



HAL
open science

Expertise en sport de balle dans des tâches de poursuite virtuelle : importance de l'implication des processus perceptivo-moteurs

Maroua Mallek

► To cite this version:

Maroua Mallek. Expertise en sport de balle dans des tâches de poursuite virtuelle : importance de l'implication des processus perceptivo-moteurs. Education. Normandie Université, 2019. Français. NNT : 2019NORMC221 . tel-02409857

HAL Id: tel-02409857

<https://theses.hal.science/tel-02409857v1>

Submitted on 13 Dec 2019

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Normandie Université

THÈSE

Pour obtenir le diplôme de doctorat

Spécialité SCIENCES ET TECHNIQUES DES ACTIVITES PHYSIQUES ET SPORTIVES

Préparée au sein de l'Université de Caen Normandie

**Expertise en sport de balle dans des tâches de poursuite virtuelle
: importance de l'implication des processus perceptivo-moteurs**

**Présentée et soutenue par
Maroua MALLEK**

**Thèse soutenue publiquement le 23/09/2019
devant le jury composé de**

M. BENOIT BIDEAU	Professeur des universités, Université Rennes 2	Rapporteur du jury
M. GILLES MONTAGNE	Professeur des universités, Aix-Marseille Université	Rapporteur du jury
M. MOHAMED JARRAYA	Maître de conférences HDR, l'Université de Sfax	Membre du jury
Mme GAELLE QUARCK	Maître de conférences HDR, Université Caen Normandie	Membre du jury
M. NICOLAS BENGUIGUI	Professeur des universités, Université Caen Normandie	Directeur de thèse
M. REGIS THOUVARECQ	Professeur des universités, Université Rouen Normandie	Co-directeur de thèse

Thèse dirigée par NICOLAS BENGUIGUI et REGIS THOUVARECQ, Centre d'étude sport et actions motrices (Caen)



UNIVERSITÉ
CAEN
NORMANDIE



Remerciements

Je tiens tout d'abord à remercier mes deux directeurs de thèses, Nicolas Benguigui et Régis Thouwarecq.

Je souhaite exprimer ma gratitude envers Nicolas Benguigui, pour tout le savoir que j'ai acquis à ses côtés. Je suis ravie d'avoir travaillé en sa compagnie, d'abord pendant mon master et ensuite durant la thèse. Je le remercie pour son appui scientifique, sa disponibilité, ses encouragements lors des moments de doute. Pour son soutien tout au long de ce parcours de recherche et ses judicieux conseils au cours de l'élaboration de cette thèse, merci.

Je tiens également à exprimer ma reconnaissance envers Régis Thouwarecq, pour m'avoir accueilli à l'UFR STAPS de Rouen pendant l'année de mon poste d'ATER et pour la pertinence de ses remarques qui ont largement contribué à alimenter ma réflexion. Sa disponibilité et sa réactivité ont été indispensables pour l'aboutissement de ce travail.

Pour arriver à mener mon projet de recherche à terme, j'ai bénéficié de conditions très favorables. J'exprime tout d'abord ma reconnaissance à l'École doctorale HSRT ED556 qui m'a attribué une allocation de recherche ministérielle, pour les formations doctorales riches et variées ainsi que pour la prise en charge de certaines inscriptions en conférences. Je remercie de même les deux composantes l'UFR STAPS de Caen et de Rouen qui m'ont confié des missions d'enseignement dans le cadre de mon contrat doctoral et des deux postes ATER. Ce cadre, propice au travail, m'a permis de me familiariser avec le quotidien d'un enseignant-chercheur.

Je voudrais également exprimer ma gratitude envers Gilles Montagne et Benoit Bideau pour avoir accepté d'être rapporteurs de ce travail de recherche, ainsi qu'à Mohamed Jarraya et Gaëlle Quarck pour l'intérêt qu'ils ont porté à ce travail en me faisant l'honneur d'être examinateurs.

Merci aux joueurs de basket du club Caen Basket Calvados (CBC), aux joueurs de tennis et aux participants non-sportif d'avoir accepté de participer à de nombreuses expérimentations (bien plus que celles présentées dans ce manuscrit), et d'avoir accepté d'accorder un peu de leur temps pour venir suivre la petite balle qui se déplace sur l'écran. Merci à l'entraîneur du CBC Hervé Coudray, à la Fédération Française de Tennis et particulièrement à Bernard Pestre (DTN adjoint en charge de la Formation) de m'avoir facilité l'accès aux joueurs experts de différents niveaux.

Je remercie les membres du laboratoire CesamS pour la qualité des échanges que j'ai pu avoir lors des séminaires du laboratoire ou lors de discussions informelles dans les couloirs ; je pense notamment à Bruno Mantel et à Laure Lejeune, merci pour le partage de vos connaissances lors de ces discussions. Mes pensées vont également aux doctorants et postdoctorants avec qui j'ai passé de très bons moments, accompagnés de belles discussions sans fin . . . Je pense spécialement à Sami Mecheri, avec qui j'ai eu des échanges constructifs et très inspirants ainsi qu' à Hamdi Habacha et Cynthia Mandil, vos encouragements et conseils m'ont été très utiles au bon moment.

Cette thèse a aussi permis de riches rencontres avec certains collègues du laboratoire GREYC et LMNO, je souhaite remercier ceux qui m'ont à différents niveaux beaucoup apporté : Abderrahim El Moataz Billah et François Lozes pour les échanges très motivants que nous avons eus, et pour leurs conseils concernant différents logiciels de programmation et le LateX ; François Kauffman, Miryem Drafi, et François Rioult pour leur disponibilité et pour les traitements de certaines expérimentations, même si nous avons fait le choix de ne pas les intégrer dans ce manuscrit de thèse, néanmoins les discussions que nous avons eues ensemble ont alimenté mes connaissances dans le domaine du traitement et l'analyse des données.

Je tiens aussi à exprimer toute ma reconnaissance envers le professeur Simon Bennett qui m'a accueilli au sein du laboratoire Sensorimotor neuroscience à l'université John Moores de Liverpool pour un séjour de recherche.

Il m'est impossible d'oublier Joëlle Guibert, présidente de l'ASPTT Caen Volleyball, le club qui m'a accueilli lors de mon arrivée à Caen. Merci Joëlle, sans toi je ne serai pas venue à Caen.

Merci à Normandie Incubation et au LeTremplin, pour leur programme de formation, je pense notamment aux Sterne et à l'évènement Hackathon Sport 2019. Les personnes rencontrées dans ces évènements, ont contribué à booster mon énergie dans la finalisation de ce travail de recherche.

Une pensée profonde pour ceux à qui ma réussite tient à coeur, mes amis en Tunisie, en France et ailleurs, qui m'ont soutenu tout au long de ce parcours par leurs présences, leurs appels et leurs messages motivants, de près comme de loin ; une pensée particulière pour Nouha, Rania, Hamida, Wiem, Éric et Guillaume.

Enfin, je ne saurais terminer ces remerciements sans penser à ceux qui sont le plus chers à mon coeur, ma famille qui m'a épaulée depuis toujours, je ne vous remercierai jamais assez pour tout l'amour que vous m'apportez au quotidien. Un grand merci à ma mère qui m'a toujours soutenue au cours de mon projet professionnel, également à mon père, celui qui a été ma source de sagesse lorsqu'il a fallu prendre des décisions importantes. Je remercie également mes deux frères pour leurs encouragements continus. Un merci particulier à ma soeur, qui a toujours été disponible avec des paroles justes, et qui m'a toujours encouragé dans tout ce que j'ai entrepris même en étant loin de moi.

Table des matières

Remerciements	2
Introduction générale	8
I Cadre Théorique	13
1 Approche cognitive de la perception et de l'action	14
1.1 Principes généraux	15
1.2 Les actions d'interception comme illustration des interactions avec l'environnement : l'hypothèse du timing opérationnel	16
1.3 Interaction avec des objets à vitesse non-constante	17
1.4 Les modèles internes représentatifs de l'environnement	18
1.4.1 Modèles internes pour prédire les rebonds de balle	20
1.4.2 Le modèle interne de la gravité	22
1.4.3 Critique du modèle interne de la gravité	34
1.5 L'expertise selon l'approche cognitive	38
1.5.1 Performance perceptivo-cognitive	38
1.5.2 Capacité d'anticipation et de prise de décision des experts	40
1.5.3 Identification des indices visuels du comportement adverse	41
1.5.4 Utilisation des probabilités situationnelles	42
1.5.5 Utilisation des modèles internes	43
1.5.6 L'expertise cognitivo-motrice	44
2 Approche écologique de la perception et de l'action	47
2.1 Principes généraux	47
2.2 Les lois de contrôle	49
2.3 Un exemple de loi de contrôle : le modèle de la vitesse requise	50
2.4 Un exemple de spécification optique de l'information : la variable optique tau	53
2.5 Adaptation et régulation de l'action face à des trajectoires à vitesse non-constante	54

2.6	L'expertise selon l'approche écologique	56
2.6.1	Délai visuo-moteur et adaptation face à des trajectoires imprévisibles . . .	59
3	Tâche de poursuite visuo-manuelle	66
3.1	Introduction	66
3.2	Rappel historique des tâches de poursuite visuo-manuelle	67
3.3	Les tâches de poursuite visuo-manuelles selon les différentes approches	69
4	Intérêt de la réalité virtuelle pour étudier la perception et l'action	74
4.1	Introduction	74
4.2	Réalité virtuelle au service de l'étude des processus perceptifs et moteurs dans le sport	75
	Problématique	79
II	Études expérimentales	82
1	Première partie expérimentale : Étude des processus perceptivo-cognitifs et perceptivo-moteurs des experts en sports de balle	83
1.1	Introduction de la première partie expérimentale	84
1.2	Expérience 1 : Étude des jugements perceptivo-cognitifs dans un environnement virtuel sur des trajectoires modifiées d'un ballon de basket chez des experts et non-experts	86
1.2.1	Introduction	86
1.2.2	Méthode	87
1.2.3	Résultats	95
1.2.4	Discussion	99
1.3	Expérience 2 : Etude des jugements perceptivo-cognitifs dans un environnement réel (séquences vidéo) sur des trajectoires modifiées d'un ballon de basket chez des experts et non-experts	102
1.3.1	Introduction	102
1.3.2	Méthode	102
1.3.3	Résultats	108
1.3.4	Discussion	109

1.4	Expérience 3 : Etude des coordinations perceptivo-motrices dans un environnement virtuel sur des trajectoires modifiées d'un ballon de basket chez des experts et non-experts	110
1.4.1	Introduction	110
1.4.2	Méthode	112
1.4.3	Résultats	117
1.4.4	Discussion	125
1.5	Conclusion	128
2	Deuxième partie expérimentale : Etude des régulations perceptivo-motrices des experts en sports de balle	130
2.1	Introduction de la seconde partie expérimentale	131
2.2	Expérience 4 : Sport expertise in perception-action coupling revealed in a visuomotor tracking task	131
2.2.1	Abstract	131
2.2.2	Introduction	132
2.2.3	Method	134
2.2.4	Data Analysis	138
2.2.5	Results	138
2.2.6	Discussion	143
2.3	Expérience 5 : Capacité d'adaptation face à des déviations imprévisibles et rôle du délai visuo-moteur dans une tâche de poursuite visuo-manuelle	146
2.3.1	Introduction	146
2.3.2	Méthode	147
2.3.3	Résultats	154
2.3.4	Discussion	160
2.4	Expérience 6 : Poursuite visuo-manuelle en immersion 3D	163
2.4.1	Introduction	163
2.4.2	Méthode	164
2.4.3	Résultats	170
2.4.4	Discussion	176
	Discussion générale, limites et perspectives	180
	Références bibliographiques	191

Annexes	218
A Fiche de présentation, renseignement, questionnaire pour les expériences de jugement	219
B Fiche de présentation, renseignement, questionnaire pour les expériences de poursuite 3D	223
Liste des figures	225
Liste des tableaux	236
Liste des équations	237

Introduction générale

L'être humain, dans ses interactions avec l'environnement, met en œuvre des processus perceptifs et moteurs extrêmement efficaces, particulièrement lorsqu'il se donne des objectifs de performance très élevés et passe de longues périodes à s'exercer. Dans ce cas, on parle d'expertise à travers la maîtrise de tâches complexes et d'actions particulièrement précises, rapides, puissantes ou économiques. Cela peut s'observer aussi bien chez un expert maîtrisant un instrument de musique ou un outil d'artisanat que dans la réalisation de performances sportives.

