EV et en environnement réel. Or il est tout à fait possible de penser que l'EV généré par Ma et Kaber induit un sentiment de présence suffisant pour la performance, ce qui expliquerait l'absence de relation entre présence et performance dans cette étude.

En ce qui concerne notre cadre d'étude, l'analyse de la PIV du gardien de but de handball en EV, il nous faudrait montrer au préalable que cette tâche est la même dans le monde réel et dans le monde synthétique choisi. Ceci afin de valider un degré de présence suffisant. A ce sujet, Bideau et al. ont validé le niveau de présence de gardiens de but de handball immergés dans un monde virtuel au cours d'une série d'expérimentations [Bideau2003b]. Ces auteurs ont voulu évaluer le degré de présence des gardiens de but en EV en comparant le mouvement des gardiens dans le monde réel (face à des tirs réels) et dans le monde virtuel (face aux mêmes mouvements de tir animés). L'étude de Bideau et al. se découpe donc en deux parties (figure 1.15). Dans la première partie, un système optoélectronique (Vicon 370, Oxford Metrics, Oxford, UK) a permis d'effectuer une capture de mouvement simultanée des actions de tir de joueurs de handball et des mouvements d'interception correspondants des gardiens de but. Dans une seconde partie, les gardiens sont immergés dans un monde synthétique où les mouvements de tirs réels ont été utilisés pour animer un humanoïde de synthèse. Les mouvements de parade des gardiens sont alors capturés. A partir de là, les auteurs sont en mesure de comparer la performance des gardiens dans le monde réel et dans le monde virtuel. Les résultats montrent que les mouvements des gardiens de but sont similaires pour les deux environnements. Ce constat suggère donc que l'environnement de synthèse choisi par les auteurs entraîne un degré de présence suffisant pour l'analyse de cette situation sportive. C'est pourquoi nous utiliserons ce cadre de travail pour l'analyse de la PIV du gardien de but de handball.

Nous allons maintenant expliciter la genèse de l'environnement de synthèse choisi et notamment le processus d'animation permettant d'obtenir un mouvement de tir virtuel suffisamment réaliste pour l'analyse de la PIV du gardien de but de handball.

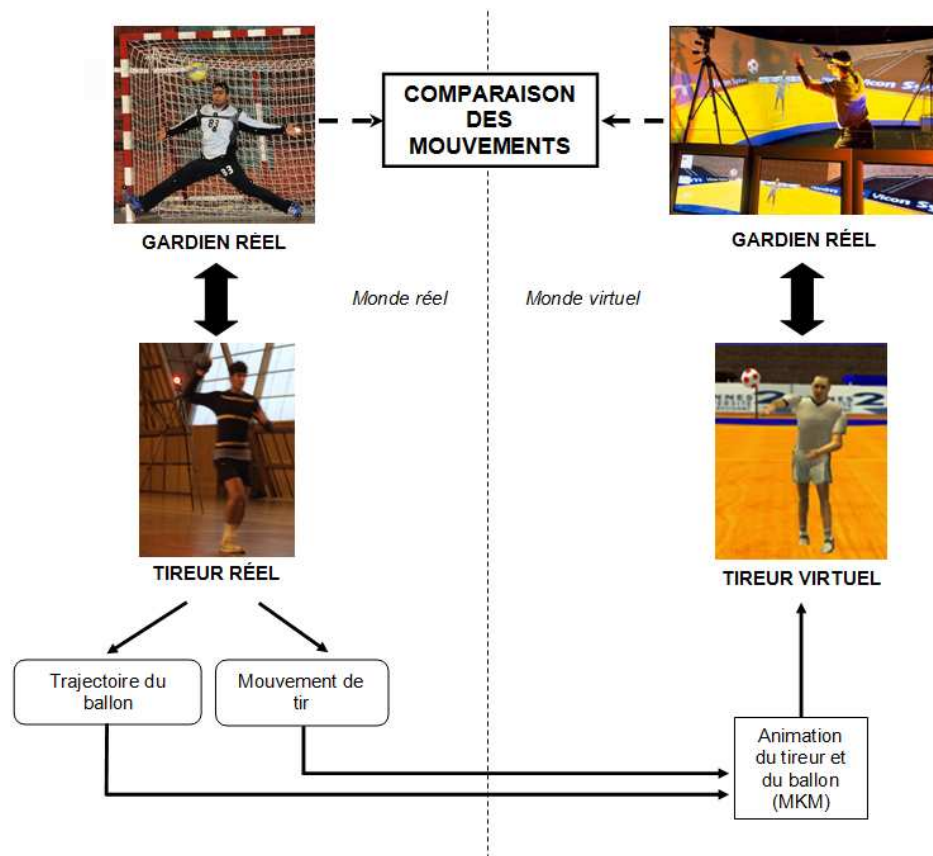


Fig. 1.15 - Protocole expérimental permettant d'évaluer le niveau de présence de gardiens de but de handball en EV (d'après [Bideau2003b]).

1.4 L'animation du mouvement

Lorsqu'on utilise les EV pour l'analyse sportive, il est nécessaire de s'intéresser à la façon dont le mouvement va être représenté dans le monde synthétique. Dans le cadre de l'analyse de la PIV du gardien de but de handball, il nous faut modéliser un mouvement de tir pour savoir quels sont les indices visuels prélevés par le gardien de but. Ce mouvement de tir se décompose en deux sous-parties : le tireur et le ballon. Il nous faut donc tout d'abord modéliser et représenter le tireur grâce à un humanoïde de synthèse. Plusieurs techniques existent aujourd'hui pour cela.

1.4.1 La représentation des humanoïdes de synthèse

Plusieurs méthodes existent actuellement pour modéliser le corps humain. Même si de plus en plus d'études s'intéressent à la modélisation du système musculo-squelettique [Vigouroux2005, Bonnefoy2008], il est actuellement très difficile de représenter le corps humain et ses nombreux composants (os, organes, muscles, tissus mous, peau, etc.) dans son ensemble. Il faut donc choisir une représentation simplifiée du corps humain qui préserve les caractéristiques essentielles du mouvement. Dans le domaine de l'animation, une structure hiérarchique du corps est utilisée. Elle représente chaque os comme un arc de cette hiérarchie avec des noeuds correspondant aux

articulations rattachant les os entre eux. Le squelette est ainsi représenté par des solides rigides articulés et l'animation d'un humanoïde s'effectue alors en utilisant les degrés de liberté de rotation de chaque segment du squelette au cours du temps [Kulpa2005a]. Cette représentation hiérarchique fait d'ailleurs l'objet d'une norme (www.h-anim.org).

Cependant, la représentation hiérarchique, fondée sur l'état des articulations, ne garantit pas que les angles utilisés sur un squelette particulier s'appliquent parfaitement sur un autre. Les différences morphologiques et anthropométriques remettent en cause la valeur des angles à appliquer. Prenons l'exemple de deux gardiens de but de handball animés en EV avec des longueurs de bras et d'avant-bras différentes. Pendant que le premier gardien de but synthétique (avec les membres les plus courts) arrêtera le ballon avec ses deux mains, le second aura ses deux mains situées plus hautes que le ballon (le contact se faisant au niveau du poignet par exemple). Pour éviter ce type de problème, certains auteurs ont proposé une représentation normalisée du squelette [Ménardais2003]. En plus d'une structure hiérarchique classique, cette représentation distingue trois types de chaîne cinématique (figure 1.16) :

- les membres sont modélisés comme un seul segment de longueur variable (en rouge),
- la colonne vertébrale est représentée par des splines (en bleu),
- et les autres segments, nommés segments normalisés, sont composés d'un seul segment (en noir).

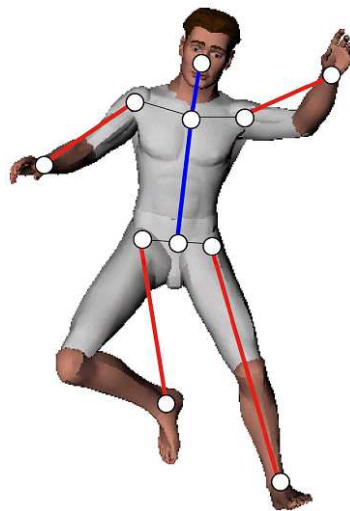


Fig. 1.16 - Représentation normalisée du squelette [Kulpa2005a].

L'avantage de cette représentation provient du fait qu'elle intègre des données à la fois angulaires et cartésiennes. En effet chaque chaîne cinématique CC composée des segments S_j est calculée à partir des positions cartésiennes de ses articulations distale E et proximale R . Le vecteur $\overrightarrow{(R, E)}$ est alors normalisé en le divisant par la somme des longueurs initiales lg_j des segments S_j appartenant à la chaîne CC :

$$CCNorm = \frac{E - R}{\sum_j lg_j} \quad (1.1)$$

Grâce à cette représentation, il suffit d'inverser le processus de normalisation pour retrouver instantanément la position de l'extrémité pour une nouvelle morphologie d'humanoïde. En effet, la nouvelle position E' de l'articulation distale par rapport à l'articulation proximale est calculée

en multipliant la chaîne cinématique normalisée par les longueurs lg'_j des segments de la nouvelle morphologie :

$$E' = CCNorm \times \sum_j lg'_j \quad (1.2)$$

La figure 1.17 montre que les articulations des genoux, coudes et vertèbres ne sont pas intégrées dans la représentation normalisée. Mais leur position peut être retrouvée à tout moment lorsque c'est nécessaire. Des solutions analytiques sont alors utilisées (figure 1.17) :

- pour les membres, les calculs se font à partir d'un repère définissant à la fois le vecteur $(\vec{R}, \vec{E})$ et le demi-plan dans lequel se trouve l'articulation manquante (genou ou coude). La norme du vecteur $(\vec{R}, \vec{E})$, qui définit l'aspect plus ou moins plié de la jambe, est aussi utilisée. En effet, cette norme représente un pourcentage de la longueur totale du membre,
- pour le rachis, la position des vertèbres est directement retrouvée en discrétisant les splines qui représente la colonne vertébrale.

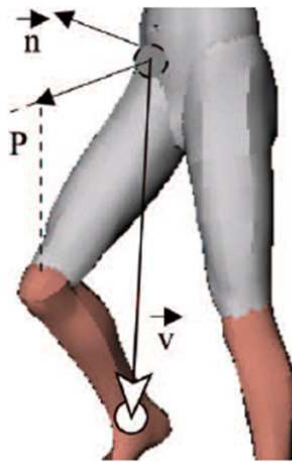


Fig. 1.17 - Représentation normalisée de la jambe. Le demi-plan dans lequel se trouve le genou est indirectement défini par le repère de cette jambe (axe P). Les coordonnées locales du genou sont alors retrouvées analytiquement [Kulpa2005b].

Enfin, la position de la racine du squelette est normalisée par la longueur des jambes, ce qui engendre le placement automatique du personnage à la bonne hauteur par rapport au sol. C'est cette représentation hiérarchique et normalisée des humanoïdes de synthèse qui a été utilisée dans le cadre de travail défini par Bideau et al. [Bideau2003a]. Intéressons-nous à présent à la manière d'appliquer le mouvement sur notre représentation d'humanoïde.

1.4.2 La représentation du mouvement

Il existe plusieurs méthodes pour représenter le mouvement. Historiquement, c'est la représentation image par image [Marrey1894] qui a été utilisée (chronophotographie). La décomposition du mouvement en une succession de postures à intervalle de temps fixe a permis de décrire et

d'analyser les différentes phases d'un mouvement (figure 1.18). Cependant, ce type de représentation ne peut s'appliquer dans le domaine de l'animation où la fréquence d'animation va varier en fonction de la complexité de la scène à calculer.

La représentation par postures-clés simplifie l'animation en spécifiant uniquement les postures jugées importantes au cours du mouvement. Le choix de ces postures-clés peut être fait manuellement ou automatiquement. Ainsi, Assa et ses collègues proposent d'effectuer cette sélection en tenant compte des positions, des angles et des vitesses angulaires et cartésiennes de chaque articulation [Assa2005]. Les séquences d'animation restantes sont alors calculées par interpolation (cartésienne ou angulaire). Cette méthode, très générique, peut s'appliquer sur n'importe quelle représentation du squelette même si la plus utilisée reste la représentation angulaire. Cependant, le résultat de l'animation est dépendant de plusieurs facteurs comme le type d'interpolation utilisée, l'intervalle d'échantillonnage considéré ou encore le choix des postures-clés, ce qui rend cette représentation lourde et coûteuse en temps de main d'œuvre d'animateur.

Afin de faire ressortir les propriétés dynamiques contenues intrinsèquement dans chaque trajectoire articulaire, il est possible d'utiliser une représentation fréquentielle du mouvement. Après avoir capturé un mouvement, on utilise le traitement du signal pour le décomposer (principalement les angles d'Euler) sous forme de séries de Fourier ou d'ondelettes. L'ensemble de la trajectoire est ensuite représenté par une suite finie de paramètres. Certains de ces paramètres peuvent être utilisés pour générer de nouveaux mouvements en interpolant dans le domaine fréquentiel [Unuma1991]. Cependant, même si cette méthodologie s'applique assez bien à des mouvements périodiques (locomotion), elle ne permet pas de contrôler le mouvement de manière intuitive.

Plutôt que de représenter un mouvement, certains auteurs ont proposé de produire ce mouvement afin de maîtriser toutes les étapes de la création. C'est notamment le cas des captures de mouvement que nous utiliserons dans ce travail de thèse.

1.4.3 La production du mouvement

Une première méthode pour créer un mouvement consiste à utiliser les connaissances acquises durant des analyses cinématiques (forme des trajectoires) du mouvement. On parle alors de modèle descriptif. De telles connaissances n'existent que pour des mouvements très fréquemment analysés comme la marche [Olivier2008], la course [Novacheck1998] ou des mouvements de pointage manuel [Soukoreff2004].

Le mouvement humain répond également à des lois de la mécanique, il est donc primordial d'intégrer ces lois pour la production d'un mouvement réaliste. C'est l'objectif des modèles générateurs qui sont aussi descriptifs, mais d'un point de vue mécanique. À partir du formalisme de Lagrange ou de Newton, il est possible de dériver un modèle mécanique de tout système polyarticulé [Nougaret1996]. Ce modèle est alors capable d'intégrer les forces et les couples qui agissent sur le système pour calculer la configuration du système au pas de temps suivant. Bien que ce modèle soit difficile à contrôler, il est possible de définir des contrôleurs du système qui vont calculer les forces et les couples nécessaires à la résolution d'une tâche donnée [Lecerf1994]. En ce qui concerne le mouvement humain, les lois de la mécanique n'interviennent que partiellement dans le processus de génération du mouvement. Or un mouvement peut être valide d'un point de vue mécanique sans paraître naturel à l'œil humain. . .

En robotique, une autre méthode appelée "cartes de chemin probabiliste" a permis de manipu-

ler des objets dans des environnements très contraints [Laumond2005]. Cette méthode consiste à travailler dans l'espace des configurations E formé par tous les degrés de liberté du système. En choisissant aléatoirement des points de l'espace E et en ne gardant que ceux qui correspondent aux critères (par exemple, ne pas être en collision avec un élément de l'environnement), il est possible de relier ces points par des arcs qui doivent aussi vérifier les contraintes.

Mais la meilleure façon de produire et de représenter un mouvement réaliste en animation consiste en l'utilisation de données réelles du mouvement. Il s'agit alors d'effectuer une capture de mouvements pour animer un humanoïde de synthèse à partir de ces mouvements. Les premiers systèmes de capture de mouvements étaient de type vidéographique et servaient à analyser le mouvement humain pour déterminer les facteurs responsables de la performance motrice [Marrey1894] (figure 1.18).

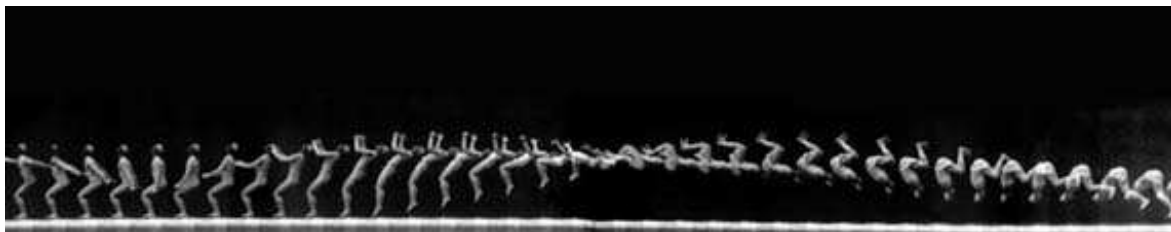


Fig. 1.18 - Etude de Marey sur le saut périlleux [Marrey1894].

Plus récemment, des systèmes de capture de mouvement en 3D qui respectent l'intégrité du sujet ont été créés. Ces systèmes non invasifs enregistrent précisément le déplacement d'un individu au cours du temps grâce à un ensemble de marqueurs positionnés sur la peau de l'individu. Différents types de systèmes de captures de mouvement ont ainsi été définis [Menache2000, Moeslund2006] :

- les systèmes dits "intérieur-sortant" utilisent des récepteurs placés sur le corps pour enregistrer des données émises par des sources externes. C'est le cas des systèmes magnétiques qui émettent un champ magnétique ambiant pour calculer la position de récepteurs placés sur la peau,
- les systèmes dits "intérieur-entrant" utilisent des récepteurs et des sources rattachés directement au sujet. C'est le cas des systèmes d'acquisition mécaniques comme les accéléromètres par exemple,
- les systèmes dits "extérieur-entrant" se servent de sources placées sur la peau du sujet en mouvement pour enregistrer des données cinématiques via des récepteurs externes. Le système optoélectronique est le plus connu dans cette catégorie. L'acquisition des données s'effectue par l'intermédiaire de caméras infrarouges (récepteurs externes) qui enregistrent le déplacement de marqueurs réfléchissants placés sur des repères anatomiques (sources). C'est ce type de système qui a été utilisé par Bideau et al. [Bideau2003a] pour animer un mouvement de tir au handball (figure 1.19).

L'animation d'un humanoïde de synthèse se faisant à partir des noeuds de son squelette, il a fallu mettre au point un certain nombre de calculs pour retrouver les données cinématiques des centres articulaires à partir de la position des marqueurs externes placés sur des repères anatomiques [Ménardais2002]. Ces calculs ont aussi permis de déterminer la position des marqueurs occultés durant la capture de mouvement.

Les différentes approches vues jusqu'à présent sont fondées sur la connaissance antérieure de mouvements capturés. D'après ces approches, pour calculer de nouveaux mouvements, il faut

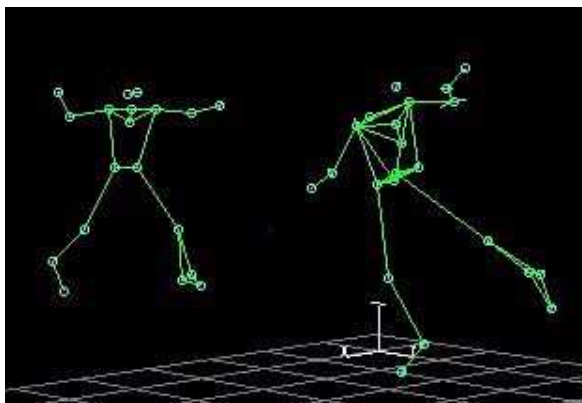


Fig. 1.19 - Capture de mouvement reconstruite pour l'animation du mouvement de tir [Bideau2003b].

trouver des opérateurs capables d'adapter ces données à de nouvelles conditions. Cependant, il apparaît difficile de mettre au point une méthode capable de reproduire l'infinie variété et complexité des mouvements naturels possibles. Pour pallier cette limite, la combinaison de plusieurs mouvements peut être employée. Cette combinaison peut tout d'abord être gérée par les graphes de mouvements qui vont trouver les meilleures transitions entre chaque posture des mouvements. Générer un mouvement dans ce graphe revient donc à trouver un chemin menant d'une posture courante à une posture souhaitée [Kovar2002]. Il est également possible d'utiliser la méthode du "mélange de mouvements" pour combiner plusieurs mouvements. Cette méthode part de l'hypothèse qu'une posture donnée est le résultat de plusieurs autres (un tir en suspension au handball pourrait être la combinaison d'un mouvement de course, d'un mouvement de saut et d'un mouvement de tir). On définit alors un algorithme permettant de mélanger les postures à chaque pas de temps de manière réaliste (par combinaison linéaire [Park2004]).

1.4.4 Le processus d'animation

Dans l'étude de Bideau et al., le processus d'animation était composé de trois étapes principales [Bideau2003a] :

- dans un premier temps, les données cinématiques du squelette issues de la capture de mouvement de tirs réels étaient chargées dans le module d'animation,
- dans un second temps, une phase de reconstruction permettait de retrouver les points manquants ou occultés durant la capture,
- pour finir, le squelette de l'humanoïde de synthèse était animé grâce à une représentation hiérarchique et normalisée du mouvement (cf. section 1.4.1, p28). Cela a permis d'adapter le mouvement de tir du squelette réel à la taille et à la morphologie du squelette de l'humanoïde de synthèse. Dans cette étude, les auteurs se sont cependant attachés à reproduire un humanoïde de synthèse avec une morphologie identique à celle du personnage réel. Au cours de cette étape, plusieurs contraintes pouvaient être spécifiées comme le contact entre le pied et le sol virtuel pendant la phase de course.

Le module d'animation, nommé MKM (Manageable Kinematic Motions), a été validé à travers plusieurs études scientifiques [Kulpa2005a, Kulpa2005b, Multon2008]. Il s'agit en fait

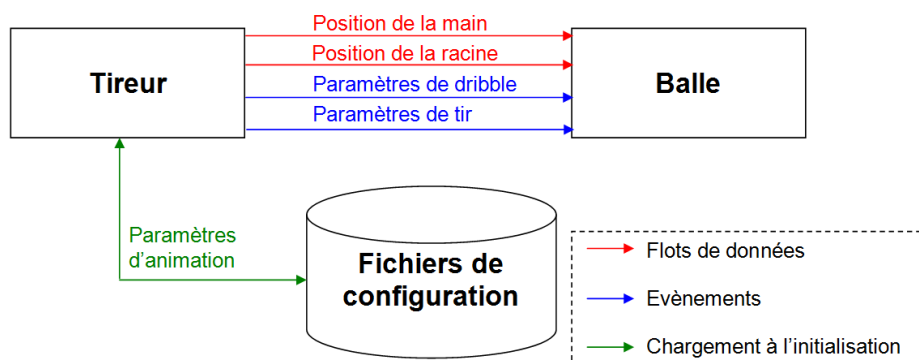


Fig. 1.20 - Description des différents modules d'animation du mouvement de tir virtuel. D'après [Bideau2003b].

d'une librairie d'animation des humanoïdes de synthèse en temps-réel. Dans le cadre de l'étude de Bideau et al., l'ensemble des tirs virtuels était ensuite intégré dans une plate-forme de réalité virtuelle (OpenMask) qui permet l'interaction entre différents éléments animés [Margery2002]. Dans le cas présent, les différents éléments animés concernent le mouvement de tir et le ballon de handball (figure 1.20).

Ainsi c'est le processus d'animation MKM qui sera repris au cours de ce travail de thèse. En effet, MKM a permis d'animer en EV des mouvements de tir au handball de façon réaliste [Bideau2003b]. Confronter un gardien de but de handball face à ce type d'actions nous permettra donc d'analyser la PIV du gardien de but de façon standardisée, tout en respectant le degré de présence des sujets.

Synthèse et objectifs

L'état de l'art nous a permis de démontrer que lors d'un duel entre un gardien de but et un tireur au handball, la PIV est un critère déterminant pour comprendre la performance. Plusieurs méthodes permettent aujourd'hui de l'analyser. Nous avons cependant pu voir que les méthodes actuelles ne permettent pas de répondre de manière efficace à la problématique de la PIV. En effet, plusieurs contraintes limitent leur utilisation. Parmi celles-ci, nous avons vu que les techniques fondées sur la vidéo diminuent le nombre d'informations visuelles du fait de la bidimensionnalité de l'affichage. De plus, ces techniques ne permettent pas d'adapter le point de vue du sujet en temps réel. Les études de terrain, quant à elles, sont limitées par la reproductibilité et la standardisation du protocole expérimental.

Par conséquent, il nous paraît nécessaire de concevoir et d'appliquer une nouvelle méthodologie fondée sur l'utilisation des EV afin de dépasser ces limites. En effet, la réalité virtuelle comporte de nombreux avantages pour l'étude de la PIV d'un protagoniste sportif comme l'affichage tridimensionnel, l'adaptation du point de vue ou la reproductibilité des situations. Néanmoins l'utilisation de la réalité virtuelle entraîne de nouvelles questions, notamment au niveau du degré d'implication du sujet immergé dans un monde synthétique (notion de présence). Bideau et al. ont ainsi développé un environnement de synthèse permettant d'obtenir un haut degré de présence pour l'analyse du duel entre un gardien et un tireur au handball [Bideau2003b]. De ce fait, aux vues de l'état de l'art sur les différentes techniques d'animation du mouvement en EV, nous nous appuyerons sur le cadre de travail fixé par Bideau et al. pour mener nos expérimentations.

Bien que l'utilisation de la réalité virtuelle nous apparaisse comme la méthode la plus pertinente pour l'analyse de la PIV du gardien de but de handball, il existe d'autres techniques référencées dans la littérature. Parmi celles-ci, les techniques fondées sur l'utilisation de la vidéo sont les plus communément employées. Ainsi, il nous semble tout d'abord nécessaire d'évaluer l'efficacité de notre méthodologie en la comparant avec une technique d'analyse employant la vidéo. Ceci fera l'objet d'une première étude décrite dans le chapitre 2.

Après avoir démontré l'avantage des EV sur la vidéo pour l'analyse de la PIV du gardien de but de handball, nous nous intéresserons à la mise en place de cette méthodologie. Plus précisément, l'influence des éléments graphiques de l'action de tir virtuelle sera étudiée. Nous déterminerons donc quels niveaux de détails graphiques permettent d'induire un niveau de présence suffisant pour le gardien de but immergé dans l'environnement de synthèse. Pour cela nous évaluerons

l'influence de la qualité graphique des informations cinématiques du mouvement de tir virtuel sur la perception du gardien de but de handball.

Nous appliquerons enfin notre méthodologie en EV pour analyser la PIV du gardien de but de handball. En effet, lors d'un face à face avec un joueur de handball, le gardien de but a accès à un grand nombre d'informations visuelles pour orienter son action. Cette prise d'informations peut s'effectuer sur le tireur et/ou sur le ballon. Grâce à l'utilisation de la réalité virtuelle, il nous est possible d'isoler chacune de ces deux sources d'informations. L'objectif de cette dernière étude est donc d'identifier les sources d'informations visuelles principalement utilisées par le gardien de but de handball.

Par ailleurs, il existe différents modes de réponses pour analyser la PIV que l'on peut catégoriser en deux grandes familles : les tâches en jugement et les tâches en mouvement. Or, à notre connaissance, il n'existe pas de consensus sur l'utilisation privilégiée de l'une ou l'autre tâche [Regan2000, Pelli2001, Farrow2003]. Nous nous proposons donc de tester chacune de ces deux tâches d'exécution à travers l'ensemble des études de cette thèse.

Chapitre 2

Analyse comparative de la vidéo et des environnements virtuels

L'état de l'art nous a montré qu'il existait plusieurs méthodes d'analyse de la PIV dans le domaine sportif telles que l'utilisation de questionnaires ou de séquences vidéo. Dans ce chapitre nous nous proposons donc de mettre en place un protocole expérimental permettant de comparer notre méthodologie fondée sur l'utilisation de la réalité virtuelle et une technique employant la vidéo. 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 par exemple. 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 dans la scène virtuelle. De plus, un cadre de travail en EV a permis de valider l'utilisation de cette méthode pour l'analyse du duel entre un gardien et un tireur au handball [Bideau2004]. Nous comparerons donc ces deux méthodes afin d'évaluer leur influence relative sur la perception du gardien de but de handball.

Plusieurs modes de réponse seront employés au cours de cette analyse comparative et méthodologique. Dans un premier temps, les sujets effectueront une tâche de jugement au cours de laquelle perception et action ne seront pas couplées. Puis nous utiliserons un mode de réponse fondé sur une tâche motrice en temps réel pour induire un couplage entre la perception et l'action du gardien de but.

2.1 Objectifs

Dans un premier temps, nous comparerons l'efficacité de la méthode fondée sur la vidéo par rapport à une nouvelle méthodologie utilisant l'animation d'un tireur virtuel. Cette analyse comparative et méthodologique se fonde sur l'extraction des paramètres cinématiques d'un mouvement de tir réel (figure 2.1). En confrontant les gardiens de but de handball à la séquence de tir animée en EV et à la même séquence sous forme de clip vidéo (toutes deux issues de l'action de tir réel), nous serons en mesure d'établir les avantages et les inconvénients de ces deux méthodes d'investigation. Si les résultats obtenus par les gardiens de but de handball face à la séquence filmée sont similaires à ceux obtenus face à l'animation en EV, cela signifiera que les deux techniques sont aussi efficaces pour l'analyse de la PIV du gardien de but de handball. Si les résultats sont significativement différents, cela montrera les limites de l'une d'elle par rapport à l'autre.

Par ailleurs, nous avons pu voir que différents modes de réponse sont utilisés dans la littérature pour analyser la PIV des sportifs. Nous effectuerons donc cette analyse comparative et méthodologique pour deux modes de réponse : une tâche de jugement et une tâche de mouvement. La démarche de cette première étude est schématisée par la figure 2.1.

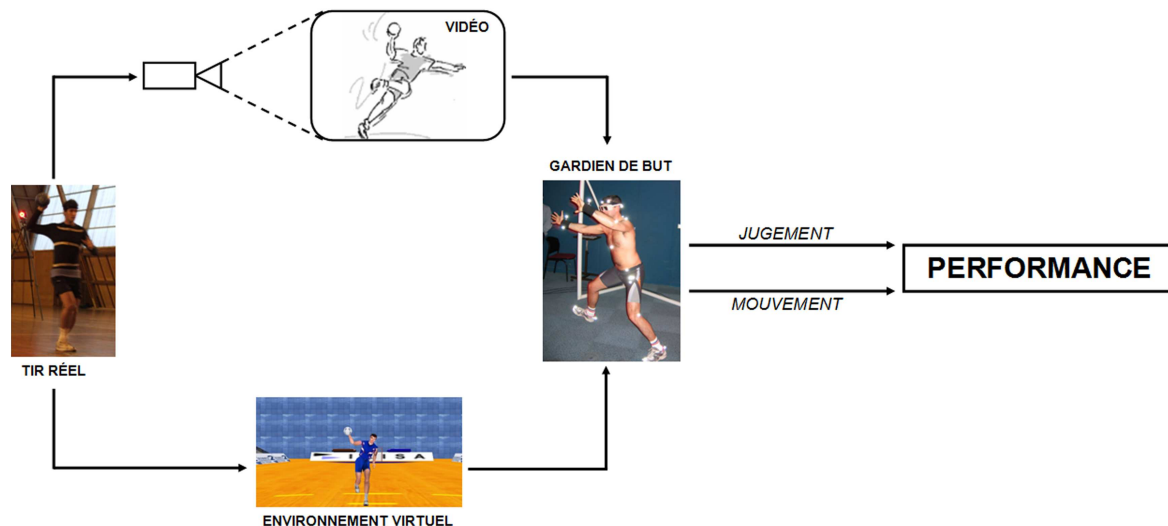


Fig. 2.1 - Schématisation de l'objectif de l'étude 1. La performance des gardiens de but de handball sera analysée face à deux techniques d'analyse de la PIV (vidéo et réalité virtuelle) et pour deux modes de réponse (jugement et mouvement).

2.2 Capture de mouvement, vidéo et animation des tirs en environnement virtuel

2.2.1 Capture de mouvement et acquisition vidéo des actions de tir

Afin d'animer le personnage de synthèse et le ballon en EV, de réelles actions de tir ont été enregistrées. Pour cela, un joueur de handball de niveau national (évoluant en LNH) a participé à cette partie de l'expérimentation (24ans, 1.84m, 95kg). Ce joueur a été informé du déroulement de l'expérimentation et a donné son accord pour y participer.

Les données cinématiques tridimensionnelles des tireurs ont été acquises grâce au système optoélectronique Vicon MX40 (Oxford Metrics, Oxford, UK) composé de 12 caméras infrarouges à haute résolution (4 Mpixels). Ces caméras infrarouges, séquencées à 100Hz, enregistraient la position de marqueurs sphériques réfléchissants positionnés sur le corps du sujet (figure 2.2). De plus, une caméra numérique Canon HV30 haute définition (Canon, Tokyo, Japon) placée dans le milieu du but et séquencée à 25Hz a permis de filmer les actions de tir (figure 2.2).

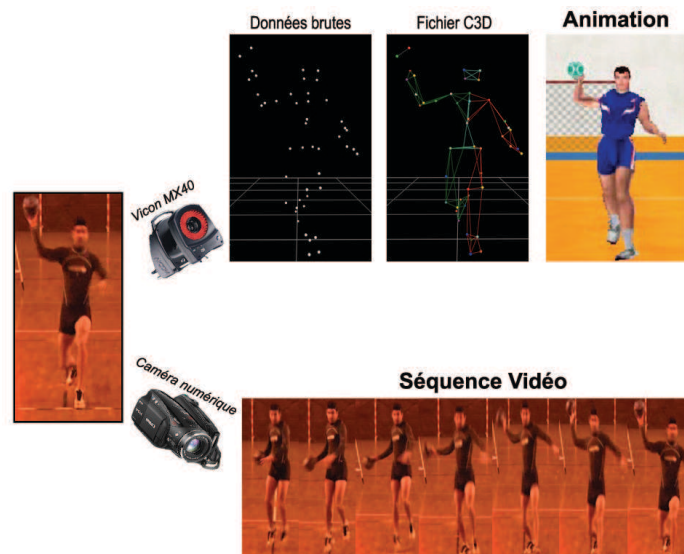


Fig. 2.2 - Processus de création de l'animation virtuelle et de la séquence vidéo. L'action du tireur est enregistrée par l'intermédiaire du système Vicon MX40 sous forme de données brutes avant d'être labellisée (fichier C3D) puis texturée pour l'animation virtuelle. Dans le même temps, l'action de tir est filmée par l'intermédiaire d'une caméra numérique afin de produire la séquence vidéo.

Le tireur était équipé de 43 marqueurs réfléchissants placés sur des repères anatomiques standardisés (figure 2.3). Les différentes positions de ces marqueurs anatomiques sont résumées dans le tableau 2.2.1. Tous les marqueurs n'interviennent pas dans les calculs ultérieurs. En effet, les marqueurs repérés en vert sur la figure 2.3 servent à créer une dissymétrie entre le côté droit et le côté gauche du sujet. Cela permet de faciliter le traitement des données lors de la reconstruction et de la labellisation des marqueurs.

La reconstruction tridimensionnelle de la position de chaque marqueur au cours du temps ainsi que la labellisation des marqueurs ont été réalisées grâce au logiciel Vicon IQ (Oxford

Marqueurs	Repères anatomiques
RFHD, LFHD	Os frontal côtés droit et gauche
RBHD, LBHD	Os occipital côtés droit et gauche
C7	Processus épineux de la 7 ^{ème} vertèbre cervicale
T10	Processus épineux de la 10 ^{ème} vertèbre thoracique
CLAV	Incisure jugulaire du sternum
STRN	Processus xyphoïde
RBAC	Marqueur dissymétrique sur la scapula droite
RSHO, LSHO	Acromion droit et gauche
RUPA, LUPA	Marqueurs dissymétriques sur le bras droit et gauche
RHUM, LHUM	Épicondyle médial huméral droit et gauche
RRAD, LRAD	Tête du radius droit et gauche
RWRA, LWRA	Processus styloïde radial droit et gauche
RWRB, LWRB	Processus styloïde ulnaire droit et gauche
RCAR, LCAR	3 ^{ème} processus métacarpien de la main droite et gauche
RFWT, LFWT	Épine iliaque antéro-supérieure droite et gauche
RBWT, LBWT	Épine iliaque postéro-supérieure droite et gauche
RKNE, LKNE	Condyle latéral fémoral droit et gauche
RKNI, LKNI	Condyle médial tibial droit et gauche
RTHI, LTHI	Marqueurs dissymétriques sur la cuisse droite et gauche
RANE, LANE	Malléole externe droite et gauche
RANI, LANI	Malléole interne droite et gauche
RHEE, LHEE	Pternion droit et gauche
RTAR, LTAR	Articulation de Lisfranc droite et gauche
RTOE, LTOE	Acropodion droit et gauche

Tab. 2.1 - Repères anatomiques pour le placement des marqueurs externes.

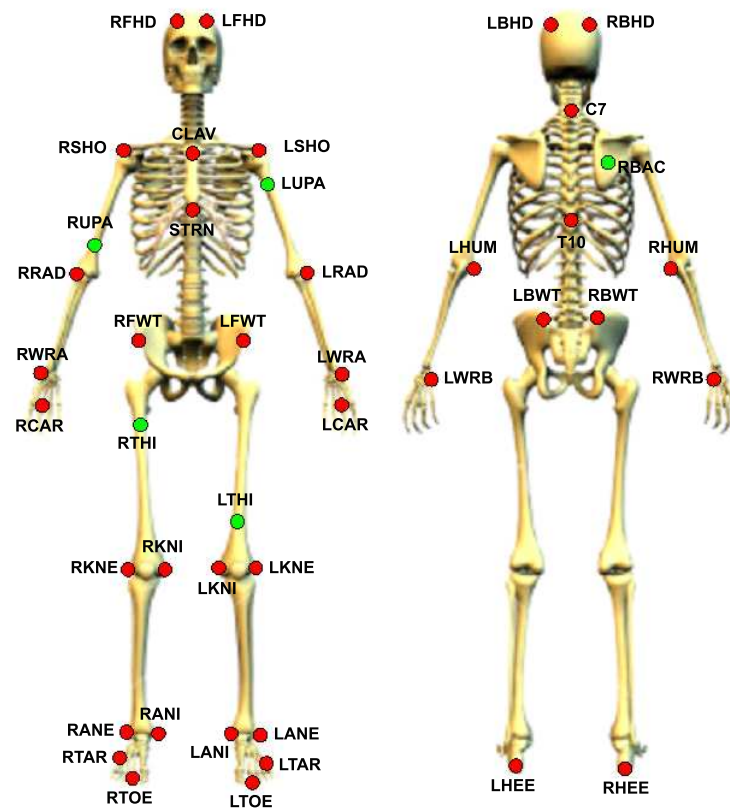


Fig. 2.3 - Modèle de placement des marqueurs. Les marqueurs repérés en rouge permettent le calcul des centres de masse locaux et donc le calcul du centre de masse total du sujet. Les marqueurs repérés en vert servent à provoquer une dissymétrie entre le côté droit et le côté gauche du sujet.

Metrics, Oxford, UK). Des marqueurs réfléchissants positionnés sur le ballon ont également permis de capturer la trajectoire du ballon. Les trajectoires de chaque marqueur ainsi obtenues ont été exportées dans un fichier au format C3D. En ce qui concerne les vidéos des actions de tir, toutes les séquences ont été sauvegardées au format AVI.

La capture de mouvement a eu lieu dans une salle de sport comprenant un terrain de handball. Au cours de l'expérimentation, le joueur effectuait des tirs en appui à 9 m du but. Aucun gardien n'était présent dans le but durant l'expérimentation. Le but de handball était découpé en neuf zones équivalentes (figure 2.4). Ce découpage est issu des travaux de Cottin [Cottin1989]. Le tireur devait préférentiellement viser les six zones latérales (numéros en noir sur la figure 2.4). Il effectuait cinq répétitions par zone dans un ordre aléatoire, ce qui donne un total de :

$$6 \text{ zones} \times 5 \text{ répétitions} = 30 \text{ tirs}$$

Six mouvements de tir, dont la trajectoire du ballon se termine au niveau du centre de la zone visée, ont été sélectionnés et utilisés pour produire les séquences vidéos et les animations de tir en EV.



Fig. 2.4 - But de handball divisé en neuf zones de même taille. Une caméra numérique a permis de filmer les actions de tir. Les numéros en noir correspondent aux zones visées au cours de l'expérimentation.

2.2.2 Animation du tir et projection vidéo

Les données cinématiques issues des captures de mouvement étaient ensuite transmises au module d'animation MKM (IRISA, Rennes, France) (cf. section 1.4.4, p33). Ce module nous a permis d'animer un humanoïde de synthèse représentant un joueur de handball en temps réel. Les trajectoires du ballon virtuel ont été calculées par l'intermédiaire d'un autre module d'animation issu des captures de mouvement du ballon. Il faut noter que les vitesses du ballon étaient très proches pour l'ensemble des tirs ($20 \pm 0.2 m.s^{-1}$). Ceci implique que les temps de vol du ballon étaient sensiblement les mêmes au cours des actions de tir. Les deux modules d'animation (mouvement de tir et trajectoire du ballon) ont été synchronisés en temps réel par le logiciel OpenMask (IRISA, Rennes, France) [Margery2002].

L'animation des tirs s'est déroulée dans un EV constitué d'un terrain de handball à l'intérieur d'une salle de sport virtuelle (figure 2.5). Cet environnement a été créé grâce au logiciel 3DSMAX (Autodesk Inc., San Rafael, CA, EU). La salle de sport virtuelle a été conçue de telle sorte qu'une unité dans l'environnement de synthèse correspond à un mètre dans la réalité. Le terrain virtuel avait donc pour dimension 20 m de large sur 40 m de long. Tous les marquages au sol du terrain virtuel ont également été représentés.



Fig. 2.5 - Aperçu de l'EV constitué d'un terrain de handball avec tribunes à l'intérieur d'une salle de sport.

Un système de réalité virtuelle de type semi-immersif a été utilisé pour projeter l'EV ainsi que les actions de tir. Ce système était constitué de trois vidéoprojecteurs Barco 1208S (Barco, Courtrai, Belgique) dirigés par une station graphique SGI 83 Onyx2 Infinite Reality (Silicon Graphics, Sunnyvale, CA, EU) (figure 2.6). Cette station graphique a par la suite évolué au profit d'une grappe de PC. 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 (cf. figure 2.6, p43). Le même système de projection a servi à afficher les films vidéos des actions de tir sélectionnées.



Fig. 2.6 - Salle de réalité virtuelle composée d'une station de contrôle, de vidéoprojecteurs, d'un écran semi-cylindrique et de lunettes stéréoscopiques.

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.

2.3 Protocole expérimental en environnement virtuel

La population d'étude est constituée de 10 gardiens de but de handball de niveau national. Leurs caractéristiques anthropométriques sont reportées dans le tableau 2.3. Chaque gardien a été informé du déroulement de l'expérimentation et a donné son accord pour y participer. Aucune information concernant le découpage du but en zones n'a été donnée aux gardiens. Tous les gardiens possédaient une vision normale ou considérée comme normale grâce à l'utilisation de lentilles de correction.

Sujets	Âge (ans)	Taille (m)	Masse (Kg)
S1	19	1.95	84
S2	34	1.84	85
S3	18	1.9	71
S4	27	1.88	120
S5	17	1.77	69
S6	23	1.84	85
S7	24	1.81	96
S8	27	1.85	80
S9	30	1.82	89
S10	21	1.85	80
Moyenne	24	1.84	85.9
Écart type	5.52	0.04	14.36

Tab. 2.2 - Caractéristiques anthropométriques des gardiens de but de handball participant à l'expérimentation.

Le système de capture de mouvement Vicon MX40 (Oxford Metrics, Oxford, UK) a été utilisé pour enregistrer la performance des gardiens de but de handball. Afin de permettre l'adaptation du point de vue du gardien en temps réel, quatre marqueurs réfléchissants étaient positionnés au niveau de la tête de ce dernier pendant l'expérimentation. Cette adaptation du point de vue résulte de la synchronisation entre le système Vicon MX40 et la plate-forme de réalité virtuelle. Autrement dit, les informations cinématiques des marqueurs de la tête acquises par le Vicon sont transmises à la plate-forme de réalité virtuelle via un protocole réseau, ce qui permet de situer ces marqueurs dans l'environnement de synthèse en temps réel. Ensuite, une commande informatique autorise la caméra du monde virtuel à suivre la trajectoire du milieu des quatre marqueurs de la tête (figure 2.7). Notons ici que la latence du système est inférieure à 20ms.

Au cours de l'expérimentation, le gardien de but de handball faisait face à deux séries d'actions de tir virtuelles (une série en jugement et une série en mouvement) et deux séries d'actions de tir filmées (une série en jugement et une série en mouvement) (figure 2.2). Toutes ces séries ont été présentées dans un ordre différent pour chaque gardien. Chaque gardien effectuait une

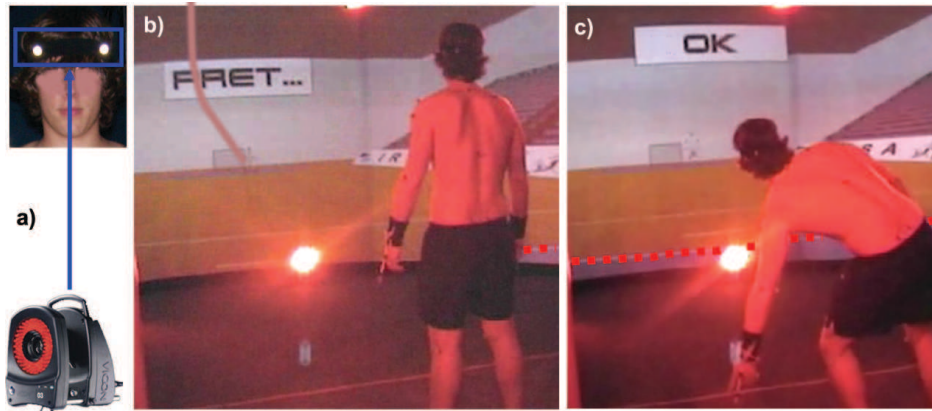


Fig. 2.7 - Principe de l'adaptation du point de vue du gardien en EV. Le système Vicon MX40 enregistre les positions des marqueurs de la tête (a) puis les informations sur ces marqueurs sont transmises à l'EV (b) qui modifie l'emplacement de la caméra virtuelle lorsque la tête bouge (c). Cette adaptation du point de vue est repérée par la zone des 6m qui devient plus visible (ligne pointillée rouge).

session d'échauffement afin de se familiariser avec l'EV et la tâche à effectuer. Durant cette période, le gardien de but était confronté à cinq tirs animés et cinq tirs filmés. Aucun essai réalisé durant la période d'échauffement n'a été retenu pour le traitement des résultats.

Au final, les actions de tir sélectionnées pour l'expérimentation en salle de réalité virtuelle concernent les tirs dans les zones 1, 3, 4 et 6 (figure 2.4). Cependant, l'animation et les séquences vidéos des actions de tir dans les zones 7 et 9 ont tout de même été sauvegardées. En effet, ces tirs ont servi de tirs aléatoires pour augmenter les possibilités de prédiction des gardiens de but lors de l'expérimentation.

2.3.1 La tâche en jugement

Pendant la phase de jugement, le gardien regardait l'action de tir (animation ou film) en restant immobile. Une fois le tir effectué et la trajectoire du ballon coupée à 4m de la ligne de but (donc la trajectoire du ballon est vue pendant 5m soit 250ms), le gardien avait pour consigne de prédire la position finale du ballon dans le but en plaçant l'une de ses mains (droite ou gauche) à l'endroit estimé. Il était demandé aux sujets d'effectuer leur prédiction le plus rapidement possible après la fin de l'action de tir. La position finale de la main dans le but était enregistrée par l'intermédiaire du système Vicon MX40. 11 marqueurs réfléchissants étaient donc nécessaires pour l'enregistrement de la tâche de jugement : quatre sur la tête (adaptation du point de vue, cf. figure 2.7, p45), trois sur la main droite et quatre sur la main gauche. Il y avait un marqueur de plus sur la main gauche (marqueur de dissymétrie PHAL) afin de distinguer la main droite de la main gauche au cours de la reconstruction et de la labellisation. De plus, du fait de la configuration de la salle de réalité virtuelle, il y avait un risque d'occultation des marqueurs RCAR et LCAR habituellement situés sur le dos des mains gauche et droite au niveau du 3^{ème} processus métacarpien (cf. section 2.2.1, p39). Afin d'être sûr de capturer tout au long de l'expérimentation la position de ces marqueurs, nous les avons positionnés à l'extrémité du 3^{ème} métacarpien par l'intermédiaire d'une tige rigide rattachée à la main (figure 2.9a).

Les actions de tirs dans les zones 1, 3, 4 et 6 ont été répétées trois fois de façon aléatoire.

Les tirs dans les zones 7 et 9 ont servi de tirs supplémentaires. Au total, lors de la tâche de jugement, chaque gardien était donc confronté à :

$$((4 \text{ zones} \times 3 \text{ répétitions}) + 4 \text{ tirs aléatoires}) \times 2 \text{ conditions} = 32 \text{ tirs}$$

2.3.2 La tâche en mouvement

Durant la série d'expérimentations en mouvement, le gardien avait pour consigne de réagir aux actions de tir (virtuelles ou filmées) de la même façon qu'en situation de match. Ces actions étaient animées avec un joueur de handball virtuel effectuant un tir à 9m du but.

Ainsi, les actions de tirs dans les zones 1, 3, 4 et 6 ont été répétées trois fois de façon aléatoire. Les tirs dans les zones 7 et 9 (répétés deux fois chacun) ont servi de tirs supplémentaires pour éviter que les gardiens ne s'habituent aux mêmes zones. Au total, lors de la tâche en mouvement, chaque gardien était donc confronté à :

$$((4 \text{ zones} \times 3 \text{ répétitions}) + 4 \text{ tirs aléatoires}) \times 2 \text{ conditions} = 32 \text{ tirs}$$

L'action de parade du gardien de but de handball était alors enregistrée grâce au système Vicon MX40. Pour cela, 44 marqueurs réfléchissants ont été aposés sur le corps du gardien en se basant sur le même modèle que dans la section 2.2.1 (p39). La seule différence avec ce modèle concerne les marqueurs de la main. Ces derniers étaient positionnés de la même façon que dans la section 2.3.1 afin de faciliter le traitement. Ce qui explique qu'il y ait un marqueur de plus pour ce dernier modèle (marqueur PHAL). Cela nous a permis de calculer l'erreur radiale en mouvement.

En plus de fournir l'adaptation du point de vue du sujet en temps réel, la synchronisation du système Vicon MX40 avec la plate-forme de réalité virtuelle nous a permis d'effectuer la détection de collision en temps réel entre le corps du gardien de but immergé et la trajectoire du ballon virtuel.

2.3.2.1 Détection de collision

Le processus de détection de collision a permis de savoir, en temps réel, si le gardien de but de handball immergé avait arrêté ou non le ballon. Ce processus est fondé sur une représentation cylindrique et sphérique du corps du gardien de but. En effet, comme le montre la figure 2.8, les segments du tronc, de la ligne des épaules, des bras, des avant-bras, des cuisses, des jambes et des pieds sont représentés par des cylindres alors que ceux des mains et de la tête sont schématisés par des sphères. La position en temps réel de ces cylindres et de ces sphères est calculée à partir des centres articulaires et des extrémités corporelles du squelette du gardien. Ces éléments sont obtenus à partir de calculs effectués sur les marqueurs externes capturés par le Vicon MX40 (Annexe A) et de la table anthropométrique de de Leva [de Leva1996]. Les calculs pour déterminer les centres articulaires de l'épaule et de la hanche sont issus respectivement des travaux de Reed et al. [Reed1999] et de Leardini et al. [Leardini1999]. L'utilisation des centres articulaires et des extrémités corporelles pour le calcul du modèle de détection de collision est résumée dans le tableau de l'annexe B.

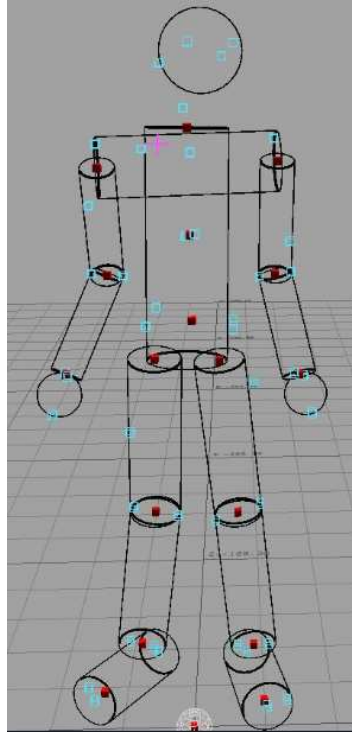


Fig. 2.8 - Modèle de détection de collision utilisé lors des expérimentations en mouvement. Cette représentation simplifiée permet de savoir en temps réel si le gardien a stoppé ou non le ballon.

Après chaque tir, une boîte de dialogue dans l'EV indiquait au gardien si le tir avait été arrêté ou non.

2.3.3 Analyse de la tâche en jugement

Lors de la tâche en jugement, nous avons récupéré la position des marqueurs de la main directrice au moment de la prédiction (RWRA, RWRB et RCAR ou LWRA, LWRB, LCAR et PHAL). Nous avons alors calculé la position du centre de la main au moment de la prédiction en utilisant le logiciel Matlab (Mathworks, Natick, Massachussets, US). Cette position a ensuite été comparée à la position finale du ballon dans le but (au centre de la zone visée). Il nous a ensuite été possible de calculer plusieurs variables révélatrices de la performance du gardien de but de handball lors de la tâche de jugement :

- le pourcentage de zones correctes du gardien de but. Le but étant découpé en neuf zones de taille identique (cf. figure 2.4, p42), une zone prédite est considérée comme correcte lorsque le gardien positionne sa main dans la zone où va réellement le ballon.
- le pourcentage de réussite du gardien de but. Une prédiction était considérée comme réussie lorsque la distance entre les deux centres des cercles considérés (main et ballon) était inférieure à la somme des rayons de ces deux cercles (figure 2.9) :

$$\left\| \overrightarrow{C_M C_B} \right\| < R_M + R_B \quad (2.1)$$

avec C_M la position du centre de la main, C_B la position du centre du ballon, R_M le rayon de la main et R_B le rayon du ballon.

- l'erreur radiale de jugement (ER). Dans le cas où la prédiction n'est pas réussie (figure 2.9), l'erreur radiale de jugement correspond à la distance séparant l'extrémité de la main (représentée par un cercle) de l'extrémité du ballon :

$$ER = \left\| \overrightarrow{C_M C_B} \right\| - R_M + R_B \quad (2.2)$$

Cette erreur était obtenue à partir de ses deux composantes : horizontale et verticale.

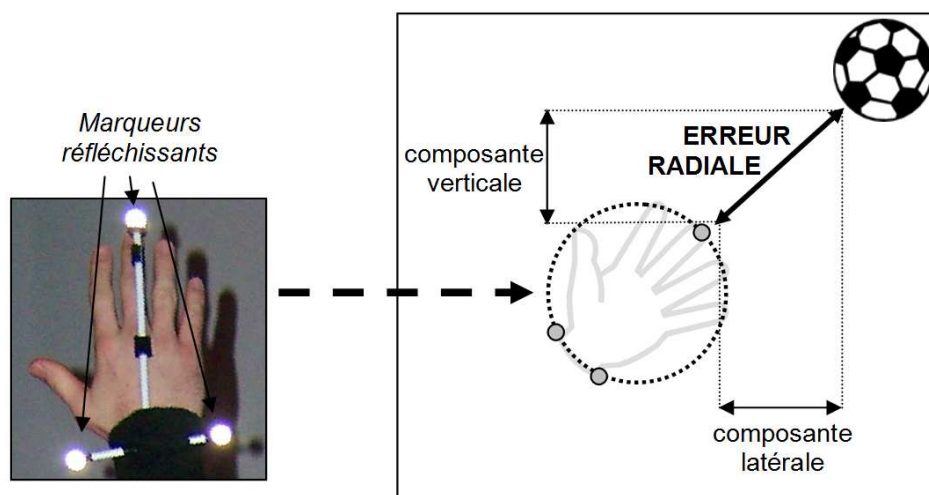


Fig. 2.9 - Représentation de l'erreur radiale et de ses composantes verticale et horizontale lors de la tâche de jugement. Une fois la position des marqueurs de la main enregistrée (a), l'erreur radiale est calculée entre la position de la main du gardien, représentée par un cercle, et la position du ballon virtuel (dans le plan de la main), lui aussi représenté par un cercle (b).

2.3.4 Analyse de la tâche en mouvement

Les données issues de la détection de collision nous ont permis de calculer le pourcentage de réussite des gardiens de but. Pour obtenir les autres variables cinématiques représentatives de la tâche en mouvement, nous avons converti les fichiers C3D en données numériques afin de récupérer la position 3D de chacun des marqueurs réfléchissants au cours du temps. À partir de là, nous avons pu calculer plusieurs paramètres :

- le temps de réponse motrice (TRM), défini comme l'intervalle de temps entre le déclenchement d'un stimulus et la détection d'une réponse motrice. Ici, il s'agit du délai entre le lâcher du ballon virtuel par l'humanoïde de synthèse et le pic d'accélération (double dérivée de la position au cours du temps) du centre de masse de l'avant-bras [Richerson2005]. Ce paramètre nous renseigne sur l'initiation de la parade.
- le pourcentage de réussite du gardien de but calculé à partir des données issues du calcul de détection de collision (figure 2.8). Une parade est considérée comme réussie lorsque la distance entre le centre du ballon et le centre du volume représentant le segment du gardien de but est inférieure à la somme des rayons des deux volumes considérés, à l'instant où le ballon est le plus proche du corps du gardien de but (figure 2.10) :

$$\|\overrightarrow{C_S C_B}\| < R_S + R_B \quad (2.3)$$

avec R_S le rayon du segment le plus proche du ballon, R_B le rayon du ballon, C_B la position du centre du ballon et C_S la position du centre du volume pouvant être de deux types :

dans le cas où le volume est un cylindre : le centre du volume correspond au point où la perpendiculaire à l'axe longitudinal du cylindre passe par le point C_B ,

dans le cas où le volume est une sphère : le centre du volume correspond au centre de la sphère.

- l'erreur radiale de mouvement dans le cas où le gardien n'arrêterait pas le ballon (figure 2.10). La formule de l'erreur radiale correspond alors à :

$$\text{Erreur radiale} = \|\overrightarrow{C_S C_B}\| - R_S + R_B \quad (2.4)$$

De la même façon que pour la tâche de jugement, l'erreur radiale était obtenue à partir de ses deux composantes : horizontale et verticale.

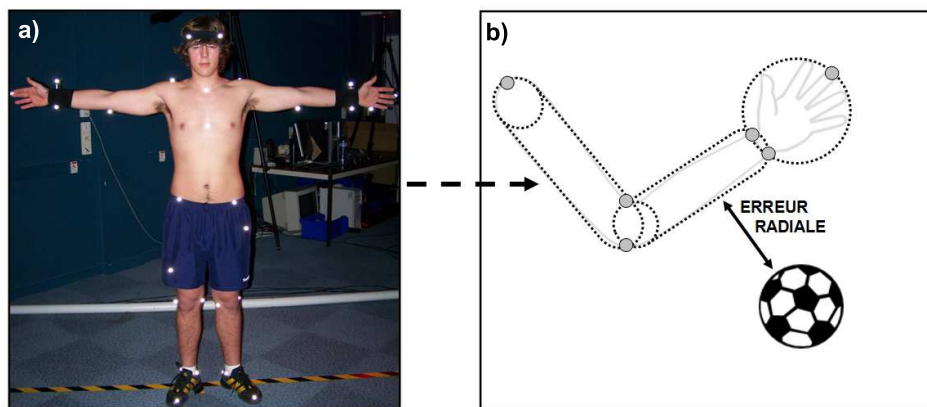


Fig. 2.10 - Représentation du positionnement des marqueurs réfléchissants et de l'erreur radiale lors de la tâche en mouvement. La position des marqueurs réfléchissants étaient enregistrés (a) pour permettre le calcul de l'erreur radiale entre le ballon et le membre le plus proche de celui-ci au cours de la parade (b).

2.3.5 Tests statistiques

Les tests statistiques ont été effectués grâce au logiciel Sigmasat (Systat Software, Inc., California, US). La normalité des variables étudiées a été établie par le test de Kolmogorov-Smirnov. L'homogénéité des variances a été estimée à partir du test de Levene ("Equal Variances Test"). Si les deux tests précédemment cités ne passaient pas (test de normalité et test d'homogénéité des variances), nous avons effectué un test non paramétrique en comparant deux à deux les variables concernées ("Wilcoxon Test"). Les différences entre les conditions "affichage vidéo" et "action de tir virtuelle", et les différentes zones visées ont été obtenues à partir d'analyses de variance multiples à mesures répétées. Dans le cas où une différence significative était détectée, nous avons utilisé le test *post hoc* de Tukey. Le seuil de significativité est fixé à $p < 0.05$.

2.4 Résultats

Après avoir décrit le protocole expérimental et les variables étudiées, nous allons présenter au cours de cette section les différents résultats de la première étude. Dans un premier temps, nous analyserons ceux obtenus lors de la tâche de jugement puis nous examinerons les résultats des gardiens de but lors de la tâche effectuée en mouvement.

Pour chaque variable analysée, nous examinerons d'abord l'influence du mode d'affichage (animation virtuelle ou vidéo) sur la performance du gardien de but de handball de façon globale. Puis nous verrons comment cette influence est répartie à l'intérieur de chacune des zones visées. Enfin, nous aborderons l'influence de la zone visée dans le but, indépendamment du facteur "mode d'affichage". Ceci nous permettra d'observer si certaines zones sont plus difficiles à estimer que d'autres.

2.4.1 Résultats de la tâche en jugement

Lors de la tâche de jugement, trois principaux paramètres ont été étudiés : le pourcentage de zones correctes, le pourcentage de réussite et l'erreur radiale de jugement.

2.4.1.1 Pourcentage de zones correctes

Les pourcentages de zones correctement prédites par les gardiens de but lors de la tâche de jugement sont représentés par la figure 2.11.

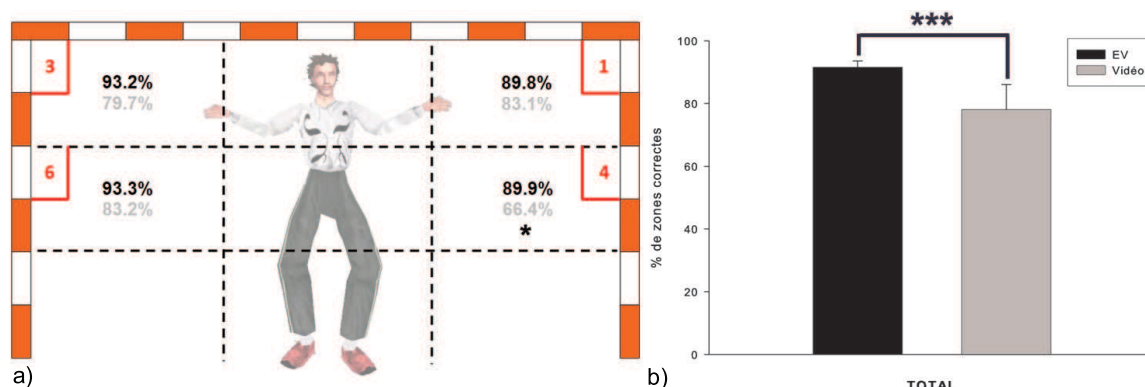


Fig. 2.11 - Pourcentages de zones correctement prédites en fonction du mode de visualisation (EV et vidéo) (* : $p < 0.05$; *** : $p < 0.001$).

Après une analyse de variance à deux voies à mesures répétées, les gardiens de but de handball sont plus performants dans leur prédiction de la zone face au mouvement de tir virtuel que face à la vidéo (RV=91.6 $\pm$ 2% ; vidéo=78.1 $\pm$ 8%) pour l'ensemble des zones ($F_{(1,27)} = 27.279$; $p < 0.001$) (figure 2.11b).

Si l'on s'intéresse maintenant à chacune de ces zones, il y a une différence significative uniquement à l'intérieur de la zone 4 (zone 1 : $p = 0.449$; zone 3 : $p = 0.132$; zone 4 : $p < 0.05$; zone 6 : $p = 0.256$) (figure 2.11a).

De plus, il n'y a pas d'influence significative de la zone dans laquelle se passe la prédiction quel que soit le mode de visualisation ($F_{(3,27)} = 0.5$; $p=0.686$).

2.4.1.2 Pourcentage de réussite

Le pourcentage de réussite des gardiens de but a également été calculé. Il correspond au pourcentage de tirs pour lesquels la prédiction des gardiens était superposée à la position finale du ballon dans le but (figure 2.12).

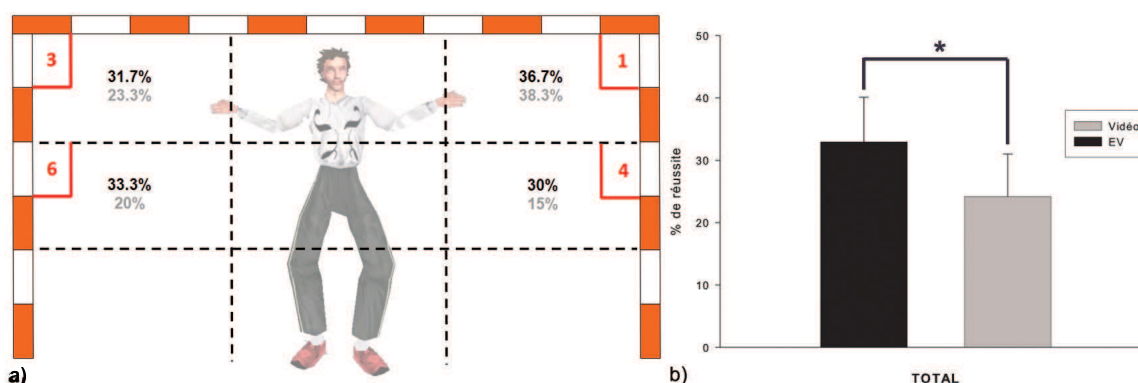


Fig. 2.12 - Pourcentages de réussite en fonction du mode de visualisation (EV et vidéo) (* : $p < 0.05$).

Le pourcentage est supérieur lorsque les gardiens de but sont face à l'animation du mouvement virtuel ($RV=32.9 \pm 7.2\%$; vidéo= $24.2 \pm 6.8\%$). Cette différence de pourcentage apparaît comme significative pour toutes les zones après une analyse de variance à deux voies à mesures répétées ($F_{(1,27)} = 9.252$; $p < 0.05$) (figure 2.12b).

Cependant, il n'existe pas de différence significative entre les modes de visualisation pour chacune des quatre zones (zone 1 : $p=0.877$; zone 3 : $p=0.441$; zone 4 : $p=0.17$; zone 6 : $p=0.222$) (figure 2.12a).

Une fois de plus, on ne trouve aucune différence significative entre les zones visées pour les deux modes de visualisation ($F_{(3,27)} = 1.176$; $p=0.337$).

2.4.1.3 Erreur radiale de jugement

L'erreur radiale nous renseigne sur la précision de la prédiction des gardiens de but. La figure 2.13 résume les résultats obtenus pour l'erreur radiale et ses composantes horizontale et verticale en totalité et en fonction de la zone visée.

D'après la figure ci-dessus, on peut voir que les gardiens de but de handball sont significativement plus précis face au mouvement de tir virtuel que face à la vidéo (RV : composante horizontale= $7.5 \pm 1.1cm$, verticale= $7 \pm 0.8cm$, absolue= $10.3 \pm 0.8cm$; vidéo : composante horizontale= $9.5 \pm 1.8cm$, verticale= $11.6 \pm 2.4cm$, absolue= $15 \pm 2.5cm$). De plus, si l'on considère l'ensemble des zones, cette différence est significative pour l'erreur radiale ($F_{(1,27)} = 39.890$; $p < 0.001$) et sa composante verticale ($F_{(1,27)} = 13.246$; $p < 0.01$). Cependant, il n'y a pas de différence signifi-

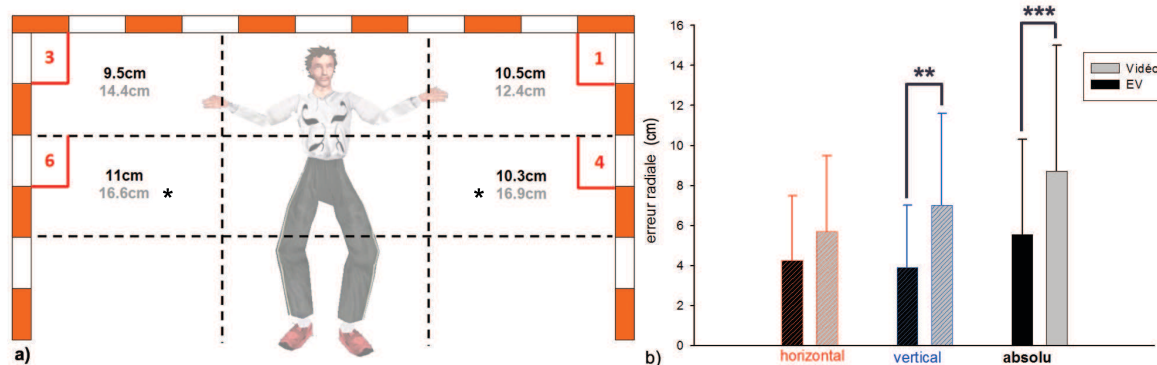


Fig. 2.13 - Erreur radiale et ses composantes horizontale et verticale en fonction du mode de visualisation (EV et vidéo) (** : $p < 0.01$; *** : $p < 0.001$). Les composantes horizontale et verticale ne sont pas représentées dans le but de handball.

cative concernant le mode de visualisation pour la composante horizontale ($p=0.119$) (figure 2.13b).

L'analyse de variance à deux voies à mesures répétées nous renseigne aussi sur le fait qu'il existe des différences significatives d'erreur radiale entre les modes de visualisation pour les zones 4 et 6 (zone 1 : $p=0.412$; zone 3 : $p=0.06$; zone 4 : $p<0.05$; zone 6 : $p<0.05$) (figure 2.13a).

Néanmoins, il n'y a pas de différence significative entre les zones visées pour l'ensemble des tirs pour ce paramètre ($F_{(3,27)} = 1.309$; $p=0.292$).

2.4.2 Résultats de la tâche en mouvement

Dans une seconde partie de l'expérimentation, il a été demandé aux gardiens de but de handball de réagir de façon naturelle face à l'action de tir visualisée (vidéo et EV). Nous avons alors pu calculer un certain nombre de paramètres caractéristiques du mouvement de parade du gardien de but : le TRM, le pourcentage de réussite et l'erreur radiale en mouvement.

2.4.2.1 Temps de Réponse Motrice

Le TRM nous renseigne sur le délai temporel dont le gardien de but a besoin pour initier son mouvement de parade. La PIV est à l'origine de ce mouvement, c'est-à-dire que plus la PIV va être efficace, plus le gardien de but va débiter son mouvement rapidement. Les résultats concernant le TRM en fonction des différentes modalités de projection sont résumés sur la figure 2.14.

La figure 2.14 nous montre que les gardiens de but déclenchent leur réponse motrice plus rapidement face à l'animation de tir virtuel que face à la vidéo ($RV=355.9 \pm 14.3ms$; vidéo= $382.1 \pm 15.7ms$). Par ailleurs, cette différence est significative pour l'ensemble des zones ($F_{(1,27)} = 76.396$; $p<0.001$) (figure 2.14b).

De plus, cette différence significative entre les modes de visualisation s'appliquent également à chacune des quatre zones (zone 1 : $p<0.01$; zone 3 : $p<0.001$; zone 4 : $p<0.001$; zone 6 :

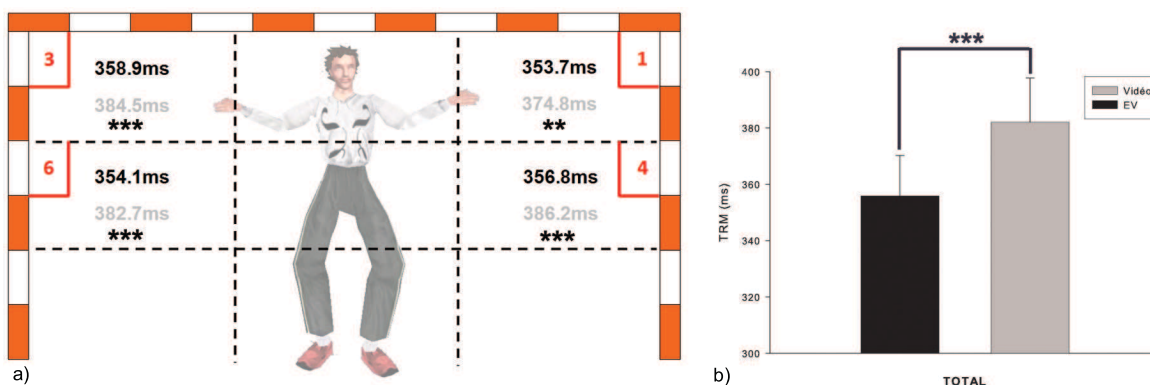


Fig. 2.14 - TRM en fonction du mode de visualisation (EV et vidéo) (** : $p < 0.01$; *** : $p < 0.001$).

$p < 0.001$) (figure 2.14a).

En ce qui concerne la zone visée quelle que soit le mode de projection, nous avons pu démontrer qu'il n'existe pas de différence significative entre ce facteur et le TRM ($F_{(3,27)} = 1.129$; $p = 0.355$).

2.4.2.2 Pourcentage de réussite

Le pourcentage de réussite reflète la performance du gardien de but de handball. Lors de la tâche en mouvement, ce paramètre correspond à l'arrêt du ballon virtuel. Le processus de détection de collision nous a permis de calculer le pourcentage de réussite des gardiens de but en fonction du mode visualisation (figure 2.15).

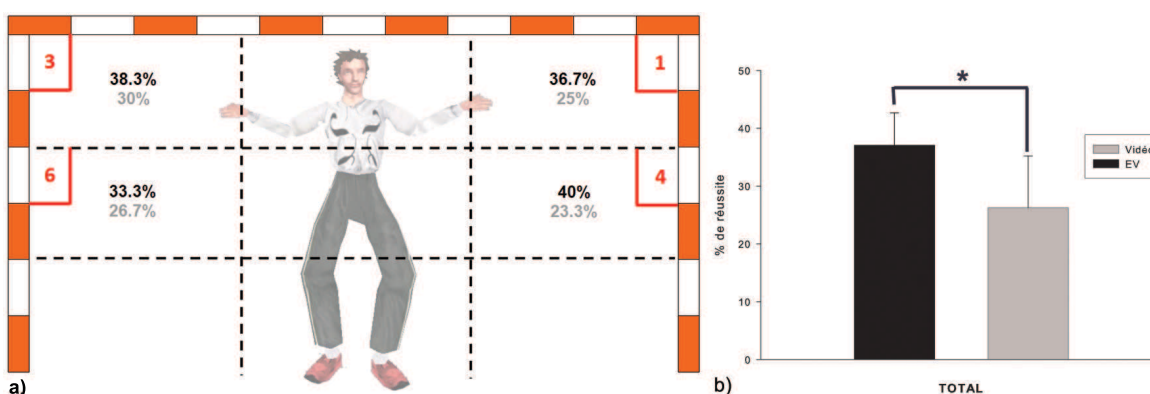


Fig. 2.15 - Pourcentage de réussite en fonction du mode de visualisation (EV et vidéo) (* : $p < 0.05$).

Le pourcentage de réussite des gardiens de but lors de la tâche de mouvement est plus important face à l'action de tir virtuel ($37.1 \pm 7.6\%$) que face à l'action de tir filmée ($26.3 \pm 8.9\%$). Après une analyse de variance à deux voies à mesures répétées, cette différence se révèle être significative pour l'ensemble des zones ($F_{(1,27)} = 8.642$; $p < 0.05$) (figure 2.15b).

Cependant, il n'y a pas de différence significative si l'on considère le facteur "mode de visualisation" pour chacune des zones (zone 1 : $p = 0.281$; zone 3 : $p = 0.44$; zone 4 : $p = 0.127$; zone 6 : $p = 0.536$) (figure 2.15a).

Si l'on ne s'intéresse maintenant qu'au facteur "zone visée", il n'apparaît aucune différence significative en ce qui concerne le pourcentage de réussite ($F_{(3,27)} = 0.134$; $p=0.939$).

2.4.2.3 Erreur radiale en mouvement

Nous avons calculé l'erreur radiale en mouvement lorsque les gardiens de but n'ont pas réussi à stopper le ballon virtuel. Cette erreur nous renseigne sur la précision de la parade des gardiens de but de handball (figure 2.16).

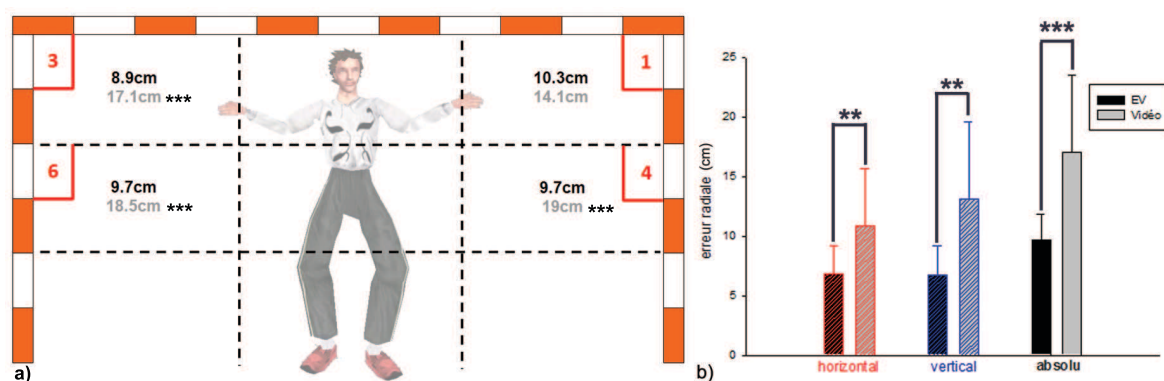


Fig. 2.16 - Erreurs radiales (en horizontal, vertical et absolu) en fonction du mode de visualisation (EV et vidéo) (** : $p<0.01$; *** : $p<0.001$). Les composantes horizontale et verticale ne sont pas représentées dans le but de handball.

En ce qui concerne la précision de la parade des gardiens de but de handball, l'erreur radiale est supérieure face à la vidéo en comparaison à l'animation du tir virtuel (RV : erreur horizontale = $6.9 \pm 2.3\text{cm}$, verticale = $6.8 \pm 2.4\text{cm}$, absolue = $9.7 \pm 2.2\text{cm}$; vidéo : erreur horizontale = $10.9 \pm 4.8\text{cm}$, verticale = $13.1 \pm 6.5\text{cm}$, absolue = $17.1 \pm 6.5\text{cm}$). Ces différences sont significatives pour les erreurs horizontale ($F_{(1,27)} = 19.286$; $p<0.01$), verticale ($F_{(1,27)} = 20.415$; $p<0.01$) et absolue ($F_{(1,27)} = 70.001$; $p<0.001$) après une analyse de variance à deux voies à mesures répétées (figure 2.16b).

Si l'on considère chacune des quatre zones en fonction du mode visualisation, cette différence s'avère être significative pour les zones 3, 4 et 6 (en absolu) (zone 1 : $p=0.074$; zone 3 : $p<0.001$; zone 4 : $p<0.001$; zone 6 : $p<0.001$) (figure 2.16a).

De plus, il n'apparaît pas de différence significative si l'on considère uniquement le facteur "zone visée" pour les erreurs horizontale, verticale et absolue (absolu : $F_{(3,27)} = 1.015$; $p=0.402$).

2.5 Discussion

L'ensemble des résultats de cette étude nous a permis d'évaluer l'influence de deux méthodes d'investigation de la PIV sur la perception des gardiens de but de handball. En effet, au cours de cette expérimentation, deux méthodologies ont pu être comparées : l'utilisation de la vidéo et l'emploi des EV. A partir de la capture (vidéo et optoélectronique) d'un mouvement de tir réel d'un joueur de handball, nous avons pu confronter les gardiens de but à la séquence filmée de ce tir ainsi qu'à l'animation de ce même tir en EV.