Le domaine des sports de balle offre à ce sujet de nombreux exemples d'adaptations extrêmement impressionnantes face aux contraintes de l'environnement. Ces sports sont particulièrement exigeants et demandent une grande précision et des vitesses d'exécution très élevées pour être efficaces dans les actions d'interception, de frappe ou de capture requises. La complexité des actions à réaliser est renforcée par les interactions avec des trajectoires très rapides et souvent peu prévisibles. La réussite d'une interception fait donc intervenir des processus perceptifs et moteurs très précis dans un temps très réduit. Par exemple, un joueur de tennis dispose de moins d'une seconde pour répondre efficacement à un service frappé à 200 km/h (Durey et De Kermadec, 1984). Un joueur de base-ball doit s'organiser et frapper la balle avec une précision définie par une fenêtre spatio-temporelle de l'ordre +/-5 ms (Regan, 1997) ou +/-2 ms (Tresilian, 2004). Ces tâches sont donc caractérisées par de fortes contraintes spatio-temporelles (incertitude, précision, complexité du mouvement à coordonner, etc.) et nécessitent de ce fait une grande habileté motrice qui implique des coordinations visuo-motrices précises afin d'intercepter la cible au bon moment et au bon endroit (Peper, Bootsma, Mestre, et Bakker, 1994; Tresilian, 2005; Zago, McIntyre, Senot, et Lacquaniti, 2008, 2009; Zhao et Warren, 2015).

Dans ce cadre, l'objectif de cette thèse est d'étudier les processus perceptivo-moteurs et cognitifs impliqués dans les actions d'interception en s'intéressant particulièrement aux experts pour mieux comprendre la nature de ces processus. Dans ce domaine comme d'ailleurs dans d'autres ayant pour but de comprendre les mécanismes de la perception et de l'action, un débat existe entre différentes théories. La théorie la plus classique est dite cognitiviste (e.g., (Neisser, 1967)). Celle-ci met en avant l'importance des connaissances et des anticipations, aussi bien dans la capacité à prédire l'évolution d'une situation ou d'une trajectoire de balle (e.g., (Tyldesley et Whiting, 1975)), que dans la capacité à planifier une action adaptée impliquant les mécanismes de régulation nécessaires (e.g., (Schmidt, 1975)). La théorie alternative est

dite écologique ([Gibson, 1979](#)) et met en avant la capacité du système perceptif, à extraire directement des invariants de l'environnement et à les utiliser dans un couplage fonctionnel entre perception et action. Ceci permet la réalisation d'action efficace sur la base de lois de contrôle prospectives dans lesquelles les régulations sont essentielles. ([Warren, 2006](#)).

Une des caractéristiques intéressante des actions d'interception est de permettre de tester le pouvoir explicatif de ces deux théories. Cela est particulièrement le cas face à des trajectoires à vitesse non-constante (e.g., ([Baurès, Benguigui, Amorim, et Siegler, 2007](#))). De manière générale, les accélérations ou décélérations que peuvent subir les trajectoires de balle du fait de la gravité ou des forces de frottement diminuent considérablement son caractère prévisible et rendent la tâche plus complexe. Il apparaît d'ailleurs que l'être humain est mal équipé pour percevoir les variations de vitesse (e.g., ([Werkhoven, Snippe, et Alexander, 1992](#); [Watamaniuk et Heinen, 2003](#))). Pour autant, cela n'empêche pas la réussite d'interception de balle face à ce type de trajectoires.

Les réponses données à ces questions par chacune des théories que nous venons de citer sont radicalement différentes. Selon l'approche cognitive, le système perceptif surmonte la difficulté liée à la perception de l'accélération par l'utilisation de modèles internes permettant par exemple de prédire les effets de la gravité ([McIntyre, Zago, Berthoz, et Lacquaniti, 2001](#)). Cette approche suppose que l'être humain est en mesure d'internaliser et de modéliser les effets de la gravité pour ensuite prédire l'évolution future de la trajectoire aux niveaux spatial et temporel afin de planifier l'action souhaitée. Par ailleurs, les travaux sur l'expertise ont montré que les experts possédaient des capacités à mieux prédire les actions adverses (e.g., ([Williams, Davids, et Williams, 1999](#); [Williams et Ward, 2007](#))). Cependant, à notre connaissance aucune recherche n'a montré que les capacités supérieures de prédiction des experts en sports de balle avaient pour origine des modèles internes de trajectoires plus élaborés permettant de prédire plus précisément l'évolution des trajectoires et ainsi d'être plus précis. Cette question mérite donc d'être posée.

Selon l'approche écologique, la réussite d'actions d'interception face à des trajectoires accélérées repose sur des processus de couplage continu entre perception et action. Dans ce cas, une régulation optimisée permet de se passer d'informations relatives à la variation de vitesse ou à l'utilisation de modèles internes, mais plutôt de se baser sur des lois de contrôle qui utilisent des informations de position et de vitesse. Cette conception peut être illustrée par les travaux de ([Lee, 1976](#)) qui montrent qu'à mesure que l'on s'approche du contact, la différence entre le

temps de contact estimé (sur la base de la distance, de la vitesse) et le temps de contact réel (qui inclut l'accélération) est de plus en plus faible. Cela peut suggérer qu'avec une régulation continue du mouvement l'absence de prise en compte de l'accélération ne pose pas de problème de précision. Dans ce cas, l'expertise devrait se traduire par des lois de contrôle optimisées dans lesquelles notamment les délais de couplages sont minimisés afin d'augmenter la précision de la régulation du mouvement (Le Runigo, Benguigui, et Bardy, 2005, 2010).

Si ces théories s'opposent radicalement, il s'agit de déterminer laquelle apporte les meilleures clés pour la compréhension des mécanismes étudiés. À moins qu'une forme de complémentarité existe entre les processus qui viennent d'être décrits. C'est donc avec cet objectif de confrontation ou de combinaison de ces deux modèles théoriques de la perception et de l'action que cette thèse a été élaborée. Pour cela, nous avons réalisé un ensemble de six expériences pour mieux comprendre l'expertise en sports de balle et tester la robustesse des hypothèses qui pouvaient être formulées sur la base des approches cognitiviste et écologique. Dans un premier temps, nous avons utilisé des tâches de jugement perceptivo-cognitif de discrimination pour étudier la mise en jeu et la possible optimisation d'un modèle interne de la gravité chez les experts en sports de balle. Dans un second temps, nous avons mis en place des tâches de poursuite visuo-manuelle pour continuer de tester les capacités prédictives des experts, mais aussi la possible optimisation du couplage perception-action chez les experts.

La première partie de la thèse présente le cadre théorique et la problématique de notre travail de recherche. Le premier chapitre présente les apports de la théorie cognitiviste pour la compréhension des mécanismes perceptifs et moteurs et des principes de développement de l'expertise. Le deuxième chapitre présente les apports de la théorie écologique et les travaux sur l'expertise associés à cette théorie. Un troisième chapitre présente les tâches de poursuite visuo-manuelles qui ont été largement utilisées dans cette thèse. Un quatrième chapitre présente l'intérêt de la réalité virtuelle pour étudier la perception et l'action. À l'issue de cette partie, la problématique de la thèse et ses hypothèses sont formulées.

Dans la deuxième partie qui repose sur une démarche empirique, nous avons tenté de répondre à la question de la possible utilisation des représentations internes de la gravité et/ou d'une régulation en continu de l'action. Cette partie repose sur six expériences couvrant d'une part le registre perceptivo-cognitif et d'autre part le registre perceptivo-moteur à partir de tâches en réalité virtuelle sollicitant des experts avec différents niveaux d'expertise et des non-experts en sports de balle.

Enfin, dans la dernière partie, une discussion de l'ensemble de ces résultats est présentée, suivie d'une conclusion et des perspectives d'études sur ce travail de thèse.

Première partie

Cadre Théorique

Chapitre 1

Approche cognitive de la perception et de l'action

Sommaire

1.1	Principes généraux	15
1.2	Les actions d'interception comme illustration des interactions avec l'environnement : l'hypothèse du timing opérationnel	16
1.3	Interaction avec des objets à vitesse non-constante	17
1.4	Les modèles internes représentatifs de l'environnement	18
1.4.1	Modèles internes pour prédire les rebonds de balle	20
1.4.2	Le modèle interne de la gravité	22
1.4.3	Critique du modèle interne de la gravité	34
1.5	L'expertise selon l'approche cognitive	38
1.5.1	Performance perceptivo-cognitive	38
1.5.2	Capacité d'anticipation et de prise de décision des experts	40
1.5.3	Identification des indices visuels du comportement adverse	41
1.5.4	Utilisation des probabilités situationnelles	42
1.5.5	Utilisation des modèles internes	43
1.5.6	L'expertise cognitive-motrice	44

1.1 Principes généraux

L'approche cognitive de la perception et de l'action a notamment été élaborée à partir des travaux de (Shannon et Weaver, 1949) sur la théorie de la transmission de l'information. Les cognitivistes se sont inspirés du fonctionnement d'un ordinateur traitant des informations complexes, pour comprendre le comportement humain et identifier les différents processus cognitifs qui le constituent. Ils comparent le cerveau de l'individu à un "processeur d'information", c'est-à-dire un super ordinateur. Le processus de traitement de l'information, depuis les entrées sensorielles jusqu'à la production des réponses motrices, implique des étapes perceptives, décisionnelles et motrices (Sanders, 1990). Ce système repose essentiellement sur des processus mnésiques qui permettent de stocker des informations concernant les expériences précédentes afin de les réutiliser (e.g., (Atkinson et Shiffrin, 1971)). Ces processus interviennent à chaque étape étant donné qu'ils permettent d'interpréter, de comprendre et de répondre aux événements extérieurs. Pour construire une information exploitable, la mémoire identifie et sélectionne des indices informatifs pertinents (Marr, 1982). Ceci lui permet ensuite de choisir la réponse la plus appropriée face aux événements.

Concernant le contrôle du mouvement, les travaux de (Schmidt, 1975) ont défini l'utilisation de programmes moteurs généralisés (PMG). Ces PMG sont envisagés sous la forme de schémas généraux des mouvements les plus utilisés et stockés en mémoire. Les schémas de rappel permettent de produire des habiletés sur la base de programmes élaborés et stockés tandis que les schémas de reconnaissance, qui peuvent être assimilés à des copies des schémas de rappel, permettent de détecter les erreurs et de réguler le mouvement en cours de réalisation. Le PMG est adapté aux conditions d'exécution par des paramètres de spécifications du geste tels que la direction, l'amplitude ou la vitesse. Plus récemment, cette conception a été poursuivie avec le concept de modèles internes du contrôle du mouvement (Wolpert et Flanagan, 2001). Ces modèles internes (au système nerveux central) permettraient un contrôle du mouvement sur la base de prédiction de l'état futur du système moteur. Le modèle interne a ainsi pour vocation de simuler le comportement dynamique du corps et de l'environnement, ce qui permet la prédiction en conséquence des commandes motrices. La programmation effectuée sur cette base et le mouvement réalisé, ces modèles internes permettraient de réguler le mouvement en

cours par la comparaison entre la simulation et l'exécution par rapport à des écarts perçus. Ces boucles de rétroactions seraient également impliquées dans les apprentissages par affinement des modèles internes.

1.2 Les actions d'interception comme illustration des interactions avec l'environnement : l'hypothèse du timing opérationnel

Dans le cadre de l'approche cognitive, l'anticipation joue un rôle essentiel dans la réussite des actions d'interception. L'anticipation peut être définie comme la capacité à prédire la survenue d'un événement avant qu'il ne se produise. Ainsi, (Schmidt, 1968) a proposé que la réussite d'une action d'interception repose sur une double anticipation. La première est perceptive et permet de prédire les paramètres spatiaux et temporels de l'interception. La seconde est motrice et permet de programmer une action ayant pour but d'atteindre le lieu prédit de l'interception dans le temps initialement estimé. Par la suite, (Tyldesley et Whiting, 1975) ont repris cette idée de double anticipation pour proposer le modèle du timing opérationnel. Ce modèle correspond à une sélection d'un programme moteur qui intègre tous les paramètres adaptés à la situation. Il exige une prédiction précise des paramètres spatio-temporels des déplacements de la cible pour pouvoir l'intercepter. Les informations en lien avec la trajectoire de la balle et ses variations de position et de vitesse devraient être connues auparavant et utilisées pour identifier une variable temporelle qui indique le temps restant avant le contact, appelé temps de pré-contact (time-to-contact : TTC) ((Lee, 1976) pour une définition dans un autre contexte théorique).