Dans leur face-à-face, les gardiens de but avaient pour consigne d'effectuer deux types de tâche, fréquemment utilisées dans la littérature. Dans un premier temps, les gardiens de but réalisaient une tâche de jugement caractérisée par le positionnement de la main dans le but à l'endroit supposé du ballon virtuel. Dans un second temps, une tâche motrice, correspondant à l'action naturelle du gardien de but de handball, était demandée.

La discussion de cette étude s'organisera de la manière suivante : nous verrons dans un premier temps en quoi les résultats de cette étude démontrent l'avantage d'utiliser les EV plutôt que la vidéo pour l'analyse de la PIV des gardiens de but de handball. Puis, nous verrons plus en détails les difficultés perceptives liées à l'utilisation de la vidéo.

2.5.1 L'avantage des environnements virtuels sur la vidéo : éléments de réponse

D'après les résultats de cette étude, on peut tout d'abord voir que les gardiens de but de handball sont plus efficaces face à l'action de tir virtuelle que face à ce même tir filmé. En effet, les paramètres relatifs à l'efficacité du gardien de but (pourcentages de réussite) sont significativement supérieurs face au personnage de synthèse par rapport à la séquence de tir filmée. Ce constat est autant valable pour la tâche en jugement ($RV = 32.9 \pm 7.2\%$; $vidéo = 24.2 \pm 6.8\%$) que pour la tâche réalisée en mouvement ($RV = 37.1 \pm 7.6\%$; $vidéo = 26.3 \pm 8.9\%$). Il faut cependant noter que la notion d'efficacité est à relativiser pour la tâche de jugement. En effet, le manque de contraintes temporelles pour ce mode de réponse implique que le gardien de but effectue plutôt une prédiction correcte qu'un geste efficace lorsque la main se trouve au niveau de la position finale du ballon dans le but.

Outre le fait que les gardiens de but soient plus efficaces, ils sont aussi plus précis face à l'animation du tir que face à la vidéo. En effet, plusieurs paramètres nous ont permis de statuer sur la précision de la tâche des gardiens de but au cours de cette étude. Ainsi, le pourcentage de zones correctement prédites, calculé lors de la tâche de jugement, constitue un premier niveau d'analyse de la précision. Il est alors apparu que les gardiens de but ont significativement plus de facilité à prédire la zone dans laquelle se trouve le ballon dans le but face au mouvement de tir virtuel ($91.6 \pm 2\%$) que face à ce même mouvement filmé ($78.1 \pm 8\%$). Il faut noter ici que le pourcentage de zones correctes a été établi uniquement pour la tâche de jugement car ce paramètre ne semble pas révélateur de la précision lors de la tâche en mouvement. En effet, les contraintes temporelles liées à ce mode de réponse implique que la position des membres du gardien de but ne peut être enregistrée qu'à un seul instant (lorsque le ballon est le plus proche du gardien de but). L'instant qui suit, le membre le plus proche du ballon peut se trouver dans une zone différente.

Afin d'approfondir la notion de précision de la réponse des gardiens de but, nous avons

calculé l'erreur radiale des gardiens lorsqu'il n'y avait pas réussite. Cela correspond en fait à la différence de distance séparant le ballon virtuel de la main du gardien pour la tâche de jugement. Cette erreur apparaît significativement différente entre le mouvement de tir virtuel et la vidéo ($EV=10.3 \pm 0.8cm$, vidéo= $15 \pm 2.5cm$) ainsi que pour sa composante verticale ($EV=7 \pm 0.8cm$, vidéo= $11.6 \pm 2.4cm$).

Pour la tâche effectuée en mouvement, l'erreur radiale est calculée lorsque le gardien de but n'intercepte pas le ballon virtuel. Cette erreur correspond alors à la distance séparant la position du ballon virtuel de la position du membre le plus proche du ballon au cours du mouvement d'interception. Il apparaît alors que la position de ce membre est significativement plus précise en vertical ($EV=6.8 \pm 2.4cm$, vidéo= $13.1 \pm 6.5cm$) et en horizontal ($EV=6.9 \pm 2.3cm$, vidéo= $10.9 \pm 4.8cm$) face à l'action de tir virtuel que face à la vidéo. Il en est donc de même pour l'erreur radiale du mouvement du gardien de but ($EV=9.7 \pm 2.2cm$, vidéo= $17.1 \pm 6.5cm$).

Ainsi, que ce soit pour l'efficacité ou la précision de la réponse, les gardiens de but de handball sont plus performants lorsqu'ils se trouvent immergés en EV que lorsqu'ils sont face à une vidéo. Cela peut être expliqué par l'ensemble des désavantages liés à l'utilisation de la vidéo que nous avons décrits dans l'état de l'art (cf. section 1.1.3.2, p7). En effet, certains auteurs affirment que ce type d'affichage dégrade nécessairement quelques éléments visuels de la scène qui peuvent être fondamentaux pour la perception. Cela pourrait provenir du manque d'informations stéréoscopiques, de la réduction du champ visuel, de la taille de l'image ou bien du manque de résolution de l'image [Abernethy2001].

En ce qui concerne les informations stéréoscopiques, il a en effet été démontré qu'elles peuvent influencer sur la performance des sujets. Ainsi, des patients souffrant d'une déficience au niveau de la vision stéréoscopique sont moins performants que des patients sains lors d'une tâche d'interception, en particulier en ce qui concerne l'aspect temporel de l'interception [Lenoir1999]. Le résultat que nous obtenons pour le TRM va dans ce sens. En effet, le TRM des gardiens de but face à la vidéo ($382.1 \pm 15.7ms$) était significativement supérieur par rapport à celui obtenu face à l'animation de tir virtuel ($355.9 \pm 14.3ms$). On peut donc supposer qu'il existe une influence des informations stéréoscopiques sur l'initiation du mouvement d'interception.

Dans le même ordre d'idée, Hendrix a prouvé que les informations visuelles stéréoscopiques amélioraient le sentiment de présence dans un EV [Hendrix1996]. Ainsi, lors de cette expérimentation, les gardiens de but ont probablement dû ressentir un degré de présence moindre lorsqu'ils étaient face à la vidéo. Or nous avons vu que la relation entre présence et performance est primordiale dans la validation d'un système immersif et interactif [Barfield1995a, Slater1996, Zahorik1998] (cf. section 1.2.5, p24). Utiliser la vidéo pour analyser la performance ne permet pas de fournir des conditions optimales d'immersion.

De plus, dans notre EV, l'adaptation du point de vue du sujet en temps réel offrent des informations supplémentaires aux gardiens de but de handball. Cette adaptation couplée à la vision stéréoscopique permet au gardien de but d'extraire plus d'informations visuelles que face à la méthodologie fondée sur la vidéo. En effet, face à une séquence vidéo, le sujet ne peut percevoir les informations concernant la profondeur de la scène. Or la vision stéréoscopique peut avoir une influence sur le sentiment de présence des sujets [Hendrix1994, Hendrix1996]. L'adaptation du point de vue, possible en EV, est d'autant plus importante dans notre étude que, lors des deux tâches demandées (jugement et mouvement), le gardien de but a la possibilité de bouger la tête.

Ainsi, par rapport à l'animation d'un tir virtuel, l'affichage vidéo influence de façon négative l'efficacité, la précision et l'organisation temporelle de la réponse des gardiens de but. Cette influence peut être expliquée par le manque d'informations stéréoscopiques et l'impossibilité d'adapter le point de vue du sujet face à la séquence filmée.

2.5.2 L’affichage vidéo et la perception de la hauteur

Certains résultats de cette étude démontrent que l’affichage vidéo peut avoir une influence significative sur la perception verticale de la trajectoire de balle. C’est notamment le cas pour l’erreur radiale en jugement. La composante verticale de cette erreur est significativement plus élevée face à la vidéo que face à l’animation virtuelle ($p < 0.01$). Il semble cependant que le problème lié à la verticalité soit un phénomène global, quelque soit le mode d’affichage. En effet, la répartition des erreurs liées à la zone prédite le démontre. Lors de la tâche de jugement des gardiens de but, nous avons pu calculer si la main se trouvait dans la zone où se dirigeait le ballon virtuel (pourcentages de zones correctement prédites). Nous avons également déterminé la nature de l’erreur de prédiction (hauteur, côté, les deux ou en dehors du but) lorsque la main du gardien de but ne se trouvait pas dans la zone visée. Ce sont ces erreurs qui sont répertoriées dans le tableau 2.5.2.

Type d’erreur de prédiction	EV (%)	Vidéo (%)
Hauteur incorrecte	75.2	70.6
Côté incorrect	8.1	12.3
Hauteur et côté incorrects	4.3	5.9
En dehors du but	13.8	15.1

Tab. 2.3 - Répartition des pourcentages d’erreurs liées à la prédiction de la zone pour la tâche de jugement.

Ainsi, on peut voir qu’il y a beaucoup plus d’erreurs de prédiction concernant la hauteur du ballon que le côté où est situé le ballon. Le problème de la verticalité de la prédiction a déjà été démontré par le passé à partir de méthodologies fondées sur la vidéo [Salmela1979, Abernethy1987, Abernethy1990a]. Ce constat rejoint notamment les résultats de l’étude de Williams et al. [Williams1993]. Ces auteurs avaient demandé à des gardiens de but de football de prédire la zone (parmi les quatre coins du but) dans laquelle se dirigeait un tir de penalty issu d’une séquence vidéo. Ils ont alors démontré que les gardiens de but commettaient plus d’erreur de prédiction sur l’axe vertical que sur l’axe horizontal (respectivement 62% vs 26%).

De manière plus précise, il semble que les problèmes de prédiction verticale s’applique particulièrement aux zones situées à mi-hauteur du but (zones 4 et 6). C’est notamment ce que démontrent nos résultats concernant l’erreur radiale en jugement ($p < 0.05$). Les gardiens de but semblent donc moins précis verticalement pour ces deux zones lorsqu’ils sont face à la vidéo. Cela peut s’expliquer par le fait que les zones 4 et 6 sont des zones centrales, il y a donc deux fois plus de probabilités de se tromper verticalement lors de leur prédiction.

2.6 Conclusion

Le but de cette étude était de comparer deux techniques d'analyse de la PIV du gardien de but de handball : une technique relativement répandue dans la littérature qui utilise la vidéo et une technique récente et innovante qui fait intervenir les EV.

Au vu des résultats obtenus, la méthode fondée sur l'animation d'un tireur virtuel apparaît plus adaptée que celle utilisant la vidéo. En effet, les gardiens sont plus efficaces, plus précis et plus réactifs face au mouvement de tir virtuel que face à la même action de tir filmée. Et ce, que ce soit pour une tâche de jugement ou pour une tâche de mouvement.

Cela signifie que la perception visuelle des gardiens de but de handball est altérée par l'utilisation de la vidéo. Contrairement à d'autres études [Williams1999a], nous avons pourtant respecté l'échelle de représentation de la scène vidéo au cours de cette étude (taille du joueur filmé identique à la taille réelle). De plus, la prédiction verticale semble particulièrement atteinte par le mode d'affichage vidéo. La bidimensionnalité de l'affichage vidéo ou l'impossibilité d'adapter son point de vue face à une séquence filmée sont autant d'éléments qui peuvent expliquer l'influence de l'affichage vidéo sur la performance des gardiens de but de handball.

Afin de confirmer cela, il serait nécessaire de mener une série d'expérimentations en EV où chacune des variables pourrait être isolée. En ce qui concerne l'influence des informations stéréoscopiques, il serait possible de comparer les performances des gardiens de but face à une animation virtuelle de tir visionnée avec et sans stéréovision. Le même protocole pourrait également être utilisé pour comprendre l'influence de l'adaptation du point de vue des gardiens de but sur la performance.

D'après l'ensemble des résultats de cette étude, notre choix concernant la méthode d'investigation de la PIV des gardiens de but de handball va s'orienter vers l'utilisation des EV. Cette méthode, dont l'emploi a déjà été validé pour l'analyse du duel entre un gardien et un tireur au handball [Bideau2004], s'avère être plus efficace que l'utilisation de la vidéo.

Cependant la mise en place d'une méthode fondée sur les EV nécessite certaines précautions, notamment au niveau du réalisme du mouvement de tir virtuel. Ce réalisme, caractérisé par la représentation graphique du mouvement, est un élément clé dans la perception visuelle des EV [Seyama2007]. La seconde étude de ce travail de thèse va donc s'intéresser à l'influence de la représentation graphique du mouvement en EV sur la perception visuelle des gardiens de but de handball.

Chapitre 3

La représentation graphique du mouvement en environnement virtuel

Après avoir démontré l'avantage de la technique fondée sur les EV pour l'analyse de la PIV des gardiens de but de handball, il est important d'aborder la mise en place des EV pour notre sujet d'étude. En effet, l'animation d'un mouvement virtuel est un processus qui fait intervenir de nombreux facteurs. Parmi ceux-ci, la représentation graphique du personnage de synthèse est un élément prépondérant qui peut avoir une influence sur le sentiment de présence des sujets immergés [Barfield1995b, Seyama2007].

Certains auteurs ont pu démontrer par le passé que le sentiment de présence des gardiens de but de handball en EV était suffisant pour une représentation texturée du mouvement de tir virtuel [Bideau2003b]. On pourrait donc imaginer utiliser le même type de représentation graphique pour l'analyse de la PIV des gardiens de but de handball. Cependant une telle qualité de représentation graphique de l'animation en EV peut être coûteuse en terme de temps de calcul [Doncescu1989] et difficile à mettre en oeuvre. En effet, la texture utilisée pour représenter graphiquement le tireur virtuel doit être ajustée au squelette de l'humanoïde pour obtenir une déformation réaliste pendant l'animation [Kulpa2005a]. On peut alors se poser la question de savoir si un niveau de représentation graphique du mouvement "allégé" n'engendrerait pas un degré de présence suffisant pour les gardiens de but de handball.

En confrontant plusieurs niveaux de représentation graphique (cinq au total) d'un même mouvement de tir virtuel aux gardiens de but de handball, nous serons en mesure d'établir pour quel(s) niveau(x) les gardiens de but ressentent un sentiment de présence suffisant dans l'EV. Le niveau de détail graphique minimal induisant un degré de présence suffisant pourra alors être déterminé. Le niveau de présence des gardiens de but sera estimé à partir de leur performance lors de deux modes de réponse précédemment définis : une tâche de jugement et une tâche de mouvement.

3.1 Objectifs

Le but de cette étude est de déterminer un niveau de représentation graphique du mouvement de tir virtuel minimal pour induire un degré de présence suffisant de la part des gardiens de but. Pour ce faire, nous avons conçu plusieurs représentations graphiques du mouvement que nous appellerons niveaux de détail graphique (NDG). Ces différents NDG sont appliqués à un seul et même modèle de tir afin de standardiser la cinématique du mouvement. De la même façon que dans l'étude 1, le mouvement de tir provient d'une capture de mouvement d'un tir réel réalisée dans des conditions naturelles (figure 3.1).

Au total, cinq NDG sont définis : un niveau de référence texturé inspiré de l'étude de [Bideau2003b] (N0), un niveau non texturé (N1), un niveau dit en "fil de fer" (N2), un niveau représenté en PLD (N3) et un niveau en PLD où la taille du ballon a été réduite à la taille d'un point lumineux (N4) (figure 3.1). En analysant l'influence relative de chacun des NDG sur la performance des gardiens de but de handball, nous serons en mesure de déterminer pour quel NDG le niveau de présence des gardiens de but est suffisant.

Notre protocole expérimental prendra en compte les différents modes de réponse utilisés dans la littérature : une tâche de jugement et une tâche en mouvement.

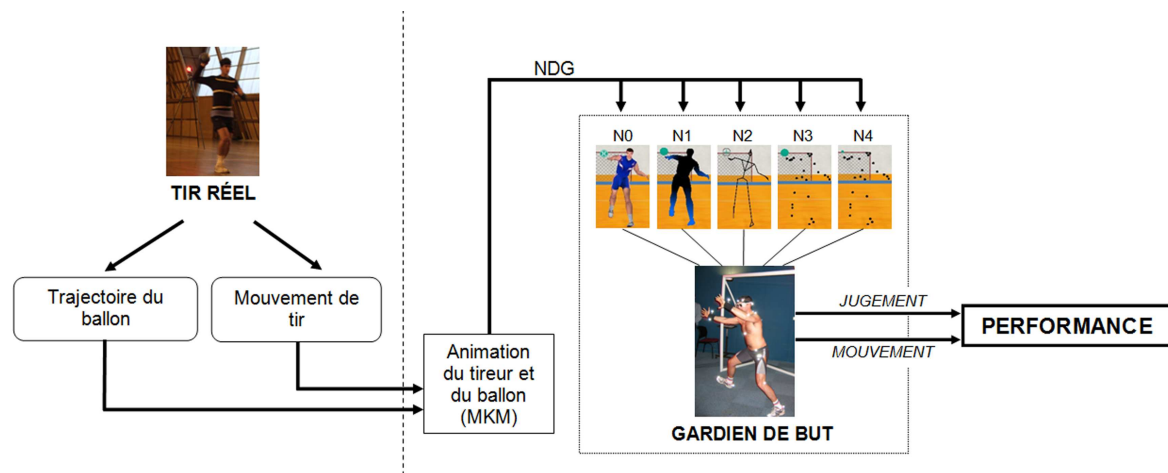


Fig. 3.1 - Schématisation de l'objectif de l'étude 2. La performance des gardiens de but de handball sera analysée face à cinq NDG et pour deux modes de réponse (jugement et mouvement).

3.2 De la capture de mouvement à l'animation des actions de tir en environnement virtuel

3.2.1 Capture de mouvement

Afin d'animer le mouvement de tir virtuel avec cinq NDG, nous avons à nouveau effectué des captures de mouvements sur de réelles actions de tir de handball. Trois joueurs de handball de niveau national ont participé aux captures de mouvement réel (cf. tableau 3.2.1). Ils avaient pour consigne d'effectuer des tirs en appui à 12m du but. Chaque tireur a donné son accord pour participer à cette étude et a été informé du déroulement de l'expérimentation.

Sujets	Âge (ans)	Taille (m)	Masse (Kg)
S1	21	1.83	80
S2	25	1.87	85
S3	22	1.89	91
Moyenne	22.7	1.86	85.3
Écart type	2.08	0.03	5.5

Tab. 3.1 - Caractéristiques anthropométriques des joueurs de handball ayant participé aux captures de mouvement réel de la seconde étude.

Le système optoélectronique Vicon MX40 a permis d'acquérir les données cinématiques des joueurs capturés. La fréquence du système était de 200 Hz afin d'enregistrer un maximum de données. 43 marqueurs réfléchissants ont été positionnés sur les repères anatomiques du sujet de la même manière que dans la première étude (figure 3.2). Les différentes positions de ces marqueurs sont résumées dans le tableau 2.2.1 de la section 2.2.1 (p39). L'étape de reconstruction et de labellisation tridimensionnelle des marqueurs au cours du temps s'est effectuée avec le logiciel Vicon IQ, ce qui a permis d'exporter les données cinématiques vers le module d'animation MKM.

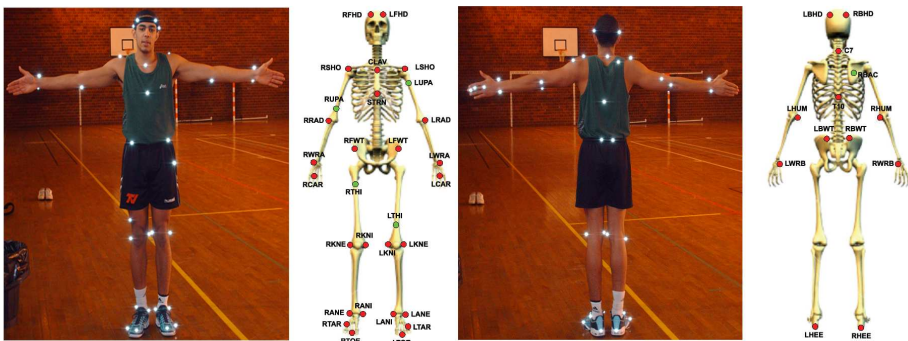


Fig. 3.2 - Placement des marqueurs réfléchissants. Les marqueurs repérés en rouge servent au calcul des centres de masse locaux et global. Les marqueurs repérés en vert induisent une dissymétrie utile pour la phase de labellisation des marqueurs.

Les captures de mouvement se sont déroulées sur un terrain de handball. Il était demandé à chaque joueur d'effectuer des tirs en appui à 12m du but. Il n'y avait pas de gardien dans le but de handball durant l'expérimentation. Ce but était découpé en neuf zones de taille équivalente (cf. figure 2.4, p42). Le joueur avait pour consigne de viser les neuf zones du but à cinq reprises dans un ordre aléatoire. Cela nous donne un total de :

$$9 \text{ zones} \times 5 \text{ répétitions} = 45 \text{ tirs}$$

Les tirs dont les trajectoires du ballon se terminaient au centre de chaque zone ont été retenus pour produire l'animation des actions de tir en EV.

3.2.2 Animation des actions de tir

Grâce au module d'animation MKM, nous avons pu animer les actions de tirs précédemment capturées. Les mouvements de l'humanoïde de synthèse et la trajectoire du ballon ont été calculés grâce à des modules d'animation différenciés avant d'être synchronisés en temps réel par l'intermédiaire du logiciel OpenMask [Margery2002]. Les vitesses du ballon étaient très proches pour l'ensemble des tirs ($20 \pm 0.2 m.s^{-1}$). L'EV représentant un terrain de handball ainsi que le système de réalité virtuelle semi-immersif sont les mêmes que ceux utilisés dans la section 2.2.2 (42). Un but de handball réel a été positionné dans la salle semi-immersive afin d'optimiser le sentiment de présence des gardiens de but.

3.3 Protocole expérimental en environnement virtuel

10 gardiens de but de handball de niveau national ont participé à cette étude. Les caractéristiques anthropométriques des sujets sont résumées dans le tableau 3.3. Chaque gardien de but a donné son accord et a été informé du déroulement de l'expérimentation avant d'y participer. De plus, aucune information concernant le découpage du but en neuf zones équivalentes n'a été transmise aux gardiens. Tous les gardiens possédaient une vision normale ou considérée comme normale grâce à l'utilisation de lentilles de correction.

Sujets	Âge (ans)	Taille (m)	Masse (Kg)
S1	22	1.75	68
S2	25	1.85	77
S3	33	1.83	82
S4	28	1.92	90
S5	21	1.84	83
S6	19	1.77	83
S7	23	1.93	115
S8	21	1.95	84
S9	25	1.87	81
S10	18	1.85	90
Moyenne	23.5	1.86	12.2
Écart type	4.48	0.07	12.18

Tab. 3.2 - Caractéristiques anthropométriques des gardiens de but de handball participant à l'expérimentation.

De la même manière que dans la première étude, la performance des gardiens de but lors des tâches de jugement et de mouvement a été enregistrée grâce au système Vicon MX40. De plus, le point de vue du sujet était adapté en temps réel au cours de l'expérimentation (cf. figure 2.7, p45).

Chaque gardien de but faisait face, de façon randomisée, à cinq différents NDG au cours de l'expérimentation (figure 3.3) :

- N0 : il s'agit d'un NDG texturé. Ce niveau est considéré comme le niveau de référence. En effet, Bideau et al. ont démontré que son utilisation entraînait un degré de présence suffisant de la part de gardiens de but de handball immergés en EV [Bideau2003b]. Ainsi, si la performance pour un autre NDG est similaire à la performance pour N0, alors le NDG considéré pourra être assimilé à un NDG permettant d'induire un degré de présence suffisant pour les gardiens de but.
- N1 : ce second NDG 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

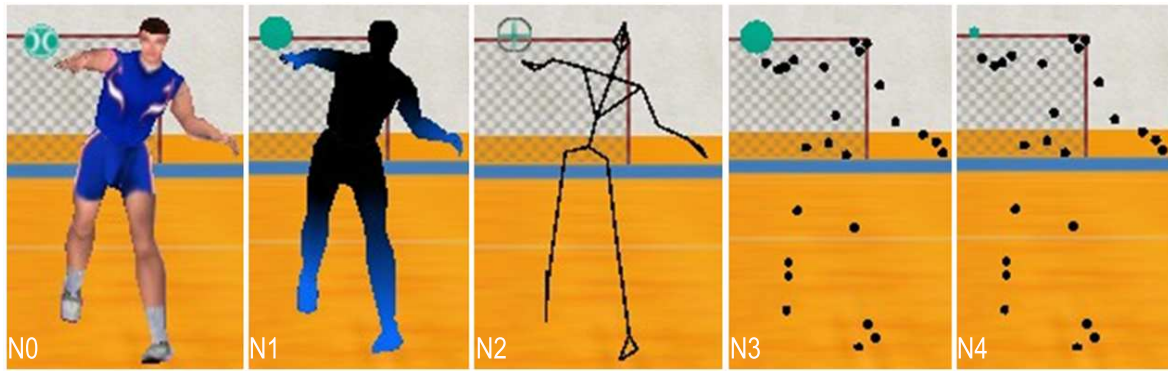


Fig. 3.3 - Représentation des différents NDG utilisés pour le mouvement de tir virtuel.

en bleu afin de percevoir une éventuelle superposition des membres sur le reste du corps (3D).

- N2 : ce NDG est fondé 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. Le fait de réduire la taille du ballon va nous permettre de statuer sur l'influence de ce paramètre sur la perception visuelle des gardiens de but.

Chaque gardien effectuait une session d'échauffement afin de se familiariser avec l'EV et les différents NDG. Durant cette période, le gardien de but était confronté à dix tirs, correspondant à deux tirs par NDG. Aucun essai réalisé durant la période d'échauffement n'a été retenu pour le traitement des résultats.

Contrairement à la première étude où les zones 1, 3, 4 et 6 étaient visées à trois reprises en EV, nous ne prendrons ici en compte que les zones 1, 6 et 7 (cf. figure 2.4, p42) pour lesquelles il y aura cinq répétitions par zone. Le fait d'augmenter le nombre de répétitions par zone va nous permettre de renforcer notre analyse statistique. Cependant les tirs effectués dans les autres zones (zones 2, 3, 4, 5, 8 et 9) ont été conservés et utilisés comme tirs supplémentaires afin d'augmenter les possibilités de choix chez les gardiens de but de handball. Au total, chaque gardien était donc confronté à :

$$((3 \text{ zones} \times 5 \text{ répétitions}) \times 5 \text{ NDG}) + 10 \text{ tirs aléatoires} = 85 \text{ tirs}$$

3.3.1 La tâche en jugement

Lors de la phase de jugement, les consignes étaient les mêmes que dans la première étude. Le gardien devait regarder l'action de tir virtuel en restant immobile au centre du but avant de prédire, une fois le tir fini, la position finale du ballon dans le but à l'aide de sa main (cf. figure 2.9, p48). Il était demandé aux sujets d'effectuer leur prédiction le plus rapidement possible après la fin de l'action de tir. Dans cette expérimentation, la trajectoire du ballon était coupée à 6m de la ligne de but, ce qui laisse 6m de visualisation, autrement dit le ballon était vu pendant 300ms.

La position de la main (droite ou gauche) a été enregistrée par l'intermédiaire du système Vicon MX40. 11 marqueurs réfléchissants étaient nécessaires pour permettre la capture de la tâche de jugement ainsi que l'adaptation du point de vue du sujet au cours de l'expérimentation. Leur positionnement était le même que lors de la section 2.3.1 (p45).

3.3.2 La tâche en mouvement

Lors de la tâche réalisée en mouvement, les gardiens ont reçu les mêmes consignes que pour la première étude. A savoir : chaque gardien devait réagir de façon naturelle aux actions de tir en essayant d'intercepter le ballon virtuel. Tout comme lors de la tâche de jugement, la trajectoire du ballon était coupée à 6m de la ligne de but.

Le mouvement de parade du gardien de but a pu être capturé par l'intermédiaire du système Vicon MX40. De la même façon que dans la section 2.3.2, 44 marqueurs réfléchissants ont été positionnés sur le corps du sujet afin de permettre l'adaptation du point de vue du sujet en temps réel et le calcul de la détection de collision (cf. section 2.3.2.1, p46).

3.3.3 Analyse de la tâche en jugement

Nous avons pu récupérer les données des marqueurs des mains au moment de la prédiction lors de la tâche de jugement. La position du centre de la main a alors pu être calculée avant d'être comparée avec la position finale du ballon dans le but. Nous avons alors pu calculer les mêmes variables que lors de la première étude :

- 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 (cf. équation (2.1), p47),
- 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 (cf. équation (2.2), p48 et figure 2.10, p49).

3.3.4 Analyse de la tâche en mouvement

Le processus de détection de collision ainsi qu'un traitement *a posteriori* des fichiers de mouvement nous ont permis d'obtenir plusieurs paramètres caractéristiques de la tâche de mouvement :

- 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 [Richerson2005],
- 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 corps du gardien de but lors du mouvement d'interception (cf. équation (2.3), p49),
- 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 (cf. équation (2.4), p49 et figure 2.10, p49),

- l'indice cinématique de la réponse motrice : il correspond à l'indice de régulation de la parade obtenu à partir du déplacement du centre de masse de l'avant-bras. Pour l'obtenir, plusieurs étapes de calculs ont été nécessaires (figure 3.4) :

1. nous avons tout d'abord calculé la trajectoire moyenne du centre de masse de l'avant-bras sur les axes horizontal et vertical face à chaque NDG. Cette trajectoire moyenne correspondait à la moyenne des cinq répétitions. Lorsqu'un tir était complètement différent des autres (ce qui aurait pu faire varier la courbe moyenne), nous l'avons détecté grâce à la vérification de points de contrôle graphiques.
2. puis nous avons défini la courbe de référence à partir de la trajectoire moyenne du centre de masse de l'avant-bras lorsque le gardien était face à la représentation N0. Ce NDG a été pris comme niveau de référence car il a été démontré que les gardiens de but de handball atteignent un degré de présence suffisant lorsqu'ils y sont confrontés [Bideau2003b].
3. enfin nous avons calculé l'erreur RMS entre la courbe de référence du niveau N0 et les courbes moyennes des quatre autres niveaux (N1, N2, N3 et N4) (équation (3.1)). Ces valeurs d'erreur RMS ont ensuite été comparées entre elles pour l'analyse statistique.

$$\text{erreur RMS} = \sqrt{\frac{(N0_1 - NDG_1)^2 + (N0_2 - NDG_2)^2 + \dots + (N0_n - NDG_n)^2}{n}} \quad (3.1)$$

avec $N0_1, N0_2, \dots, N0_n$ la série de valeurs appartenant à la courbe de référence ; $NDG_1, NDG_2, \dots, NDG_n$ la série de valeurs appartenant à la courbe du NDG concerné (N1, N2, N3 ou N4) ; n le nombre de valeurs des deux séries.

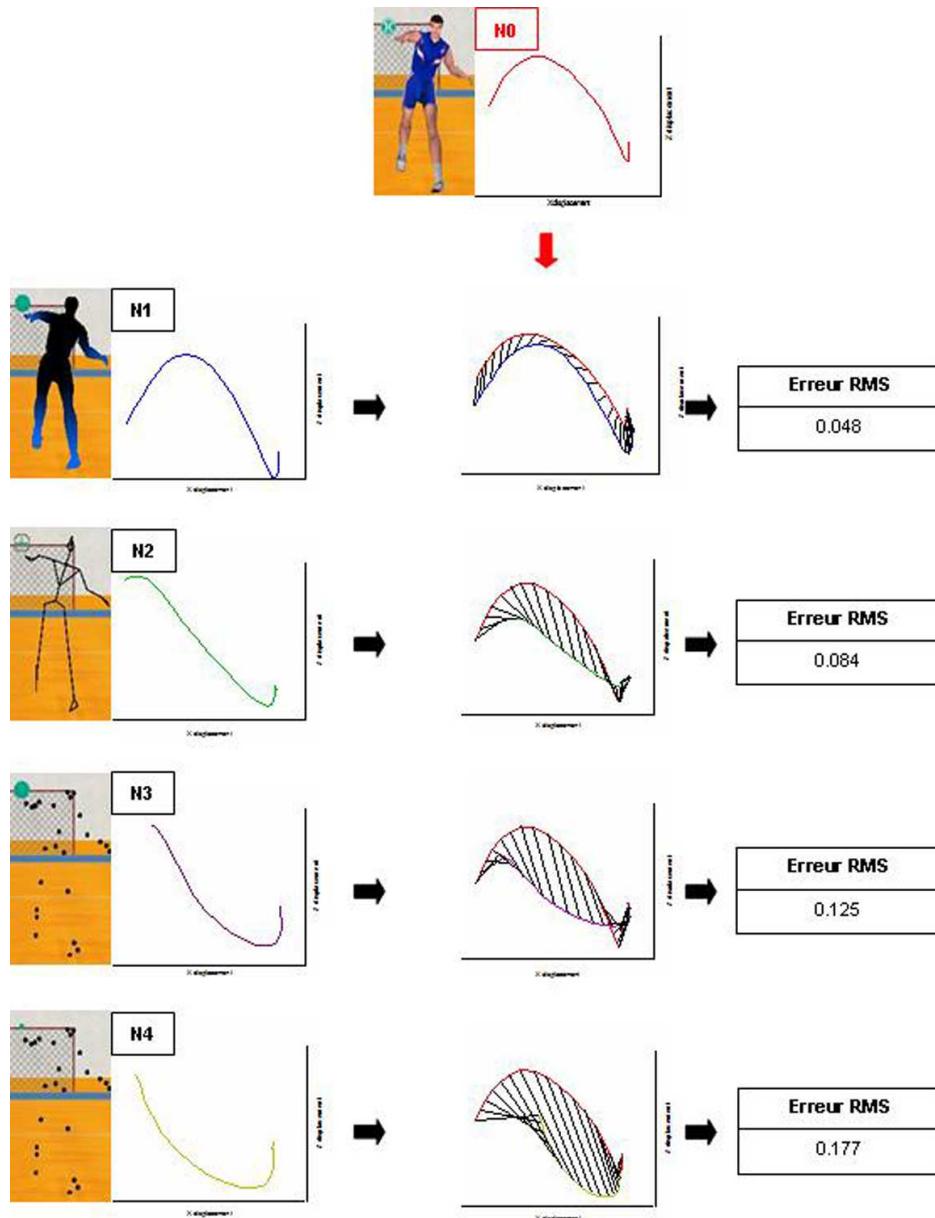


Fig. 3.4 - Exemple d'analyse cinématique de la réponse motrice d'un gardien de but pour un tir en zone 1. Cette analyse est fondée sur le calcul de l'erreur RMS entre la trajectoire moyenne du centre de masse de l'avant-bras pour le niveau de référence N0 et les trajectoires moyennes pour les autres niveaux (N1, N2, N3 et N4).

3.3.5 Tests statistiques

La normalité des variables étudiées a été établie par le test de Kolmogorov-Smirnov et l'homogénéité des variances par le test de Levene ("Equal Variances Test"). Lorsque ces deux tests ne passaient pas, un test non paramétrique a pu être mené ("Wilcoxon Test"). Les différences entre les NDG et les zones visées ont été calculées à partir d'analyses de variance à mesures répétées. Dans le cas où une différence significative était détectée, nous avons utilisé le test *post hoc* de Tukey. Nous avons fixé le seuil de significativité à $p < 0.05$.

3.4 Résultats

Les résultats de la seconde étude seront séparés en deux catégories : nous verrons d'abord les résultats issus de la tâche de jugement puis nous aborderons les résultats obtenus lors de la tâche effectuée en mouvement.

Pour chacune des variables observées, l'influence du NDG sur la performance du gardien de but de handball sera d'abord analysée dans sa globalité. Nous quantifierons ensuite, lorsque c'est le cas, l'influence du NDG pour chacune des zones visées. Pour finir, nous reporterons l'ensemble des résultats concernant la zone visée sans considérer le facteur "NDG".

3.4.1 Résultats de la tâche en jugement

Nous avons calculé trois variables lors de la tâche de prédiction en jugement : le pourcentage de zones correctes, le pourcentage de réussite et l'erreur radiale de jugement.

3.4.1.1 Pourcentage de zones correctes

Lorsque les gardiens de but positionnaient leur main dans la zone où se terminait la trajectoire du ballon virtuel, la zone était considérée comme correctement prédite. La figure 3.5 résume les pourcentages de zones correctement estimées par les gardiens de but lors de la tâche de jugement.

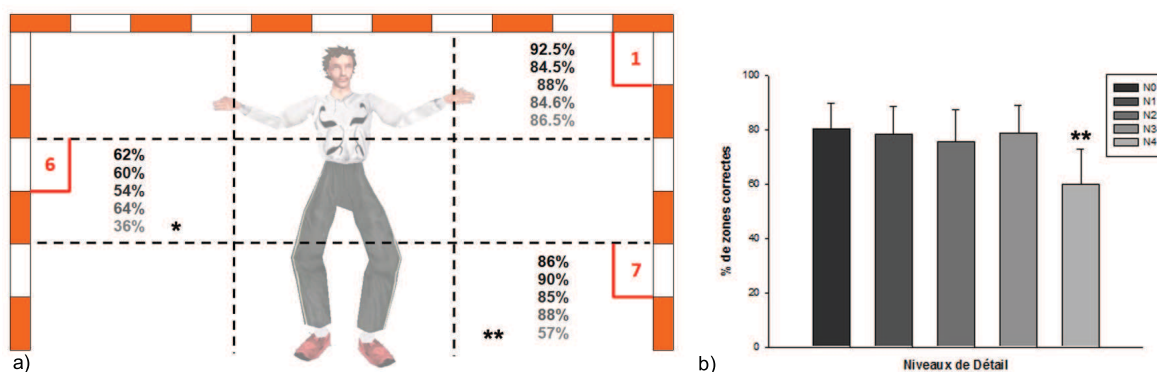


Fig. 3.5 - Pourcentages de zones correctement prédites en fonction du NDG (N0, N1, N2, N3 et N4) (* : $p < 0.05$; ** : $p < 0.01$).

Après avoir effectué une analyse de variance à deux voies à mesures répétées, il apparaît que les gardiens de but ont un pourcentage de zones correctement prédites significativement plus important pour les NDG N0 ($80.2 \pm 9.4\%$), N1 ($78.2 \pm 10.3\%$), N2 ($75.7 \pm 11.8\%$) et N3 ($78.9 \pm 10.1\%$) que pour N4 ($60 \pm 12.7\%$) pour l'ensemble des zones ($F_{(4,72)} = 6.304$; $p < 0.001$) (figure 3.5b).

Pour ce qui est de chacune des zones prise indépendamment, il existe une influence significative du NDG N4 pour les zones 6 (N0 vs N4 : $p < 0.05$; N1 vs N4 : $p < 0.05$; N2 vs N4 : $p = 0.167$; N3 vs N4 : $p < 0.01$) et 7 (N0 vs N4 : $p < 0.01$; N1 vs N4 : $p < 0.001$; N2 vs N4 : $p < 0.01$; N3 vs

N4 : $p < 0.01$) mais pas pour la zone 1 (N0 vs N4 : $p = 0.938$; N1 vs N4 : $p = 0.949$; N2 vs N4 : $p = 0.923$; N3 vs N4 : $p = 0.961$) (figure 3.5a).

En ce qui concerne l'influence de la zone visée sans prise en compte du facteur NDG, il apparaît une différence significative entre les zones 1 ($87.2 \pm 8.3\%$) et 6 ($55.3 \pm 9.7\%$) ($F_{(2,72)} = 4.218$; $p < 0.05$). Il n'y a pas de différence significative avec la zone 7 ($81.2 \pm 8.6\%$).

3.4.1.2 Pourcentage de réussite

Nous avons également calculé le pourcentage de réussite des gardiens de but lors de la tâche de jugement. Ce chiffre correspond au pourcentage de prédiction correcte, non plus en terme de zone mais en terme de position de la main correcte (figure 3.6).

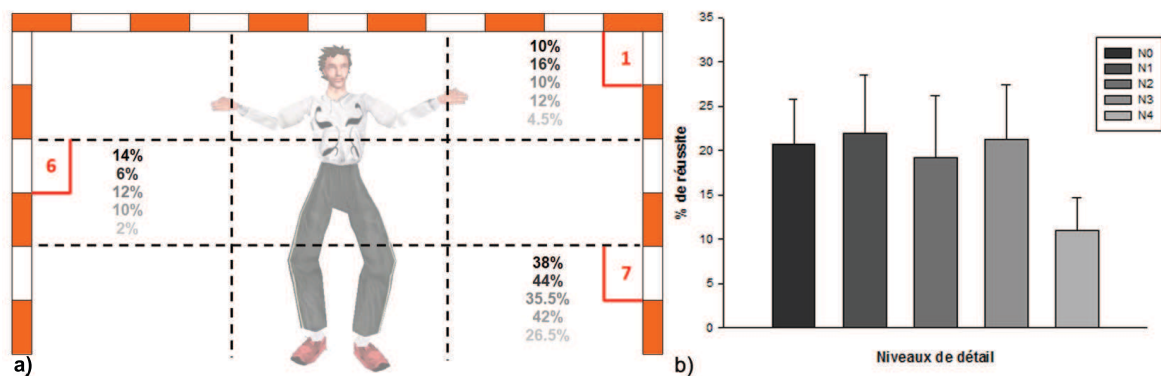


Fig. 3.6 - Pourcentages de réussite en fonction du NDG (N0, N1, N2, N3 et N4) pour la tâche de jugement.

D'après la figure 3.6, plusieurs constats peuvent être effectués. Tout d'abord, il n'y a pas d'influence significative du NDG sur le pourcentage de réussite sur l'ensemble des données ($F_{(4,72)} = 2.408$; $p = 0.067$). Cependant, on peut remarquer une tendance à la baisse pour le niveau N4 ($11 \pm 3.7\%$) par rapport aux autres NDG (N0= $20.6 \pm 5.1\%$; N1= $22 \pm 6.6\%$; N2= $19.2 \pm 7\%$; N3= $21.3 \pm 6.1\%$) (figure 3.6b).

Pour ce qui est du facteur "zone visée" seul, il apparaît une influence significative de ce facteur sur le pourcentage de réussite des gardiens de but ($F_{(2,72)} = 10.061$; $p < 0.01$). Les différences significatives se situent entre les zones 1 ($9.7 \pm 4.7\%$) et 7 ($37.3 \pm 5.5\%$) ($p < 0.01$), et entre les zones 6 ($8.8 \pm 5.1\%$) et 7 ($p < 0.01$) (figure 3.6a).

3.4.1.3 Erreur radiale de jugement

Afin d'analyser plus précisément la prédiction faite par les gardiens de but lors de la tâche de jugement, nous avons calculé l'erreur radiale qui correspond à la distance séparant la position finale du ballon virtuel de la position de la main du gardien de but au moment de la prédiction. Cette distance a également été calculée sur l'axe horizontal et sur l'axe vertical (figure 3.7).

Une analyse de variances à deux voies à mesures répétées nous apprend qu'il existe une influence significative du NDG sur la précision de la prédiction des gardiens de but de handball, que

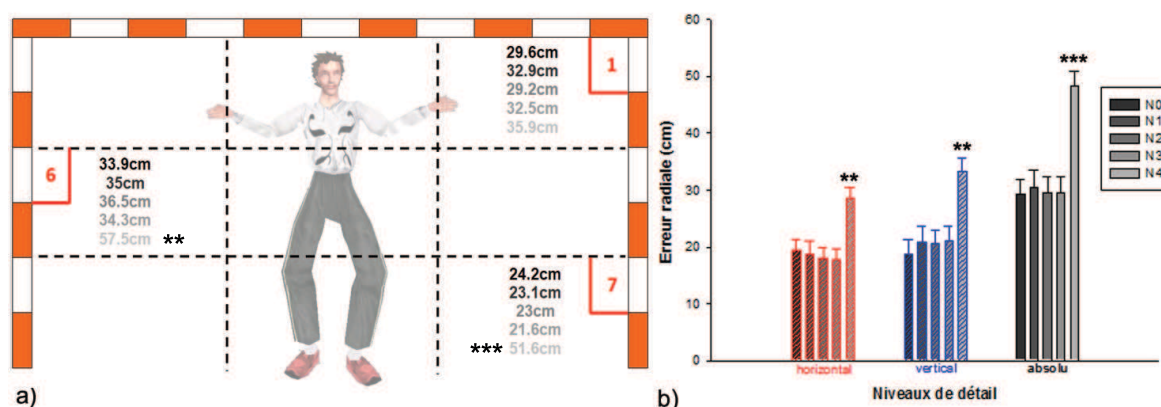


Fig. 3.7 - Erreur radiale et ses composantes en horizontal et en vertical en fonction du NDG (N0, N1, N2, N3 et N4) pour la tâche de jugement (** : $p < 0.01$; *** : $p < 0.001$). Les composantes horizontale et verticale ne sont pas représentées dans le but de handball.

ce soit pour l'erreur radiale ($F_{(4,68)} = 9.673$; $p < 0.001$) ou pour ses composantes en horizontal ($F_{(4,68)} = 5.798$; $p < 0.001$) et en vertical ($F_{(4,68)} = 5.394$; $p < 0.01$). Après un test *post hoc* de Tukey, on peut voir que l'erreur radiale pour le NDG N4 (en horizontal = 28.7 ± 1.9 cm, en vertical = 33.2 ± 2.5 cm, en absolu = 48.3 ± 2.7 cm) est significativement différente des autres niveaux (N0 : en horizontal = 19.5 ± 1.9 cm, en vertical = 18.7 ± 2.5 cm, en absolu = 29.2 ± 2.7 cm ; N1 : en horizontal = 18.8 ± 2.2 cm, en vertical = 20.8 ± 3.0 cm, en absolu = 30.4 ± 3.1 cm ; N2 : en horizontal = 18.1 ± 1.9 cm, en vertical = 20.5 ± 2.5 cm, en absolu = 29.6 ± 2.7 cm ; N3 : en horizontal = 17.8 ± 2.0 cm, en vertical = 21.0 ± 2.6 cm, en absolu = 29.5 ± 2.8 cm) (figure 3.7b).

Lorsqu'on s'intéresse à l'influence du facteur "NDG" à l'intérieur de chacune des trois zones visées, il apparaît des différences significatives d'erreur radiale entre N4 et les autres niveaux pour la zone 6 (N0 vs N4 : $p < 0.01$; N1 vs N4 : $p < 0.01$; N2 vs N4 : $p < 0.01$; N3 vs N4 : $p < 0.01$) et la zone 7 (N0 vs N4 : $p < 0.001$; N1 vs N4 : $p < 0.001$; N2 vs N4 : $p < 0.001$; N3 vs N4 : $p < 0.001$) uniquement (figure 3.7a).

De plus, si l'on regarde maintenant uniquement le facteur "zone visée" pour l'ensemble des tirs, il n'y a pas d'influence significative de ce facteur sur l'erreur radiale ($F_{(2,68)} = 1.279$; $p = 0.302$).

3.4.2 Résultats de la tâche en mouvement

Il a également été demandé aux gardiens de but de handball de réagir de façon naturelle face aux différents NDG. Dans ce cas de figure, plusieurs paramètres, caractéristiques du mouvement de parade du gardien de but, ont été calculés comme le TRM, le pourcentage de réussite, l'erreur radiale et l'indice cinématique de la réponse motrice.

3.4.2.1 Temps de Réponse Motrice

Comme nous avons pu le voir précédemment (cf. section 2.3.4, p48), le TRM reflète la mise en action de la parade du gardien de but. Les valeurs de ce délai en fonction des NDG sont

résumées sur la figure 3.8.

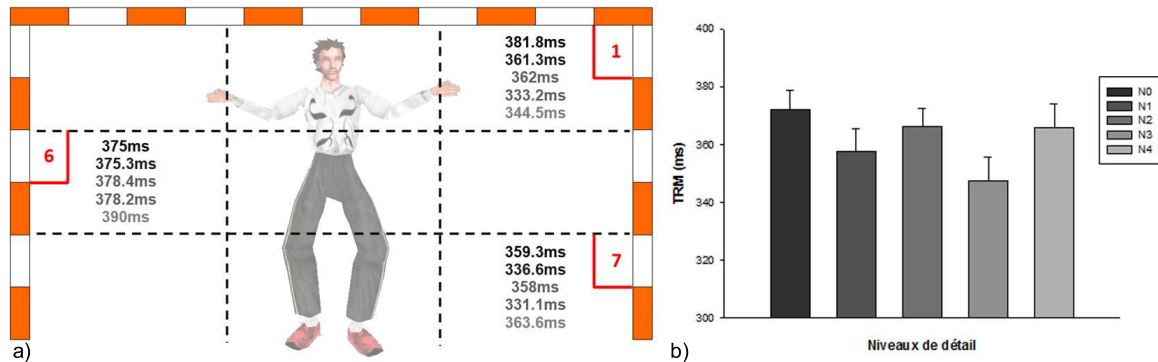


Fig. 3.8 - TRM en fonction du NDG (N0, N1, N2, N3 et N4).

D'après la figure 3.8, on peut voir qu'il n'y a pas d'influence significative du NDG sur le TRM ($F_{(4,72)} = 1.630$; $p=0.188$). En effet, les valeurs de TRM sont relativement proches pour tous les NDG (N0=372 ± 6.8ms ; N1=357.7 ± 7.9ms ; N2=366.1 ± 6.3ms ; N3=347.5 ± 8.1ms ; N4=366 ± 8.2ms) (figure 3.8b).

En ce qui concerne la zone visée quelle que soit le NDG, l'analyse de variances à deux voies à mesures répétées nous montre qu'il existe une influence significative de la zone sur les valeurs de TRM ($F_{(2,72)} = 4.544$; $p<0.05$). Cette différence significative se situe entre la zone 6 (379.4 ± 5.3ms) et la zone 7 (349.7 ± 7.5ms) ($p<0.05$) (figure 3.8a).

3.4.2.2 Pourcentage de réussite

Lors de la tâche réalisée en mouvement, nous avons mesuré l'efficacité des gardiens de but en calculant leur pourcentage de réussite. Un mouvement était considéré comme réussi lorsqu'un des membres du gardien de but rentrait en collision avec le ballon virtuel au cours de l'action de tir (figure 3.9).

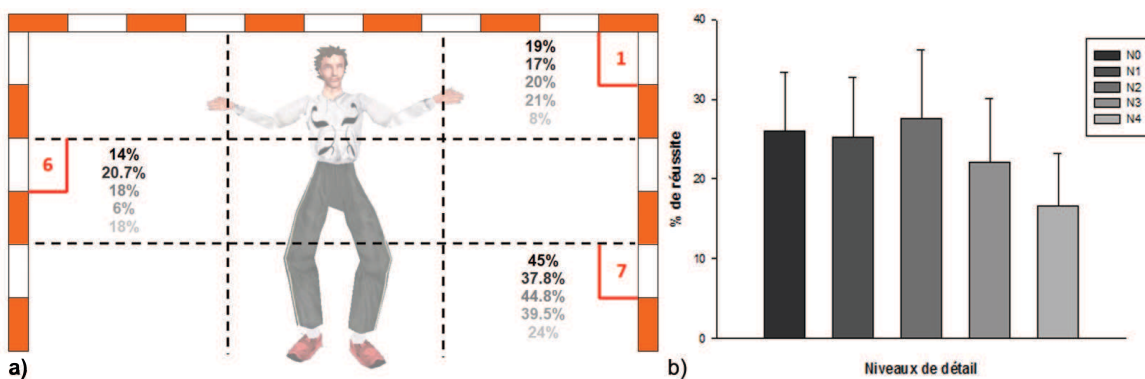


Fig. 3.9 - Pourcentage de réussite en fonction du NDG (N0, N1, N2, N3 et N4).

Après une analyse de variances à deux voies à mesures répétées, il n'apparaît aucune influence significative du NDG sur le pourcentage de réussite des gardiens de but ($F_{(4,72)} = 1.809$; $p=0.149$). Cependant, on peut observer une tendance non significative pour le pourcentage

de réussite du niveau N4 ($16.7 \pm 6.5\%$) par rapport aux autres NDG ($N0=26 \pm 7.4\%$; $N1=25.2 \pm 7.5\%$; $N2=27.6 \pm 8.5\%$; $N3=22.2 \pm 6.5\%$) (figure 3.9b).

L'analyse de variance démontre néanmoins une influence significative du facteur "zone visée" sur le pourcentage de réussite des gardiens de but ($F_{(2,72)} = 6.261$; $p < 0.01$). Cette influence se caractérise par une différence significative entre les zones 1 ($17 \pm 4.9\%$) et 7 ($38.2 \pm 5.1\%$) ($p < 0.05$) et les zones 6 ($15.3 \pm 5.4\%$) et 7 ($p < 0.05$).

3.4.2.3 Erreur radiale en mouvement

L'erreur radiale a pu être calculée lors du mouvement de parade du gardien de but lorsque ce dernier ne rentrait pas en collision avec le ballon virtuel lors de son geste. L'erreur radiale a été calculée au moment où le membre du gardien de but était le plus proche du ballon virtuel. Ce paramètre nous donne une idée de la précision avec laquelle le gardien de but effectue son mouvement (figure 3.10).

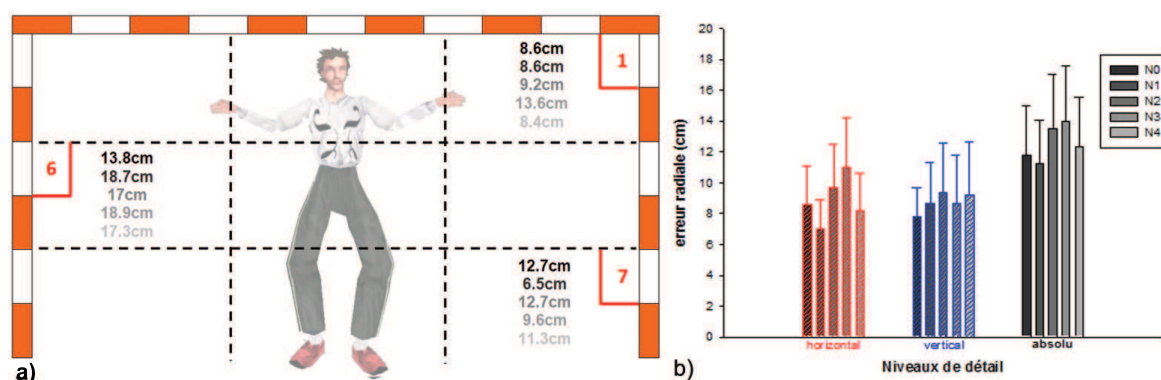


Fig. 3.10 - Erreur radiale et ses composantes en horizontal et en vertical en fonction du NDG (N0, N1, N2, N3 et N4). Les composantes horizontale et verticale ne sont pas représentées dans le but de handball.

Après avoir mené une analyse de variances à deux voies à mesures répétées, il n'y a pas d'influence significative du NDG sur les valeurs de l'erreur radiale et ses composantes horizontale et verticale, et donc sur la précision du geste des gardiens de but ($F_{(4,69)} = 0.689$; $p = 0.604$). Cela signifie que ces valeurs sont relativement proches pour l'ensemble des NDG (N0 : en horizontal= $8.6 \pm 2.5cm$, en vertical= $7.8 \pm 1.9cm$, en absolu= $11.8 \pm 3.2cm$; N1 : en horizontal= $7 \pm 1.9cm$, en vertical= $8.7 \pm 2.6cm$, en absolu= $11.2 \pm 2.9cm$; N2 : en horizontal= $9.7 \pm 2.8cm$, en vertical= $9.4 \pm 3.2cm$, en absolu= $13.5 \pm 3.5cm$; N3 : en horizontal= $11 \pm 3.2cm$, en vertical= $8.7 \pm 3.1cm$, en absolu= $14 \pm 3.5cm$; N4 : en horizontal= $8.2 \pm 2.4cm$, en vertical= $9.2 \pm 3.5cm$, en absolu= $12.3 \pm 3.2cm$) (figure 3.10b).

Néanmoins, le facteur "zone visée", indépendamment du facteur "NDG", semble avoir une influence significative sur les valeurs d'erreur radiale ($F_{(2,69)} = 7.202$; $p < 0.01$). C'est dans la zone 6 qu'apparaissent les valeurs d'erreur radiale les plus élevées ($17.1 \pm 4.5cm$) en comparaison aux autres zones (zone 1 : $9.7 \pm 3.9cm$; zone 7 : $10.6 \pm 4.8cm$). Les différences significatives se situent donc entre les zones 1 et 6 ($p < 0.01$) et entre les zones 7 et 6 ($p < 0.05$).

3.4.2.4 Indice cinématique de la réponse motrice

Cet indice nous permet de quantifier la régulation du mouvement du gardien de but (cf. figure 3.4, p67) à partir de la trajectoire du centre de masse de l'avant-bras au cours du mouvement. Il faut noter que les tirs situés en zone 7 ne font pas forcément intervenir que le mouvement de l'avant-bras. En effet, nous avons pu constater que les mouvements de parade pour des tirs en zone 7 amènent le gardien à utiliser aussi bien ses membres supérieurs que ses membres inférieurs. De ce fait, nous avons calculé l'indice cinématique de la réponse motrice uniquement pour les tirs en zone 1 et 6. Les valeurs de ces différentes erreurs RMS sont résumées sur la figure 3.11.

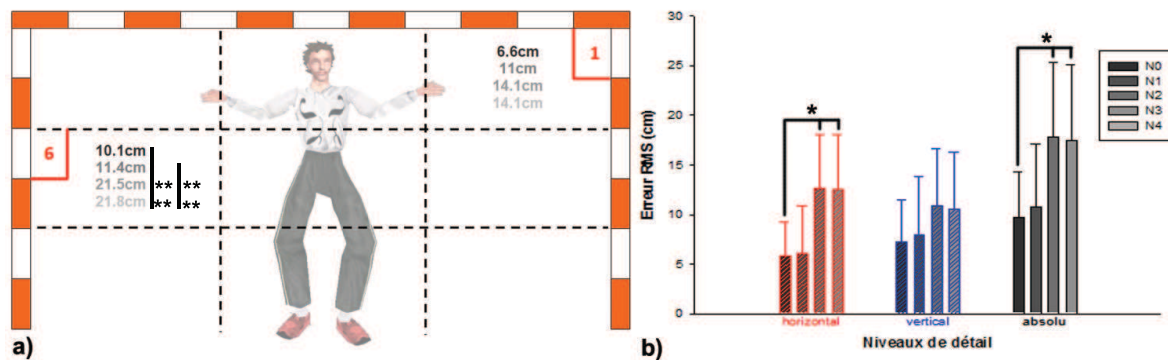


Fig. 3.11 - Erreurs RMS (en horizontal, vertical et absolu) entre la trajectoire du centre de masse de l'avant-bras pour le niveau N0 et cette même trajectoire pour les niveaux N1, N2, N3 et N4 (* : $p < 0.05$; ** : $p < 0.01$). Seules les erreurs en absolu sont représentées dans le but de handball.

La figure 3.11 nous montre qu'il y a une influence significative du NDG sur les valeurs d'erreur RMS calculées en horizontal ($F_{(3,22)} = 4.936$; $p < 0.01$) et en absolu ($F_{(3,22)} = 5.62$; $p < 0.01$) mais pas en vertical ($F_{(3,22)} = 2.571$; $p = 0.073$), même si cette dernière valeur est proche du seuil de significativité. De ce fait, un test *post hoc* nous apprend que les valeurs d'erreur RMS en horizontal et en absolu pour N0-N1 (erreur horizontale = 4.7 ± 1.9 cm ; absolue = 8.4 ± 2 cm) sont significativement différentes des valeurs RMS calculées pour N0-N3 (erreur horizontale = 12.6 ± 1.8 cm ; absolue = 17.8 ± 1.9 cm) ($p < 0.05$), et pour N0-N4 (erreur horizontale = 13 ± 2.1 cm ; absolue = 18 ± 2.3 cm) ($p < 0.05$) (figure 3.11b).

Si l'on considère maintenant chaque zone séparément, il apparaît des différences significatives d'erreur RMS en horizontal et en absolu en fonction des NDG uniquement pour la zone 6. Ces différences se situent entre les erreurs calculées pour N0-N1 (erreur horizontale = 6.8 ± 1.7 cm ; absolue = 10.1 ± 1.9 cm) et N0-N3 (erreur horizontale = 18.2 ± 1.7 cm ; absolue = 21.5 ± 1.9 cm) ($p < 0.01$), entre N0-N1 et N0-N4 (erreur horizontale = 18 ± 2.3 cm ; absolue = 21.8 ± 2.5 cm) ($p < 0.01$), entre N0-N2 (erreur horizontale = 7.1 ± 1.7 cm ; absolue = 11.4 ± 1.9 cm) et N0-N3 ($p < 0.01$), et entre N0-N2 et N0-N4 ($p < 0.01$) (figure 3.11a).

Lorsqu'on s'intéresse uniquement à l'influence du facteur "zone visée" sur l'erreur RMS, il apparaît une influence significative seulement sur l'axe horizontal après une analyse de variances à deux voies à mesures répétées ($F_{(1,22)} = 7.831$; $p < 0.05$). Cette influence provient de la différence significative des valeurs d'erreur RMS sur l'axe horizontal entre la zone 1 (5.8 ± 1.7 cm) et la zone 6 (12.5 ± 1.7 cm) ($p < 0.05$).

3.5 Discussion

Afin de permettre une mise en place des EV optimale pour l'analyse de la PIV des gardiens de but de handball, cette étude se proposait d'estimer quel niveau de représentation graphique du tireur et du ballon virtuels apparaît minimal pour induire un degré de présence suffisant chez les gardiens de but de handball. Ce degré de présence a été évalué par la mesure de la performance des gardiens de but [Zahorik1998, Sanchez-Vives2005]. Nous avons ainsi mis au point cinq NDG afin d'évaluer leur influence réciproque sur les tâches effectuées par les gardiens de but de handball.

Le niveau N0, considéré comme le niveau de référence par [Bideau2003b], était représenté par un personnage de synthèse entièrement texturé de façon réaliste. Le niveau N1 correspondait au niveau N0 non texturé. Dans le niveau N2, l'enveloppe corporelle du personnage de synthèse a été enlevée. Les articulations ne sont alors reliées que par des traits. Les NDG N3 et N4 utilisent une représentation de l'action de tir fondée sur le PLD. Seule la taille du ballon virtuel a été diminuée dans le niveau N4.

Les tâches effectuées par les gardiens de but étaient de deux types : d'une part les gardiens de but devaient prédire de façon passive (sans contrainte temporelle) la position finale du ballon virtuel dans le but grâce à leur main. C'est ce que nous avons appelé la tâche de jugement. D'autre part, nous avons demandé aux gardiens de but d'effectuer une réponse motrice naturelle pour intercepter le ballon virtuel.

Afin de discuter des différents résultats obtenus, nous aborderons tout d'abord les données concernant l'influence globale et relative (en fonction de la zone) du NDG sur la performance des gardiens de but de handball, puis nous nous intéresserons uniquement aux effets de la zone visée dans le but .

3.5.1 L'influence du niveau de détail graphique

Les résultats de cette seconde étude nous montrent tout d'abord qu'il n'y a pas d'influence du NDG sur la performance globale des gardiens de but de handball. 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. Autrement dit, les représentations dégradées du mouvement (N1, N2, N3 et N4) ne semblent pas influencer l'efficacité des gardiens de but. Ce constat rejoint les résultats obtenus par Ma et Kaber [Ma2006]. Ces auteurs ont démontré que le fait de dégrader visuellement l'apparence de l'arrière-plan dans un EV n'entraînait aucune modification de la performance des sujets immergés. Les auteurs expliquent ce résultat par l'hypothèse suivante : il existerait un seuil de réalisme visuel pour induire le sentiment de présence en EV. Au-delà de ce seuil, il paraîtrait difficile de quantifier des différences au niveau du degré de présence. Cette idée pourrait donc expliquer nos résultats.

Cependant, le concept de l'"uncanny valley" doit être pris en compte lorsqu'on étudie la représentation graphique de l'apparence humaine en EV : la représentation graphique d'un personnage synthétique génère une impression désagréable pour l'observateur immergé si cette représentation se rapproche de l'apparence humaine réelle sans la confondre totalement [Seyama2007]. Ainsi, en se basant sur les différentes idées évoquées, on peut émettre deux hypothèses. Tout d'abord, les NDG employés dans cette étude se trouvent au-dessus d'un seuil de réalisme visuel permettant d'induire un niveau de présence suffisant. Ensuite, ces NDG se situent en dessous du seuil de réalisme corporel défini par le concept de l'"uncanny valley".

De plus, le fait qu'il n'y ait pas d'influence des différents NDG sur l'efficacité des gardiens de but peut être mis en lien avec certains travaux de la littérature. Par exemple, Bobick et Davis ont démontré que des représentations "allégées" du mouvement étaient suffisantes pour reconnaître les mouvements effectués [Bobick1996]. Dans le même ordre d'idée, Ahlström et al. ont trouvé qu'il était plus simple d'identifier un marcheur représenté en PLD que filmé et flouté [Ahlström1997]. La représentation en PLD, initialement créée par Johansson [Johansson1973] (cf. section 1.1.3.4, p13), a déjà fait l'objet de nombreuses études au cours desquelles il a pu être prouvé que ce type de représentation permet de reconnaître l'identité de marcheur [Stevenage1999], de catégoriser les types de mouvements effectués [Dittrich1996], d'identifier le genre d'un individu [Hill2001, Pollick2002]. Dans le domaine sportif, il a été démontré que l'utilisation du PLD n'altérerait pas la performance des athlètes. Ainsi, certains auteurs ont prouvé que les capacités anticipatoires de joueurs de tennis expérimentés sont similaires face à un mouvement de frappe filmé et face au même mouvement représenté en PLD [Ward2003, Shim2006]. Nos résultats sont donc en accord avec certaines études de la littérature qui suggèrent que les informations visuelles liées au mouvement, qui sont disponibles dans la représentation en PLD, fourniraient en fait les informations visuelles minimales nécessaires pour effectuer une tâche de prédiction efficace.

Par ailleurs, l'efficacité des gardiens de but n'est pas le seul paramètre qui reste inchangé face à la représentation en PLD. En effet, les gardiens de but de handball ont également des TRM similaires face à un mouvement texturé et face à un mouvement en PLD lors de la tâche en mouvement. La capacité des gardiens à réagir est donc équivalente quelle que soit le NDG. Cela signifie que les indices visuels nécessaires pour initier un mouvement d'interception sont présents dans tous les NDG, notamment dans la représentation en PLD (N3 et N4). Il en va de même pour la précision des gardien de but lors de la tâche de mouvement : l'erreur radiale de ces derniers n'est pas influencée par les différents NDG. Cela suggère une fois de plus que la représentation en PLD n'affecte pas la perception des gardiens de but.

Cependant, un autre paramètre caractérise la performance du gardien de but de handball, il s'agit de la régulation de son geste en continu au cours de l'interception. Ce paramètre ne peut donc, par définition, qu'être analysé lors de la tâche réalisée en mouvement.

L'analyse cinématique du mouvement du gardien au cours de la tâche d'interception révèle qu'un NDG "allégé" peut influencer la régulation du geste. En effet, grâce au calcul des erreurs RMS, on peut voir que 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 régulation de 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, Williams2006]. Cependant la stéréovision n'était pas prise en compte dans ces études.

L'affichage en PLD du mouvement de tir semblent donc contenir des informations visuelles différentes qui influencent la régulation du mouvement d'interception. L'efficacité du gardien de but n'est cependant pas atteinte par la représentation en PLD ce qui signifie que la fin du mouvement est correctement dirigée. Par contre, il est possible de penser qu'au début du mouvement, le gardien de but utilise des informations visuelles imprécises, ce qui le conduit à initier sa parade de façon incorrecte. Cela expliquerait que les profils de position du centre de masse de l'avant-bras entre le niveau N1 et le niveau N3 ou N4 s'éloignent en début de parade. Le rapprochement du ballon virtuel permettrait ensuite de percevoir des informations visuelles

plus fiables, ce qui engendrerait un réajustement du mouvement d'interception. Ce réajustement est tel qu'il conduit à se trouver à la position exacte du ballon dans le but, l'efficacité du gardien reste alors équivalente à celle obtenue pour les autres NDG (cf. pourcentages de réussite).

3.5.2 L'importance de la taille du ballon

Si l'on s'intéresse maintenant à la précision de la réponse des gardiens de but lors de la tâche de jugement, on peut voir qu'il y a une influence significative du NDG N4. En effet, au cours de cette tâche, le pourcentage de zones correctement prédites est significativement plus faible pour N4 par rapport aux autres NDG ($p < 0.001$). Il en est de même pour l'erreur radiale en jugement : il existe une différence significative entre l'erreur radiale ($p < 0.001$) et ses composantes en horizontal ($p < 0.001$) et en vertical ($p < 0.01$) calculées pour le niveau N4, et les mêmes paramètres obtenus pour les autres NDG. Ces deux résultats (pourcentage de zones correctes et erreur radiale) démontrent qu'il existe une influence du niveau N4 sur la précision des gardiens de but de handball. Ainsi, même si les gardiens sont aussi efficaces pour l'ensemble des NDG, il apparaît que la précision de leur geste varie en fonction de la représentation graphique N4. Cette représentation ne se différencie du niveau N3 que par la taille réduite du ballon virtuel. Autrement dit, le fait de diminuer la taille de l'objet (de 15cm pour N3 à 5cm pour N4) dont il faut prédire la trajectoire entraîne une précision moindre chez les gardiens de but. La taille du ballon virtuel apparaît alors comme un facteur primordial à prendre en compte 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] (figure 3.12).

Même si dans cette étude, le taux d'expansion du ballon virtuel est le même entre N3 et N4 (le ballon parcourt 6m dans les deux cas), on pourrait expliquer l'influence de la taille du ballon par une valeur seuil dans la représentation de la taille du ballon. En dessous d'une certaine valeur (comprise entre 15cm et 5cm), les informations visuelles provenant du ballon 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. La taille du ballon virtuel joue donc un rôle capital dans la performance des gardiens de but en EV.

Par ailleurs, l'influence du niveau N4 sur la performance des gardiens de but de handball est avérée uniquement pour les zones 6 et 7. En effet, lors de la tâche de jugement, la précision des gardiens de but (pourcentage de zones correctes et erreur radiale) n'est pas altérée par N4 pour tous les tirs situés dans la zone 1. On pourrait donc supposer que le fait de diminuer la taille du ballon virtuel n'a pas d'incidence sur la précision de la prédiction pour des tirs dirigés dans la zone 1. Ceci pourrait être mis en relation avec l'angle vertical du tir calculé entre la hauteur initiale H_i du ballon au moment du lâcher (zone 1 : $H_i=1.65\text{m}$; zone 6 : $H_i=1.5\text{m}$; zone 7 : $H_i=1.45\text{m}$) et la hauteur finale H_f de la trajectoire du ballon (zone 1 : $H_f=1.66\text{m}$; zone 6 : $H_f=1\text{m}$; zone 7 : $H_f=0.33\text{m}$) entre les trois zones. On peut ainsi voir que l'angle δ_v est différent suivant la zone visée (zone 1 : $\delta_v=0.05^\circ$; zone 6 : $\delta_v=2.39^\circ$; zone 7 : $\delta_v=5.33^\circ$).

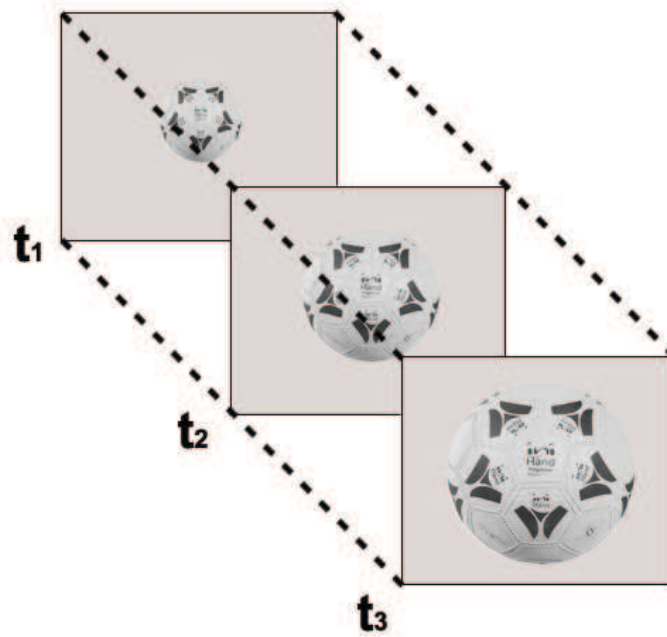


Fig. 3.12 - Principe du phénomène d'expansion visuelle. Cette figure illustre les entrées visuelles disponibles au gardien de but lorsque le ballon se rapproche de la ligne pour trois instants successifs (t_1 , t_2 et t_3). Le changement d'échelle du ballon au cours du temps fournit les informations visuelles nécessaires au gardien de but pour effectuer son interception.

Nous venons donc de voir que la taille de l'objet virtuel à intercepter (ici un ballon) pourrait avoir une influence sur la précision des gardiens de but lors d'une tâche de jugement et lors d'une tâche de mouvement (sauf pour la zone 1). Cette influence peut être expliquée par le phénomène d'expansion. Ainsi, la performance du gardien de but de handball ne semble pas être affectée par la représentation en PLD, dès lors que celle-ci n'utilise pas une taille réduite du ballon virtuel (comme dans le niveau N3).

Pour conclure sur l'impact du NDG sur la performance des gardiens de but de handball, nous avons pu voir que le critère de performance principal qu'est l'efficacité, n'est pas influencé par les différentes représentations graphiques utilisées dans cette étude. Néanmoins la régulation du mouvement d'interception du gardien de but apporte de nouveaux éléments sur l'influence du NDG lors de la tâche réalisée en mouvement. Après une analyse cinématique du mouvement, il apparaît en effet que les NDG représentés en PLD (N3 et N4) ont un impact sur la régulation du mouvement de parade des gardiens de but. De plus, le mouvement de tir représenté par le niveau N4, où la taille du ballon virtuel est diminuée, engendre un déclin significatif de la précision des gardiens de but lors de la tâche de jugement.

3.5.3 L'influence de la zone visée

Indépendamment du facteur "NDG", la zone visée par le tireur virtuel semble influencer la performance des gardiens de but. C'est notamment le cas pour l'efficacité des gardiens. En effet, nous avons montré que la zone visée par le tireur virtuel a une influence significative sur le pourcentage de réussite du gardien de but lors de la tâche de jugement ($p < 0.01$). Cette influence a pour origine le très fort pourcentage de réussite obtenu pour la zone 7 (37.3%) par rapport

aux autres zones (zone 1=10.5% ; zone 6=8.8%). On retrouve également ces résultats pour la tâche effectuée en mouvement (zone 1=17%, zone 6=15.3%, zone 7=38.2%). Il semble donc plus aisé de prédire la position finale du ballon virtuel dans le but lorsque celui-ci se dirige dans la zone située en bas à gauche quand on est face au tireur (zone 7), quelle que soit la tâche (jugement ou mouvement).

Une hypothèse peut être avancée pour expliquer ce pourcentage de réussite significativement supérieur. Il s'agit de la particularité cinématique du mouvement de tir virtuel réalisé pour atteindre la zone 7. En effet, une analyse cinématique menée sur les différents mouvements de tir nous amène à formuler différentes idées (figure 3.13).

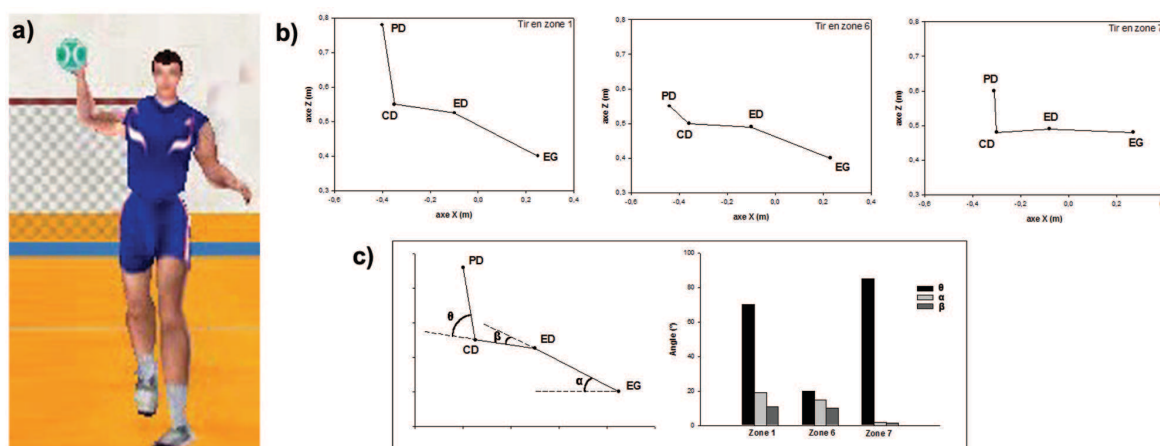


Fig. 3.13 - Résumé de l'analyse cinématique menée sur les tirs en zones 1, 6 et 7. Cette analyse comprend la photo d'un mouvement de tir (exemple du tir en zone 7) (a), une représentation schématique du membre supérieur pour les trois zones dans le plan frontal (b) et un histogramme des angles aux articulations du membre supérieur (c) à l'instant du lâcher. EG=épaule gauche ; ED=épaule droite ; CD=coude droit ; PD=poignet droit.

A partir des données cinématiques du mouvement de tir (illustrées par la photo 3.13a), nous avons tout d'abord représenté, au moment du lâcher du ballon, le haut du corps du tireur. Cette représentation simplifiée ne laisse apparaître que les articulations et les segments les plus importants pour le mouvement [Deridder1985, Fradet2003] afin d'obtenir la configuration segmentaire du tireur dans le plan frontal au moment du lâcher du ballon (figure 3.13b). Il faut noter que l'origine du repère utilisé (plan (O, x, z)) correspond à la position du centre de masse du tireur. Puis une analyse angulaire a été menée à partir de l'angle segmentaire au niveau de la ligne des épaules, et des angles articulaires au niveau de l'épaule droite et du coude droit (figure 3.13c).

Ces différents éléments peuvent nous aider à expliquer le fort pourcentage de réussite des gardiens de but dans la zone 7. En effet, on peut voir que la configuration de la ligne des épaules et du membre supérieur au moment du lâcher est très différente entre les trois tirs (zones 1, 6 et 7). La principale particularité du tir en zone 7 provient de la linéarité entre la ligne des épaules et le bras du tireur au moment du lâcher. Autrement dit, l'angle articulaire au niveau de l'épaule droite est très faible ($\beta=1.5^\circ$) par rapport au même angle pour les deux autres tirs (zone 1 : $\beta=11.1^\circ$ et zone 6 : $\beta=10.1^\circ$). On peut donc supposer que les gardiens de but de handball ont réussi à percevoir cet indice visuel relatif à la ligne des épaules pour le tir en zone 7, ce qui leur a permis de prédire efficacement la position finale du ballon dans le but.

Nous venons donc de voir que la zone visée par le personnage de synthèse peut avoir une influence sur l'efficacité des gardiens de but de handball. Cela est notamment le cas pour la zone

7 où les gardiens apparaissent plus performants. La configuration cinématique du mouvement du tireur peut être à l'origine de cette influence.

3.6 Conclusion

Au cours de cette étude, nous avons analysé l'influence de la représentation graphique du mouvement de tir sur la performance des gardiens de but de handball. Comme nous considérons ici que la performance des gardiens de but reflète le degré de présence en EV [Zahorik1998, Sanchez-Vives2005], nous avons pour objectif de déterminer le NDG minimal requis pour induire ce sentiment de présence.

Nos résultats montrent plusieurs influences du NDG sur la performance des gardiens de but. Tout d'abord, l'efficacité des gardiens n'est pas altérée par les différents NDG présentés. Cela va dans le sens de certaines données de la littérature concernant l'utilisation de la représentation en PLD pour l'analyse de la PIV [Shim2006]. Puis nous avons pu observer que la réduction de la taille du ballon influence la précision de la prédiction des gardiens de but lors de la tâche de jugement. Par conséquent, la taille du ballon virtuel doit rester standard (15cm) lors de sa représentation en EV. Enfin, il apparaît que la représentation en PLD influe sur la régulation du mouvement d'interception des gardiens de but. Ce type de représentation ne peut donc pas être utilisée pour l'animation d'un mouvement de tir en EV, pour une tâche réalisée en mouvement.