Dans le cas d'interception de balle à vitesse constante se déplaçant suivant une trajectoire rectiligne, le TTC peut être estimé avec la formule suivante :

$$TTC = \frac{-d}{v} \quad (\text{Équation 1})$$

avec d : distance entre le point d'interception et la balle ; v : vitesse de la balle.

Cette équation est simple, mais il faut noter que le cas d'interception d'objet à vitesse constante et rectiligne est extrêmement rare hors d'un cadre expérimental et que le cas typique est celui d'interception d'objet à vitesse non-constante. C'est ce que nous allons aborder dans le détail dans la partie qui suit.

1.3 Interaction avec des objets à vitesse non-constante

Si les actions d'interception requièrent une grande précision, il faut souligner que le système visuel ne paraît pas précisément équipé pour estimer précisément l'accélération d'un objet en mouvement (Benguigui, Ripoll, et Broderick, 2003; Brouwer, Brenner, et Smeets, 2002; Watamaniuk et Heinen, 2003). Or la plupart des objets en mouvement sont soumis à des conditions d'accélération positives ou négatives causées par l'effet de la gravité et de décélérations dues aux forces de frottement.

De nombreuses recherches de psychophysique ont étudié les limites du système visuel à travers la mesure des seuils de sensibilité de l'être humain pour détecter les variations du vecteur vitesse, c'est-à-dire soit la variation de la norme, soit la variation de la direction (e.g., (Babler et Dannemiller, 1993; Brouwer *et al.*, 2002; Calderone et Kaiser, 1989; Regan, Kaufman, et Lincoln, 1986; Werkhoven *et al.*, 1992)). Typiquement, les études se focalisant sur les changements de norme de vitesse consistent à identifier, pour un stimulus de vitesse variable, le seuil à partir duquel le changement de vitesse est perçu. Le pourcentage de variation est défini par le ratio $([(v \text{ finale} - v \text{ initiale}) / v \text{ moyenne}] \times 100)$ où v est la vitesse (e.g., (Babler et Dannemiller, 1993; Calderone et Kaiser, 1989; Regan *et al.*, 1986)). Des études ont montré qu'avec un temps de présentation supérieur ou égal à 300 ms, l'accélération peut être perçue pour un ratio de 20 à 25% de variation de la norme du vecteur vitesse (e.g., (Babler et Dannemiller, 1993; Brouwer *et al.*, 2002; Werkhoven *et al.*, 1992)). Les études de (De Bruyn et Orban, 1988; Werkhoven *et al.*, 1992; Mateeff, Genova, et Hohnsbein, 1999) ont ainsi montré que l'augmentation de la variation de vitesse réduit le temps de réponse pour identifier cette variation. Lorsque c'est la direction et non la norme de vitesse qui change, il apparaît que le temps de réaction est inversement proportionnel à l'angle de déviation (angle entre la direction précédente d'un stimulus et la direction future) (Mateeff *et al.*, 1999; Genova, Mateeff, Bonnet, et Hohnsbein, 2000; Hohnsbein et Mateeff, 1998).

Il apparaît donc que la perception des variations de vitesse est possible dans le cas où ces changements sont suffisamment importants. Plus les variations sont grandes, meilleure sera la perception. Avec de faibles variations, la détection de variation de vitesse est difficile et le système visuel sera mis en défaut. De ce fait, la précision requise pour les actions d'interception n'est pas assurée. D'autres travaux ont par ailleurs montré que l'utilisation d'information sur la variation de vitesse n'était pas possible, que cette variation soit faible ou forte (Benguigui *et al.*, 2003; Benguigui et Bennett, 2010).

Pour compenser ces limites du système perceptivo-moteur, l'approche cognitive a avancé l'hypothèse selon laquelle le cerveau serait en mesure d'élaborer des modèles internes permettant de prédire l'évolution de la trajectoire sans avoir besoin de détecter ses propriétés. Ces modèles internes permettraient une reconstruction de la trajectoire de la balle issue des essais antérieurs mémorisés et des lois invariantes de l'environnement intégrées pour prédire les événements (Wolpert et Flanagan, 2001). Nous détaillons dans la section suivante le concept du modèle interne.

1.4 Les modèles internes représentatifs de l'environnement

Les modèles internes prédictifs représentent un concept clé de l'approche cognitive. Ils permettent la reconstruction de l'information dans un processus actif et expliquent les capacités d'anticipation du système sensorimoteur, notamment quand le système visuel est limité comme nous l'avons vu précédemment pour les variations de vitesse (Wolpert et Ghahramani, 2000). Le concept de modèle interne a été initié par (Craig, 1943) qui a défini leur élaboration par des systèmes prédictifs permettant la reconstruction de la réalité pour prédire des événements extérieurs au monde physique. Ces modèles seraient développés et affinés au fil des expériences rencontrées et des apprentissages réalisés (Berthoz et Petit, 2006). Ils reposent sur l'intégration d'invariants de la physique Newtonienne tels que par exemple la position, la vitesse, la gravité, la résistance de l'air.

Une des principales méthodes pour étudier les capacités de représentations internes et de prédictions des trajectoires de balle est l'utilisation du paradigme d'occlusion visuelle. Avec cette méthode, (Whiting et Sharp, 1974) ont été les premiers à chercher et à déterminer

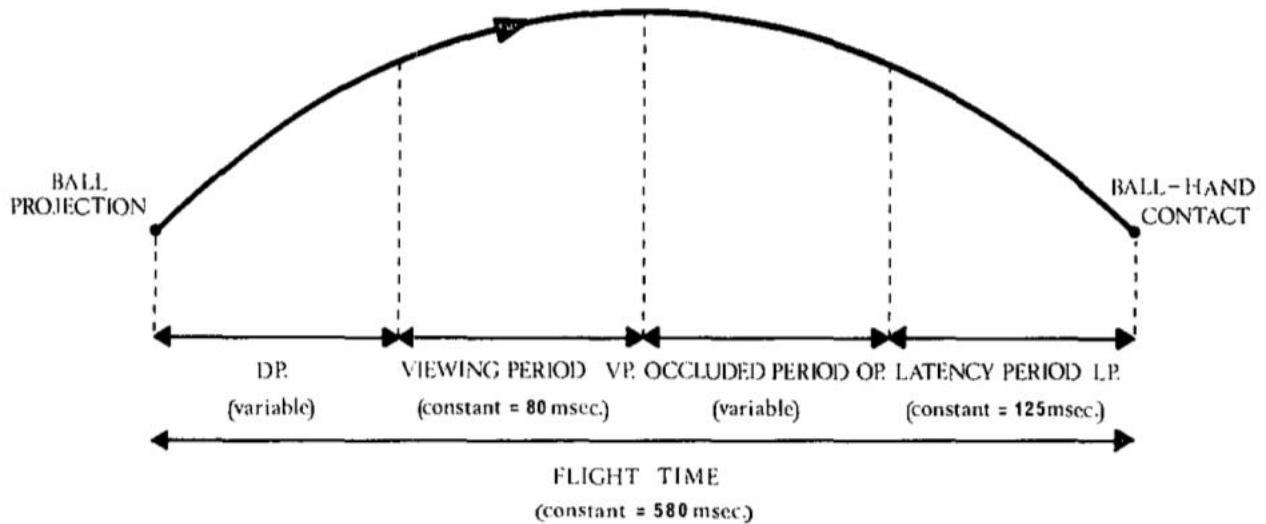


FIGURE 1: Schéma représentatif du paradigme expérimental de (Whiting et Sharp, 1974). La trajectoire de la balle a été découpée en plusieurs périodes : tout d'abord la balle est projetée dans une salle non éclairée (Dark Period : DP), puis la balle devient visible (Visible Period : VP), puis la balle est occultée (Occluded Period : OP, Latency Period : LP) et enfin la balle est interceptée.

les périodes qui devraient être visibles pour une interception réussie. Pour cela, ils ont mené une tâche d'interception de balle de tennis lancées par une machine de projection et ont fait varier le début et la durée des périodes d'occultation visuelle. La balle était toujours projetée dans le noir, puis elle était illuminée pendant une certaine durée au cours du vol, puis occultée pendant une durée variable, et enfin la balle devait être attrapée dans le noir (voir Figure 1). Les résultats ont montré une chute de la performance dès que la durée de la période d'occultation était supérieure à 160 ms.

D'autres études réalisées au cours de ces dernières années ont confirmé que la performance d'interception d'une cible diminue de façon importante après occultation d'une durée de 200 ms (Marinovic, Plooy, et Tresilian, 2009; López-Moliner, Brenner, Louw, et Smeets, 2010; Yakimoff, Mateeff, Ehrenstein, et Hohnsbein, 1993). Cette dégradation de la performance est d'autant plus importante lorsque le temps d'occultation augmente. Cela signifie que si des modèles internes sont utilisés, leur précision pourrait être limitée. D'autres modèles internes ont été envisagés pour expliquer les anticipations réalisées sur des rebonds de balle et sur les effets de la gravité. Ces deux questions vont être détaillées dans les sections qui suivent.

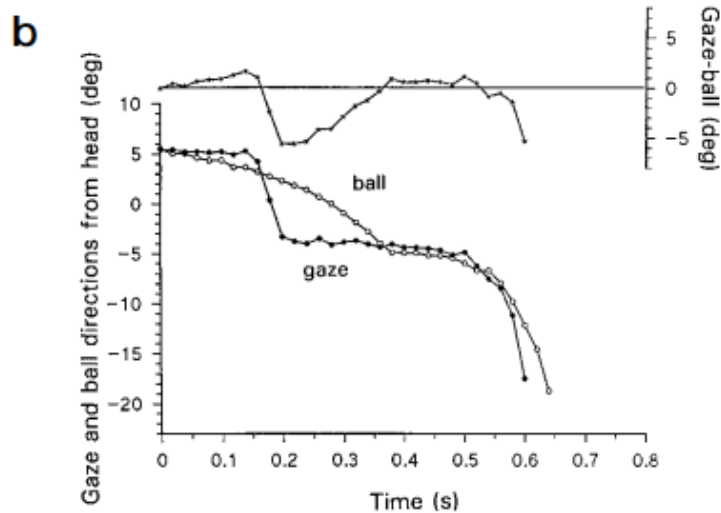


FIGURE 2: Évolution de la direction du regard et de la balle à travers le temps. L'écart entre la direction du regard et la direction de la balle est minimal au moment du lancer et du rebond de la balle. Une saccade est observée juste avant le rebond, suivie d'une fixation du regard. (Land et McLeod, 2000)

1.4.1 Modèles internes pour prédire les rebonds de balle

Dans des environnements dynamiques tels qu'en sports de balle, les propriétés de ces environnements peuvent être incorporées dans le but de guider le regard et le mouvement requis. Dans ce registre, (Land et McLeod, 2000) ont montré chez des joueurs de cricket que les batteurs anticipaient le rebond de balle. En effet, ils ont remarqué que le regard était orienté vers la position future du rebond de 100 à 200 ms avant que la balle n'arrive. De plus, ils ont montré que les saccades oculaires étaient suivies d'une fixation sur la balle pour estimer la trajectoire de la balle post-rebond, quand elle quitte la main du lanceur (Figure 2). Ceci suggère que les batteurs utilisent des données sensorielles en combinaison avec l'expérience antérieure du mouvement de la balle pour prédire l'emplacement du rebond.

Dans le même contexte, (Hayhoe, Mennie, Sullivan, et Gorgos, 2005) ont montré que les propriétés d'un rebond de balle pouvaient être anticipées. Dans leur étude, les mouvements des yeux, de la tête et des mains ont été enregistrés pendant que les participants attrapaient des balles après rebond. Comme pour les batteurs de cricket, les participants fixaient d'abord les mains du lanceur, puis faisaient une saccade jusqu'au point du rebond. Par la suite, ils poursuivaient la balle jusqu'à ce qu'elle soit attrapée. Ainsi, les auteurs ont constaté que les participants ciblaient une région juste au-dessus du point de rebond, plutôt que le point de rebond lui-même. Les analyses oculaires ont relevé un regroupement des points d'observation suite aux saccades produites avant le rebond. Ceci a suggéré que les participants utilisaient les

informations issues de la période pré-rebond pour cibler l'emplacement probable du rebond. De plus, les auteurs ont montré que les précédents essais avaient une influence sur l'anticipation des propriétés du rebond de balle et sur la capacité à poursuivre la balle. En effet, lorsque la balle de tennis a été remplacée de façon inattendue par une balle plus élastique, les participants ont été incapables de poursuivre visuellement la balle au cours des premiers essais. Il est également apparu que les participants se réadaptaient très rapidement à la nouvelle balle et retrouvaient une bonne précision dans la poursuite après seulement deux ou trois essais.