Aux vues des résultats obtenus dans cette étude, 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.

De plus, la zone visée dans le but semble être importante pour la perception visuelle des gardiens de but puisque les tirs situés dans la zone 7 engendrent de meilleurs résultats de la part des gardiens de but. Cette incidence peut être expliquée par la configuration cinématique du mouvement de tir au moment du lâcher du ballon.

Après avoir choisi la méthodologie la plus appropriée pour l'analyse de la PIV du gardien de but de handball au cours de la première étude, nous connaissons maintenant le NDG de l'action de tir virtuelle qui peut être appliqué en EV pour analyser la PIV du gardien de but. La troisième et dernière étude de ce travail de thèse va donc s'attacher à analyser la PIV du gardien de but afin de déterminer quel(s) élément(s) visuel(s) sont prépondérants pour son activité.

Chapitre 4

Analyse de la prise d'informations visuelles en environnement virtuel

Le premier chapitre de ce travail de thèse a pu démontrer l'avantage des EV sur la vidéo pour l'analyse de la PIV des gardiens de but de handball. La seconde étude s'est quant à elle intéressée à la manière dont le mouvement de tir doit être graphiquement représenté en EV. Le but de ce travail de thèse étant de concevoir et d'évaluer une méthodologie d'analyse de la PIV des gardiens de but de handball, nous nous proposons dans cette troisième et dernière étude d'investiguer la PIV des gardiens de but de handball en EV.

Il existe deux hypothèses principales dans la littérature concernant la PIV des sportifs face à une tâche d'interception. La première stipule que la performance dans ce type de tâche dépend des informations visuelles issues de la trajectoire de balle [Lenoir2002, McLeod2006, Bastin2006, Craig2006, Panchuk2006]. A l'inverse, d'autres auteurs ont avancé l'hypothèse que ce sont les informations visuelles provenant du mouvement de l'adversaire qui sont responsables de la performance [Shank1987, Goulet1989, Williams1994, Savelsbergh2002, Jackson2006, Rowe2009].

De manière à éclaircir la façon dont s'oriente la PIV du gardien de but de handball, il nous faut séparer les deux sources d'informations visuelles citées précédemment : mouvement du tireur et trajectoire du ballon. Par le passé, cette séparation des informations visuelles n'a pu être réalisée car les précédentes études sur le sujet se basaient généralement sur des techniques vidéos [Savelsbergh2002, Savelsbergh2005, Jackson2006, Rowe2009]. En utilisant notre méthodologie fondée sur la représentation de l'action de tir en EV, nous sommes en mesure d'isoler chacune des informations visuelles présentées au gardien de but.

Nous allons donc confronter une population de gardiens de but de handball experts à trois conditions d'une action de tir virtuel : une action où seule la trajectoire du ballon sera visible, une action où seul le mouvement de tir sera visible et enfin une action complète où ces deux éléments seront réunis. Nous serons alors en mesure de conclure sur l'importance relative de chacun de ces éléments, et donc de comprendre la façon dont s'applique la PIV des gardiens de but de handball. De la même façon que pour les deux études précédentes de ce travail de thèse, ce protocole sera élaboré pour une tâche de jugement et une tâche en mouvement.

4.1 Objectifs

Le principal objectif de cette étude est de comprendre la PIV 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 virtuel. Cela nous amène à considérer plusieurs conditions de visualisation appliquées à une seule et même action de tir. Cette action de tir sera animée à partir d'une capture de mouvement réel.

Les conditions de visualisation de l'action de tir virtuelle seront les suivantes : une condition où seule la trajectoire du ballon sera visible (condition BS), une condition où seul le mouvement du tireur sera animé (condition TS), et enfin une condition où les deux éléments seront affichés (condition BT), ce qui correspond à une action complète de tir (figure 4.1). A partir de l'analyse de la performance des gardiens de but de handball lors de ces trois conditions, nous pourrions démontrer quelle est la source d'informations visuelles privilégiée du gardien de but de handball.

Ce protocole expérimental tiendra compte des différents modes de réponse rencontrés dans la littérature sur l'analyse de la PIV des sportifs puisque nous étudierons simultanément les performances des gardiens de but lors d'une tâche de jugement et lors d'une tâche réalisée en mouvement.

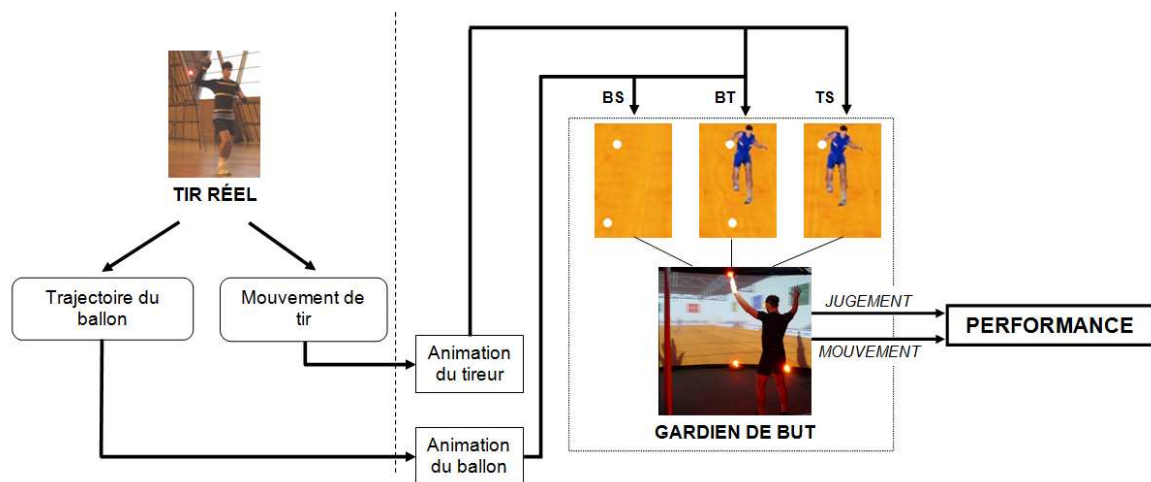


Fig. 4.1 - Schématisation de l'objectif de l'étude 3. Les gardiens de but de handball seront confrontés à trois conditions de visualisation. Pour chacune de ces conditions, deux modes de réponse seront utilisés : jugement et mouvement.

4.2 De la capture de mouvement à l'animation des actions de tir en environnement virtuel

Pour animer l'action de tir virtuelle, nous avons utilisé les données cinématiques de tir obtenues lors de la seconde étude (cf. section 3.2, p61) sur trois tireurs de niveau national (cf. tableau 3.2.1, p61). Il s'agit donc de tirs en appui à 12m du but enregistrés par l'intermédiaire du système de capture de mouvement Vicon MX40.

Les données cinématiques, transmises au module d'animation MKM, ont permis d'animer les actions de tir réelles capturées. Comme il y a deux modules indépendants respectivement pour l'animation du mouvement de tir et l'animation de la trajectoire du ballon, nous avons pu séparer puis associer ces deux types d'informations visuelles. Il faut noter que l'animation de la trajectoire du ballon de handball provient d'un modèle dynamique fondé sur le vecteur vitesse initial et la localisation finale du ballon dans le but.

4.3 Protocole expérimental en environnement virtuel

Une population de 10 gardiens de but de handball de niveau national a participé à cette étude. Le tableau 4.3 résume les caractéristiques anthropométriques des athlètes. Nous n'avons fourni aux gardiens aucune information relative au découpage du but en neuf zones de taille équivalente. Tous les gardiens ont donné leur accord préalable avant de participer à cette expérimentation. De plus, ils possédaient tous une vision normale ou considérée comme normale grâce à l'utilisation de lentilles de correction.

Sujets	Âge (ans)	Taille (m)	Masse (Kg)
S1	19	1.95	84
S2	34	1.84	85
S3	18	1.90	71
S4	27	1.88	120
S5	17	1.77	69
S6	23	1.84	85
S7	24	1.81	96
S8	27	1.85	80
S9	30	1.82	89
S10	21	1.85	80
Moyenne	24	1.84	85.9
Écart type	5.52	0.04	14.36

Tab. 4.1 - Caractéristiques anthropométriques des gardiens de but de handball participant à l'expérimentation de la troisième étude.

A l'image des deux premières études de ce travail de thèse, la performance des gardiens de but a été enregistrée par l'intermédiaire du système Vicon MX40, aussi bien pour la tâche de jugement que pour la tâche de mouvement. Le fait d'utiliser ce matériel a permis au gardien d'adapter son point de vue en temps réel au cours de l'expérimentation (cf. figure 2.7, p45).

A partir de l'animation des actions de tir réelles, nous avons pu concevoir trois types de conditions visuelles pour l'analyse de la PIV (figure 4.2) :

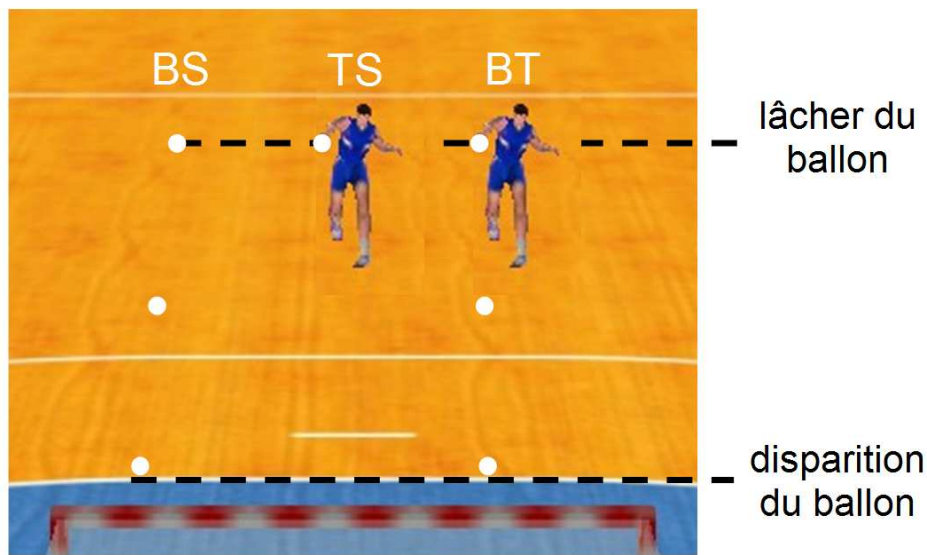


Fig. 4.2 - Schématisation des différentes conditions visuelles utilisées dans la troisième expérimentation (BS, TS, BT).

- BS : cette condition ne fait apparaître que la trajectoire du ballon depuis l'instant du lâcher jusqu'à sa disparition à 6m du but. Une fenêtre virtuelle placée au-dessus de la scène permet d'effectuer le décompte avant le lâcher du ballon (sinon le gardien n'a pas d'indication sur le moment où va partir le ballon).
- TS : le gardien de but ne voit ici que le mouvement du tireur. Autrement dit, le ballon est visible pendant tout le déroulement du mouvement de tir et disparaît au moment du lâcher.
- BT : lors de la condition BT, le gardien de but est face à l'action de tir complète, c'est-à-dire que le gardien voit à la fois le mouvement de tir et la trajectoire du ballon, jusqu'à sa disparition à 6m du but.

Une série d'actions de tir virtuelles a été proposée pour l'échauffement des gardiens de but. Au cours de celle-ci, les gardiens pouvaient voir neuf tirs, correspondant à trois tirs par condition visuelle (BS, TS, BT). Chacun de ces tirs était dirigé vers l'une des neuf zones dans un ordre aléatoire. Aucune action des gardiens réalisée au cours de la session d'échauffement n'a été retenue pour la suite de l'expérimentation.

Dans cette étude, les zones sélectionnées dans le but sont les suivantes : zones 1, 3, 4 et 6 (cf. figure 2.4, p42). Nous n'avons pas gardé les zones basses du but du fait des résultats obtenus lors de la deuxième étude. De plus, nous avons conservé cinq répétitions par zone visée dans un ordre aléatoire, ce qui nous donne un total de :

$$(4 \text{ zones} \times 5 \text{ répétitions}) \times 3 \text{ conditions visuelles} = 60 \text{ tirs}$$

4.3.1 La tâche en jugement

Pendant le mode de réponse en jugement, il était demandé au gardien de but de visionner l'action de tir virtuelle tout en restant immobile au centre du but. Puis le gardien devait indiquer avec sa main, aussi rapidement que possible, l'endroit dans le but où il estimait que le ballon

terminait sa trajectoire (cf. figure 2.9, p48). La position de la main était alors enregistrée par l'intermédiaire du système Vicon MX40. En effet, 7 marqueurs réfléchissants ont été placés au préalable sur les mains du gardien. 4 autres marqueurs placés sur la tête du gardien ont permis l'adaptation du point de vue pendant l'expérimentation.

4.3.2 La tâche en mouvement

Pour ce qui est de la tâche réalisée en mouvement, chaque gardien avait pour consigne de tenter d'arrêter le ballon de façon naturelle (même quand celui-ci disparaissait de la main du tireur dans la condition TS). Le mouvement d'interception était alors enregistré *via* le système Vicon MX40 composé de caméras infrarouges et de marqueurs réfléchissants. Ces marqueurs étaient positionnés sur l'ensemble du corps du gardien de la même façon que dans la section 2.3.2 (46) afin de permettre l'adaptation du point de vue et le calcul de la détection de collision (cf. section 2.3.2.1, p46).

4.3.3 Analyse de la tâche en jugement

En ce qui concerne la tâche de jugement, la position des marqueurs réfléchissants attachés aux mains du gardien nous a permis de calculer la position du centre de la main au moment de la prédiction. Cette position a ensuite été comparée avec la position finale du ballon dans le but. Un ensemble de variables a alors pu être calculé :

- le pourcentage de zones correctes du gardien de but : ce paramètre a été calculé lorsque le gardien positionne sa main dans la zone où va réellement le ballon,
- le pourcentage de réussite du gardien de but : calculé lorsque la main du gardien et le ballon virtuel sont superposés (cf. équation (2.1), p47),
- l'erreur radiale de jugement : obtenue lorsque la tâche de prédiction n'est pas réussie. Autrement dit, cette erreur correspond à la différence de distance en absolu entre le cercle représentant la main et le cercle représentant le ballon virtuel (cf. équation (2.2), p48 et figure 2.9, p48).

4.3.4 Analyse de la tâche en mouvement

Les différents paramètres calculés lors de la tâche en mouvement sont issus du processus de détection de collision ainsi que du traitement de certaines données cinématiques par le logiciel Matlab. Ainsi nous avons pu obtenir les paramètres suivants :

- 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 [Richerson2005],
- le pourcentage de réussite du gardien de but : la tâche du gardien était réussie lorsque le ballon virtuel était superposé à l'un des segments du corps du gardien au cours du mouvement de parade (cf. équation (2.3), p49),
- l'erreur radiale de mouvement : quand la tâche n'était pas réussie, nous avons calculé

la distance séparant le ballon virtuel du segment le plus proche au cours du mouvement d'interception (cf. équation (2.4), p49 et figure 2.10, p49).

4.3.5 Analyse cinématique et tests statistiques

Nous avons réalisé l'ensemble des tests statistiques grâce au logiciel Sigmastat. La normalité des variables étudiées a été établie par le test de Kolmogorov-Smirnov et l'homogénéité des variances par le test de Levene ("Equal Variances Test"). Lorsque ces deux tests ne passaient pas, un test non paramétrique a pu être mené ("Wilcoxon Test"). Les différences entre les trois conditions visuelles et les zones visées ont été calculées à partir d'analyses de variance à mesures répétées. Dans le cas où une différence significative était détectée, nous avons utilisé le test *post hoc* de Tukey. Nous avons fixé le seuil de significativité à $p < 0.05$.

4.4 Résultats

Les résultats de cette troisième étude seront présentés de la manière suivante : nous allons d'abord voir les résultats issus de la tâche en jugement puis nous verrons ceux obtenus pour la tâche en mouvement.

Pour chacune des variables que nous allons décrire, nous commencerons par étudier l'influence de la condition visuelle (BS, TS et BT) sur la performance des gardiens de but de handball. La répartition de cette influence à l'intérieur de chacune des zones visées sera ensuite abordée. Enfin, nous examinerons si la zone visée au cours de l'expérimentation a un impact sur la performance des gardiens de but, indépendamment de la condition visuelle.

4.4.1 Résultats de la tâche en jugement

Les trois principaux paramètres calculés pour la tâche en jugement sont : le pourcentage de zones correctes, le pourcentage de réussite et l'erreur radiale de jugement.

4.4.1.1 Pourcentage de zones correctes

Ce paramètre correspond au pourcentage de zones correctement prédites par le gardien de but. Cela constitue un premier niveau d'analyse dans la précision de la réponse du gardien de but de handball (figure 4.3).

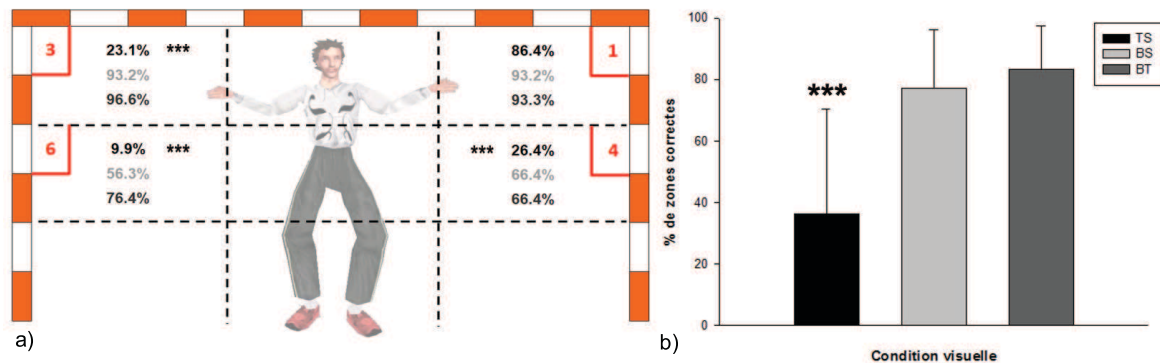


Fig. 4.3 - Pourcentages de zones correctement prédites en fonction de la condition visuelle (BS, TS, BT) (***) : $p < 0.001$.

Une analyse de variance à deux voies à mesures répétées nous montre qu'il existe une influence significative de la condition visuelle sur le pourcentage de zones correctement prédites ($F_{(2,54)} = 100.91$; $p < 0.001$). En effet, le pourcentage de zones correctement prédites pour la condition TS ($36.5 \pm 34.1\%$) est significativement inférieur aux pourcentages obtenus pour les conditions BS ($77.3 \pm 18.8\%$) et BT ($83.2 \pm 14.3\%$) (figure 4.3b).

Si l'on considère maintenant le facteur "condition visuelle" à l'intérieur de chacune des zones visées, on s'aperçoit qu'il y a une influence significative de la condition visuelle TS sur les pourcentages de zones correctes dans la zone 3 (TS vs BS : $p < 0.001$; TS vs BT : $p < 0.001$),

dans la zone 4 (TS vs BS : $p<0.001$; TS vs BT : $p<0.001$) et dans la zone 6 (TS vs BS : $p<0.001$; TS vs BT : $p<0.001$) (figure 4.3a).

Si l'on s'intéresse maintenant au facteur "zone visée" seul, l'analyse de variance montre que ce facteur a une influence significative sur le pourcentage de zones correctes ($F_{(3,54)} = 20.089$; $p<0.001$). Plus précisément, cette influence provient de la différence significative entre le pourcentage de la zone 1 ($91 \pm 17.6\%$) et les pourcentages des zones 3 ($71 \pm 37.9\%$) ($p<0.001$), 4 ($53.1 \pm 33.5\%$) ($p<0.001$) et 6 ($47.5 \pm 37.8\%$) ($p<0.001$). Il y a par ailleurs une autre différence significative entre le pourcentage de la zone 3 et les pourcentages des zones 4 ($p<0.05$) et 6 ($p<0.01$).

4.4.1.2 Pourcentage de réussite

Lors de la tâche de jugement, nous avons pu calculer le pourcentage de réussite des gardiens de but. Cette valeur correspond au nombre de fois où le gardien a positionné sa main à l'endroit où se trouvait le ballon virtuel dans le but. La figure 4.4 résume la répartition des pourcentages de réussite obtenus par les gardiens de but.

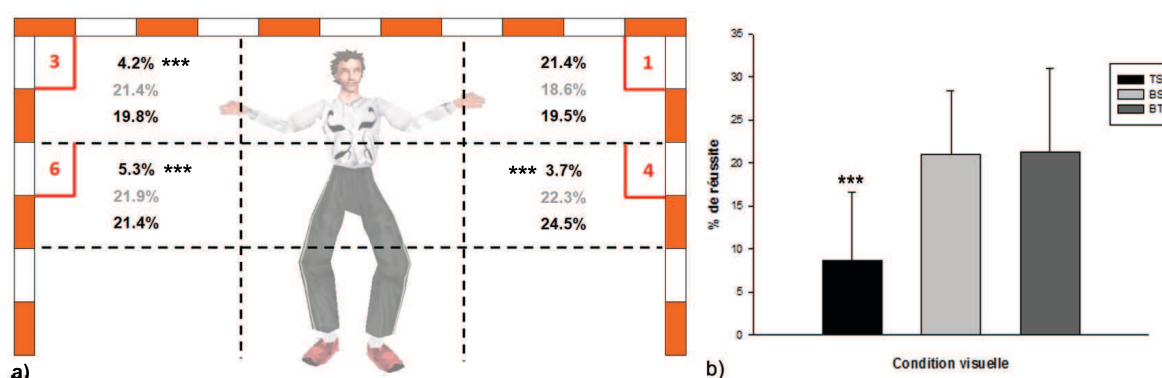


Fig. 4.4 - Pourcentages de réussite en fonction de la condition visuelle (BS, TS, BT) pour la tâche de jugement (***) : $p<0.001$.

En premier lieu, tout comme pour le pourcentage de zones correctes, il apparaît une influence significative de la condition visuelle ($F_{(2,54)} = 46.082$; $p<0.001$). Un test *post hoc* de Tukey nous apprend que le pourcentage de réussite obtenu pour la condition TS ($8.6 \pm 7.9\%$) est significativement inférieur à ceux des conditions BS ($21.1 \pm 7.3\%$) et BT ($21.3 \pm 9.7\%$) ($p<0.001$) (figure 4.4b).

Prises indépendamment les unes des autres, les zones visées sont aussi influencées par la condition visuelle. Ainsi, le pourcentage de réussite pour la condition TS est significativement inférieur dans les zones 3 ($p<0.001$), 4 ($p<0.001$) et 6 ($p<0.001$) mais pas dans la zone 1 ($p=0.74$) (figure 4.4a).

Si l'on isole le facteur "zone visée", on voit qu'il n'y a pas d'influence significative de la zone dans laquelle est dirigée le ballon virtuel (zone 1= $19.8 \pm 4.3\%$; zone 3= $15.1 \pm 5.7\%$; zone 4= $16.8 \pm 6.2\%$; zone 6= $16.2 \pm 5.6\%$) sur le pourcentage de réussite des gardiens de but ($F_{(3,54)} = 1.531$; $p=0.229$).

4.4.1.3 Erreur radiale de jugement

L'erreur radiale nous renseigne sur la précision de la prédiction faite par les gardiens de but de handball. Ses composantes calculées sur les axes horizontal et vertical permettent d'obtenir la distance absolue séparant la position de la main du gardien de la position finale du ballon virtuel dans le but (figure 4.5).

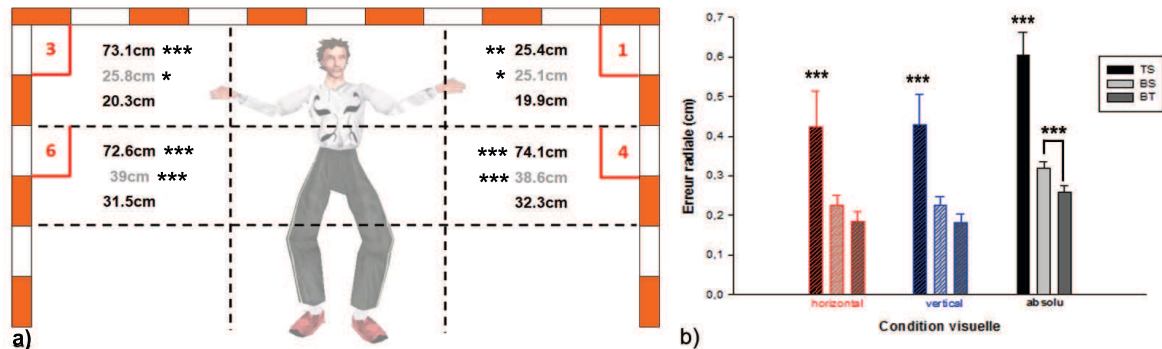


Fig. 4.5 - Erreur radiale et ses composantes en horizontal et en vertical en fonction de la condition visuelle (BS, TS, BT) pour la tâche de jugement (* : $p < 0.05$; ** : $p < 0.01$; *** : $p < 0.001$). Les composantes horizontale et verticale ne sont pas représentées dans le but de handball.

D'après la figure 4.5, on peut voir qu'il y a une influence significative de la condition visuelle sur les valeurs de l'erreur radiale ($F_{(2,54)} = 803.501$; $p < 0.001$) et de ses composantes en horizontal ($F_{(2,54)} = 102.45$; $p < 0.001$) et en vertical ($F_{(2,54)} = 168$; $p < 0.001$). Pour les composantes horizontale et verticale, la différence significative se situe entre la condition TS (en horizontal : $42.4 \pm 8.9cm$; en vertical : $43 \pm 7.7cm$) et les conditions BS (en horizontal : $22.7 \pm 2.3cm$; en vertical : $22.2 \pm 2.2cm$) et BT (en horizontal : $18.3 \pm 2.5cm$; en vertical : $18.6 \pm 2cm$) (en horizontal : $p < 0.001$; en vertical : $p < 0.001$). Pour ce qui est de l'erreur radiale proprement dite, en plus de la différence significative entre la condition TS ($61.3 \pm 5.3cm$) et les conditions BS ($31.8 \pm 1.4cm$) et BT ($26.2 \pm 1.8cm$) ($p < 0.001$), il y a également une différence significative entre la condition BS et la condition BT ($p < 0.001$) (figure 4.5b).

Pour chacune des quatre zones visées, l'influence de la condition visuelle est différente. En effet, dans la zone 1, on a des différences significatives d'erreur absolue entre les conditions TS et BT ($p < 0.01$) et entre les conditions BS et BT ($p < 0.05$). Dans la zone 3, ces différences significatives se trouvent entre les trois conditions visuelles (TS vs BS : $p < 0.001$; TS vs BT : $p < 0.001$; BS vs BT : $p < 0.05$). C'est aussi le cas pour la zone 4 (TS vs BS : $p < 0.001$; TS vs BT : $p < 0.001$; BS vs BT : $p < 0.01$) et la zone 6 (TS vs BS : $p < 0.001$; TS vs BT : $p < 0.001$; BS vs BT : $p < 0.001$) (figure 4.5a).

Si l'on ne s'intéresse maintenant qu'à la zone visée par le tireur virtuel, on s'aperçoit que cette dernière influence significativement l'erreur radiale des gardiens de but ($F_{(3,54)} = 245.463$; $p < 0.001$) ainsi que ses composantes horizontale ($F_{(3,54)} = 68.416$; $p < 0.001$) et verticale ($F_{(3,54)} = 74.545$; $p < 0.001$). En ce qui concerne la composante horizontale, ce sont principalement les valeurs de la zone 1 qui sont inférieures à celles des trois autres zones ($p < 0.001$). Pour la composante verticale, il y a des différences significatives entre la zone 1 et les autres zones ($p < 0.001$), et entre la zone 3 et les zones 4 et 6 ($p < 0.001$). On retrouve les mêmes résultats pour les valeurs d'erreur en absolu.

4.4.2 Résultats de la tâche en mouvement

Lors du mode de réponse en mouvement, les gardiens de but de handball devaient tenter d'arrêter le ballon de la même façon que s'ils étaient en situation de match. Nous avons alors pu calculer trois paramètres caractéristiques de cette tâche en mouvement : le TRM, le pourcentage de réussite et l'erreur radiale.

4.4.2.1 Temps de Réponse Motrice

Lors d'un mouvement d'interception, il est important de connaître le délai de mise en action des segments corporels. C'est ce que nous avons voulu caractériser en calculant le TRM lors de la tâche de mouvement (figure 4.6).

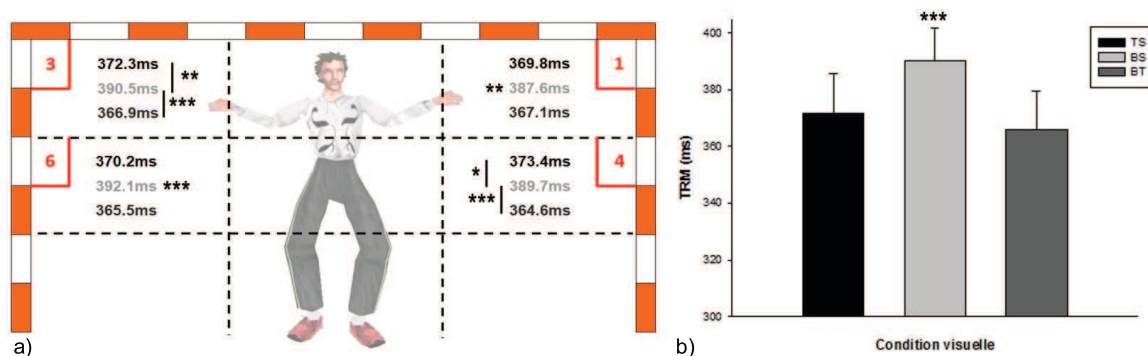


Fig. 4.6 - TRM en fonction de la condition visuelle (BS, TS, BT) pour la tâche de mouvement (* : $p < 0.05$; ** : $p < 0.01$; *** : $p < 0.001$).

Après une analyse de variances à deux voies à mesures répétées, il apparaît une influence significative de la condition visuelle sur le TRM ($F_{(2,54)} = 43.713$; $p < 0.001$). En effet, il existe une différence significative entre le TRM de la condition BS ($389.9 \pm 11.8ms$) et les TRM des conditions TS ($371.4 \pm 14.3ms$) et BT ($366 \pm 13.3ms$) ($p < 0.001$) (figure 4.6b).

Lorsqu'on regarde l'influence de la condition visuelle à l'intérieur de chacune des zones, on retrouve cette influence significative de la condition BS par rapport aux conditions TS et BT dans les zones 1 ($p < 0.01$), 3 (BS vs TS : $p < 0.01$; BS vs BT : $p < 0.001$), 4 (BS vs TS : $p < 0.05$; BS vs BT : $p < 0.001$) et 6 ($p < 0.001$) (figure 4.6a).

L'analyse de variances à deux voies à mesures répétées nous révèle en revanche qu'il n'y a pas d'influence significative de la zone visée sur le TRM ($F_{(3,54)} = 0.108$; $p = 0.955$).

4.4.2.2 Pourcentage de réussite

Afin de caractériser l'efficacité des gardiens de but, nous avons calculé le pourcentage de réussite des gardiens de but lors de leur mouvement d'interception. Pour cela, il fallait que l'un des membres du gardien de but rentre en contact avec le ballon virtuel au cours du mouvement. Les résultats sont résumés sur la figure 4.7.

D'après cette figure, on peut voir que la condition visuelle a une influence significative sur

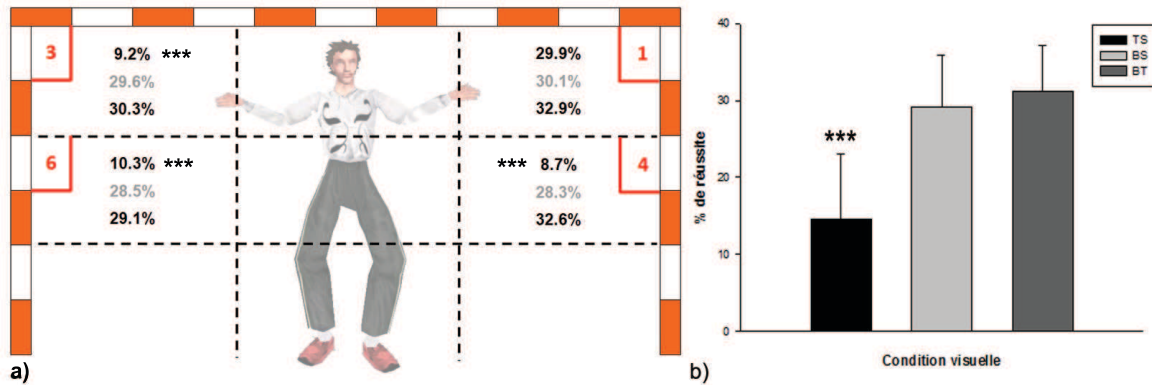


Fig. 4.7 - Pourcentage de réussite en fonction de la condition visuelle (BS, TS, BT) pour la tâche de mouvement (***) : $p < 0.001$.

le pourcentage de réussite des gardiens de but de handball ($F_{(2,54)} = 100.226$; $p < 0.001$). Cette influence se traduit par une différence significative entre le pourcentage obtenu pour la condition visuelle TS ($14.5 \pm 8.6\%$) et les pourcentages des conditions BS ($29.1 \pm 6.7\%$) et BT ($31.2 \pm 5.9\%$) (figure 4.7b).

Pour ce qui est de l'influence de la condition visuelle TS à l'intérieur de chacune des zones, celle-ci est significative pour les zones 3 ($p < 0.001$), 4 ($p < 0.001$) et 6 ($p < 0.001$) mais pas pour la zone 1 (BT vs TS : $p = 0.621$; BS vs TS : $p = 0.997$) (figure 4.7a).

En ce qui concerne le facteur "zone visée" indépendamment du facteur "condition visuelle", il apparaît une influence significative de la zone dans laquelle est dirigée le ballon virtuel ($F_{(3,54)} = 6.389$; $p < 0.01$). Cette influence se caractérise par une différence significative entre les valeurs de la zone 1 ($31 \pm 4.2\%$) et celles des zones 3 ($23 \pm 5.7\%$), 4 ($23.2 \pm 4.8\%$) et 6 ($22.6 \pm 5.3\%$) ($p < 0.01$).

4.4.2.3 Erreur radiale en mouvement

Lorsqu'il n'y avait pas collision entre le gardien de but et le ballon virtuel, nous avons pu calculer l'erreur radiale. Cette erreur correspond à la distance séparant le ballon virtuel du membre du gardien le plus proche au cours du mouvement d'interception. Les résultats concernant ce paramètre sont résumés sur la figure 4.8.

La figure 4.8 nous renseigne sur le fait qu'il existe une influence significative de la condition visuelle sur les valeurs d'erreur radiale ($F_{(2,54)} = 257.762$; $p < 0.001$) et sur celles de ses composantes en horizontal ($F_{(2,54)} = 149.503$; $p < 0.001$) et en vertical ($F_{(2,54)} = 69.197$; $p < 0.001$). Un ensemble de tests *post hoc* nous apprend que les différences significatives se situent entre les valeurs d'erreur radiale pour la condition visuelle TS (en horizontal : $34.4 \pm 8\text{cm}$; en vertical : $33.2 \pm 9.3\text{cm}$; en absolu : $47.8 \pm 7.3\text{cm}$) et les valeurs pour les conditions BS (en horizontal : $12.7 \pm 2.6\text{cm}$; en vertical : $13.1 \pm 3.6\text{cm}$; en absolu : $18.2 \pm 2.9\text{cm}$) et BT (en horizontal : $9.8 \pm 4.6\text{cm}$; en vertical : $9.5 \pm 5.6\text{cm}$; en absolu : $13.6 \pm 4.4\text{cm}$) ($p < 0.001$ en horizontal, vertical et absolu) (figure 4.8b).

A l'intérieur de chacune des quatre zones visées, on retrouve l'influence de la condition visuelle TS sur l'erreur radiale. Pour la zone 1, une différence significative existe entre les valeurs pour TS et celles pour BT uniquement ($p < 0.05$). Pour les zones 3, 4 et 6, on a une différence

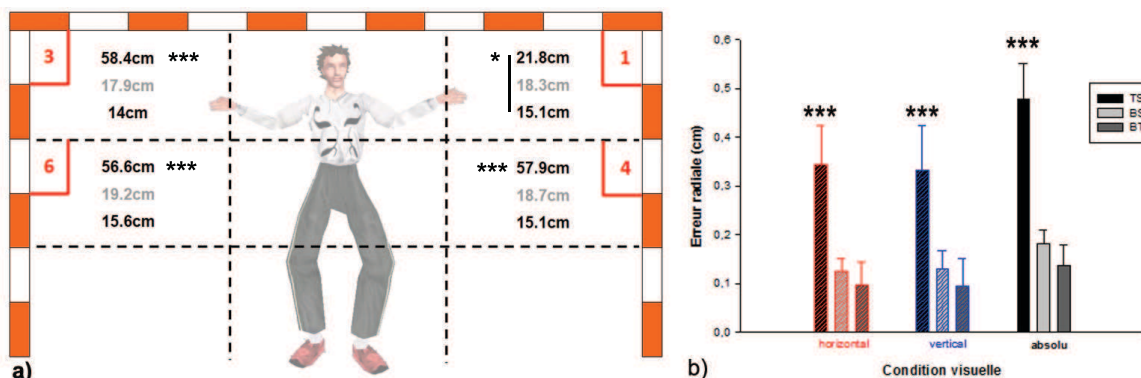


Fig. 4.8 - Erreur radiale et ses composantes en horizontal et en vertical en fonction de la condition visuelle (BS, TS, BT) (* : $p < 0.05$; *** : $p < 0.001$). Les composantes horizontale et verticale ne sont pas représentées dans le but de handball.

significative entre TS et BS ($p < 0.001$), et entre TS et BT ($p < 0.001$) (figure 4.8a).

En isolant le facteur "zone visée", on s'aperçoit que ce dernier a une influence significative sur les valeurs d'erreur radiale ($F_{(3,54)} = 42.65$; $p < 0.001$) et ses composantes horizontale ($F_{(3,54)} = 18.596$; $p < 0.001$) et verticale ($F_{(3,54)} = 9.68$; $p < 0.001$). Dans tous les cas, la différence significative est comprise entre les valeurs obtenues pour la zone 1 et celles des trois autres zones ($p < 0.001$).

4.5 Discussion

Le duel entre un gardien de but et un joueur de champ au handball se caractérise par une pression temporelle élevée qui oblige le gardien à prélever et sélectionner des informations visuelles dans un temps très court. Le gardien doit donc effectuer une PIV efficace pour prendre la bonne décision et ainsi être performant [Williams1999a]. Or des difficultés perceptives apparaissent lorsque le temps disponible pour effectuer une réponse motrice est supérieur au temps de vol de l'objet à intercepter [Ripoll1989].

Dans le cadre de notre étude, le tireur virtuel lâchait le ballon à 12m du but à une vitesse proche de $20m.s^{-1}$. Cela laissait donc 600ms au gardien pour intercepter le ballon lors de la tâche de mouvement. Or le gardien initie son mouvement environ 370ms après le départ du ballon lorsqu'il est face à une action de tir correctement texturée (cf. étude 2 et 3). Cela laisse 230ms au gardien de but pour atteindre le ballon virtuel. Or lorsqu'il est placé au centre du but, les mains du gardien se situent environ à 1.5m en vertical et 0.5m en latéral. Pour aller chercher un ballon dans la zone 1 ou la zone 3 du but, le gardien doit donc déplacer sa main de 0.52m en 230ms. La vitesse d'action du gardien doit donc être autour de $2.2m.s^{-1}$. Cette valeur correspond à la vitesse moyenne d'action du gardien obtenue lors de tests expérimentaux. Lors de ce duel, le gardien de but se trouve donc confronté à des contraintes temporelles très fortes où le temps disponible pour effectuer la réponse motrice est quasiment identique au temps de vol du ballon. Ainsi il semble difficile de savoir si le gardien anticipe son action d'après les indices cinématiques du mouvement de tir (temps disponible pour effectuer la réponse motrice inférieur au temps de vol du ballon), ou s'il se sert des informations relatives à la trajectoire du ballon (temps disponible pour effectuer la réponse motrice supérieur au temps de vol du ballon) pour effectuer son interception.

En effet, dans la littérature, il existe deux théories contradictoires sur la PIV lors d'un mouvement d'interception. D'une part, certains auteurs soutiennent l'idée que la PIV des gardiens est orientée vers les indices cinématiques corporels du tireur lors d'une interception [Savelsbergh2002, Savelsbergh2005, Williams1993, Salmela1979, Rowe2009]. Cette hypothèse trouve un appui scientifique dans le fait qu'un entraînement fondé sur l'interprétation des indices visuels issus du mouvement de l'adversaire entraîne une amélioration des capacités d'anticipation des athlètes [Williams2004]. Ces expérimentations sont fondées sur l'utilisation de séquences vidéo coupées à certains instants clés de l'action. D'autre part, de plus en plus de travaux tendent à démontrer que les experts fixent l'objet lancé avant et après le lâcher [Bard1981, Ripoll1988, McMorris1993, Vickers1997, Land2000, Rodrigues2002, Panchuk2006]. Les indices concernant la trajectoire de balle serait donc primordiaux pour la PIV et la performance lors d'une tâche d'interception. Les études issues de ce dernier courant s'appuient sur l'utilisation d'un oculomètre.

Afin de savoir vers quel élément s'oriente la PIV des gardiens de but de handball, nous avons séparé les informations visuelles issues du mouvement du tireur (TS) de celles provenant de la trajectoire du ballon (BS). Nous avons également couplé ces deux conditions visuelles afin d'obtenir une situation de référence pour le gardien de but (BT). La performance des gardiens de but face à ces trois conditions visuelles - TS, BS et BT - a alors été enregistrée pour deux modes de réponse : une réponse en jugement et une réponse effectuée en mouvement.

Nous verrons dans un premier temps que les indices issus de la trajectoire du ballon semblent être plus importants que ceux provenant du mouvement de tir pour la PIV des gardiens de but de handball. Dans un second temps, nous aborderons l'utilité des indices cinématiques corporels uniquement pour certaines zones du but de handball.

4.5.1 L'influence du mouvement de tir

En isolant certaines informations visuelles de l'action de tir (trajectoire du ballon et mouvement de tir) grâce à notre méthodologie en EV, nous sommes en mesure de vérifier quelle information est préférentiellement utilisée lors de la tâche d'interception du gardien de but de handball.

La plupart des résultats obtenus dans cette étude mettent en doute l'importance des informations visuelles concernant la cinématique du mouvement de tir lors de la PIV des gardiens de but. En effet, pour tous les paramètres calculés, sauf le TRM, il apparaît une plus faible performance pour la condition TS. C'est notamment le cas pour la précision de la réponse des gardiens de but de handball.

La précision de la performance des gardiens de but a tout d'abord été analysée grâce au pourcentage de zones correctement prédites. On trouve alors que ce pourcentage est largement plus faible pour la condition visuelle TS ($36.5 \pm 34.1\%$) que pour les conditions visuelles BS ($77.3 \pm 18.8\%$) et BT ($83.2 \pm 14.3\%$). 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.

Une analyse des erreurs liées à la prédiction de la zone dans laquelle se dirige le ballon virtuel peut nous aider à caractériser l'influence de la condition visuelle TS (tableau 4.5.1).

Type d'erreur de prédiction	TS (%)	BS (%)	BT (%)
Hauteur incorrecte	23.2	65.1	86.9
Côté incorrect	33.1	17.1	6.9
Hauteur et côté incorrects	40	17.1	5.4
En dehors du but	3.7	0.1	0.1

Tab. 4.2 - Répartition des pourcentages d'erreurs liées à la prédiction de la zone en fonction des différentes conditions visuelles (TS, BS et BT).

D'après le tableau 4.5.1, on peut tout d'abord remarquer que les conditions visuelles BS et BT ont des répartitions d'erreurs de prédiction de zones similaires avec un fort pourcentage pour des erreurs liées à la hauteur de la zone (BS=65.1% ; BT=86.9%). Puis les erreurs horizontales (BS=17.1% ; BT=6.9%) et les erreurs biaxiales (BS=17.1% ; BT=5.4%) sont retrouvées dans les mêmes proportions. Cela signifie que les gardiens de but ont plus de mal à estimer la hauteur que le côté d'un tir lorsqu'ils sont face à un mouvement de tir complet (BT) et face à une trajectoire de balle seule (BS). Comme nous l'avons évoqué dans la première étude, il semble que les experts aient plus de difficultés à estimer la hauteur que la latéralité d'un tir [Salmela1979, McMorris1993, Williams1993, Savelsbergh2002]. Le fait d'enlever les informations concernant le mouvement de tir (condition BS) entraîne toutefois une diminution des erreurs liées à la hauteur et une augmentation des erreurs latérales et biaxiales. Cependant cela ne modifie pas leur classement hiérarchique.

Pour ce qui est de la condition TS, on peut voir que celle-ci influence le type d'erreurs de prédiction de zones. En effet, il apparaît que, par rapport à la condition de vision complète BT, la condition TS provoque beaucoup moins d'erreurs de prédiction liées à la hauteur seule du ballon (TS=23.2% ; BT=86.9%). Cela est compensé par le fait que les erreurs biaxiales sont

beaucoup plus nombreuses lorsque seul le mouvement de tir est visualisé (TS : 40% ; BT : 5.4%). Ainsi, les gardiens de but face à la condition TS n'ont pas seulement des difficultés à évaluer la hauteur de la zone dans laquelle va se trouver le ballon. Ils n'arrivent pas à estimer à la fois sur l'axe horizontal et sur l'axe vertical. C'est pour cette raison que l'on retrouve une répartition presque équivalente entre les erreurs verticale, horizontale et biaxiale pour la condition TS (verticale=23.2% ; horizontale=33.1% ; biaxiale=40%). Ce constat est à mettre en relation avec le faible pourcentage de zones correctement prédites pour cette condition visuelle (36.5 ±34.1%).

Or si les gardiens de but connaissent des difficultés à estimer, de manière générale, la zone dans laquelle va se situer la position finale du ballon, il est logique qu'ils aient du mal à prédire cette position finale. C'est ce que nous montre le pourcentage de réussite des gardiens de but lors de la tâche de jugement (TS : 8.6 ±7.9% ; BS : 21.1 ±7.3 ; BT : 21.3 ±9.7). La condition visuelle TS affecte donc également l'efficacité des gardiens. Cela signifie qu'ils ne sont pas en mesure de prédire efficacement la position finale du ballon dans le but lorsqu'ils ne se fondent que sur les informations visuelles liées au mouvement du tireur virtuel. 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 à la condition visuelle complète (BT). La condition visuelle BS semble donc suffisante pour produire une performance efficace lors de la tâche de jugement. On retrouve d'ailleurs le même résultat pour les valeurs de pourcentage de réussite lors de la tâche réalisée en mouvement (TS : 14.5 ±8.6% ; BS : 29.1 ±6.7 ; BT : 31.2 ±5.9). Cela tend à confirmer l'inefficacité de la condition TS pour la performance des gardiens de but de handball.

L'efficacité des gardiens de but étant influencée par la condition TS, on peut maintenant s'attendre à ce qu'il en soit de même pour la précision de la réponse des gardiens de but. C'est le calcul de l'erreur radiale en jugement et en mouvement qui nous a permis de nous renseigner sur ce point. Lors de la tâche de jugement, il apparaît une influence significative de la condition visuelle sur les valeurs d'erreur radiale ainsi que sur les composantes horizontale et verticale. On retrouve ici l'influence de la condition TS qui engendre des valeurs d'erreur radiale largement supérieures aux deux autres conditions visuelles pour les composantes horizontale ($p<0.001$), verticale ($p<0.001$) et absolue ($p<0.001$). Il en va de même pour la tâche effectuée en mouvement ($p<0.001$ pour les trois composantes). Cette influence négative de la condition visuelle TS rejoint les constats effectués pour l'efficacité du gardien de but et pour le pourcentage de zones correctement prédites. La condition TS affecte donc l'efficacité et la précision de la réponse des gardiens de but de handball. Leurs performances sont donc moindres face au mouvement de tir seul.

Ce sont donc les informations visuelles provenant de la trajectoire du ballon qui sembleraient primordiales. Cette idée est en accord avec certaines données de la littérature obtenues au hockey [Bard1981, Panchuk2006], au volleyball [Vickers1997] ou au tennis de table [Rodrigues2002]. Bien que ces études se soient déroulées dans des conditions réelles de jeu, elles démontrent toutes que le fait de fixer et de suivre la trajectoire de l'objet lancé conditionne la performance lors d'une tâche d'interception.

Cependant, les valeurs d'erreur radiale calculées lors de la tâche de jugement nuance ce constat. Il apparaît en effet que ces valeurs sont significativement différentes entre la condition BS (31.8 ±1.4cm) et la condition BT (26.2 ±1.8cm) ($p<0.001$). Cela signifie que, lors de cette tâche, les gardiens de but de handball sont plus précis face à la condition BT que face à la condition BS. Or le seul élément qui change entre ces deux conditions est la présence du mouvement du tireur. Il y aurait donc également une influence positive des informations visuelles provenant du mouvement du tireur sur la performance des gardiens de but de handball.

4.5.2 Mouvements du tireur et zone visée

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, une autre tendance semble émerger. Pour ce qui est du pourcentage de zones correctement prédites lors de la tâche de jugement, on peut voir que celui-ci n'est pas influencé par la condition visuelle TS dans la zone 1 (TS=86.4% ; BS=93.2% ; BT=93.3%). Cela signifie que les gardiens de but de handball avaient assez d'informations visuelles pour prédire la zone dans laquelle se dirigeait le ballon virtuel lors de la condition TS.

On retrouve le même résultat pour le pourcentage de réussite lors de la tâche de jugement. L'efficacité des gardiens de but de handball est identique entre les trois conditions visuelles lorsque les tirs sont dirigés dans la zone 1 (TS=21.4% ; BS=18.6% ; BT=19.5%). La similarité de l'efficacité pour la zone 1 s'applique d'ailleurs aussi pour la tâche en mouvement (TS=29.9% ; BS=30.1% ; BT=32.9%). Les gardiens de but ne semblent donc pas manquer d'informations visuelles lorsque seul le mouvement de tir est affiché et dirigé dans la zone 1.

En ce qui concerne la précision des gardiens de but de handball lors de la tâche de jugement, on observe une différence significative entre les conditions TS et BT ($p < 0.01$) et entre les conditions BS et BT ($p < 0.05$). Cependant, contrairement aux valeurs obtenues pour les autres zones, il n'y a pas de différence significative entre les conditions TS et BS pour la zone 1. Cela signifie que ces deux conditions visuelles produisent des résultats similaires. Il s'agit là encore d'un argument en faveur de la condition TS dans la zone 1. Le même résultat a été obtenu pour la tâche réalisée en mouvement : il n'existe pas de différence significative entre les valeurs d'erreur radiale pour TS et ces valeurs pour BS dans la zone 1.

Ainsi, tous les paramètres calculés, hormis le TRM, présentent une influence positive de la zone 1 sur la performance des gardiens de but lors de la condition visuelle TS. Il semble donc que les gardiens de but ont à leur disposition suffisamment d'informations visuelles pour être efficace et précis lorsqu'ils ne voient que le mouvement du tireur dirigé vers la zone 1. On peut donc supposer que la cinématique du tir en zone 1 est suffisamment remarquable pour que la PIV du gardien de but conduise à une performance efficace et précise. Cela n'est pas le cas dans les autres zones visées (3, 4 et 6). Nous avons donc effectué une analyse cinématique du mouvement de tir afin de mettre en évidence les différences cinématiques qui peuvent exister entre le tir en zone 1 et les autres tirs (figure 4.9).

De la même manière que dans la section 3.5.3, nous avons schématisé la configuration des segments du tireur (membre supérieur) au moment du lâcher du ballon pour les tirs en zone 1, 3, 4 et 6. Cette schématisation s'effectue dans le plan (0,x,z) avec comme origine du repère la position du centre de masse du tireur. A partir de là, nous avons calculé les différents angles caractéristiques de la configuration des segments (angle segmentaire au niveau de la ligne des épaules, angles articulaires au niveau de l'épaule droite et du coude droit).

La figure 4.9 nous apprend que la configuration segmentaire du tir dans la zone 1 est très proche de celle concernant le tir dans la zone 3. En effet, que ce soit au niveau des positions articulaires ou au niveau de la configuration angulaire, l'analyse cinématique nous montre que ces deux tirs se ressemblent. A l'inverse, les tirs en zone 4 et 6 apparaissent différents, que ce soit entre eux ou que ce soit par rapport aux tirs en zones 1 et 3.

Ainsi, l'analyse cinématique du mouvement du tireur virtuel nous montre qu'il existe une similitude segmentaire entre le tir en zone 1 et le tir en zone 3. On pourrait donc expliquer les faibles performances obtenues pour la zone 3 lors de la condition visuelle TS par le fait que les

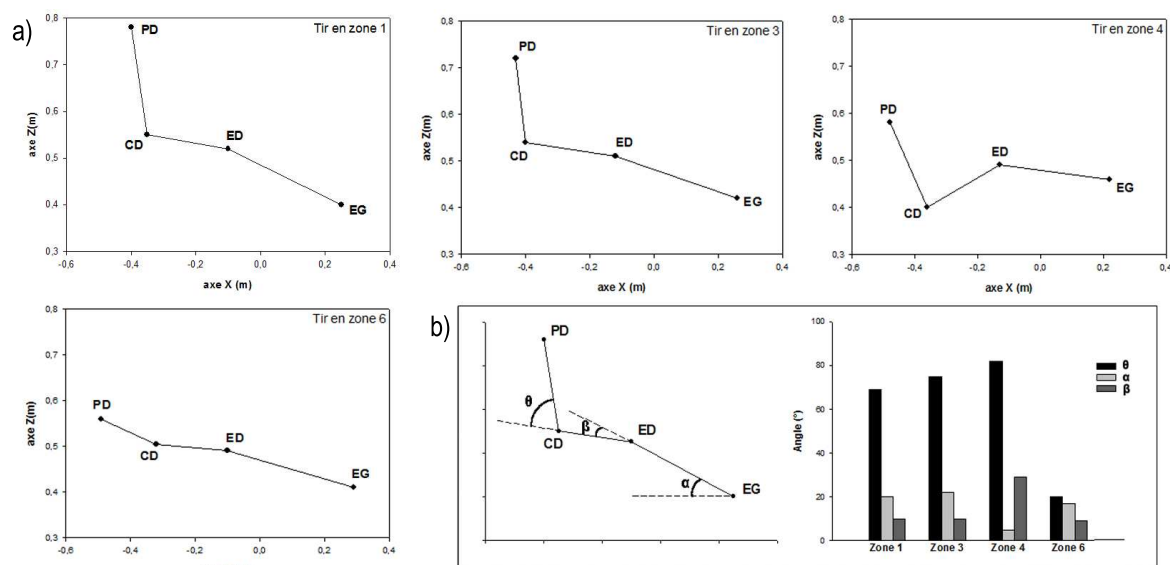


Fig. 4.9 - Analyse cinématique menée sur les tirs en zones 1, 3, 4 et 6. Cette analyse s'appuie sur la configuration des segments du membre supérieur du tireur au moment du lâcher du ballon dans le plan frontal (a) et sur un histogramme des angles aux articulations du membre supérieur (b) à l'instant du lâcher. EG=épaule gauche ; ED=épaule droite ; CD=coude droit ; PD=poignet droit.

sujets aient confondu les tirs en zone 3 avec des tirs en zone 1. Une analyse de la distribution des réponses par zones lors de la tâche de jugement peut nous aider à confirmer cette hypothèse (figure 4.10).

L'analyse de la distribution des réponses par zones nous indique qu'il y a effectivement eu confusion pour les tirs de la zone 3. Plus précisément, il semble que ces tirs aient été confondus avec des tirs destinés aux zones 1 et 2 car c'est dans ces zones que l'on trouve les pourcentages les plus élevés. Les réponses pour les tirs en zone 3 se répartissent donc entre les trois zones hautes du but. Les gardiens de but ont probablement pu percevoir que les tirs de la zone 3 allaient en haut du but sans pouvoir déterminer avec exactitude de quel côté il s'agissait. Pour ce qui est de la zone 4, il semble que la confusion ait plutôt eu lieu en terme de hauteur. En effet, les réponses des gardiens de but face aux tirs de la zone 4 sont principalement réparties entre les zones 1, 4 et 7, zones situées du même côté du but. Enfin, un dernier élément semble intéressant à noter. Il s'agit des tirs dirigés dans la zone 6. Les réponses face à ces tirs sont majoritairement dirigées vers la zone 1, ce qui laisse supposer qu'un ou plusieurs indices cinématiques de ce tir orientent les réponses vers la zone 1. Si l'on se réfère de nouveau à la figure 4.9, on s'aperçoit que les éléments communs entre le tir en zone 1 et le tir en zone 6 proviennent de l'angle articulaire au niveau de l'épaule droite (zone 1 : $\beta=10.3^\circ$; zone 6 : $\beta=9.4^\circ$) et de l'angle segmentaire au niveau de la ligne des épaules (zone 1 : $\alpha=20.1^\circ$; zone 6 : $\alpha=17.3^\circ$). Ces deux angles pourraient donc expliquer l'influence positive de la zone 1 sur la performance des gardiens de but lors de la condition visuelle TS. De plus, on retrouve des valeurs angulaires similaires pour le tir en zone 3 ($\beta=10.6^\circ$; $\alpha=22.4^\circ$).

Le fait que la performance des gardiens de but soit meilleure dans la zone 1 pour la condition TS a pour conséquence d'influencer la répartition globale de la performance en fonction des zones. Autrement dit, le facteur "zone visée" a une influence significative sur certains paramètres calculés (pourcentage de zones correctement prédites, erreur radiale de jugement, pourcentage de réussite en mouvement, erreur radiale en mouvement). Mais cela n'est dû qu'à la condition

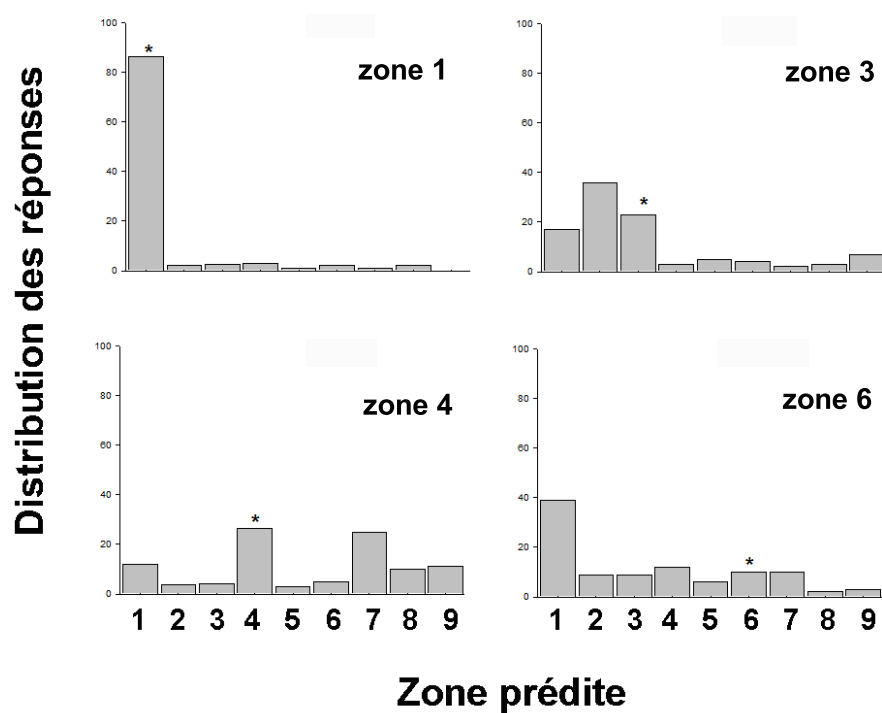


Fig. 4.10 - Distribution de la fréquence des réponses pour chacune des quatre zones (1, 3, 4 et 6) pour la condition TS lors de la tâche de jugement (* : zone visée).

visuelle TS.

4.6 Conclusion

La troisième et dernière étude de ce travail de thèse nous a permis d'analyser la PIV des gardiens de but de handball. Le but de cette étude était ainsi de déterminer si les indices cinématiques liés au mouvement du tireur conditionnait la PIV des gardiens de but, ou bien si ce sont les informations visuelles concernant la trajectoire du ballon qui sont prépondérantes pour la performance du gardien de but de handball. Ainsi, nous avons pu, grâce à la méthodologie fondée sur les EV, séparer ces différentes informations visuelles afin de produire trois conditions visuelles différentes : une condition où seul le mouvement du tireur était visible (TS), une condition où seule la trajectoire du ballon s'affichait (BS) et enfin une condition de référence où les deux éléments cités étaient réunis (BT).

L'ensemble de nos résultats nous révèle tout d'abord que la condition TS influence la performance des gardiens de but de façon négative. Que ce soit au niveau de la précision de la tâche ou au niveau de l'efficacité de la réponse, la condition TS engendre une performance moindre pour tous les paramètres (sauf pour le TRM). Ce n'est pas le cas de la condition BS qui permet aux gardiens de but d'obtenir, pour la majorité des paramètres, une performance similaire à la condition de référence BT. Cela signifie que les informations issues de la trajectoire du ballon semblent être prépondérantes pour la PIV du gardien de but de handball. Ce résultat est à mettre en relation avec plusieurs études réalisées sur le terrain qui constatent aussi l'aspect fondamental des informations visuelles issues de la trajectoire de l'objet lancé [Vickers1997, Land2000, Rodrigues2002, Panchuk2006].

Néanmoins, l'analyse de l'impact de la condition visuelle en fonction de la zone visée nous apprend que la performance des gardiens de but dans la zone 1 n'est jamais influencée par la condition visuelle TS. Les informations visuelles provenant du mouvement du tireur virtuel pour cette zone semblent donc suffisantes pour la PIV des gardiens de but. L'analyse cinématique du mouvement de tir dans les différentes zones nous révèle que les configurations segmentaires pour les tirs en zones 1, 3 et 6 se ressemblent. Les tirs en zones 3 et 6 ont donc pu être confondus avec les tirs en zone 1, ce qui peut expliquer la faible performance des gardiens de but pour la condition TS. Il apparaît ainsi que les informations cinématiques relatives au mouvement du tireur peuvent, dans certaines configurations, être un indice efficace pour la PIV et donc la performance des gardiens de but de handball.

L'un des paramètres calculés n'a cependant pas respecté les différents constats cités. Il s'agit du TRM qui est significativement plus élevé pour la condition BS par rapport aux conditions TS et BT ($p < 0.001$), et ce pour toutes les zones. Le fait de voir le mouvement du tireur seul (condition TS) ne semble donc pas influencer la mise en action des segments corporels. Par contre, lorsque les gardiens de but sont face à la trajectoire du ballon uniquement, ils initient leur mouvement d'interception plus tard. Cela peut être expliqué par le protocole expérimental. En effet, lors de la condition BS, un décompte temporel avertissait les gardiens de but du départ du ballon. Mais ces derniers devaient attendre que le ballon parte pour amorcer leur parade. Ce qui n'était pas le cas lors des conditions TS et BT où les gardiens pouvaient partir avant le départ du ballon. On peut donc supposer que les gardiens de but prenaient des informations visuelles sur le mouvement du tireur pour initier leur geste [Panchuk2006]. Cela explique pourquoi les TRM sont plus courts pour les conditions TS et BT. Ce résultat va dans le sens de l'utilisation des informations cinématiques du mouvement de tir par les gardiens de but [Salmela1979, McMorris1993, Savelsbergh2002, Savelsbergh2005]. Ce résultat rejoint celui de l'étude de Shim et al. [Shim2005]. Ces auteurs ont analysé le temps de réaction de joueurs de tennis expérimentés placés à la volée lors de deux conditions : face à une machine lance-balles ou face à un adversaire réel. Dans la première condition, aucune information n'était disponible avant l'envoi de la balle, comme dans notre étude. Il est alors apparu que les réponses étaient

significativement plus rapides lorsque les joueurs avaient la possibilité de voir le mouvement de l'adversaire.

Cette troisième étude a donc permis d'analyser la PIV des gardiens de but de handball, et plus particulièrement nous avons pu examiner quel indice visuel était utilisé par les gardiens de but lors de la PIV. Il apparaît que les informations visuelles provenant de la trajectoire du ballon sont primordiales pour la performance. Cependant, le mouvement du tireur dans certaines zones peut aussi apporter des indices permettant une réponse efficace des gardiens de but. La PIV effectuée sur le mouvement du tireur permet également d'anticiper le mouvement.

En perspectives, nous pourrions envisager de définir avec plus de précision spatiale et temporelle la localisation des informations visuelles pertinentes pour le gardien de but de handball. Pour cela, il serait possible de couper l'action de tir virtuelle à plusieurs endroits. Par exemple, une première coupure pourrait intervenir avant le lâcher du ballon, une seconde au moment du lâcher et une dernière après le lâcher du ballon, ce qui équivaut à celle que nous avons considérée ici (coupure à 6m de la ligne de but). En conservant ces trois instants de coupure et en isolant une fois de plus chaque source d'informations visuelles (trajectoire du ballon et mouvement du tireur), nous pourrions statuer plus précisément de l'influence de chacune de ces sources sur la PIV du gardien de but de handball. Pour aller encore plus loin dans l'analyse, il serait envisageable de confronter le gardien de but à un mouvement de tir graduellement modifié [Bideau2004]. Cela nous permettrait par exemple d'analyser la PIV des gardiens de but de handball en fonction de la zone visée dans le but.

Chapitre 5

Discussion générale

La perception visuelle est une fonction essentielle pour interagir avec l'environnement qui nous entoure. Dans les activités physiques et sportives, elle joue un rôle particulièrement important puisqu'elle constitue le canal sensoriel privilégié pour l'exploration de l'environnement et la prédiction des événements futurs [Prévost2002]. Plus précisément, lors d'une tâche d'interception, le système visuel nous permet de sélectionner les informations visuelles pertinentes pour anticiper l'action adverse [Savelsbergh2002]. L'analyse de la PIV apparaît alors comme un élément fondamental pour la compréhension de la performance [Williams1999a].

Plusieurs méthodes permettent aujourd'hui ce type d'analyse, mais toutes présentent un certain nombre de limites. En réponse à cela, nous avons développé une nouvelle méthodologie d'analyse de la PIV. Dans ce travail de thèse, nous avons évalué et mis en œuvre cette méthodologie innovante fondée sur l'utilisation des EV.

Dans la première étude de ce mémoire, nous avons comparé une méthodologie fondée sur l'utilisation de la vidéo avec notre méthodologie fondée sur les EV. Il a alors été démontré que les gardiens de but de handball étaient plus performants face à une animation de tir virtuelle que face à la même action de tir filmée. Nous nous sommes ensuite intéressés à la mise en place de la méthodologie fondée sur les EV d'un point de vue graphique. Différents niveaux de représentation graphique de l'action de tir virtuelle ont alors été proposés aux gardiens de but de handball. Nous avons alors pu démontrer l'influence négative des représentations en PLD pour notre cadre d'étude. Dans un troisième temps, une analyse de la PIV des gardiens de but de handball a pu être menée. Celle-ci nous a permis de mettre en évidence l'importance des informations visuelles liées à la trajectoire du ballon. Les indices cinématiques du mouvement de tir peuvent également, pour certains mouvements de tir, orienter l'action d'interception des gardiens de but de handball.

L'ensemble de ces trois études nous a ainsi permis de concevoir une démarche scientifique cohérente pour analyser la PIV du gardien de but de handball. Il apparaît dès lors important de faire le bilan de cette démarche à travers une dimension plus générale. Ainsi nous présenterons dans un premier temps les contributions de ces travaux pour la conception des futurs systèmes de réalité virtuelle dans le domaine sportif. Puis, dans un second temps, nous discuterons des différents apports de ce travail pour la compréhension de la PIV du gardien de but de handball.

5.1 Les environnements virtuels : avantages et limites pour l'analyse d'une situation sportive

Les EV autorisent aujourd'hui un contrôle total des situations d'étude [Tarr2002]. Les protocoles expérimentaux en EV peuvent donc être standardisés et les expérimentations reproduites à l'infini. Ces différents aspects des EV ont amené les chercheurs à utiliser cet outil dans divers domaines comme la chirurgie [Mondada2004] ou l'aérospatiale [Boccara2000]. Dans le domaine sportif, plusieurs disciplines ont fait l'objet d'une application en EV, comme le tennis [Noser1997] et le football [Craig2006]. En ce qui concerne le handball, Bideau et al. ont démontré que les gardiens de but réagissent de la même manière dans le monde virtuel et dans l'environnement réel [Bideau2003b]. Ce travail de thèse intervient dans la continuité de cette étude afin d'évaluer et de mettre en œuvre un cadre de travail en EV pour l'analyse de la PIV des gardiens de but de handball. Nous allons donc d'abord nous intéresser précisément aux avantages que représentent ce cadre de travail en EV avant d'aborder les limites de notre méthodologie.

5.1.1 Les avantages des environnements virtuels pour l'analyse d'une situation sportive

A l'inverse des méthodologies classiques fondées sur la vidéo, l'utilisation d'un EV nous a tout d'abord permis de fournir des informations stéréoscopiques aux gardiens de but de handball. Ces informations peuvent notamment être déterminantes pour la performance [Hendrix1996, Lenoir1999, Mazyn2004]. Ceci peut expliquer les différences de résultats obtenues au cours de notre première étude. Les gardiens de but de handball étaient plus performants face à une action de tir virtuelle par rapport à la même action de tir filmée. Etant donné le lien qui existe entre présence et performance, on peut estimer que le degré de présence des gardiens de but était plus important face au tireur virtuel que face au tireur filmé.

Un autre avantage de notre EV repose sur l'adaptation du point de vue du sujet en temps réel. Contrairement à l'affichage vidéo qui reste fixe, le sujet qui se déplace dans un EV peut avoir accès à de nouvelles informations visuelles. Cette adaptation du point de vue permet notamment d'augmenter le sentiment de présence du sujet immergé [Hendrix1996]. Cette adaptation est d'autant plus importante que, dans ce travail de thèse, le gardien de but a la possibilité de tourner la tête lors des deux tâches demandées (jugement et mouvement).

Les EV sont également capables de reproduire les interactions du monde réel. Au cours de nos expérimentations, la tâche réalisée en mouvement permettait un couplage entre la trajectoire du ballon virtuel et le mouvement d'interception du gardien de but de handball. Ainsi, le processus de détection de collision nous a permis de savoir si le gardien de but avait arrêté le ballon ou non. Comme dans la réalité, le gardien de but interagissait donc avec le ballon de handball. Cela était illustré par un retour visuel sur le résultat de l'action effectuée (feedback).

5.1.2 Les limites de l'immersion en environnement virtuel

Il existe cependant certaines limites à l'utilisation des EV pour l'analyse d'une situation sportive. Comme la plupart des sujets n'a généralement jamais eu l'occasion d'être immergés dans

un EV, cette expérience est totalement nouvelle pour eux. C'est d'autant plus vrai lorsque l'on manipule des informations visuelles de l'action de tir. En d'autres termes, les gardiens de but de handball ne sont pas habitués à faire face à des tirs provenant d'une animation virtuelle ou d'une séquence vidéo (cf. étude 1), à des actions de tir visuellement dégradées (cf. étude 2), ou à des actions de tir privées de certaines informations visuelles (cf. étude 3). La pratique et l'entraînement font que les sportifs sont plus performants pour des tâches connues. Mais lorsqu'ils sont face à des cas de figure inhabituels, leur performance peut être influencée, surtout s'il s'agit d'athlètes experts [Shim2005]. Cependant, les résultats obtenus par les gardiens de but de handball dans nos études sont relativement proches de ceux qu'ils obtiennent dans la réalité [LNH2009], ce qui tend à accréditer le réalisme de notre EV.

Dans le même ordre d'idée, il est possible que les gardiens de but de handball n'aient pas eu à leur disposition suffisamment d'informations contextuelles avant d'effectuer leur prédiction [Chamberlain1993]. Par exemple, en situation réelle de jeu, le gardien de but de handball peut savoir que le tireur auquel il fait face a préférentiellement tiré à droite pendant le match. Il peut également déterminer la feinte préférée du tireur lors des face-à-faces. De plus, le gardien de but ne prendra peut-être pas autant de risque s'il reste 20 ou 1 minute à jouer dans le temps réglementaire. . . La situation de duel que nous avons utilisée fait abstraction des informations environnementales qui peuvent exister lors d'une réelle situation de jeu. En effet, les contraintes expérimentales obligent généralement les chercheurs à isoler les situations sportives, que ce soit en laboratoire [Farrow2003, Shim2006, Williams2006] ou sur le terrain [Panchuk2006]. Or les informations contextuelles ou situationnelles peuvent parfois améliorer la prise de décision des sportifs [Paull1997, Williams2002, Crognier2007].

5.1.3 Conclusion

Pour conclure, la méthodologie présentée dans ce travail de thèse propose de nombreux avantages par rapport aux méthodologies classiques d'analyse de la PIV. Certains paramètres comme la vision stéréoscopique ou l'adaptation du point de vue en temps réel permettent une meilleure immersion de l'athlète dans l'environnement de synthèse. Ainsi, alors que les expérimentateurs contrôlent et standardisent les situations d'étude, les sujets se sentent proches d'une situation réelle de jeu.

La notion d'interaction est également très importante pour la performance du sujet immergé. Elle se résume actuellement au calcul de détection de collision. A l'avenir, il serait possible d'améliorer les interactions dans l'EV. On pourrait par exemple modifier le modèle comportemental du tireur virtuel pour qu'il adapte son mouvement aux gestes du gardien de but de handball réel (si le gardien part à droite, le tireur vise à gauche, etc.). Dans la même optique, des interactions avec d'autres humanoïdes de synthèse pourraient être créées. En effet, le gardien de but de handball fait généralement face à une situation où des défenseurs protègent son but. Il communique d'ailleurs avec eux au cours de l'attaque portée par l'équipe adverse. Cette attaque fait également intervenir plusieurs joueurs que nous pourrions modéliser. Ajouter des partenaires au tireur virtuel serait effectivement une façon d'améliorer le réalisme contextuel de la scène. Cependant, pour modéliser ce type d'interaction (relations entre le gardien de but, les défenseurs et les attaquants virtuels), il est nécessaire d'effectuer des analyses comportementales précises [MacNamee2003].

Il serait également envisageable d'améliorer les paramètres d'immersion de notre système de réalité virtuelle. Au cours de ce travail, nous avons utilisé un système semi-immersif, c'est-à-dire

qu'une part du monde réel était présente entre les gardiens de but et l'écran sur lequel était affiché l'animation virtuelle (figure 5.2.3). Ce type de système semi-immersif peut poser certains problèmes suivant la tâche à effectuer [Pol1999, Qi2006].



Fig. 5.1 - Configuration de la salle de réalité virtuelle utilisée au cours de ce travail de thèse.

Or il existe également des systèmes totalement immersifs comme le HMD par exemple (cf. figure 1.9, p17). Les gardiens de but seraient alors totalement immergés et pourraient faire abstraction du monde réel qui les entoure. Néanmoins, d'autres questions se posent lorsqu'on utilise ce genre de système pour l'analyse d'une situation sportive : comment représenter graphiquement les segments du gardien de but lorsqu'un de ses membres passe dans son champ de vision [Slater1994, Slater1998] ? Le champ de vision d'un HMD est-il suffisant pour percevoir correctement l'action de tir virtuelle [Knapp2004] ?

Par ailleurs, lors de nos expérimentations, nous avons eu l'occasion de demander aux gardiens de but ce qu'il pensait du système d'immersion. La majorité des participants avaient une remarque principale : il s'agissait du manque de retour sensoriel lorsqu'ils arrêtaient le ballon virtuel. Autrement dit, nous pourrions envisager de faire porter aux gardiens de but des gants haptiques afin de leur permettre d'avoir la sensation de toucher lorsqu'ils stoppent le ballon virtuel. Ce type d'interface permet en effet d'améliorer les performances d'un individu immergé [Oakley2003]. Dans le même ordre d'idée, une bande sonore pourrait être intégrée au système pour améliorer le degré de présence des sujets [Takeuchi1993, Hendrix1994].

5.2 Contributions pour la compréhension de la prise d'informations visuelles

En plus des contributions technologiques que ce travail peut apporter pour les futurs systèmes de réalité virtuelle, l'ensemble de ces trois études nous a permis d'améliorer la compréhension de la PIV du gardien de but de handball. En effet, nos résultats permettent de fournir quelques éléments de réponse face à certaines questions fondamentales concernant la perception des sportifs. La troisième étude s'est ainsi posée la question de savoir si ce sont les informations issues de la trajectoire du ballon ou celles provenant du mouvement de tir qui sous-tendent majoritairement la PIV du gardien de but de handball.

5.2.1 La cinématique du mouvement de tir

Lors de la troisième étude de ce travail de thèse, nous avons pu voir que la précision et l'efficacité de la réponse des gardiens de but est influencée par la condition visuelle TS. Le mouvement de tir seul ne semble donc pas être un élément suffisant pour prédire la position finale du ballon dans le but. Mais nous avons également remarqué que, par rapport à une condition visuelle où seule la trajectoire du ballon est présentée, la performance du gardien de but était significativement supérieure lorsque l'ensemble des informations visuelles étaient présentes. Cela suppose que les informations relatives au mouvement du tireur peuvent jouer un rôle dans la PIV du gardien de but de handball. Une analyse des réponses des gardiens de but en fonction de la zone visée nous montre que cela est notamment le cas lorsqu'un tir est dirigé dans la zone 1. En effet, pour cette zone, les gardiens de but obtiennent les mêmes performances selon les trois conditions visuelles. Après avoir effectué une analyse cinématique du mouvement de tir, nous avons remarqué que les tirs en zone 1 et en zone 3 étaient très proches dans leur organisation segmentaire. L'examen de la distribution des réponses en fonction de la zone visée, lorsque seules les informations concernant le mouvement de tir étaient présentes, nous a confirmé que les faibles performances obtenus pour les tirs en zone 3 proviennent du fait qu'ils ont probablement été confondus avec des tirs se dirigeant dans la zone 1. L'angle articulaire à l'épaule ainsi que l'angle segmentaire de la ligne des épaules pourraient expliquer cette confusion.

Nous avons d'ailleurs retrouvé l'influence des propriétés cinématiques du mouvement de tir au cours de la seconde étude. En effet, lors de cette expérimentation, nous avons observé un fort pourcentage de réussite pour les tirs dirigés vers la zone située en bas à gauche du but (zone 7). Grâce à une analyse cinématique du mouvement de tir au moment du lâcher du ballon, nous avons pu remarqué que le tir en zone 7 se caractérisait par un très faible angle articulaire à l'épaule droite. On peut donc supposer que cet angle constitue une information visuelle pertinente lors de la PIV des gardiens de but de handball.

A l'avenir, nous pourrions donc envisager de mener une expérimentation où nous ferions varier graduellement l'angle articulaire à l'épaule droite du tireur virtuel. Il nous serait alors possible de statuer sur l'influence de cet angle sur la perception du gardien de but de handball (valeur de cet angle en fonction de la zone visée par exemple).

5.2.2 La régulation du mouvement d'interception

Dans la seconde étude de ce travail de thèse, nous avons remarqué un point important concernant la régulation du mouvement du gardien de but de handball. Une analyse cinématique du mouvement d'interception du gardien de but a démontré qu'une représentation graphique du mouvement de tir en PLD pouvait influencer l'évolution de la parade du gardien de but, sans pour autant avoir un effet sur son efficacité (pourcentages de réussite similaires). En effet, il semble que face à ce type de représentations graphiques, la trajectoire du centre de masse de l'avant-bras s'éloigne de la trajectoire moyenne avant de s'en rapprocher en fin de mouvement. On peut donc supposer que le gardien de but percevait des informations visuelles imprécises au début du mouvement, ce qui l'a conduit à décaler son mouvement par rapport à la trajectoire de référence. Puis, au cours de l'action de tir, le gardien de but a pu s'appuyer sur des informations visuelles de plus en plus précises, ce qui l'a finalement amené à modifier son mouvement pour stopper le ballon. D'après ces éléments, le gardien de but de handball semble donc réguler sa parade en continu lors du mouvement d'interception (cf. étude 2).