Les auteurs ont évalué la précision de la poursuite pour les deux balles. Ils ont mesuré la proportion de temps durant laquelle la distance entre la balle et la position regardée était inférieure à deux diamètres de la balle, dans la période entre le rebond et la capture. Les résultats ont montré une amélioration de la précision de la poursuite sur 6 essais, et une amélioration rapide au cours des trois premiers essais pour la balle élastique. La capacité à effectuer des mouvements de poursuite précis dans ce contexte dépend donc de la connaissance des propriétés dynamiques de la balle. L'ajustement de la précision était assez rapide et uniforme d'un sujet à l'autre, ce qui suggère que l'adaptation à de tels changements dans l'environnement est une caractéristique importante du comportement naturel (Figure 3).

(Hayhoe *et al.*, 2005) ont conclu que les saccades et les mouvements de poursuite dans une tâche de capture de balle indiquent que l'acquisition des informations visuelles est planifiée par rapport à des attentes du déplacement et du rebond de la balle. Ces attentes précises correspondent selon les auteurs à un modèle interne stocké en mémoire. Lorsque les propriétés de la balle changent, des erreurs se produisent. Ces erreurs correspondent aux attentes liées au modèle interne. Il apparaît néanmoins que le modèle peut être mis à jour très rapidement à partir de l'utilisation d'un feedback sur les erreurs commises.

Dans une autre étude de (Diaz, Cooper, Rothkopf, et Hayhoe, 2013), une tâche d'interception dans un environnement virtuel de squash a été réalisée. La balle devait être interceptée après avoir rebondi. Elle pouvait avoir trois vitesses initiales différentes, et deux niveaux d'élasticité. Pour chaque trajectoire pré-rebond, deux trajectoires post-rebond étaient possibles selon le niveau d'élasticité (Figure 4). Durant l'expérience, deux balles ayant une même vitesse initiale auront la même trajectoire de balle pré-rebond. Cependant, si ces deux balles ont une élasticité différente alors leurs trajectoires post-rebond seront différentes. Ainsi, pour qu'un participant prédise la trajectoire post-rebond avec des saccades pré-rebond, il doit prendre en compte la propriété d'élasticité de la balle. Les résultats ont montré que, sans avoir

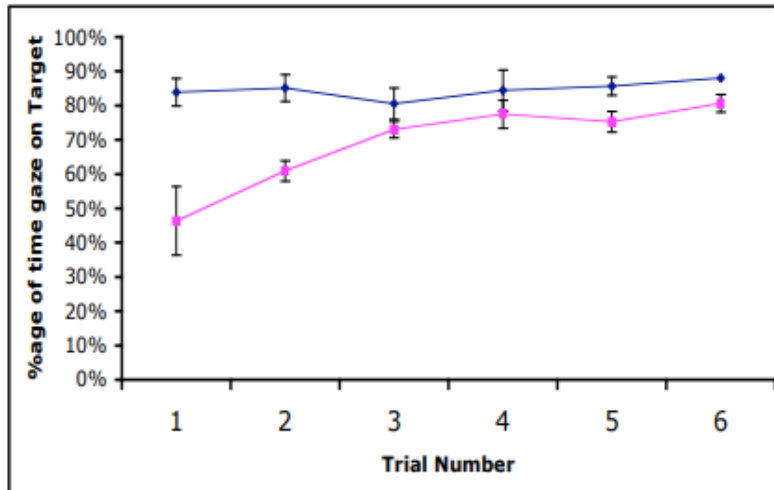


FIGURE 3: Présentation de la variable de précision de poursuite à travers les essais avec une balle de tennis (courbe du haut), ou avec une balle élastique (courbe du bas). Durant les trois premiers essais, la précision s'améliore rapidement (Hayhoe et al., 2005).

reçu d'instruction particulière, les participants ont effectué des saccades précises, qui prennent en compte les changements de la vitesse et l'élasticité de la balle pour prédire le temps d'arrivée et l'emplacement de la balle celle-ci après rebond (Figure 5). Cela suggère une adaptation des modèles internes en fonction des propriétés spécifiques des objets avec lesquels il y a interaction. Cette adaptation pourrait se faire au travers d'un apprentissage rapide. Par exemple dans une tâche d'interception de balle réelle, les sujets adaptent leur orientation du regard face à une nouvelle élasticité de balle après trois essais (Hayhoe et al., 2005).

1.4.2 Le modèle interne de la gravité

Pour expliquer comment l'être humain fait face aux variations de vitesse liées aux effets de la gravité, un grand nombre de travaux ont porté sur la définition et la mise en évidence d'un modèle interne de la gravité. Ce modèle repose sur l'hypothèse d'une capacité de l'individu à intérioriser la constante de la gravité terrestre afin de prédire ces effets sur les trajectoires de balle pour pouvoir l'intercepter avec la précision requise (Lacquaniti et Maioli, 1989b,a; Zago et Lacquaniti, 2005b; McIntyre et al., 2001). Cette constante de gravité serait stockée en mémoire et permettrait de prédire le TTC de la balle en chute sur la base de l'équation suivante (selon (Senot, Zago, Lacquaniti, et McIntyre, 2005)) :

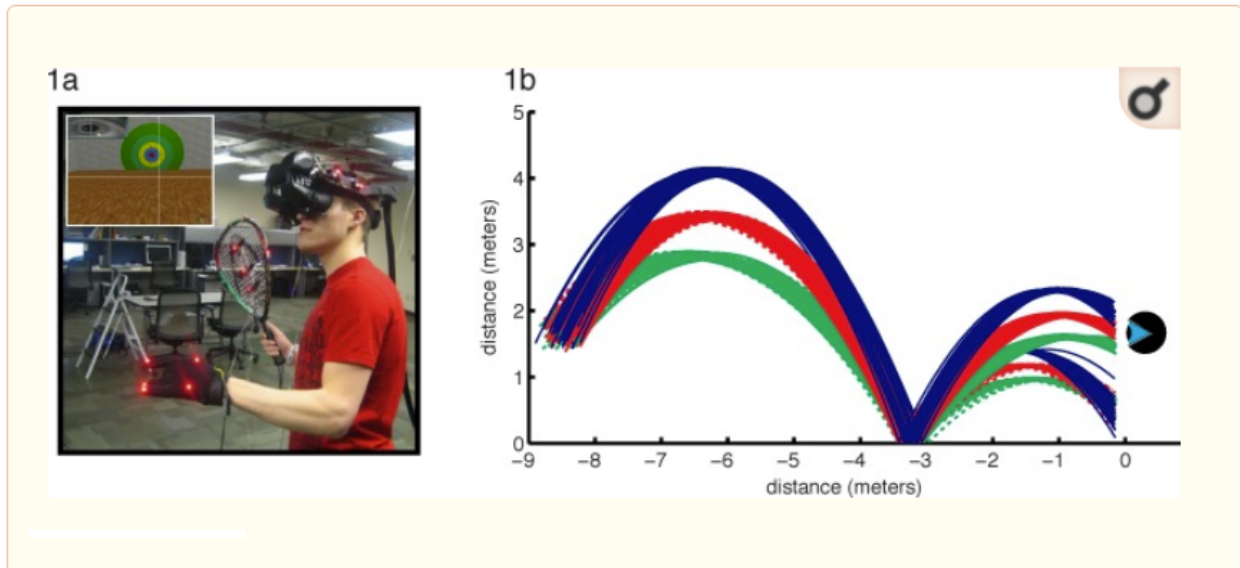


FIGURE 4: Présentation du dispositif expérimental utilisé dans l'étude de (Diaz et al., 2013). À l'aide d'un casque de réalité virtuelle, les participants visualisent un terrain virtuel de squash. Dans la scène virtuelle, les balles lancées doivent être frappées avec une raquette équipée d'un système de capture de mouvement et représentées visuellement dans le monde virtuel. (b) illustration des différentes trajectoires possibles de la balle pour une seule session. Trois trajectoires principales sont possibles dans la période pré-rebond, mais différentes dans la composante verticale de la vitesse de la balle. Pour chacune de ces trajectoires de pré-rebond, il peut y avoir deux trajectoires post-rebond possibles en fonction du niveau d'élasticité, représentées par des lignes pleines et en pointillés.

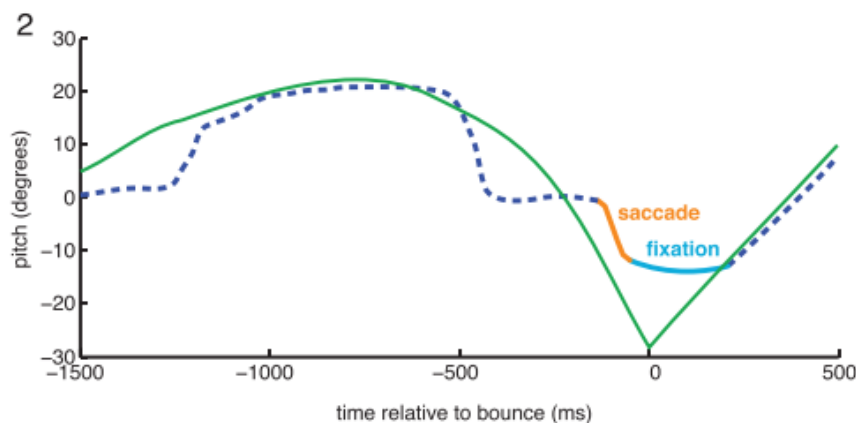


FIGURE 5: Évolution de la trajectoire de la balle (ligne verte), ainsi que de la trajectoire du regard (ligne bleue en pointillés) à travers le temps. Les participants ajustent avec précision leur regard pour prédire la trajectoire de la balle post-rebond. Une saccade est faite juste avant le rebond, suivie d'une fixation du regard à travers le rebond. (Diaz et al., 2013)

$$TTC = \frac{-v + \sqrt{v^2 + 2g \times d}}{g} \quad (\text{Équation 2})$$

avec d : distance entre le point d'interception et la balle ; v : vitesse de la balle, gravité.

Dans ce contexte, (Lacquaniti et Maioli, 1989a) ont réalisé une étude pionnière dans laquelle ils ont montré un lien entre le timing de la capture de balle et la hauteur de chute en suggérant l'utilisation d'un modèle interne de la gravité pour prédire le TTC d'une balle en chute libre avec et sans vision. En particulier, une synchronisation de la fermeture de la main des participants a été observée avec le moment d'arrivée de la balle. Cette synchronisation a été produite sans informations visuelles en connaissant a priori la hauteur de la chute de la balle et à l'aide d'un signal auditif qui indique son départ. Ce résultat a été interprété comme traduisant la prise en compte de l'accélération gravitaire mémorisée et permettant la prédiction du TTC de la balle en chute libre.

Par la suite, (McIntyre *et al.*, 2001) ont réalisé une étude également marquante pour étayer l'hypothèse du modèle interne de la gravité. Dans cette étude, il était demandé à des astronautes d'intercepter une balle projetée d'une hauteur de 1.60 m du sol et soumise soit à 0g (condition de gravité dans l'espace) soit à 1g (conditions de gravité sur Terre). Les résultats ont montré une réponse plus précoce du biceps dans la condition 0g par rapport à la condition 1g, (Figure 6). Ces résultats ont ainsi montré une attente d'accélération de la balle même en condition 0g suggérant ainsi l'utilisation d'un modèle interne dans cette tâche de capture de balle en chute libre.

Pour tester la validité du modèle interne, (Zago, Bosco, Maffei, Iosa, Ivanenko, et Lacquaniti, 2004; Zago et Lacquaniti, 2005a,b) ont étudié le timing de tâches d'interception de balle virtuelle ou réelle en chute verticale tout en manipulant la gravité. Deux balles, une virtuelle et l'autre réelle derrière l'écran, étaient couplées et synchronisées pour arriver au même moment dans la zone d'interception en dessous de l'écran. Le participant devait intercepter la balle réelle lorsqu'elle arrivait en dessous de l'écran en se basant sur les informations fournies par la balle virtuelle qui pouvait se déplacer avec une accélération gravitaire équivalente à celle de la balle réelle ou à vitesse constante (Figure 7). Dans une autre situation, les auteurs ont demandé de synchroniser le clic d'une souris avec l'arrivée d'une sphère rouge virtuelle sur une boîte bleue située en bas de l'écran sans qu'il y ait de balle réelle.

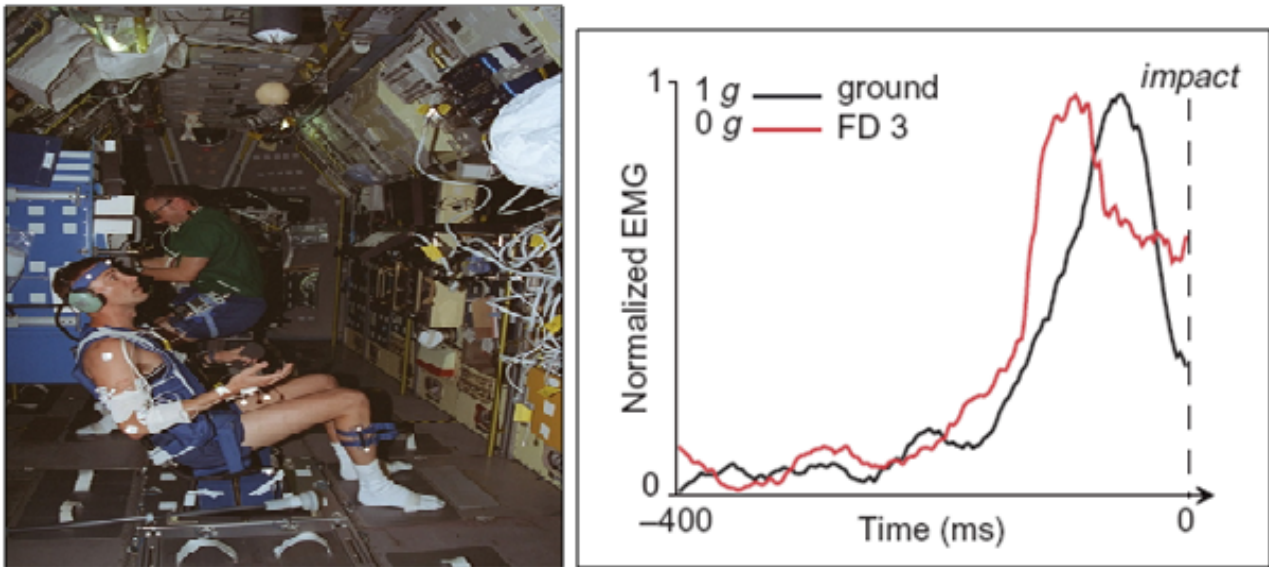


FIGURE 6: A droite : une représentation du dispositif expérimental de la mission spatiale de l'étude de (McIntyre et al., 2001). A gauche : résultats des réponses motrices anticipées du biceps. Le trait noir correspond à la réponse motrice dans la condition Terre ; Le trait rouge correspond à la réponse motrice dans l'espace ; La réponse motrice dans la condition espace se produit 30 ms plus tôt que celle produite sur Terre, d'après (McIntyre et al., 2001).

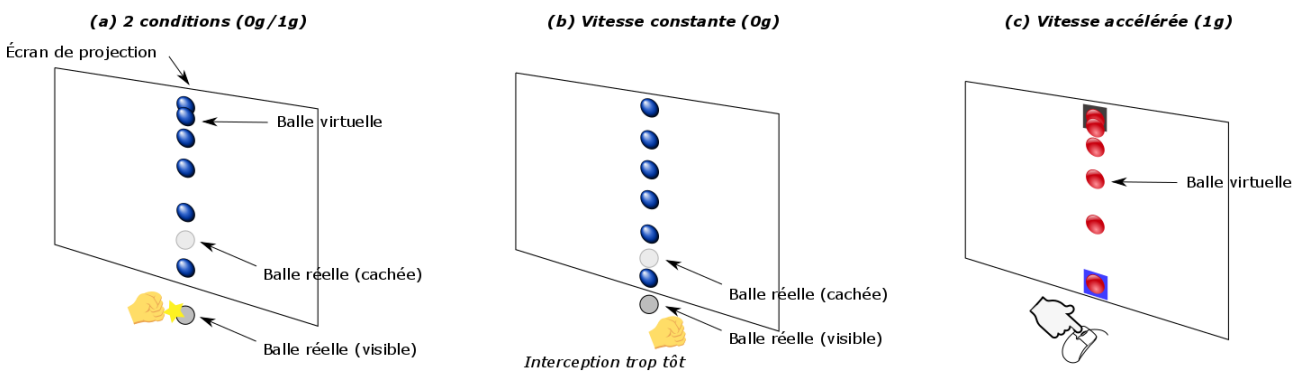


FIGURE 7: Présentation du protocole utilisé de l'étude de (Zago et al., 2004; Zago et Lacquaniti, 2005a,b). a) Le participant réussit l'interception de la balle réelle masquée par la balle virtuelle en chute libre. b) Dans le cas de l'accélération nulle (0g), l'interception de la balle par le participant se fait trop tôt (c) la balle virtuelle part d'une boîte noire, l'utilisateur doit l'intercepter lorsqu'elle arrive sur la boîte bleue, l'interception se fait à l'aide d'un presse bouton. Le participant intercepte tardivement la balle virtuelle dans la condition 1g du fait de l'effet de l'accélération.

A l'aide de ce dispositif, (Zago *et al.*, 2004) ont combiné plusieurs vitesses et accélérations et ont montré que la performance était meilleure dans la condition 1g que dans la condition 0g avec néanmoins une amélioration rapide dans cette dernière condition qui restait plus difficile que dans la condition 0g (Figure 8). Le pic de vitesse du mouvement du participant était atteint avant le moment de l'impact dans la condition 0g (-93 ms), alors que dans la condition 1g, celui-ci est atteint presque au moment de l'interception (-2 ms). Cette synchronisation dans la condition 1g a été interprétée par les auteurs comme la mise en jeu effective d'un modèle interne de la gravité qui intègre les lois de Newton.

Dans la situation sans balle réelle, dans laquelle les participants devaient presser un bouton lorsqu'ils jugeaient que la balle arrivait au point d'interception, les résultats ont montré un meilleur timing dans la condition à 0g que dans la condition 1g (Figure 8). Suite à ces résultats, les auteurs ont conclu que l'activation du modèle interne de la gravité dépendait du contexte de la tâche et que, dans ces dernières conditions, les participants percevaient la cible virtuelle comme sans masse et comme n'étant pas soumise à l'effet de la gravité, donc par conséquent utilisaient un modèle de 0g pour estimer le TTC (Figure 9).

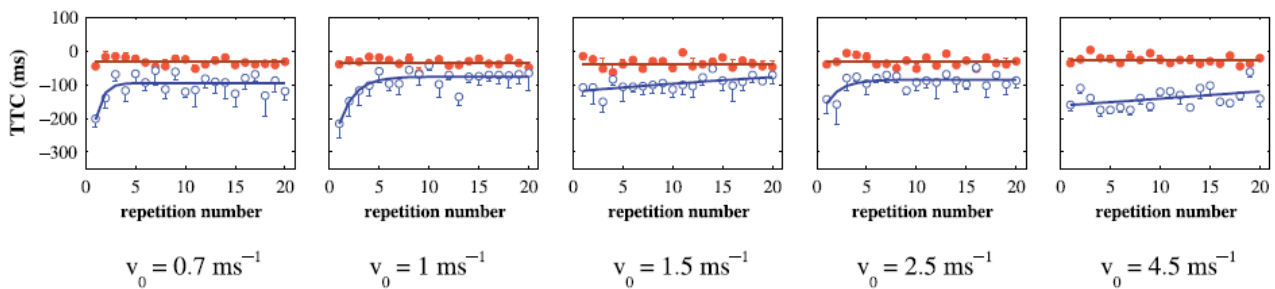


FIGURE 8: Présentation des résultats du TTC des participants pour les deux conditions (0g en bleu ; 1g en rouge) avec les différentes vitesses initiales. La synchronisation des réponses est meilleure en condition 1g, d'après (Zago *et al.*, 2004).

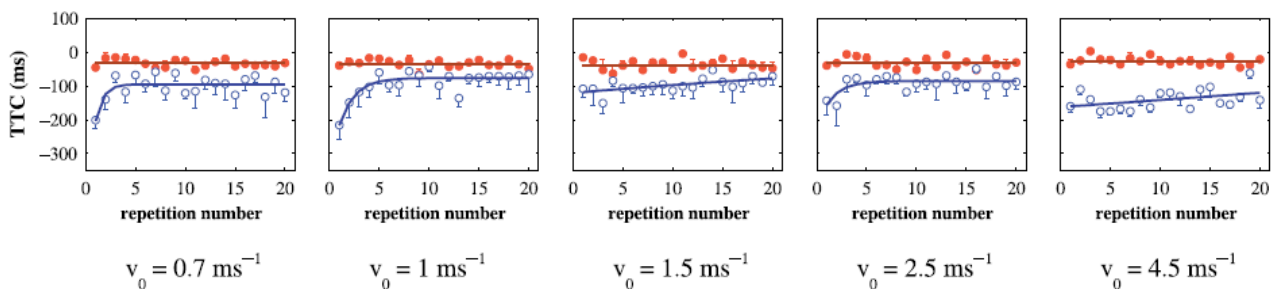


FIGURE 9: Présentation des résultats du TTC des participants pour les deux conditions (0g en bleu ; 1g en rouge) avec les différentes vitesses initiales dans la condition sans balle réelle. Un meilleur timing des réponses est observé dans la condition 0g, d'après (Zago *et al.*, 2004).

La notion de modèle multiple a été proposée pour décrire la capacité à s'adapter aux perturbations selon le contexte (Wolpert et Kawato, 1998; Flanagan, Nakano, Imamizu, Osu, Yoshioka, et Kawato, 1999; Vetter et Wolpert, 2000) et exploiter les informations répétitives en réalisant la même tâche d'une manière adaptée dans des circonstances différentes. À partir des travaux sur cette notion et des précédents travaux de Zago et collaborateurs, une des questions qui a émergé était de savoir si l'apprentissage dans une tâche d'interception d'une balle à 0g pouvait permettre de développer un modèle interne à 0g. (Zago et Lacquaniti, 2005a,b) ont ainsi étudié cette question en utilisant le même dispositif que (Zago *et al.*, 2004), c'est-à-dire une balle réelle qui tombe cachée derrière un écran, synchronisée avec une balle virtuelle projetée sur un écran en condition 0g. Leur conclusion est que le modèle interne de la gravité peut être adapté selon le contexte et que l'adaptation à partir du modèle de la gravité est possible, mais sans pour autant développer un nouveau modèle interne puisque les erreurs demeurent relativement importantes. Les deux paramètres qui permettent cette adaptation sont l'évaluation interne de la gravité de la cible et le délai compensatoire du retard causé par le délai visuo-moteur. Si l'on demande aux participants d'intercepter une balle qui se déplace en 0g, l'adaptation de leur modèle interne 1g devrait se faire à travers une diminution des délais de transmission du potentiel d'action et de son traitement par le système nerveux central ou/et à travers une diminution des délais mécaniques de l'action.

De plus, (Karniel et Mussa-Ivaldi, 2002) ont voulu vérifier l'hypothèse que le système nerveux central pouvait s'adapter à une séquence de perturbations en développant plusieurs modèles internes et en basculant de l'un à l'autre de la manière requise selon le contexte. Pour cela, ils ont demandé aux participants d'intercepter une cible qui apparaissait aléatoirement sur un écran et qui pouvait dévier en fonction de forces appliquées au cours de son déplacement. L'expérience s'est déroulée durant quatre jours consécutifs, avec des forces de déviation appliquées différemment de jour en jour, afin de mesurer l'adaptabilité de leurs modèles représentatifs des champs de forces. Les auteurs n'ont pas observé d'amélioration des performances, mais ils ont constaté une difficulté des participants à compenser les forces opposées dans le cas où ces dernières étaient présentées consécutivement. Les auteurs en ont déduit finalement l'existence d'un seul modèle interne qui nécessite d'être adapté selon le contexte via la pratique.