Il existe deux principales stratégies perceptivo-motrices pour intercepter un objet en mouvement : prédictive ou prospective [Bastin2006]. Les stratégies prédictives affirment que l'endroit où va se terminer la trajectoire de l'objet, ou le temps qu'il reste avant le contact avec l'objet, sont des paramètres connus avant d'effectuer le mouvement. Ces paramètres conditionneraient d'ailleurs la réussite de l'interception [Regan2000]. Les stratégies prédictives pour le contrôle du mouvement sont issues de l'approche théorique cognitive. Cette approche computationnelle suggère que le cerveau d'un individu fonctionne comme le processeur d'un ordinateur. Les informations visuelles provenant de l'environnement, ou de la scène sportive, sont tout d'abord perçues par l'individu, qui va ensuite analyser puis interpréter ces informations avant de planifier l'action la plus adaptée à la situation. Afin de mettre en évidence les stratégies prédictives dans le contrôle du mouvement, des travaux ont été menés pour découvrir quelle(s) source(s) d'informations visuelles permettaient aux sujets de déterminer en avance la future position de l'objet en mouvement [Harris2003, Eggert2005]. Toutes ces études ont cependant mis à jour un décalage entre la faible réussite des jugements effectués par les sujets au cours des expérimentations et les compétences de ces mêmes sujets lors de tâches d'interception naturelles [Davids2002, Welchman2004, Gray2006, Craig2009].

Cette différence de performance peut s'expliquer si l'on prend en considération la stratégie prospective pour le contrôle et la régulation du mouvement [Tresilian1995, Bootsma1997, Davids2002, Montagne2005]. Ce type de stratégie repose sur l'hypothèse que l'individu produit des adaptations du mouvement en continu pour réussir une tâche. Plus précisément, cette stratégie suggère que, tout au long de la tâche d'interception, l'individu a la capacité de percevoir et d'utiliser des informations perceptives lui permettant de guider son action [Bastin2006]. A chaque instant le gardien de but pourrait donc extraire certaines informations visuelles lui permettant d'ajuster son mouvement. Et dans le même temps, ce mouvement d'ajustement lui donnerait accès à de nouvelles informations visuelles. Cette stratégie prospective est fondée sur une approche écologique du contrôle moteur.

Dans cette approche, la perception est en étroite relation avec le mouvement. Si le sujet et/ou l'environnement est en mouvement, cela génère un flux optique porteur d'informations que le sujet utilise pour contrôler l'action. Autrement dit, *"nous percevons pour agir mais nous devons aussi agir pour percevoir"* [Gibson1979]. On considère alors que les informations visuelles sont traitées en continu lors d'une tâche d'interception. Par opposition à l'approche cognitive, les connaissances en avance sur le lieu ou le temps restant avant le contact avec l'objet ne sont pas capitales car elles sont complétées tout au long du mouvement. Plusieurs études ont par ailleurs démontré la fiabilité de la stratégie prospective pour le contrôle d'un mouvement

d'interception [Peper1994, McLeod2006, Bastin2008].

Comme le mouvement d'interception du gardien de but suit une trajectoire particulière face à une représentation de l'action de tir en PLD (cf. étude 2), on peut supposer que le gardien de but a adopté une stratégie prospective pour réguler son mouvement. Autrement dit, il serait capable de percevoir des informations visuelles qui lui permettent d'ajuster son mouvement de façon continue, avant de réussir à stopper le ballon.

5.2.3 Tâche de jugement et tâche en mouvement

Dans la littérature, nous avons vu que différents modes de réponse étaient employés pour analyser les processus perceptifs des sujets lors de tâches d'interception : questionnaires [Debanne2003], réponses verbales [Salmela1979], pression d'un bouton [Féry2001a], utilisation d'un joystick [Savelsbergh2005], mouvement du sujet [Bideau2003a]... L'ensemble de ces modes peut être catégorisé en deux grandes familles de tâche : les tâches de jugement où le sujet répond après la fin de l'action visualisée et les tâches en mouvement où la cinématique du sujet est enregistrée au cours de son mouvement. Dans ce travail de thèse, nous avons donc considéré chacune de ces deux tâches pour l'analyse de la PIV du gardien de but de handball.

Lors de la tâche de jugement, il était demandé au gardien de rester immobile pendant la visualisation de l'action de tir. Puis, une fois l'action coupée, le gardien devait positionner sa main à l'endroit où il pensait que le ballon avait terminé sa trajectoire dans le but. En ce qui concerne la tâche en mouvement, le gardien avait pour consigne de réagir de façon naturelle à l'action de tir visualisée. Autrement dit, le gardien devait effectuer son mouvement dans le but de stopper le ballon virtuel.

Nous avons résumé les différents résultats obtenus par les gardiens de but de handball lors des trois études de ce travail de thèse, en fonction du mode de réponse employé, dans le tableau 5.2.3. Dans ce tableau, nous ne considérons que les résultats obtenus pour la situation de référence de l'étude, c'est-à-dire lorsque les gardiens de but étaient face à l'action de tir virtuelle complète et texturée (situation RV pour l'étude 1, niveau de détail N0 pour l'étude 2 et condition BT pour l'étude 3).

		Jugement	Mouvement
Etude 1	Efficacité	$32.9 \pm 7.2\%$	$37.1 \pm 7.6\%$
	Précision	$10.3 \pm 0.8cm$	$9.7 \pm 2.2cm$
Etude 2	Efficacité	$20.6 \pm 5.1\%$	$26 \pm 7.4\%$
	Précision	$29.2 \pm 2.7cm$	$11.8 \pm 3.2cm$
Etude 3	Efficacité	$21.3 \pm 9.7\%$	$31.2 \pm 5.9\%$
	Précision	$26.2 \pm 1.8cm$	$13.6 \pm 4.4cm$

Tab. 5.1 - Résultats obtenus par les gardiens de but lors des trois études en fonction du mode de réponse. Les valeurs concernant l'efficacité proviennent des pourcentages de réussite et celles concernant la précision sont issues du calcul de l'erreur radiale.

Les résultats de ce tableau nous montre que, pour chacune des études, les résultats obtenus

par les gardiens de but sont meilleurs pour la tâche réalisée en mouvement. Nous sommes alors en mesure de nous interroger sur ce constat : pour quelle(s) raison(s) le mode de réponse en mouvement engendre-t-il de meilleurs résultats ? Quel(s) mécanisme(s) peut expliquer cette différence de résultats ?

Le premier argument qui pourrait expliquer ce résultat provient de la notion de "couplage" proposée par l'approche écologique. De ce point de vue, la tâche de jugement correspond à une situation où il y a un faible couplage entre la perception et l'action du sujet. En effet, au cours de cette tâche, le gardien de but doit d'abord regarder l'action de tir avant de positionner sa main. Il y a en fait d'abord perception puis action. A l'inverse, lors de la tâche en mouvement, il y a un très haut degré de couplage entre la perception et l'action car le gardien de but réagit en même temps que l'action de tir se déroule. Ce type de couplage entraînerait donc de meilleures performances de la part des sujets.

Ceci trouve un support théorique dans le fait qu'une situation où le couplage entre la perception et l'action est élevé se rapproche d'une situation réelle de jeu. Or il a été montré que les informations de la scène sont perçues plus précisément si le sujet est engagé dans l'action en temps réel, comme dans une situation réelle [Cornus1999]. De plus, certains auteurs ont démontré que plus la tâche demandée se rapprochait d'une tâche naturelle d'interception, plus l'écart de performance entre les experts et les novices était flagrant [Abernethy1993]. Le fait de se rapprocher des conditions d'une situation réelle de jeu augmenterait donc les performances des sujets experts.

En outre, si le gardien a adopté une stratégie prospective lors de la tâche en mouvement, il a pu effectuer des aller-retour permanents entre sa perception des informations visuelles et le contrôle de son action. A l'inverse, lors de la tâche de jugement, le gardien n'avait pas la possibilité de réguler son action en continu car il devait attendre que l'action de tir soit terminée pour effectuer la prédiction. Ce manque de couplage entre perception et action pour la tâche de jugement peut donc expliquer cette différence de performance entre les deux modes de réponse.

Les caractéristiques temporelles du mode de réponse peuvent également être à l'origine de ces résultats. Lors d'une tâche de jugement, les sujets doivent généralement prédire la position future d'un objet soudainement occulté [Bootsma1993]. Les auteurs tentent de mettre à jour, à travers ces prédictions, les processus d'anticipation développés par les sujets [Williams2005]. Or, d'un point de vue temporel, les contraintes liées aux tâches prédictives diffèrent considérablement de celles impliquées dans la plupart des actions naturelles d'interception [Davids2001]. Dans ce travail de thèse, bien que nous ayons demandé aux gardiens de but d'effectuer leur prédiction le plus rapidement possible après la fin de l'action de tir lors de la tâche de jugement, il y avait un délai dans la réponse. Lorsqu'il existe ce type de décalage temporel, le risque est que les processus d'analyse consciente conduisant à l'identification voire à l'interprétation du signal peuvent être mobilisés [Crognier2007]. Leur mise en jeu demande en effet quelques centaines de millisecondes de plus que les processus de transformation visuo-motrices [Castiello1991]. Or le fait que ces processus interviennent n'amènent-ils pas le sujet à répondre différemment d'une situation naturelle de jeu ?

Un certain nombre de raisons peut donc expliquer le fait que les gardiens de but de handball aient obtenu de meilleures performances lors de la tâche effectuée en mouvement par rapport à la tâche de jugement. Cependant, les études comparatives sur ces deux modes de réponse fournissent des données contradictoires [Farrow2003, Ranganathan2007, Abernethy2007]. De plus amples recherches sur la notion de couplage entre perception et action semblent donc nécessaires.

Conclusion et perspectives

La littérature scientifique nous a tout d'abord montré que la PIV est un critère déterminant de la performance lors d'un duel sportif (cf. section 1). C'est notamment le cas pour un gardien de but qui fait face à un tireur lors d'un match de handball. Nous avons donc montré qu'il est nécessaire d'analyser la PIV du gardien de but de handball pour la compréhension de son action. Un certain nombre de méthodologies ont d'ailleurs été conçues dans ce but. Cependant, qu'il s'agisse des techniques employant la vidéo ou d'analyses cinématiques menées sur le terrain, toutes ces méthodes comportent des limites d'utilisation. Afin de pallier cela, nous proposons une méthodologie innovante fondée sur l'utilisation des EV. Celle-ci permet une implication personnelle du gardien de but de handball suffisante dans l'EV choisi [Bideau2003b].

La première étude de ce mémoire a permis de comparer la pertinence de notre méthode fondée sur les EV avec une autre méthode fréquemment employée dans la littérature : l'occlusion temporelle fondée sur la vidéo. Nous avons alors pu démontrer que les performances des gardiens de but de handball étaient supérieures face à l'action de tir virtuelle par rapport à la même action de tir filmée. Ce résultat s'applique aussi bien à l'efficacité, la précision que la réactivité des gardiens de but de handball. Cela peut être expliqué par le manque d'informations stéréoscopiques inhérente à la projection vidéo (vision en 2D uniquement). L'absence d'une adaptation du point de vue du gardien de but au cours de l'expérimentation face à la vidéo peut également être à l'origine de ces résultats. De ce fait, notre nouvelle méthode issue de la réalité virtuelle apparaît plus adaptée pour l'analyse de la PIV des gardiens de but de handball.

Au cours de la seconde étude, nous nous sommes intéressés à la mise en place de notre méthodologie fondée sur les EV et à son impact sur la performance des gardiens de but de handball. Plus précisément, nous avons analysé l'influence de la représentation graphique du mouvement de tir sur la performance des gardiens de but de handball. Pour cela, nous avons créé cinq niveaux de détails graphiques hiérarchiquement dégradés : un niveau de référence totalement texturé (N0), un niveau sans texture (N1), un niveau de représentation en "fil de fer" (N2), un niveau représentant le mouvement de tir en PLD (N3) et un niveau en PLD avec une taille de ballon réduite (N4). Nos résultats montrent que, même si l'efficacité des gardiens de but n'est pas influencée, le niveau N4 affecte la précision des gardiens de but lors de la tâche de jugement. De plus, la représentation en PLD du mouvement de tir (N3 et N4) influence la régulation du mouvement d'interception du gardien de but de handball.

Après avoir démontré l'avantage de notre méthodologie par rapport à l'utilisation de la vidéo, et après avoir étudié la façon de représenter graphiquement le mouvement de tir dans notre EV, la dernière étude de ce travail de thèse a permis d'appliquer notre méthodologie pour l'analyse de la PIV des gardiens de but de handball. A ce sujet, il n'existe pas de consensus dans la littérature sur l'utilisation privilégiée des informations issues de la trajectoire du ballon ou de celles provenant de la cinématique du mouvement de tir lors d'une tâche d'interception [Panchuk2006]. Nous avons donc confronté les gardiens de but de handball à trois conditions visuelles : la trajectoire du ballon seule (BS), le mouvement de tir seul (TS) et l'action de tir complète (BT). Les résultats de cette dernière étude ont montré que la performance des gardiens de but de handball face à la condition visuelle BS était supérieure à celle obtenue face à la condition visuelle TS. Les informations visuelles issues de la trajectoire du ballon semblent donc être primordiales pour la PIV des gardiens de but de handball. Cependant, il apparaît que la performance des gardiens de but lors de la condition BT peut être supérieure à celle obtenue pour la condition BS. Les indices visuels provenant de la cinématique du tireur peuvent donc avoir leur importance. Par ailleurs, la performance des gardiens de but n'est pas influencée par la condition visuelle TS lorsque le mouvement de tir est dirigé vers la zone 1. Les informations visuelles provenant de la configuration cinématique du mouvement de tir s'avèrent dès lors également capitales pour la PIV des gardiens de but de handball.

L'ensemble des résultats de ces trois études ont pu être discutés dans une dernière partie. Nous avons ainsi pu mettre en évidence les contributions de nos études dans la conception des futurs systèmes de réalité virtuelle. Dans le cadre de l'analyse d'une situation sportive en EV, il semble nécessaire de permettre une vision stéréoscopique des images de synthèse tout en adaptant le point de vue de l'athlète immergé. Cela pourrait être effectué par l'intermédiaire d'un HMD. Les sujets se sentiraient alors plus proches d'une situation réelle. L'utilisation de gants haptiques va également dans ce sens puisque les sujets pourraient avoir la sensation de toucher le ballon. Les interactions au sein de l'EV doivent également être prises en compte de façon réaliste. Dans ce but, animer les mouvements des autres protagonistes sportifs de la situation d'étude nous semble primordial. La période d'habitation (ou d'échauffement) du sujet en EV ne doit pas être négligée afin de ne pas influencer sa performance à venir. Enfin, il serait intéressant d'inclure une situation sportive comportant des informations sur le contexte de jeu avant d'analyser la performance en EV.

Afin d'étudier plus finement la PIV du gardien de but de handball, un autre outil d'analyse pourrait être couplé à notre système de réalité virtuelle comme un oculomètre par exemple. En effet, bien que cet outil comporte certaines limites d'utilisation, cela nous permettrait d'avoir une idée plus précise de ce qui est visualisé par les gardiens de but de handball lors de l'action d'interception. On sait par exemple que les mouvements du tireur, et plus particulièrement le bras porteur de balle, jouent un rôle dans la PIV des gardiens de but de handball [Bideau2004]. En utilisant un oculomètre, il serait possible d'avoir une idée plus précise de l'indice corporel utilisé par les gardiens de but. Les chercheurs ne sont en effet pas tous d'accord sur les indices cinématiques utilisés par les gardiens de but [Savelsbergh2005, Panchuk2006]. Alors que le système de réalité virtuelle seul a déjà été utilisé pour analyser les indices corporels prépondérants pour le gardien de but de handball [Bideau2004], le fait de coupler ce système à un oculomètre permettrait d'obtenir la hiérarchie temporelle des éléments visualisés par le gardien de but dans l'action de tir. De plus, comme il est possible de modifier certains indices du mouvement de tir virtuel dans notre animation [Bideau2004], on pourrait observer comment évolue le signal oculométrique en fonction d'un mouvement de tir peu à peu modifié. Cela nous permettrait de vérifier si certains indices visuels observés par le gardien de but correspondent bien à des indices signifiants pour son action d'interception.

Lors d'une étude préliminaire menée au sein du laboratoire M2S, nous avons pu coupler un

oculomètre (ASL Eye-Track Serie 6000, ASL, Bedford, MA, US) à notre système de réalité virtuelle (figure 5.2).

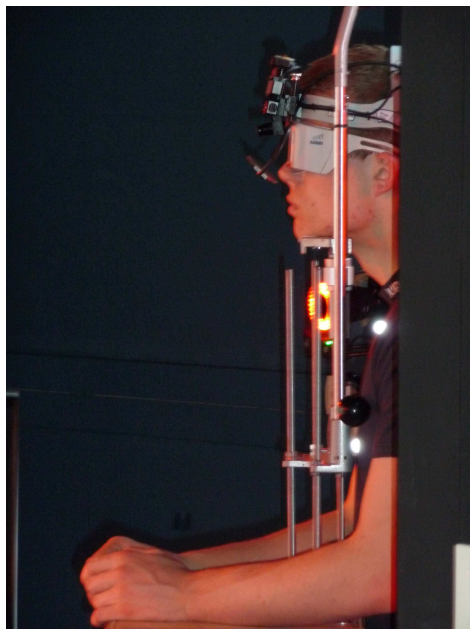


Fig. 5.2 - Image d'un oculomètre porté par un gardien de but de handball immergé dans l'EV (les lunettes de stéréovision sont visibles).

Cette étude a permis d'analyser et de comparer les stratégies de PIV des gardiens de but de handball face à un mouvement de tir visualisé dans trois environnements différents : réel, filmé et virtuel [Presse2009]. Mais l'oculomètre employé dans cette étude obligeait le gardien de but à rester immobile. L'utilisation d'un oculomètre intégré à un HMD nous permettrait d'envisager de nouvelles perspectives de recherche (figure 5.3).



Fig. 5.3 - Image d'un oculomètre couplé à un HMD pour l'analyse des stratégies visuelles en EV.

En ce qui concerne la compréhension de la PIV du gardien de but de handball, nous avons pu

démontrer l'influence des propriétés cinématiques du mouvement de tir sur la performance des gardiens de but de handball (études 2 et 3). Pour ce qui est de la cinématique du mouvement d'interception du gardien de but, il semble que celui-ci adopte une stratégie prospective du traitement des informations visuelles. Autrement dit, le gardien de but réajuste son mouvement en continu tout au long de sa parade. Les différences de performance face à la tâche de jugement et face à la tâche en mouvement ont également été abordées. La notion de couplage entre perception et action ainsi que les caractéristiques temporelles de ces modes de réponse peuvent expliquer cette différence de performance.

Les contributions de ce travail de thèse dans le domaine de l'entraînement sportif seront discutées dans le chapitre "Apport au domaine".

Apport au domaine

L'utilisation des EV pour l'analyse d'une situation sportive confère un lien étroit avec l'une des filières de recherche en STAPS : l'entraînement sportif. Plusieurs étapes sont néanmoins nécessaires avant d'utiliser les EV pour entraîner les gardiens de but de handball. Dans un premier temps, il est nécessaire de valider l'outil "réalité virtuelle" pour l'analyse de la performance des gardiens de but de handball. Ceci a été réalisé par B. Bideau au sein du laboratoire M2S [Bideau2003a].

Une fois l'EV validé, il faut montrer qu'une analyse de la performance du gardien de but de handball est possible par cette démarche. C'était le but principal de ce travail de thèse. En plus de démontrer l'avantage de notre méthodologie et s'intéresser à sa mise en place, nous avons prouvé qu'une analyse de la PIV du gardien de but est possible en EV par notre méthodologie.

Une troisième étape peut alors être envisagée. Il s'agit d'utiliser notre méthodologie fondée sur les EV pour l'entraînement des gardiens de but de handball. En effet, les avantages de la réalité virtuelle pour l'apprentissage de tâches spécifiques ont été mis en évidence dans de nombreuses disciplines comme la chirurgie [Seymour2002], la maintenance [Rickel1999] ou l'éducation [Psotka1995]. Dans le domaine sportif, il s'agit de montrer qu'un entraînement basé sur notre méthodologie peut améliorer les performances du gardien de but de handball à court et à long terme. L'utilisation des EV pour l'entraînement du gardien de but peut donc être abordée de deux façons :

- A long terme : un entraînement individualisé du gardien de but en EV peut être envisagé. Après une analyse complète des performances du gardien de but en EV (PIV, points forts, points faibles, etc.), il est possible de travailler spécifiquement certains éléments de l'activité d'interception. Par exemple, l'utilisation des EV nous permettrait de mettre en relief certaines informations visuelles (comme l'angle articulaire au niveau de l'épaule droite par exemple) en les changeant de couleur ou en les entourant au cours de l'action de tir (figure 5.2.3). Cela permettrait au gardien de se faire une meilleure représentation mentale de son environnement [Fuchs2006]. Un suivi de l'entraînement nous permettrait ensuite de voir si la performance du gardien de but s'en trouve alors améliorée. Ce processus d'entraînement pourrait également être utilisé dans les "pôles espoir" pour former les futurs gardiens de but de haut niveau.

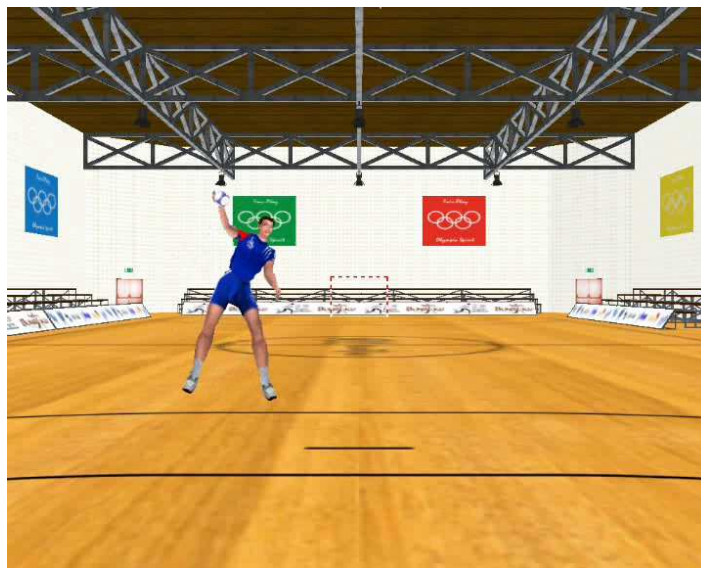


Fig. 5.4 - Image du joueur de handball virtuel dont l'épaule droite a été colorée.

- A court terme : dans le sport de haut niveau, les gardiens de but doivent continuellement s'adapter à leurs adversaires du jour. Bien que les gardiens de but de handball professionnels se servent de la vidéo dans leur entraînement (visionner les matchs de l'équipe adverse avant de les jouer), un entraînement plus "écologique" peut être conçu grâce aux EV. Du fait de l'amélioration des techniques de captures de mouvement, il est aujourd'hui possible d'enregistrer précisément un mouvement en 3D à partir de séquences vidéos [Moeslund2006]. Cette approche pourrait être appliquée pour capturer les mouvements de joueurs de handball de haut niveau. Et ces mouvements pourraient être rejoués dans l'EV grâce au module d'animation MKM. Ainsi, plutôt que de regarder les séquences vidéo d'une équipe adverse avant le match, le gardien de but de handball serait en mesure de s'entraîner contre n'importe quel adversaire avant de le rencontrer le jour du match. Les principales feintes et séquences de jeu pourraient alors être appréhendées et décodées par le gardien de but de handball.

Ce processus d'entraînement décrit pour les gardiens de but de handball peut également faire l'objet d'un entraînement spécifique dans d'autres disciplines. Ainsi, le laboratoire M2S développe actuellement, en collaboration avec la Queen's University de Belfast, deux autres thématiques de recherche en lien avec les EV. Il s'agit du rugby [Brault2009] et du football [Nicolas2009] (figure 5.2.3). Ainsi, un entraînement spécifique basé sur l'utilisation des EV serait possible dans de nombreux sports en se basant sur la démarche scientifique adoptée dans ce travail de thèse.

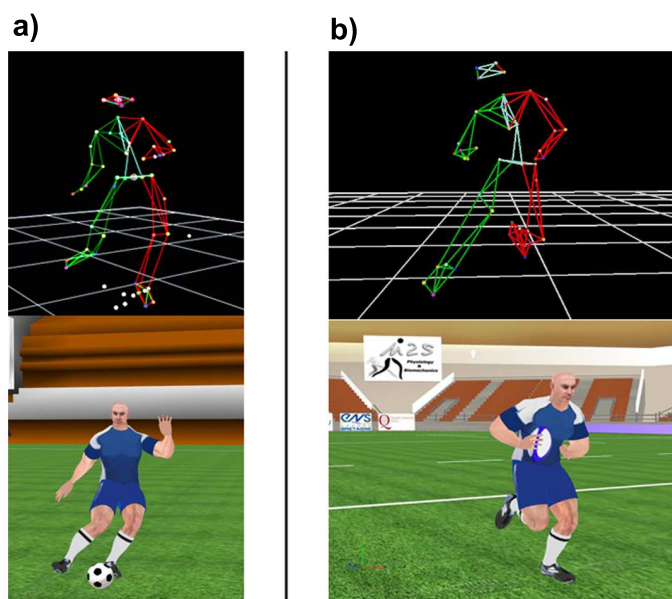


Fig. 5.5 - Utilisation de la réalité virtuelle pour deux autres disciplines sportives : a) le football (analyse de la perception du gardien de but face à un coup-franc); et b) le rugby (étude de l'influence d'un mouvement de feinte sur la perception d'un défenseur).

Par la polyvalence et l'originalité de ses travaux, le laboratoire M2S entend se positionner dans le domaine de l'entraînement sportif fondé sur les EV. Ce laboratoire a par ailleurs obtenu le financement d'un projet de recherche dédié à l'apprentissage et à l'entraînement physique et sportif à domicile (projet BIOFEEDBACK). Ce projet a pour but la conception d'un EV interactif pour l'apprentissage de gestes sportifs. Prenons l'exemple d'une personne voulant s'entraîner en danse. En plus de proposer au danseur une visualisation de la chorégraphie de danse, le projet BIOFEEDBACK permettra d'analyser le mouvement global reproduit par le danseur. Cette analyse permettra de donner un retour sur les erreurs commises pendant le mouvement. Ce projet propose donc d'intégrer de nouveaux modes d'interactions en EV pour l'entraînement sportif.

Bibliographie

- [Abernethy1984] Abernethy, B. et Russell, D. *Advance cue utilisation by skilled cricket batsmen*. Australian Journal of Science and Medicine in sport, vol. 16, n° 2, pages 2–10, 1984.
- [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.
- [Abernethy1989] Abernethy, B. et Packer, S. *Perceiving joint kinematics and segment interactions as a basis for skilled anticipation in squash*. In Proceedings of the 7th World Congress in Sport Psychology, pages 56–58, 1989.
- [Abernethy1990a] Abernethy, B. *Anticipation in squash : Differences in advance cue utilization between expert and novice players*. Journal of Sports Sciences, vol. 8, n° 1, pages 17–34, 1990.
- [Abernethy1990b] Abernethy, B. *Expertise, visual search, and information pick-up in squash*. Perception, vol. 19, n° 1, pages 63–77, 1990.
- [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.
- [Ahlström1997] Ahlström, V., Blake, R. et Ahlström, U. *Perception of biological motion*. Perception, vol. 26, n° 12, page 1539, 1997.
- [Allard1980] Allard, F. et Starkes, J. *Perception in sport : Volleyball*. Journal of Sport Psychology, vol. 2, n° 1, pages 22–33, 1980.
- [Assa2005] Assa, J., Caspi, Y. et Cohen-Or, D. *Action synopsis : pose selection and illustration*. In International Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques, pages 667–676. ACM New York, NY, USA, 2005.

- [Aukstakalnis1992] Aukstakalnis, S. et Blatner, D. *Silicon Mirage; The Art and Science of Virtual Reality*. Peachpit Press Berkeley, CA, USA, 1992.
- [Babcock2003] Babcock, J., Pelz, J. et Peak, J. *The Wearable Eyetracker : A Tool for the Study of High-level Visual Tasks*. In Proceedings of the Military Sensing Symposia Specialty Group on Camouflage, Concealment, and Deception, Tucson, Arizona, 2003.
- [Bard1976] Bard, C. et Fleury, M. *Analysis of visual search activity during sport problem situations*. Journal of Human Movement Studies, vol. 3, pages 214–222, 1976.
- [Bard1981] Bard, C. et Fleury, M. *Considering eye movement as a predictor of attainment*. Vision and sport, vol. 20, pages 28–41, 1981.
- [Barfield1993] Barfield, W. et Weghorst, S. *The sense of presence within virtual environments : a conceptual framework*. In Proceedings of the 5th International Conference on Human-Computer Interaction, pages 699–704, 1993.
- [Barfield1995a] Barfield, W. et Hendrix, C. *The effect of update rate on the sense of presence within virtual environments*. Virtual Reality, vol. 1, n° 1, pages 3–15, 1995.
- [Barfield1995b] Barfield, W., Zeltzer, D., Sheridan, T. et Slater, M. *Presence and performance within virtual environments*. Virtual environments and advanced interface design, pages 473–513, 1995.
- [Bastin2006] Bastin, J., Craig, C. et Montagne, G. *Prospective strategies underlie the control of interceptive actions*. Human movement science, vol. 25, n° 6, pages 718–732, 2006.
- [Bastin2008] Bastin, J., Jacobs, D., Morice, A., Craig, C. et Montagne, G. *Testing the role of expansion in the prospective control of locomotion*. Experimental Brain Research, vol. 191, n° 3, pages 301–312, 2008.
- [Belisle1963] Belisle, J. *Accuracy, reliability, and refractoriness in a coincidence-anticipation task*. Research Quarterly, 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. *La réalité virtuelle pour l'analyse des duels sportifs : application au duel entre un gardien et un tireur au handball*, 2003.
- [Bideau2003b] Bideau, B., Kulpa, R., Ménardais, S., Fradet, L., Multon, F., Delamarche, P. et Arnaldi, B. *Real Handball Goalkeeper vs. Virtual Handball Thrower*. Presence : Teleoperators & 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.
- [Bideau2009] Bideau, B., Kulpa, R., Vignais, N., Brault, S., Multon, F. et Craig, C. *Using Virtual Reality to Analyze Performance in Sports*. IEEE Computer Graphics and Applications, vol. sous presse, 2009.
- [Billinghurst1995] Billinghurst, M. et Weghorst, S. *The use of sketch maps to measure cognitive maps of virtual environments*. In Proceedings of IEEE 1995 Virtual Reality Annual International Symposium, pages 40–47, 1995.

- [Bobick1996] Bobick, A. et Davis, J. *An appearance-based representation of action*. ICPR, August, 1996.
- [Boccara2000] Boccara, M. *Simulation visuelle de mission spatiale : Applications Ariane 5*. In International exhibition and conferences dedicated to CAD/CAM/CAE and new technologies for design and manufacturing, pages 135–143, 2000.
- [Bonnefoy2008] Bonnefoy, A., Robert, T., Dumas, R. et Cheze, L. *Advanced biomechanical methods for the computation of joint moments and muscular forces*. Imagerie et Recherche Biomédicale, 2008.
- [Bonnet2005] Bonnet, C. *Cours de psychologie cognitive*, 2005. [http ://projet-idea.u-strasbg.fr/depotcel/DepotCel/142/lesf](http://projet-idea.u-strasbg.fr/depotcel/DepotCel/142/lesf).
- [Bootsma1993] Bootsma, R. et Oudejans, R. *Visual information about time-to-collision between two objects*. Journal of Experimental Psychology : Human Perception and Performance, vol. 19, n° 5, pages 1041–52, 1993.
- [Bootsma1997] Bootsma, R., Fayt, V., Zaal, F. et Laurent, M. *On the Information-Based Regulation of Movement : What Wann (1996) May Want to Consider*. Journal of Experimental Psychology : Human Perception and Performance, vol. 23, pages 1282–1289, 1997.
- [Bowman2007] Bowman, D. et McMahan, R. *Virtual Reality : How Much Immersion Is Enough ?* Computer-IEEE Computer Magazine, vol. 40, n° 7, pages 36–44, 2007.
- [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.
- [Buckolz1988] Buckolz, E., Prapavesis, H. et Fairs, J. *Advance cues and their use in predicting tennis passing shots*. Canadian Journal of Sport Sciences, vol. 13, n° 1, pages 20–30, 1988.
- [Bystrom1999] Bystrom, K., Barfield, W. et Hendrix, C. *A Conceptual Model of the Sense of Presence in Virtual Environments*. Presence : Teleoperators & Virtual Environments, vol. 8, n° 2, pages 241–244, 1999.
- [Capin1997] Capin, T., Pandzic, I., Noser, H., Magnenat-Thalmann, N. et Thalmann, D. *Virtual Human Representation and Communication in VLNET Networked Virtual Environments*. IEEE Computer Graphics and Applications, vol. 17, n° 2, pages 42–53, 1997.
- [Castiello1991] Castiello, U., Paulignan, Y. et Jeannerod, M. *Temporal dissociation of motor responses and subjective awareness : A study in normal subjects*. Brain, vol. 114, n° 6, page 2639, 1991.
- [Chamberlain1993] Chamberlain, C. et Coelho, A. *The perceptual side of action : Decision-making in sport*. Advances in psychology, vol. 102, pages 135–157, 1993.
- [Chardenon2002] Chardenon, A., Montagne, G., Buekers, M. et Laurent, M. *The visual control of ball interception during human locomotion*. Neuroscience Letters, vol. 334, n° 1, pages 13–16, 2002.
- [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.

- [Collewyn1992] Collewyn, H., Steinman, R., Erkelens, C., Pizlo, Z. et van der Steen, J. *Effect of freeing the head on eye movement characteristics during three-dimensional shifts of gaze and tracking*. Berthoz, A., Graf, W., Vidal, P. (Eds.), *The Head-Neck Sensory Motor System*, 1992.
- [Cornus1999] Cornus, S., Montagne, G. et Laurent, M. *Perception of a stepping-across affordance*. *Ecological Psychology*, vol. 11, n° 4, pages 249–267, 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.
- [Craig2009] Craig, C., Goulon, C., Berton, E., Rao, G., Fernandez, L. et Bootsma, R. *Optic variables used to judge future ball arrival position in expert and novice soccer players*. *Attention, Perception & Psychophysics*, vol. 71, n° 3, page 515, 2009.
- [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.
- [Davids2001] Davids, K., Kingsbury, D., Bennett, S. et Handford, C. *Information–movement coupling : Implications for the organization of research and practice during acquisition of self-paced extrinsic timing skills*. *Journal of Sports Sciences*, vol. 19, n° 2, pages 117–127, 2001.
- [Davids2002] Davids, K. *Interceptive Actions in Sport : Information and Movement*. Routledge, 2002.
- [Day1980] Day, L. *Anticipation in junior tennis players*. In *Proceedings of the international symposium on the effective teaching of racquet sports*, pages 107–116, 1980.
- [de Leva1996] de Leva, P. *Adjustments to Zatsiorsky-Seluyanov's segment inertia parameters*. *Journal of Biomechanics*, vol. 29, n° 9, pages 1223–1230, 1996.
- [de Rugby2000] de Rugby, A., Montagne, G., Buekers, M. et Laurent, M. *The control of human locomotor pointing under restricted informational conditions*. *Neuroscience Letters*, vol. 281, n° 2-3, pages 87–90, 2000.
- [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 penalty*. *Recherches en Activités Physiques et Sportives I*, pages 259–272, 1985.
- [Didierjean2005] Didierjean, A. et Marmèche, E. *Anticipatory representation of visual basketball scenes by novice and expert players*. *Visual Cognition*, vol. 12, n° 2, pages 265–283, 2005.
- [Dittrich1996] Dittrich, W., Troscianko, T., Lea, S. et Morgan, D. *Perception of emotion from dynamic point-light displays represented in dance*. *Perception*, vol. 25, pages 727–738, 1996.

- [Doncescu1989] Doncescu, A. et Puzenat, D. *New mesh generating adapted to parallel systems : PVM implementation issue*. In Proceedings of the International Workshops on Parallel Processing, Toronto, Canada, 1989.
- [Draper1996] Draper, J. et Blair, L. *Workload, flow, and telepresence during teleoperation*. In Robotics and Automation, 1996. Proceedings., 1996 IEEE International Conference on, volume 2, 1996.
- [Draper1998] Draper, J., Kaber, D. et Usher, J. *Telepresence*. Human Factors : The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society, vol. 40, n° 3, pages 354–375, 1998.
- [Eggert2005] Eggert, T., Rivas, F. et Straube, A. *Predictive strategies in interception tasks : differences between eye and hand movements*. Experimental Brain Research, vol. 160, n° 4, pages 433–449, 2005.
- [Ellis1995] Ellis, S. *Nature and origins of virtual environments : a bibliographical essay*. Computing Systems in Engineering, 1995.
- [Farrow2003] Farrow, D. et Abernethy, B. *Do expertise and the degree of perception-action coupling affect natural anticipatory performance?* Perception, vol. 32, n° 9, pages 1127–1140, 2003.
- [Féry2001a] Féry, Y. *Que savons-nous de nos mouvements?* Staps, vol. 55, n° 2001/2, pages 7–22, 2001.
- [Fery2001b] Fery, Y. et Crognier, L. *On the tactical significance of game situations in anticipating ball trajectories in tennis*. Research Quarterly on Exercise and Sport, vol. 72, n° 2, pages 143–9, 2001.
- [Fradet2003] Fradet, L. *Analyse biomécanique, modélisation et simulation du tir au handball*, PhD thesis, Université Rennes 2 - France, 2003.
- [Franks1997] Franks, I. et Harvey, I. *Cues for Goalkeepers-High-tech methods used to measure penalty shot response*. Soccer Journal, vol. 42, pages 30–33, 1997.
- [Freysinger2002] Freysinger, W., Truppe, M., Gunkel, A. et Thumfart, W. *Stereotactic telepresence in ear, nose, and throat surgery*. Hals-, Nasen-, Ohrenärzte, vol. 50, n° 5, pages 424–432, 2002.
- [Fuchs2001] Fuchs, P., Moreau, G. et Papin, J. *Le traité de la réalité virtuelle*. Presse de l'Ecole des mines, Paris, France, 2001.
- [Fuchs2006] Fuchs, P., Moreau, G., Berthoz, A., Vercher, J. et Auvray, M. *Le traité de la réalité virtuelle : Volume 1, L'homme et l'environnement virtuel*. Les Presses-Mines Paris, 2006.
- [Gibson1979] Gibson, J. *The Ecological Approach to Visual Perception*. Lawrence Erlbaum Associates, 1979.
- [Goulet1989] Goulet, C., Bard, C. et Fleury, M. *Expertise differences in preparing to return a tennis serve : A visual information processing approach*. Journal of Sport and Exercise Psychology, vol. 11, n° 4, pages 382–398, 1989.
- [Goulet1992] Goulet, C., Bard, C. et PLEURY, M. *Les exigences attentionnelles de la préparation au retour de service au tennis*. Canadian journal of sport sciences, vol. 17, n° 2, pages 98–103, 1992.
- [Gray2006] Gray, R., Regan, D., Castaneda, B. et Sieffert, R. *Role of feedback in the accuracy of perceived direction of motion-in-depth and control of interceptive action*. Vision Research, vol. 46, n° 10, pages 1676 – 1694, 2006.