Dans une autre étude, (Senot *et al.*, 2005) ont testé à l'aide d'un casque en réalité virtuelle la capacité des participants à utiliser un modèle interne de la gravité face à des informations proprioceptives et visuelles corrélées ou décorrélées. Les participants devaient

initier à l'aide d'un presse-bouton le déplacement d'un capteur qui permettait d'intercepter la balle. Cette dernière pouvait tomber du plafond (condition "dessus") ou monter du sol (condition "dessous"). Dans ces deux conditions, la balle pouvait être soumise à une gravité nulle (0g), à la gravité terrestre (1g) ou à la gravité inverse (-1g).

Afin de mieux orienter les participants, des informations proprioceptives et visuelles ont été rajoutées pour, par exemple, faire la distinction entre le sol et le plafond (Figure 10). Dans la condition "dessus", les participants devaient lever leurs têtes vers le haut pour intercepter la balle et dans la condition "dessous", ils devaient regarder vers le bas.

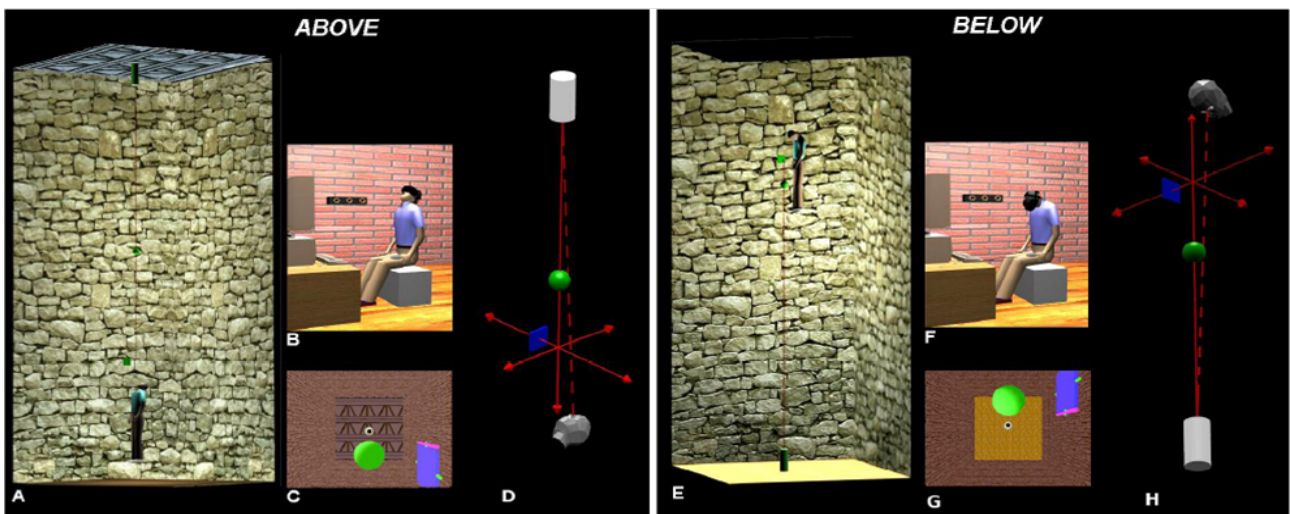


FIGURE 10: Illustration de l'expérience de (Senot et al., 2005). La balle est soumise aux conditions de gravité 1g, 0g ou -1g, le participant regarde la balle qui doit chuter du plafond ou qui doit monter du sol en regardant vers le haut ou vers le bas.

D'une manière générale et contrairement aux études précédentes, les réponses les plus précises ont été obtenues dans la condition 0g avec un taux d'interception de réussite de 67% comparé à 39% dans la condition 1g et à 40% dans la condition -1g, ceci indépendamment de la direction du mouvement. Une interaction entre la direction du mouvement et les conditions de gravité a néanmoins montré que les résultats étaient meilleurs dans la condition "dessous" dans le cas d'une décélération et dans la condition "dessus" dans le cas d'une accélération. Une expérience de contrôle, dans laquelle les participants devaient maintenir leur tête droite, a montré que les résultats étaient meilleurs dans la condition 0g que dans les conditions 1g et -1g, avec une absence d'effet entre la direction du mouvement et les conditions de gravités de la trajectoire de la balle. Ces résultats montrent que lorsque la gravité est cohérente avec la direction du mouvement et l'orientation de la tête (informations proprioceptives) les

participants réalisent une meilleure performance. Ces résultats montrent en définitive que si un modèle interne de la gravité peut être mis en jeu, il n'a ici qu'un rôle de modulateur des réponses avec une réponse anticipée quand la balle chute du plafond et retardée quand elle monte vers le plafond.

([Bosco, Delle Monache, et Lacquaniti, 2012](#)) ont posé la question de l'intégration des sources d'information dans le contrôle d'une action d'interception dans un environnement virtuel d'un terrain de baseball. Dans leurs expériences, les participants devaient intercepter une balle ayant une trajectoire parabolique au moment du contact au sol. L'emplacement de l'interception devait être indiqué à l'aide d'un curseur de souris en déplaçant un effecteur horizontalement et d'un presse-bouton (Figure 11). Dans deux sessions distinctes, les trajectoires de la balle étaient soit complètement visibles, soit occultées pendant 750, 1000 ou 1250 ms avant que la balle ne touche le sol. Dans la condition des trajectoires occultées, 500 ms de trajectoire perturbée étaient visibles avant la disparition de la balle. La perturbation était produite durant la phase descendante et consistait à changer les propriétés de la trajectoire avec trois différentes gravités possibles (0g, 1g ou 2g). L'ordre des essais avec cible visible ou cible occultée a été manipulé entre les participants pour examiner l'expérience visuelle acquise suite aux trajectoires perturbées.

La trajectoire de balle était découpée en deux parties : une première partie en condition 1g et la seconde partie en condition 0g, 1g ou 2g. Dans une première expérience, lorsque la trajectoire de la balle n'était pas perturbée (condition 1g), deux directions ainsi que deux vitesses initiales étaient possibles, de telle sorte que la balle atterrissait au même emplacement que dans les conditions 0g ou 2g. Cependant, le participant pouvait discriminer les différentes trajectoires en examinant la direction de départ. Ainsi, une seconde expérience a été menée, celle-ci consistant à faire en sorte d'utiliser une seule direction de départ avec deux vitesses initiales possibles.

Les auteurs ont mesuré les erreurs de temps et de position. L'analyse de ces erreurs a montré des sous-estimations dans la condition 0g et des surestimations dans la condition 2g (sur l'aspect temporel et spatial de la balle), renforçant l'idée que l'estimation de la trajectoire de la balle repose sur une connaissance implicite de la gravité. De plus, la vitesse de l'effecteur a été calculée au moment du presse-bouton. Les auteurs ont observé une vitesse positive (vers la droite) dans la condition 0g, une vitesse faiblement positive ou nulle dans la condition 1g, et des vitesses négatives (vers la gauche) dans la condition 2g (voir Figure 12).

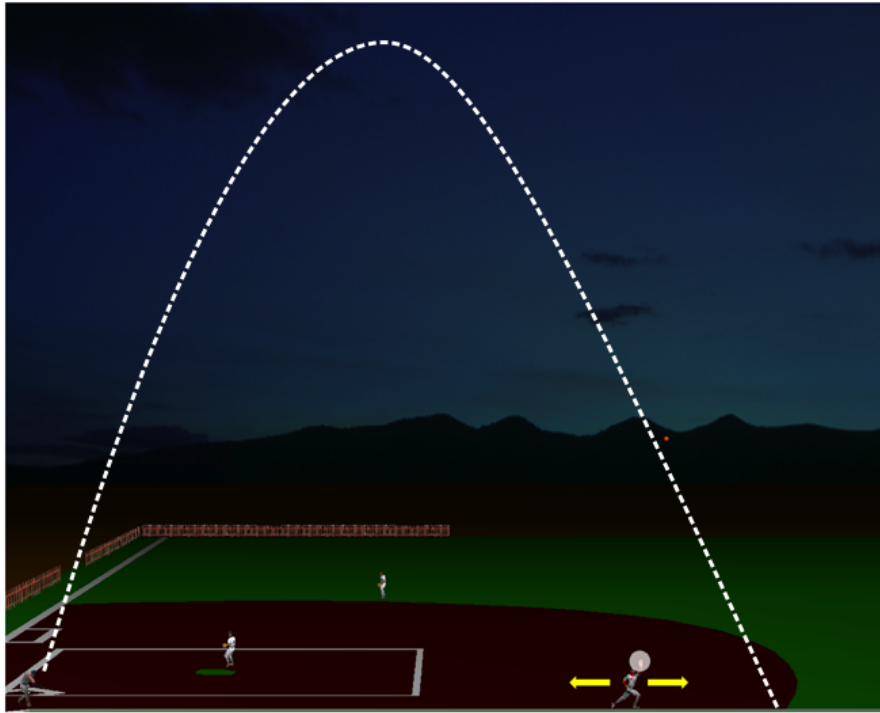


FIGURE 11: Scène expérimentale utilisée par (Bosco et al., 2012). La scène simule une situation de jeu de baseball. La balle suit une trajectoire parabolique (ligne blanche en pointillée). Les trajectoires de balle pouvaient soit être visibles soit être occultées pendant un intervalle de temps variable. Dans différents essais, la trajectoire de balle pouvait être perturbée durant la phase descendante avec trois différentes gravités possibles (0g, 1g ou 2g). Les participants devaient intercepter la balle en déplaçant le joueur à l'aide de la souris d'un ordinateur (les flèches de couleur jaune font référence aux directions possibles du mouvement) et devaient indiquer le moment d'interception avec un presse-bouton. Le cercle semi-transparent autour de la main du joueur externe délimite la surface valide d'interception de la cible.

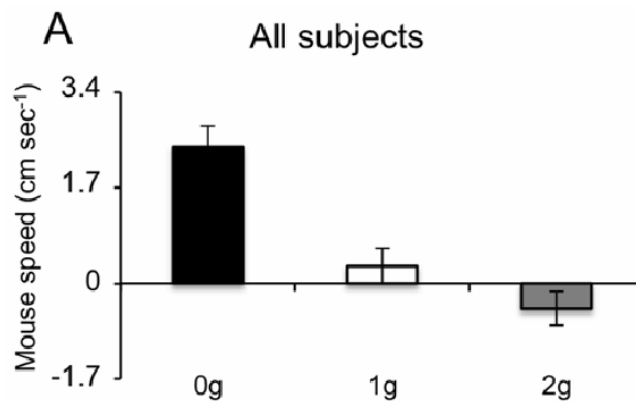


FIGURE 12: Moyenne de la vitesse de l'effecteur lors de l'appui sur le presse-bouton en fonction des différentes conditions de gravités. Les rectangles noir, blanc et gris représentent respectivement les conditions 0g, 1g et 2g. D'après (Bosco et al., 2012).

Les participants ont donc sous-estimé ou surestimé les trajectoires respectivement en condition 0g ou 2g. Ce résultat suggère la mise en jeu d'un modèle interne de la gravité. Toutefois un grand nombre de mouvements de correction vers la gauche juste avant l'appui sur le presse-bouton est présent (voir Figure 13), montrant aussi l'importance des mécanismes de régulation et d'ajustement visuel intégré aux prédictions de la trajectoire de la balle pour positionner l'effecteur de façon plus précise.

Lors de l'interception de cibles occultées, les variations des erreurs de réponse face aux différentes périodes occultées et aux trajectoires initiales observées ont montré un taux d'erreur spatiale proportionnel à l'intervalle d'occlusion. Dans ces conditions, les participants devaient utiliser principalement des mécanismes prédictifs basés sur différents types d'informations en fonction de l'expérience visuelle antérieure. Les participants sans expérience préalable sur les trajectoires perturbées commettaient des erreurs d'interception correspondant à une prédiction basée sur une connaissance a priori de la gravité. Inversement, les réponses des participants qui avaient déjà expérimenté des trajectoires entièrement visibles ont montré de meilleures performances sur le plan spatial et temporel pour les essais 1g et 2g lors des trajectoires avec occlusion par rapport aux essais 0g. Ces résultats suggèrent une connaissance des propriétés des trajectoires perturbées combinée avec l'intégration du modèle interne de la gravité.