- [Hand1996] Hand, C. *Other Faces of Virtual Reality*. Lecture Notes in Computer Science, pages 107–116, 1996.
- [Harris2003] Harris, J. et Dean, P. *Accuracy and precision of binocular 3-D motion perception*. Journal of Experimental Psychology : Human Perception and Performance, vol. 29, n° 5, pages 869–881, 2003.
- [Heeter1992] Heeter, C. *Being there : the subjective experience of presence*. Presence : Teleoperators and Virtual Environments, vol. 1, n° 2, pages 262–271, 1992.
- [Heilig1962] Heilig, M. *Sensorama simulator T*, 1962. US Patent 3,050,870.
- [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.
- [Hendrix1994] Hendrix, C. *Exploratory Studies on the Sense of Presence in Virtual Environments as a Function of Visual and Auditory Display Parameters*, PhD thesis, University of Washington, 1994.
- [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.
- [Hill2001] Hill, H. et Johnston, A. *Categorizing sex and identity from the biological motion of faces*. Current Biology, vol. 11, n° 11, pages 880–885, 2001.
- [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.
- [Howarth1984] Howarth, C., Walsh, W., Abernethy, B. et Snyder Jr, C. *A field examination of anticipation in squash : Some preliminary data*. Australian Journal of Science and Medicine in Sport, vol. 16, n° 3, pages 7–11, 1984.
- [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.
- [Jones1978] Jones, C. et Miles, T. *Use of advance cues in predicting the flight of a lawn tennis ball*. Journal of Human Movement Studies, vol. 4, pages 231–235, 1978.
- [Keller1985] Keller, D. *Comportement préparatoire et adaptation au tennis*. Staps, 6 (11), pages 57–63, 1985.
- [Keller1987] Keller, D., Goetz, M. et Henneman, M. *Ajustements duels spécifiques en sports de balle*. STAPS, vol. 15, pages 31–38, 1987.
- [Kennedy2000] Kennedy, R., Stanney, K. et Dunlap, W. *Duration and Exposure to Virtual Environments : Sickness Curves During and Across Sessions*. Presence : Teleoperators & Virtual Environments, vol. 9, n° 5, pages 463–472, 2000.
- [Kim1997] Kim, T. et Biocca, F. *Telepresence via Television : Two Dimensions of Telepresence May Have Different Connections to Memory and Persuasion.[1]*. Journal of Computer-Mediated Communication, vol. 3, n° 2, 1997.

- [Knapp2004] Knapp, J. et Loomis, J. *Limited field of view of head-mounted displays is not the cause of distance underestimation in virtual environments*. Presence : Teleoperators & Virtual Environments, vol. 13, n° 5, pages 572–577, 2004.
- [Kovar2002] Kovar, L., Gleicher, M. et Pighin, F. *Motion graphs*. ACM Transactions on Graphics (TOG), vol. 21, n° 3, pages 473–482, 2002.
- [Kulpa2005a] Kulpa, R. *Adaptation interactive et performante des mouvements d'humanoïdes synthétiques : aspects cinématique, cinétique et dynamique*, PhD thesis, INSA, Rennes-France, 2005.
- [Kulpa2005b] Kulpa, R., Multon, F. et Arnaldi, B. *Morphology-independent representation of motions for interactive human-like animation*. In Computer Graphics Forum, Eurographics 2005 special issue, volume 24, pages 343–352, 2005.
- [Land2000] Land, M. et McLeod, P. *From eye movements to actions : how batsmen hit the ball*. Nature Neuroscience, vol. 3, n° 12, pages 1340–1345, 2000.
- [Lanier1984] Lanier, J. *Scientific American*, cover, 1984.
- [Laumond2005] Laumond, J., Ferre, E., Arechavaleta, G. et Esteves, C. *Mechanical part assembly planning with virtual mannequins*. In Assembly and Task Planning : From Nano to Macro Assembly and Manufacturing, 2005.(ISATP 2005). The 6th IEEE International Symposium on, pages 132–137, 2005.
- [Laurent1996] Laurent, M., Montagne, G. et Durey, A. *Binocular invariants in interceptive tasks : a directed perception approach*. Perception, vol. 25, pages 1437–1450, 1996.
- [Leardini1999] Leardini, A., Cappozzo, A., Catani, F., Toksvig-Larsen, S., Petitto, A., Sforza, V., Cassanelli, G. et Giannini, S. *Validation of a functional method for the estimation of hip joint centre location*. Journal of Biomechanics, vol. 32, n° 1, pages 99–103, 1999.
- [Lecerf1994] Lecerf, C. *Contrôle du mouvement de systèmes mécaniques en animation*, PhD thesis, Université Rennes 1, 1994.
- [Lenoir1999] Lenoir, M., Musch, E. et La Grange, N. *Ecological relevance of stereopsis in one-handed ball-catching*. Perceptual and motor skills, vol. 89, n° 2, pages 495–508, 1999.
- [Lenoir2002] Lenoir, M., Musch, E., Savelsbergh, G. et Thiery, E. *Rate of change of angular bearing as the relevant property in a horizontal interception task during locomotion*. Journal of motor behavior, vol. 34, n° 4, pages 385–401, 2002.
- [LNH2009] LNH. *Statistiques de gardiens de but de handball de niveau international*, Statistiques réalisées entre 2007 et 2009. [http ://www.lnh.fr/](http://www.lnh.fr/).
- [Lombard1997] Lombard, M. et Ditton, T. *At the Heart of It All : The Concept of Presence*. Journal of Computer-Mediated Communication, vol. 3, n° 2, 1997.
- [Lorenceanu1997] Lorenceanu, J. *Mécanismes de la perception visuelle du mouvement*. 6ème Ecole d'été de l'ARC/CNRS, 1997.
- [Ma2006] Ma, R. et Kaber, D. *Presence, workload and performance effects of synthetic environment design factors*. International Journal of Human-Computer Studies, vol. 64, n° 6, pages 541–552, 2006.

- [MacNamee2003] MacNamee, B., Dobbyn, S., Cunningham, P. et O'Sullivan, C. *Simulating virtual humans across diverse situations*. In Intelligent virtual agents : 4th International Workshop, IVA 2003, Kloster Irsee, Germany, September 15-17, 2003 : proceedings, page 159. Springer Verlag, 2003.
- [Magill1993] Magill, R. *Motor Learning : Concepts and Applications*. 3rd. Madison : WCB Brown & Benchmark, 1993.
- [Malbos2008] Malbos, E., Mestre, D., Note, I. et Gellato, C. *Virtual Reality and Claustrophobia : Multiple Components Therapy Involving Game Editor Virtual Environments Exposure*. CyberPsychology & Behavior, vol. 11, n° 6, pages 695–697, 2008.
- [Margery2002] Margery, D., Arnaldi, B., Chauffaut, A., Donikian, S. et Duval, T. *Open-mask : Multi-threaded/ Modular animation and simulation Kernel/ Kit ; un bref survol*. Journées AFIG, 2002.
- [Marrey1894] Marrey, E. *Le mouvement*. Paris. Masson, vol. 200, pages 673–93, 1894.
- [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.
- [McLeod2006] McLeod, P., Reed, N. et Dienes, Z. *The generalized optic acceleration cancellation theory of catching*. Journal of Experimental Psychology-Human Perception and Performance, vol. 32, n° 1, pages 139–147, 2006.
- [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.
- [McMorris1996] McMorris, T. et Colenso, S. *Anticipation of professional soccer goalkeepers when facing right- and left-footed penalty kicks*. Perceptual and Motor Skills, vol. 82, n° 3, pages 931–934, 1996.
- [Menache2000] Menache, A. *Understanding Motion Capture for Computer Animation and Video Games*. Morgan Kaufmann, 2000.
- [Ménardais2002] Ménardais, S., Multon, F. et Arnaldi, B. *A Global Framework for Motion Capture*. Research report INRIA, 2002.
- [Mestre2006] Mestre, D. et Fuchs, P. *Immersion et présence*. Le traité de la réalité virtuelle. Paris : Ecole des Mines de Paris, pages 309–38, 2006.
- [Milner1995] Milner, A. et Goodale, M. *The Visual Brain in Action*. New York : Oxford, 1995.
- [Milner2007] Milner, A. et Goodale, M. *Two visual systems re-viewed*. Neuropsychologia, 2007.
- [Ménardais2003] Ménardais, S. *Fusion et adaptation temps réel de mouvements acquis pour l'animation d'humanoides synthétiques*, PhD thesis, Université Rennes 1, 2003.
- [Moeslund2006] Moeslund, T., Hilton, A. et Krüger, V. *A survey of advances in vision-based human motion capture and analysis*. Computer Vision and Image Understanding, vol. 104, n° 2-3, pages 90–126, 2006.
- [Mondada2004] Mondada, L. *Téléchirurgie et nouvelles pratiques professionnelles : les enjeux interactionnels d'opérations chirurgicales réalisées par visioconférence*. Sciences Sociales et Santé, vol. 22, n° 1, pages 95–126, 2004.

- [Montagne2005] Montagne, G. *Prospective control in sport*. International Journal of Sport Psychology, vol. 36, n° 2, page 127, 2005.
- [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.
- [Morice2008] Morice, A., Siegler, I. et Bardy, B. *Action-perception patterns in virtual ball bouncing : Combating system latency and tracking functional validity*. Journal of neuroscience methods, vol. 169, n° 1, pages 255–266, 2008.
- [Müller2006a] Müller, S. et Abernethy, B. *Batting with occluded vision : An in situ examination of the information pick-up and interceptive skills of high-and low-skilled cricket batsmen*. Journal of Science and Medicine in Sport, vol. 9, n° 6, pages 446–458, 2006.
- [Müller2006b] 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.
- [Nichols2000] Nichols, S. et Haldane, C. *Measurement of presence and its consequences in virtual environments*. International Journal of Human-Computer Studies, vol. 52, n° 3, pages 471–491, 2000.
- [Nicolas2009] Nicolas, G., Bideau, B., Kulpa, R., Rue, O., Billien, M., Vignais, N. et Delamarche, P. *Biomechanical evaluation for the identification of free kick determinants in soccer*. In Proceedings of European Workshop On Movement Science, Lisbon, Portugal, page 55, 2009.
- [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.
- [Nougaret1996] Nougaret, J.-L. *Contrôle du mouvement pour l'animation*, PhD thesis, Université Rennes 1, 1996.
- [Novacheck1998] Novacheck, T. *The biomechanics of running*. Gait & Posture, vol. 7, n° 1, pages 77–95, 1998.
- [O' Brien1998] O' Brien, J., Büscher, M., Rodden, T. et Trevor, J. *Red is behind you' : the experience of presence in shared virtual environments*. In Presence in Shared Virtual Environments Workshop, pages 10–11, 1998.
- [Oakley2003] Oakley, I. *Haptic Augmentation of the Cursor : Transforming Virtual Actions into Physical Actions*, 2003.
- [Olivier2008] Olivier, A.-H. *Analyse dans le plan courbure - vitesse d'un changement de direction lors de la marche*, PhD thesis, Université Rennes 2, 2008.
- [Panchuk2006] Panchuk, D. et Vickers, J. *Gaze behaviors of goaltenders under spatial-temporal constraints*. Human movement science, vol. 25, n° 6, pages 733–752, 2006.
- [Park2004] Park, S., Shin, H., Kim, T. et Shin, S. *On-line motion blending for real-time locomotion generation*. Computer Animation and Virtual Worlds, vol. 15, pages 125–138, 2004.

- [Paull1997] Paull, G. et Glencross, D. *Expert perception and decision making in baseball*. International Journal of Sport Psychology, vol. 28, n° 1, pages 35–56, 1997.
- [Pelli2001] Pelli, D. *Human Perception of Objects : Early Visual Processing of Spatial Form Defined by Luminance, Color, Texture, Motion, and Binocular Disparity*. Optometry and Vision Science, vol. 78, n° 11, page 779, 2001.
- [Peper1994] Peper, L., Bootsma, R., Mestre, D. et Bakker, F. *Catching balls : how to get the hand to the right place at the right time*. Journal of Experimental Psychology : Human Perception and Performance, vol. 20, n° 3, pages 591–612, 1994.
- [Pol1999] Pol, R., Ribarsky, W., Hodges, L. et Post, F. *Interaction in semi-immersive large display environments*. In Proceedings of Virtual Environments ??? 99, 1999.
- [Pollick2002] Pollick, F., Lestou, V., Ryu, J. et Cho, S. *Estimating the efficiency of recognizing gender and affect from biological motion*. Vision Research, vol. 42, n° 20, pages 2345–2355, 2002.
- [Pragier1995] Pragier, G. et Faure-Pragier, S. « *Au-delà du principe de réalité : le virtuel* ». Revue Française de Psychanalyse, vol. 1, 1995.
- [Presse2009] Presse, D. *La prise d'informations visuelles du gardien de but expert de handball : comparaison de trois environnements visuels à partir d'un signal oculométrique*, 2009. Mémoire de Master 2, Université Rennes 2.
- [Prinz1997] Prinz, W. *Perception and Action Planning*. European Journal of Cognitive Psychology, vol. 9, n° 2, pages 129–154, 1997.
- [Prévost2002] Prévost, P. *Stratégies d'anticipation et rôle du contexte dans les tâches visuo-motrices*, 2002.
- [Potka1995] Potka, J. *Immersive training systems : Virtual reality and education and training*. Instructional Science, vol. 23, n° 5, pages 405–431, 1995.
- [Qi2006] Qi, W., Taylor, R., UNC, I., Healey, C. et Martens, J. *A comparison of immersive HMD, fish tank VR and fish tank with haptics displays for volume visualization*. In Proceedings of the 3rd Symposium on Applied Perception in Graphics and Visualization, pages 51–58. ACM New York, NY, USA, 2006.
- [Quéau1993] Quéau, P. *Le virtuel : vertus et vertiges*. Editions Champ Vallon, 1993.
- [Ranganathan2007] Ranganathan, R. et Carlton, L. *Perception-Action Coupling and Anticipatory Performance in Baseball Batting*. Journal of Motor Behavior, vol. 39, n° 5, pages 369–380, 2007.
- [Reed1999] Reed, M., Manary, M. et Schneider, L. *Methods for Measuring and Representing Automobile Occupant Posture*. Proc. International Congress and Exposition, Detroit, Michigan, March 1-4, 1999.
- [Regan2000] Regan, D. et Gray, R. *Visually guided collision avoidance and collision achievement*. Trends in Cognitive Sciences, vol. 4, n° 3, pages 99–107, 2000.
- [Richerson2005] Richerson, S., Robinson, C. et Shum, J. *A comparative study of reaction times between type II diabetics and non-diabetics*. BioMedical Engineering OnLine, vol. 4, n° 1, page 12, 2005.

- [Rickel1999] Rickel, J. et Johnson, W. *Animated Agents for Procedural Training in Virtual Reality : Perception, Cognition, and Motor Control*. Applied Artificial Intelligence, vol. 13, pages 343–382, 1999.
- [Riley2001] Riley, J. et Kaber, D. *Utility of situation awareness and attention for describing telepresence experiences in a virtual telepresence task*. In Proceedings of the 2001 International Conference on Computer-Aided Ergonomics and Safety (CD-ROM). Maui, HI, July, 2001.
- [Riley2004] Riley, J., Kaber, D. et Draper, J. *Situation awareness and attention allocation measures for quantifying telepresence experiences in teleoperation*. Human Factors and Ergonomics in Manufacturing, vol. 14, n° 1, pages 51–67, 2004.
- [Ripoll1988] Ripoll, H. et Fleurance, P. *What does keeping one's eye on the ball mean ?* Ergonomics, vol. 31, n° 11, pages 1647–1654, 1988.
- [Ripoll1989] Ripoll, H. *Uncertainty and visual strategies in table tennis*. Perceptual and motor skills, vol. 68, n° 2, page 507, 1989.
- [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.
- [Rodrigues2002] Rodrigues, S., Vickers, J. et Williams, A. *Head, eye and arm coordination in table tennis*. Journal of Sports Sciences, vol. 20, n° 3, pages 187–200, 2002.
- [Rowe2009] Rowe, R., Horswill, M., Kronvall-Parkinson, M., Poulter, D. et Mc Kenna, F. *The Effect of Disguise on Novice and Expert Tennis Players's Anticipation Ability*. Journal of Applied Sport Psychology, vol. 21, n° 2, pages 178–185, 2009.
- [Sadowski2002] Sadowski, W. et Stanney, K. *Presence in virtual environments*. Handbook of Virtual Environments : Design, Implementation, and Applications, pages 791–806, 2002.
- [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.
- [Sanchez-Vives2005] Sanchez-Vives, M. et Slater, M. *From presence to consciousness through virtual reality*. Nature Reviews Neuroscience, vol. 6, n° 4, pages 332–339, 2005.
- [Sas2003] Sas, C. et O'Hare, G. *Presence Equation : An Investigation into Cognitive Factors Underlying Presence*. Presence : Teleoperators & Virtual Environments, vol. 12, n° 5, pages 523–537, 2003.
- [Savelsbergh1994] Savelsbergh, G. et Bootsma, R. *Perception-Action Coupling in Hitting and Catching*. International Journal of Sport Psychology, vol. 25, pages 331–331, 1994.
- [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.

- [Schubert1999] Schubert, T., Friedmann, F. et Regenbrecht, H. *Embodied Presence in Virtual Environments*. Visual Representations and Interpretations, pages 268–278, 1999.
- [Schuemie2001] Schuemie, M., van der Straaten, P., Krijn, M. et van der Mast, C. *Research on Presence in Virtual Reality : A Survey*. CyberPsychology & Behavior, vol. 4, n° 2, pages 183–201, 2001.
- [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.
- [Seymour2002] Seymour, N., Gallagher, A., Roman, S., OŠBrien, M., Bansal, V., Andersen, D. et Satava, R. *Virtual reality training improves operating room performance*. Annals of Surgery, vol. 236, n° 4, pages 458–464, 2002.
- [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.
- [Sheik-Nainar2005] Sheik-Nainar, M., Kaber, D. et Chow, M. *Control gain adaptation in virtual reality mediated human-telerobot interaction*. Human Factors and Ergonomics in Manufacturing, vol. 15, n° 3, pages 259–274, 2005.
- [Sheridan1992] Sheridan, T. *Musings on telepresence and virtual presence*. Presence : Teleoperators and Virtual Environments, vol. 1, n° 1, pages 120–126, 1992.
- [Sheridan1996] Sheridan, T. *Further musings on the psychophysics of presence*. Presence : Teleoperators and Virtual Environments, vol. 5, n° 2, pages 241–246, 1996.
- [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.
- [Shim2006] Shim, J., Les Carlton, G. et Kwon, Y. *Perception of kinematic characteristics of tennis strokes for anticipating stroke type and direction*. Research quarterly for exercise and sport, vol. 77, n° 3, page 326, 2006.
- [Simonnet2009] Simonnet, M., Jacobson, D., Vieilledent, S. et Tisseau, J. *SeaTouch : A Haptic and Auditory Maritime Environment for Non Visual Cognitive Mapping of Blind Sailors*. Lecture Notes in Computer Science, pages 212–226, 2009.
- [Singer1994] Singer, R., Cauraugh, J., Chen, D., Steinberg, G., Frehlich, S. et Wang, L. *Training Mental Quickness in Beginning/Intermediate Tennis Players*. Sport Psychologist, vol. 8, pages 305–305, 1994.
- [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.
- [Singer1997] Singer, M. et Witmer, B. *Presence : Where are we now*. Advances in Human Factors/Ergonomics, pages 885–888, 1997.
- [Slater1993a] Slater, M. et Usoh, M. *Presence in immersive virtual environments*. In Virtual Reality Annual International Symposium, 1993., 1993 IEEE, pages 90–96, 1993.

- [Slater1993b] Slater, M. et Usoh, M. *Representations systems, perceptual position, and presence in immersive virtual environments*. Presence : Teleoperators and Virtual Environments, vol. 2, n° 3, pages 221–233, 1993.
- [Slater1994] Slater, M. et Usoh, M. *Body centred interaction in immersive virtual environments*. Artificial life and virtual reality, pages 1–10, 1994.
- [Slater1996] Slater, M., Linakis, V., Usoh, M. et Kooper, R. *Immersion, presence and performance in virtual environments : An experiment with tri-dimensional chess*. In ACM Virtual Reality Software and Technology (VRST), pages 163–172, 1996.
- [Slater1997] Slater, M. et Wilbur, S. *A framework for immersive virtual environments (FIVE) : Speculations on the role of presence in virtual environments*. Presence : Teleoperators & Virtual Environments, vol. 6, n° 6, pages 603–616, 1997.
- [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.
- [Slater1999] Slater, M. *Measuring Presence : A Response to the Witmer and Singer Presence Questionnaire*. Presence, vol. 8, n° 5, pages 560–565, 1999.
- [Slater2000] Slater, M. et Steed, A. *A Virtual Presence Counter*. Presence : Teleoperators & Virtual Environments, vol. 9, n° 5, pages 413–434, 2000.
- [Slater2009] Slater, M., Khanna, P., Mortensen, J. et Yu, I. *Visual Realism Enhances Realistic Response in an Immersive Virtual Environment*. IEEE Computer Graphics and Applications, vol. 29, n° 3, pages 76–84, 2009.
- [Soukoreff2004] Soukoreff, R. et MacKenzie, I. *Towards a standard for pointing device evaluation, perspectives on 27 years of Fitts' law research in HCI*. International Journal of Human-Computer Studies, vol. 61, n° 6, pages 751–789, 2004.
- [Starkes1995] Starkes, J., Edwards, P., Dissanayake, P. et Dunn, T. *A new technology and field test of advance cue usage in volleyball*. Research Quarterly on Exercise and Sport, vol. 66, n° 2, pages 162–7, 1995.
- [Steuer1992] Steuer, J. *Defining Virtual Reality : Dimensions Determining Telepresence*. The Journal of Communication, vol. 42, n° 4, pages 73–93, 1992.
- [Stevenage1999] Stevenage, S., Nixon, M. et Vince, K. *Visual analysis of gait as a cue to identity*. Applied Cognitive Psychology, vol. 13, n° 6, 1999.
- [Stoffregen2002] Stoffregen, T., Bardy, B., Smart, L. et Pagulayan, R. *On the nature and evaluation of fidelity in virtual environments*. Handbook of Virtual Environments : Design, Implementation, and Applications, page 111, 2002.
- [Sutherland1968] Sutherland, I. E. *A head-mounted three dimensional display*. In Proceedings of the AFIPS Fall Joint Computer Conference, pages 757–764, 1968.
- [Takeuchi1993] Takeuchi, T. *Auditory information in playing tennis*. Perceptual and motor skills, vol. 76, n° 3 Pt 2, page 1323, 1993.
- [Tarr2002] Tarr, M. et Warren, W. *Virtual reality in behavioral neuroscience and beyond*. Nature Neuroscience, vol. 5, n° supp, pages 1089–1092, 2002.
- [Taxén2001] Taxén, G. et Naeve, A. *CyberMath-Exploring Open Issues in VR-based Learning*. In SIGGRAPH 2001 Conference Abstracts and Applications, pages 49–51, 2001.

- [Tenenbaum1996] Tenenbaum, G., Levy-Kolker, N., Sade, S., Liebermann, D. et Lidor, R. *Anticipation and confidence of decisions related to skilled performance*. International Journal of Sport Psychology, vol. 27, pages 293–307, 1996.
- [Thalmann2004] Thalmann, D. *Cours sur la Réalité Virtuelle*, 2004. <http://vr-lab.epfl.ch/thalmann/infographie/VR.pdf>.
- [Thomas1999] Thomas, G. *Environnements virtuels urbains : modélisation des informations nécessaires à la simulation de piétons*, PhD thesis, Université Rennes 1, 1999.
- [Tresilian1994] Tresilian, J. *Perceptual and motor processes in interceptive timing*. Human Movement Science, vol. 13, n° 3, pages 335–374, 1994.
- [Tresilian1995] Tresilian, J. *Perceptual and cognitive processes in time-to-contact estimation : analysis of prediction-motion and relative judgment tasks*. Perception & Psychophysics, vol. 57, n° 2, pages 231–45, 1995.
- [Tyldesley1982] Tyldesley, D., Bootsma, R. et Bomhoff, G. *Skill level and eye movement patterns in a sport orientated reaction time task*. In Proceedings of an International Symposium on Motor Behaviour : Contributions to Learning in Sports, Cologne : Hofmann, 1982.
- [Unuma1991] Unuma, M. et Takeuchi, R. *Generation of human motion with emotion*. In Computer Animation, volume 91, pages 45–58, 1991.
- [Usoh2000] Usoh, M., Catena, E., Arman, S. et Slater, M. *Using Presence Questionnaires in Reality*. Presence : Teleoperators & Virtual Environments, vol. 9, n° 5, pages 497–503, 2000.
- [Vianin1995] Vianin, P. *La perception de distances virtuelles pour un observateur mobile : approche développementale*. Projet de thèse FAPSE, Université de Genève, 1995.
- [Vickers1992] Vickers, J. *Gaze control in putting*. Perception, vol. 21, n° 1, pages 117–132, 1992.
- [Vickers1996] Vickers, J. *Control of visual attention during the basketball free throw*. American journal of sports medicine, vol. 24, n° 6, pages 93–97, 1996.
- [Vickers1997] Vickers, J. et Adolphe, R. *Gaze behaviour during a ball tracking and aiming skill*. International Journal of Sports Vision, vol. 4, n° 1, pages 18–27, 1997.
- [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.
- [Vigouroux2005] Vigouroux, L. *Modélisation biomécanique des système musculo-squelettique sous déterminés. Analyse statique des tensions des tendons mobilisant le doigt*, PhD thesis, Université Joseph-Fourier, Grenoble I-France, nov 2005, 2005.
- [Ward2002] Ward, P., Williams, A. et Bennett, S. *Visual search and biological motion perception in tennis*. Research Quarterly for Exercise and Sport, vol. 73, n° 1, pages 107–112, 2002.
- [Ward2003] Ward, P. et Williams, A. *Perceptual and cognitive skill development in soccer : the multidimensional nature of expert performance*. Journal of Sport and Exercise Psychology, vol. 25, n° 1, pages 93–111, 2003.

- [Welch1996] Welch, R., Blackmon, T., Liu, A., Mellers, B. et Stark, L. *The effects of pictorial realism, delay of visual feedback, and observer interactivity on the subjective sense of presence*. Presence : Teleoperators and Virtual Environments, vol. 5, n° 3, pages 263–273, 1996.
- [Welchman2004] Welchman, A., Tuck, V. et Harris, J. *Human observers are biased in judging the angular approach of a projectile*. Vision Research, vol. 44, n° 17, pages 2027–2042, 2004.
- [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.
- [Williams1995] Williams, M. et Davids, K. *Declarative knowledge in sport : A by-product of experience or a characteristic of expertise ?* Journal of sport and exercise psychology, vol. 17, pages 259–259, 1995.
- [Williams1998a] 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.
- [Williams1998b] Williams, A., Singer, R. et Weigelt, C. *Visual search strategy in ðlive Son-court situations in tennis*. Science and Racket Sports II. London : E & FN Spon, pages 121–128, 1998.
- [Williams1999a] Williams, A. *Visual Perception and Action in Sport*. E & FN Spon, 1999.
- [Williams1999b] Williams, A. et Elliott, D. *Anxiety, expertise, and visual search strategy in karate*. Journal of Sport and Exercise Psychology, vol. 21, pages 362–375, 1999.
- [Williams2000] Williams, A. *Perceptual skill in soccer : implications for talent identification and development*. Journal of Sports Sciences, vol. 18, n° 9, pages 737–750, 2000.
- [Williams2002] Williams, A., Vickers, J. et Rodrigues, S. *The effects of anxiety on visual search, movement kinematics, and performance in table tennis : A test of Eysenck and Calvo's processing efficiency theory*. Journal of Sport and Exercise Psychology, vol. 24, n° 4, pages 438–455, 2002.
- [Williams2004] Williams, A., Ward, P., Smeeton, N. et Allen, D. *Developing anticipation skills in tennis using on-court instruction : Perception versus perception and action*. Journal of Applied Sport Psychology, vol. 16, n° 4, pages 350–360, 2004.
- [Williams2005] Williams, A. et Ericsson, K. *Perceptual-cognitive expertise in sport : Some considerations when applying the expert performance approach*. Human movement science, vol. 24, n° 3, pages 283–307, 2005.
- [Williams2006] Williams, A., Hodges, N., North, J. et Barton, G. *Perceiving patterns of play in dynamic sport tasks : Investigating the essential information underlying skilled performance*. Perception, vol. 35, n° 3, page 317, 2006.

- [Wilson1997] Wilson, J., Nichols, S. et Haldane, C. *Presence and side effects : Complementary or contradictory?* Advances in Human Factors/Ergonomics, pages 889–892, 1997.
- [Witmer1994] Witmer, B. et Singer, M. *Measuring immersion in virtual environments*. US Army Res. Inst., Alexandria, VA, Tech. Rep, vol. 1014, 1994.
- [Witmer1998] Witmer, B. et Singer, M. *Measuring Presence in Virtual Environments : A Presence Questionnaire*. Presence, vol. 7, n° 3, pages 225–240, 1998.
- [Wright2007] Wright, M. et Jackson, R. *Brain regions concerned with perceptual skills in tennis : An fMRI study*. International Journal of Psychophysiology, vol. 63, n° 2, pages 214–220, 2007.
- [Yarbus1967] Yarbus, A. *Eye Movements and Vision*. Plenum Press, 1967.
- [Zahorik1998] Zahorik, P. et Jenison, R. *Presence as Being-in-the-World*. Presence, vol. 7, n° 1, pages 78–89, 1998.

Table des figures

1.1	Éléments du système visuel.	4
1.2	Processus fonctionnels lors d'une tâche d'interception.	6
1.3	Utilisation d'un joystick.	8
1.4	Exemple d'occultation temporelle.	9
1.5	Principe de la "pupille éclairée".	10
1.6	Fonctionnement de l'oculomètre.	11
1.7	Couplage oculomètre-vidéo.	12
1.8	Représentation en PLD.	14
1.9	Exemple de HMD.	17
1.10	Boucle perception/cognition/action adaptée aux EV.	18
1.11	Représentation du concept de présence.	21
1.12	Les facteurs externes de la présence.	22
1.13	Images de l'animation d'un mouvement de course à pied.	23
1.14	Relation entre présence et performance.	26
1.15	Protocole expérimental de Bideau et al.	28
1.16	Représentation normalisée du squelette.	29
1.17	Représentation normalisée de la jambe.	30
1.18	Le saut périlleux.	32
1.19	Capture de mouvement.	33
1.20	Organisation de l'animation.	34
2.1	Objectif de la première étude.	38
2.2	Processus de création de l'animation virtuelle et de la séquence vidéo.	39
2.3	Modèle de placement des marqueurs.	41
2.4	But de handball divisé en neuf zones équivalentes.	42
2.5	Aperçu de l'EV.	42
2.6	Salle de réalité virtuelle.	43
2.7	Principe de l'adaptation du point de vue du gardien en EV.	45

2.8	Modèle de détection de collision.	47
2.9	Représentation de l'erreur radiale et de ses composantes verticale et horizontale lors de la tâche de jugement.	48
2.10	Représentation de l'erreur radiale lors de la tâche en mouvement.	49
2.11	Pourcentages de zones correctes pour la tâche en jugement de l'étude 1.	50
2.12	Pourcentages de réussite pour la tâche en jugement de l'étude 1.	51
2.13	Erreur radiale pour la tâche de jugement de l'étude 1.	52
2.14	TRM pour la tâche en mouvement de l'étude 1.	53
2.15	Pourcentage de réussite lors de la tâche en mouvement de l'étude 1.	53
2.16	Erreurs radiales pour la tâche en mouvement de l'étude 1.	54
3.1	Objectif de la seconde étude.	60
3.2	Placement des marqueurs réfléchissants.	61
3.3	Représentation des différents NDG.	64
3.4	Analyse cinématique de la réponse motrice.	67
3.5	Pourcentages de zones correctes pour la tâche en jugement de l'étude 2.	69
3.6	Pourcentages de réussite pour la tâche en jugement de l'étude 2.	70
3.7	Erreurs radiales pour la tâche de jugement de l'étude 2.	71
3.8	TRM pour la tâche en mouvement de l'étude 2.	72
3.9	Pourcentage de réussite lors de la tâche en mouvement de l'étude 2.	72
3.10	Erreur radiale pour la tâche en mouvement de l'étude 2.	73
3.11	Erreurs RMS pour la tâche en mouvement de l'étude 2.	74
3.12	Principe du phénomène d'expansion.	78
3.13	Analyse cinématique des tirs en zones 1, 6 et 7.	79
4.1	Objectif de la troisième étude.	84
4.2	Schématisation des différentes conditions visuelles de la troisième expérimentation.	87
4.3	Pourcentages de zones correctes pour la tâche en jugement de l'étude 3.	90
4.4	Pourcentages de réussite pour la tâche en jugement de l'étude 3.	91
4.5	Erreur radiale pour la tâche de jugement de l'étude 3.	92
4.6	TRM pour la tâche en mouvement de l'étude 3.	93
4.7	Pourcentage de réussite pour la tâche en mouvement de l'étude 3.	94
4.8	Erreur radiale pour la tâche en mouvement de l'étude 3.	95
4.9	Analyse cinématique des tirs en zones 1, 3, 4 et 6.	100
4.10	Distribution des réponses des gardiens de but pour la condition TS lors de la tâche de jugement.	101
5.1	Image de la salle de réalité virtuelle.	108
5.2	Oculomètre intégré à l'EV.	115

5.3	Oculomètre couplé à un HMD.	115
5.4	Image d'un joueur de handball virtuel.	118
5.5	Exemples d'utilisation de la RV.	119

Liste des tableaux

2.1	Repères anatomiques pour le placement des marqueurs externes.	40
2.2	Caractéristiques anthropométriques des gardiens de but de handball.	44
2.3	Répartition des erreurs de prédiction de zones.	57
3.1	Caractéristiques anthropométriques des joueurs de niveau national.	61
3.2	Caractéristiques anthropométriques des gardiens de but de handball.	63
4.1	Caractéristiques anthropométriques des gardiens de but de handball de la troisième étude.	86
4.2	Répartition des erreurs de prédiction de zones en fonction des différentes conditions visuelles.	97
5.1	Répartition des résultats pour chacune des trois études en fonction du mode de réponse.	111
5.2	Calculs des centres articulaires.	144
5.3	Calculs du modèle de détection de collision.	145

Annexes

- Annexe A

Centres articulaires et extrémités corporelles	Calculs
Tête	$(RFHD + RBHD + LFHD + LBHD) \times 0.25$
Crânio-cervical	$x = C7x$ $y = C7y + \cos(8 \times \pi / 180) \times 0.55 \times \text{norm}(\text{CLAV}-C7)$ $z = C7z + \sin(8 \times \pi / 180) \times 0.55 \times \text{norm}(\text{CLAV}-C7)$
Hanche droite	$x = ((LFWTx + RFWTx) \times 0.5) + 0.38 \times \text{norm}(\text{RFWT}-LFWT)$ $y = ((LFWTy + RFWTy) \times 0.5) - 0.31 \times \text{norm}[0.5 \times ((LFWT + RFWT) - (LBWT + RBWT))]$ $z = ((LFWTz + RFWTz) \times 0.5) - 0.096 \times [\text{norm}(\text{RANI} - \text{RKNE}) + \text{norm}(\text{RKNE} - \text{RFWT})]$
Hanche gauche	$x = (LFWTx + RFWTx) \times 0.5 + 0.38 \times \text{norm}(\text{RFWT}-LFWT)$ $y = ((LFWTy + RFWTy) \times 0.5) - 0.31 \times \text{norm}[0.5 \times ((LFWT + RFWT) - (LBWT + RBWT))]$ $z = ((LFWTz + RFWTz) \times 0.5) - 0.096 \times [\text{norm}(\text{RANI} - \text{RKNE}) + \text{norm}(\text{RKNE} - \text{RFWT})]$
Epaule droite	$x = \text{RSHO}x$ $y = \text{RSHO}y + \cos(11 \times \pi / 180) \times 0.43 \times \text{norm}(\text{CLAV}-C7)$ $z = \text{RSHO}z + \sin(11 \times \pi / 180) \times 0.43 \times \text{norm}(\text{CLAV}-C7)$
Epaule gauche	$x = \text{LSHO}x$ $y = \text{LSHO}y + \cos(11 \times \pi / 180) \times 0.43 \times \text{norm}(\text{CLAV}-C7)$ $z = \text{LSHO}z + \sin(11 \times \pi / 180) \times 0.43 \times \text{norm}(\text{CLAV}-C7)$
Coude droit	$(\text{RRAD} + \text{RHUM}) \times 0.5$
Coude gauche	$(\text{LRAD} + \text{LHUM}) \times 0.5$
Poignet droit	$(\text{RWRA} + \text{RWRB}) \times 0.5$
Poignet gauche	$(\text{LWRA} + \text{LWRB}) \times 0.5$
Main droite	RCAR
Main gauche	LCAR
Genou droit	$(\text{RKNE} + \text{RKNI}) \times 0.5$
Genou gauche	$(\text{LKNE} + \text{LKNI}) \times 0.5$
Cheville droite	$(\text{RANE} + \text{RANI}) \times 0.5$
Cheville gauche	$(\text{LANE} + \text{LANI}) \times 0.5$
Pied droit	RTOE
Pied gauche	LTOE

Tab. 5.2 - Calculs des centres articulaires et des extrémités corporelles à partir des marqueurs externes positionnés sur des repères anatomiques.

– Annexe B

Volumes	Segments associés	Centres du volume	Rayons
Sphère	Tête	$(\text{Crânio-cervical} + \text{Tête}) \times 0.5$	$\text{norm}((\text{Tête-CrânioCervical}) \times 0.5)$
	Main	$(\text{Poignet} + \text{Main}) \times 0.5$	$\text{norm}(\text{Poignet-Main}) \times 0.5$
Cylindre	Tronc	Proximal : $(\text{Hanche droite} + \text{Hanche gauche}) \times 0.5$	$\text{norm}(\text{Hanche droite-Hanche gauche}) \times 0.5$
		Distal : Crânio-cervical	
	Ligne des épaules	Proximal : Epaule droite	$\text{norm}(\text{Epaule droite-RSHO})$
		Distal : Epaule gauche	
	Bras	Proximal : Epaule	$\text{norm}(\text{RRAD-RHUM}) \times 0.5$
		Distal : Coude	
	Avant-bras	Proximal : Coude	$\text{norm}(\text{RRAD-RHUM}) \times 0.5$
		Distal : Poignet	
	Cuisse	Proximal : Hanche	$\text{norm}(\text{RKNE-RKNI}) \times 0.5$
		Distal : Genou	
	Jambe	Proximal : Genou	$\text{norm}(\text{RKNE-RKNI}) \times 0.5$
		Distal : Cheville	
	Pied	Proximal : Cheville	$\text{norm}(\text{RANE-RANI}) \times 0.5$
		Distal : Pied	

Tab. 5.3 - Calculs du modèle de détection de collision utilisant à la fois les centres articulaires et les marqueurs externes.

Publications liées à la thèse

Les travaux liés à cette thèse ont donné lieu aux publications suivantes :

- Vignais, N., Bideau, B., Kulpa, R., Craig, C., Brault, S., Multon, F. *Virtual environments for sport analysis : perception-action coupling in handball goalkeeping*. International Journal of Virtual Reality, vol. 8, n°4, 2009.
- Bideau, B., Kulpa, R., Vignais, N., Brault, S., Multon, F. et Craig, C. *Using Virtual Reality to Analyze Performance in Sports*. IEEE Computer Graphic and Applications, sous presse.
- Vignais, N., Bideau, B., Craig, C., Brault, S., Multon, F., Delamarche, P., Kulpa, R. *Does the level of detail of a virtual handball thrower influence a goalkeeper's motor response ?* Journal of Sports Science and Medicine, sous presse.
- 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*. Presence : Teloperators & Virtual Environment, en révision.

.....

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

.....

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.

Mots clés : prise d'informations visuelles, réalité virtuelle, tâche d'interception, niveau de détail graphique.

.....

Introduction and evaluation of a methodology based on virtual reality for visual information uptake analysis of handball goalkeeper

.....

Visual perception is a basic element allowing us to interact with our environment. During sport activities, the visual information uptake enable an athlete to extract and select visual cues necessary to anticipate the opposing action. In the field of sports, visual information uptake analysis has been widely carried out but all the methodologies used involve functional and material limits. The purpose of this work is to evaluate and introduce an innovative methodology based on virtual reality for analyzing visual information uptake. This methodology is applied to the handball goalkeeper activity in a duel situation. Firstly, the results obtained with our methodology and with a video-based technique are compared in order to demonstrate the interest of virtual reality in the field of sport. Secondly, we focused our attention on the setting-up of our methodology. Specifically, we aimed to analyze the influence of the graphical level of detail of the throwing action on the goalkeeper's performance. At last, our methodology is used to analyze the visual information uptake of the handball goalkeeper. More precisely, the relative importance of visual cues from ball trajectory and throwing motion is estimated.

Keywords : visual information uptake, virtual reality, interception task, graphical level of detail.