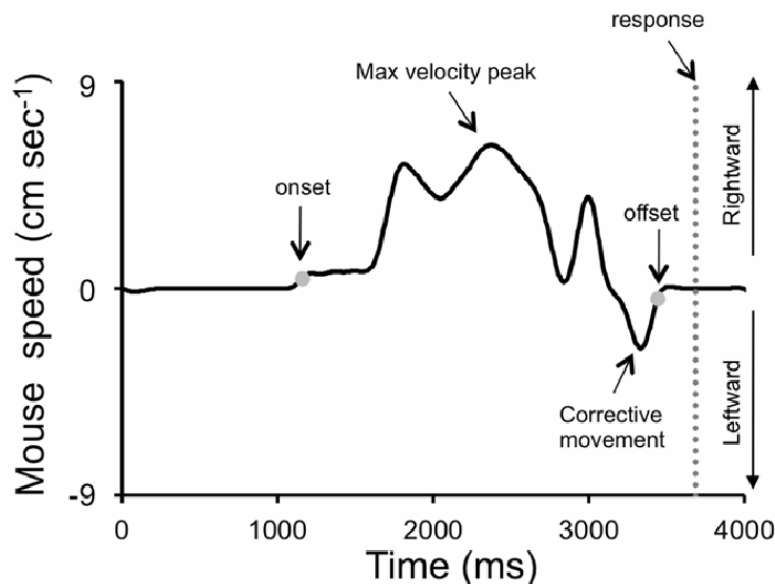


FIGURE 13: Évolution type de la vitesse de l'effecteur pour un participant dans un essai en condition visible en fonction du temps. Les vitesses positives et négatives correspondent respectivement à des déplacements vers la droite ou vers la gauche. La ligne verticale en pointillé indique le moment de l'appui sur bouton. Le premier point en gris "onset" correspond au premier moment où le déplacement de la souris dépasse 0.4 cm/s. Le point "offset" correspond au dernier moment où la vitesse de la souris est inférieure à 0.4 cm/s. Tiré de (Bosco et al., 2012).

D'autres travaux se sont intéressés à l'étude des propriétés d'invariants dans la cinématique d'un objet en mouvement. Par exemple (De Sá Teixeira, Hecht, et Oliveira, 2013) ont mené des expériences avec des cibles visuelles se déplaçant horizontalement à une vitesse constante (quatre vitesses possibles). L'objet disparaissait après avoir parcouru une distance seuil parmi trois distances possibles (voir exemple Figure 14 A). Les participants devaient localiser à l'aide de la souris l'endroit où l'objet avait disparu. La position indiquée par le participant était prise en compte après une période de rétention variant de 0 à 600 ms. Cette période de rétention correspond à un délai d'attente avant de répondre.

Les différentes expériences ont montré un comportement distinct selon l'orientation de l'axe de déplacement de l'effecteur qui pouvait se déplacer horizontalement ou verticalement. Ainsi, les erreurs pour les déplacements horizontaux étaient d'autant plus grandes que le temps de rétention augmentait. De plus, les erreurs pour les déplacements verticaux étaient biaisées dans le sens de la gravité par des surestimations du déplacement.

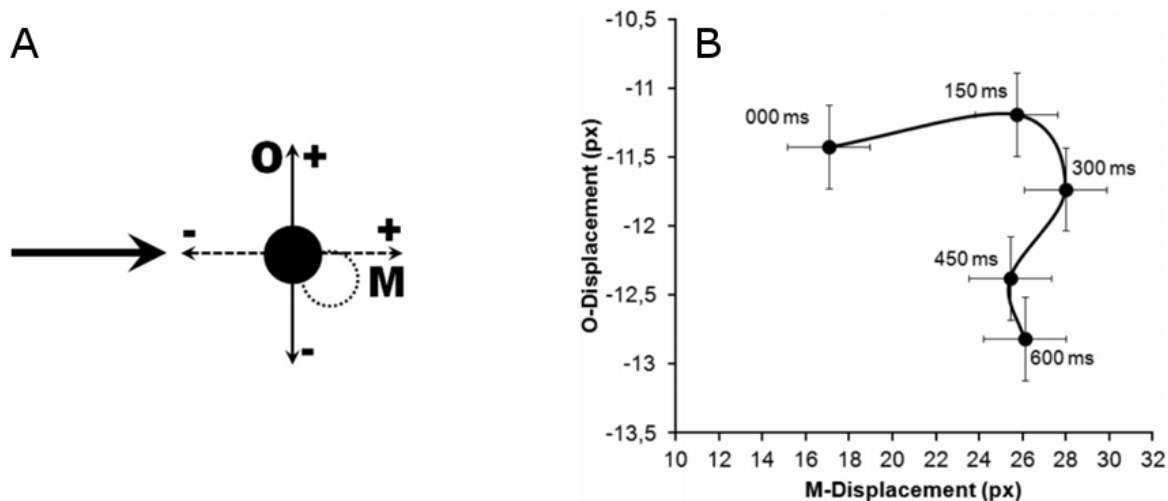


FIGURE 14: La cible peut se déplacer sur l'axe horizontal ou vertical, le participant doit indiquer la position de la balle occultée après un certain délai. Le cercle en pointillés représente l'emplacement indiqué par le participant. Le cercle en noir représente la position de la cible. (B) Évolution de l'erreur de déplacement du participant selon différents délais d'occultation (0 ms ; 150 ms ; 300 ms ; 450 ms ; 600 ms). L'axe M représente l'erreur dans la direction horizontale de la cible, une valeur positive indique un déplacement en avant dans la direction du mouvement de la cible et une valeur négative pour un déplacement en arrière. L'axe O représente l'erreur sur l'axe vertical, une valeur positive indique un déplacement vers le haut, et une valeur négative indique un déplacement vers le bas. Tiré de (De Sá Teixeira et al., 2013).

Enfin, dans une étude récente, (Russo, Cesqui, La Scaleia, Ceccarelli, Maselli, Moscatelli, Zago, Lacquaniti, et d'Avella, 2017) ont traité la question de l'utilisation d'un

modèle interne de la gravité pour la prédiction du point d'interception dans une tâche de capture. Ils ont demandé aux participants, placés dans un environnement virtuel immersif (Figure 15), d'intercepter avec une raquette des balles projetées sur une distance de 6 m avec des lieux d'arrivée, des durées de vol, des accélérations et des gravités différentes (0g et 1g). Les participants étaient libres de choisir le moment et la localisation de l'interception. Les résultats ont montré que les participants obtenaient le plus souvent une meilleure performance avec des trajectoires de balle soumises à 1g que 0g. Pour les trajectoires à 1g, les interceptions avaient tendance à se regrouper sur la moitié supérieure de la raquette. Ceci indique que les participants visaient une position d'interception plus basse que dans la trajectoire 0g. Ces résultats suggèrent à nouveau l'utilisation d'un modèle interne de la gravité pour prédire les emplacements d'interception. Les résultats ont également montré que la différence de performance entre les trajectoires de balle de 1g et de 0g dépendait de la durée du vol, la différence étant plus grande pour les balles plus rapides. Ce résultat est cohérent avec l'hypothèse que le modèle interne serait principalement utilisé pour prédire et particulièrement quand il y a peu de temps, pour réguler le mouvement. Cette hypothèse est confirmée par la mise en évidence d'un nombre des pics de vitesse de la main plus élevé avec des durées du vol plus importantes. Dans ce cas-là, l'information visuelle peut être utilisée pour ajuster et corriger l'action d'interception.

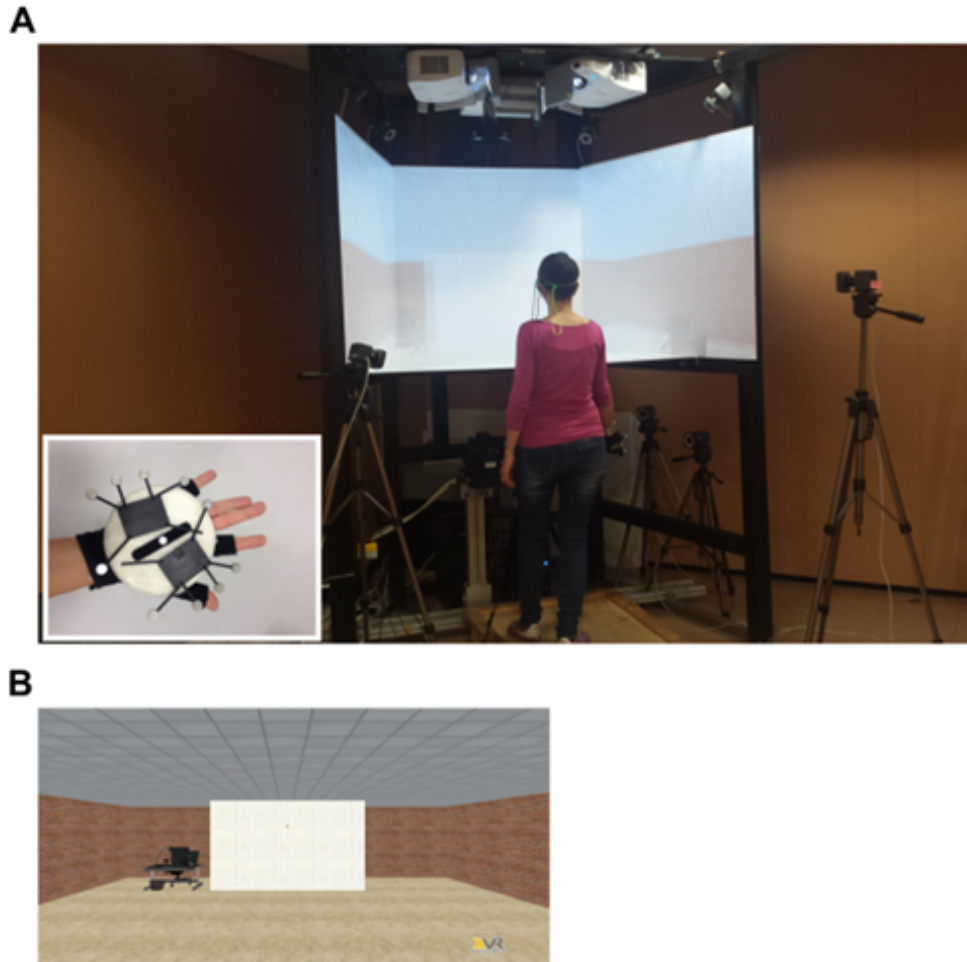


FIGURE 15: Présentation de la configuration expérimentale de (Russo et al., 2017). A : les participants se tenaient à une distance de 1 m de l'écran frontal en regardant un environnement virtuel stéréoscopique à l'aide des lunettes de réalité virtuelle. Ils tenaient une "raquette" dans leur main droite équipée de marqueurs rétro-réfléchissants attachés à la raquette pour capturer le mouvement de la main. B : représentation de l'environnement virtuel qui se compose d'une pièce avec un écran situé à 6 m en face du participant et de quelques objets de tailles familières, tels qu'un bureau et une chaise. Les balles étaient projetées à partir d'une position fixe sur l'écran.

1.4.3 Critique du modèle interne de la gravité

Il apparaît donc que de nombreux résultats empiriques supportent l'hypothèse d'un modèle interne de la gravité. Toutefois, cette interprétation a soulevé certaines questions comme cela a notamment été relevé dans la revue de questions de (Baurès et al., 2007). Il ressort également des questions d'ordre méthodologique qui peuvent remettre en cause certaines interprétations. De ce fait, il apparaît que le terme de modèle interne peut être questionné en raison du manque de précision des estimations possibles.

Ainsi, dans l'expérience de (McIntyre *et al.*, 2001), les différences temporelles obtenues dans l'activité EMG étaient seulement de 30 ms environ ce qui est très réduit si on compare cette valeur avec celle prédite par l'utilisation de la valeur de g pour déclencher le mouvement et qui devrait donner des différences de 234, 517 et 1781 ms, respectivement pour les vitesses initiales de 2.7, 1.7 et 0.7 m/s. Par conséquent, ces résultats sur l'activité du EMG ne fournissent pas une validation quantitative de l'utilisation de la gravité g , mais plutôt une modulation de la réponse.

Les résultats de l'étude de (Zago *et al.*, 2004) ont également été remis en cause. Dans cette étude, les participants devaient intercepter une balle réelle à partir d'informations résultant d'une balle virtuelle projetée sur un écran. Cela a entraîné des vitesses de sortie de balle très différentes entre ce qui était projeté en condition $0g$ et la balle réelle qui passait dans la zone d'interception beaucoup plus rapidement que ce que la balle virtuelle n'indiquait. Par conséquent, les participants pouvaient être surpris d'avoir une période d'interception très réduite avec la balle réelle par rapport à celle prévue pour une balle virtuelle. Ceci peut expliquer les faibles performances dans la condition $0g$. Cette différence n'est d'ailleurs pas présente dans la deuxième expérience de (Zago *et al.*, 2004) et il n'est pas certain que les meilleurs résultats à $0g$ soient liés à l'absence d'engagement du modèle interne de la gravité avec une balle virtuelle sans masse. (Baurès *et al.*, 2007) ont ainsi expliqué que ces résultats pouvaient être liés au fonctionnement basique du système perceptivo-moteur dans lequel les performances se dégradent davantage dans la condition accélérée comparé à la condition vitesse constante (Benguigui *et al.*, 2003).

De plus, (Baurès *et al.*, 2007) ont souligné que la valeur de g n'est pas constante et, de ce fait, ces variations peuvent impacter la précision de l'estimation du TTC estimée (voir *Équation 1*). En effet, les changements d'altitude et de latitude affectent la gravité g . De même, un objet en chute libre est soumis aux forces de frottement de l'air. L'accélération qui en résulte peut être calculée à partir de la formule suivante :

$$a_g = \frac{dv}{dt} + \frac{kv^2}{m} \quad (\text{Équation 3})$$

avec a_g : l'accélération gravitaire, v : la vitesse de l'objet, t : le temps, m : la masse, k : valeur qui dépend du coefficient de frottement. Ceci montre que la constante gravité g

seule ne peut pas représenter l'accélération de l'objet. Par conséquent, le TTC estimé à partir de l'utilisation du modèle interne de la gravité sera erroné. (Baurès *et al.*, 2007) ont calculé le temps que prenait une balle de tennis chutant d'une hauteur de 2 mètres, avec ou sans la résistance de l'air. Ils ont montré ainsi que le temps de chute était de 671 ms avec la résistance de l'air et 638 ms dans le cas contraire, soit une différence de 33 ms. Cela correspond à l'erreur d'estimation du TTC si le modèle interne de la gravité avait été utilisé. Ainsi, suivant le modèle interne de la gravité, l'accélération estimée de l'objet est de $9.81 m/s^2$ alors qu'avec la prise en compte de la résistance de l'air, l'accélération estimée n'est plus qu'à $8.06 m/s^2$. Même dans le cas de la réactualisation de l'estimation du TTC, l'erreur restera tout de même de 20 ms si on prend en compte l'absence de régulation possible dans les 200 ms avant le contact. Dans ce cas, un modèle interne de la résistance de l'air est nécessaire pour compléter le modèle interne de la gravité ce qui paraît difficilement envisageable.

À ce sujet, une récente étude de (Joerges, Hagenfeld, et Lopez-Moliner, 2018) a analysé la capacité à discriminer des accélérations gravitaires à partir de trajectoires virtuelles. La première expérience consistait en une tâche de jugement, où le participant devait choisir la trajectoire ayant la plus grande gravité parmi deux trajectoires paraboliques affichées. Les conditions permettaient de faire varier deux vitesses initiales, deux vitesses horizontales et sept valeurs de gravité (Figure 16). Une seconde expérience a été menée en reprenant les conditions de la première expérience, en faisant varier la taille de l'objet. Les résultats montrent que les participants ont des seuils de discrimination élevés de l'accélération gravitaire, ce qui correspond à une mauvaise perception de la gravité. En effet, leurs seuils de discrimination de 75% varient entre $1.28m/s^2$ et $2.9m/s^2$, cela correspond aux fractions de Weber respectivement de $1.28/9.81 = 13\%$ et $2.9/9.81 = 30\%$. Ces seuils de discrimination élevés correspondent aux résultats observés en psychophysique et à la faible perception de l'accélération dans un mouvement linéaire (voir (Benguigui *et al.*, 2003; Brenner, Rodriguez, Munoz, Schootemeijer, Mahieu, Veerkamp, Zandbergen, van der Zee, et Smeets, 2016; Brouwer *et al.*, 2002; López-Moliner, Smeets, et Brenner, 2003; Werkhoven *et al.*, 1992)). Ces résultats indiquent que même si toutes les informations sont disponibles, les participants ont une faible précision pour l'extraction de la gravité à partir de la scène visuelle présentée. Les auteurs se questionnent néanmoins sur l'utilisation de la réalité virtuelle qui pourrait ne pas donner accès à toutes les informations nécessaires.

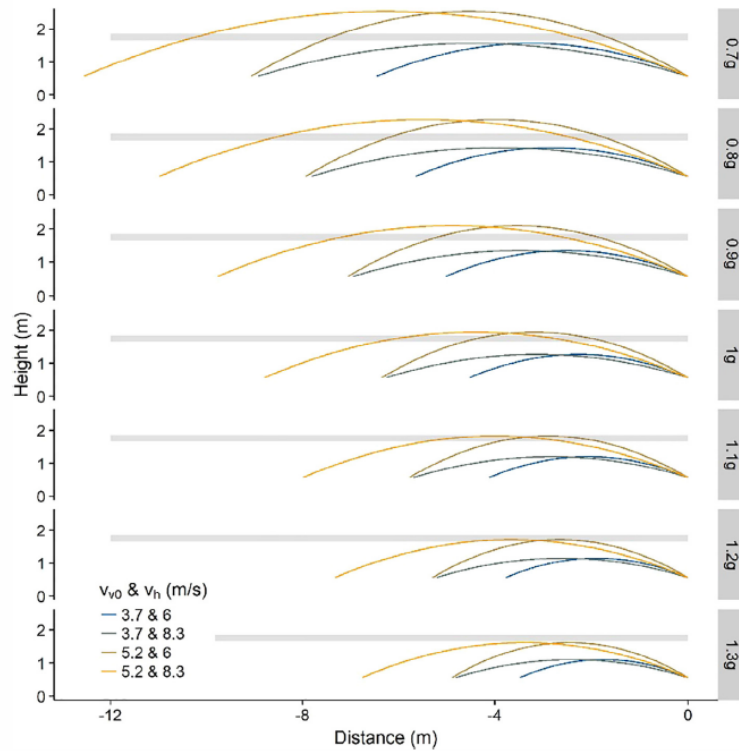


FIGURE 16: Représentation graphique des différentes trajectoires de la cible, modifiées par la gravité. Les trajectoires de la cible peuvent avoir sept valeurs de gravité différentes variant de $[0.7g, - 1.3g]$, ainsi que deux vitesses initiales verticales (3.7 ou 5.2 m/s) et deux vitesses horizontales (6 ou 8.33 m/s). Selon (Joerges et al., 2018).

À travers leur revue de littérature, (Baurès et al., 2007) ont donc souligné que l'hypothèse de l'utilisation d'un modèle interne de la gravité était surestimée dans certaines études. À la place, ils suggèrent que le contrôle du mouvement se base sur le principe du rasoir d'Occam, c'est-à-dire avoir recours à la solution la plus simple, par exemple l'utilisation d'un modèle prospectif de régulation continue de l'action (voir chapitre suivant). Néanmoins, ils envisagent effectivement que des connaissances a priori ou des représentations puissent être utilisées pour, par exemple, déclencher le mouvement plus tôt ou plus tard ou accélérer ou ralentir le mouvement en fonction d'attente des effets de la gravité et de mécanismes de calibration de l'action (e.g., (McIntyre et al., 2001; Senot et al., 2005; Hecht, 2001; Hecht et Bertamini, 2000; Hecht, Kaiser, et Banks, 1996)).

Depuis l'article de (Baurès et al., 2007), un certain nombre d'éléments ont été précisés (voir (Zago et al., 2008) pour une réponse) notamment sur l'approximation inhérente à un modèle interne et à la nécessaire régulation du mouvement. Il reste néanmoins un bon nombre de questions notamment sur la combinaison des différents types de contrôle et d'informations

et la contribution respective des uns et des autres. Avant de revenir sur ces questions dans la partie relative aux hypothèses, nous allons présenter comment l'approche cognitive a permis d'étudier l'expertise et de développer ces modèles explicatifs dans ce cadre.

1.5 L'expertise selon l'approche cognitive

Afin de mieux comprendre l'expertise dans les sports de balle, de nombreuses recherches ont utilisé les principes de l'approche cognitive (e.g., ([Abernethy et Russell, 1987](#))). Cette démarche, qui compare experts et non-experts a permis de faire progresser les modèles conceptuels de cette approche. En effet, dans ce type de sport, les athlètes accèdent à des niveaux de maîtrise élevés et donnent l'impression de repousser les limites fonctionnelles des systèmes perceptifs et moteurs. Ainsi, selon l'expression bien connue de ([Bartlett, 1947](#)) (p.836) l'expert donne souvent l'impression d'avoir "all the time in the world".

Pour atteindre le niveau d'expert, ([Chase et Simon, 1973](#)) ont remarqué qu'il fallait au minimum dix ans de pratique dans un domaine. Ensuite, ([Ericsson, Krampe, et Tesch-Römer, 1993](#)) ont montré qu'il y avait une relation très nette entre le niveau de pratique et le nombre d'heures de pratique accumulées. Ils ont ainsi formalisé ce principe avec la théorie de la "pratique délibérée". Cette théorie pose le principe selon lequel l'expertise sportive nécessite une pratique intense pendant environ dix ans à raison de 1000 heures par an, soit 10 000 heures au total (voir aussi ([Baker et Côté, 2006](#)), pour une approche similaire). Cette pratique doit être organisée de la meilleure façon et dépend bien évidemment de facteurs intrinsèques à chaque individu, mais elle permet selon les principes de l'approche cognitive de construire et d'optimiser les solutions perceptives, motrices et cognitives les plus efficaces.

1.5.1 Performance perceptivo-cognitive

La performance perceptivo-cognitive a fait l'objet de nombreuses études dans le but de révéler les déterminants de l'expertise. Les travaux de ([de Groot, 1946, 1965](#)) furent les premiers à souligner le rôle essentiel de la mémoire dans le développement de l'expertise. Dans la continuité de ces travaux, ([Chase et Simon, 1973](#)) ont montré que si les experts avaient des capacités de mémorisation largement plus importantes que des joueurs de moindre niveau, cela

se manifestait principalement dans le cadre du jeu d'échec grâce à des stratégies de stockage et de restitution fondées essentiellement sur la signification des configurations de jeu. Ces travaux ont servi de support dans de nombreux domaines. Pour les sports de balle, ce support a permis de dépasser le constat d'études qui ne montraient pas de différence entre experts et novices à partir de mesures des fonctions élémentaires de la perception visuelle comme par exemple l'acuité visuelle, la vision des couleurs, le temps de réponse périphérique, la perception de la profondeur et l'équilibre des muscles oculaires (Abernethy, Neal, et Koning, 1994; Ward, Williams, et Loran, 2000; Williams et Grant, 1999; Starkes et Deakin, 1984; Williams, 2000). Ainsi, bien que la vision joue un rôle essentiel dans ces sports, les capacités visuelles de bases semblent suffisantes pour atteindre les meilleurs niveaux d'expertise. Cela signifie que les différences experts-novices se situent à d'autres niveaux et notamment dans les capacités de traitement de l'information. En effet, il a été proposé que les experts en sports de balle accroissent de façon optimale leur capacité d'analyse des informations, c'est-à-dire identifier et traiter les informations environnementales afin de mieux les sélectionner pour exécuter l'action appropriée. La capacité de traitement de l'information étant aussi limitée, il est proposé que l'automatisation des gestes permette la libération de l'espace attentionnel afin de traiter les éléments imprévus ou importants. L'automatisme de l'expert consiste à réaliser ces gestes en utilisant le minimum de capacité attentionnelle.

Ces processus sont étayés par des systèmes de mémoire développés par les experts pour optimiser les capacités perceptives et motrices (Marteniuk, 1976; Ericsson et Kintsch, 1995; Ericsson et Lehmann, 1996). Les travaux (Alain et Proteau, 1980; Alain et Sarrazin, 1990) ont montré par exemple que l'utilisation de ces bases de connaissances permettait d'écarter les événements hautement improbables et d'attirer l'attention sur les événements les plus probables chez les experts en sports de raquette (voir également (Ward et Williams, 2003)). Néanmoins, les travaux (Alain et Proteau, 1977) ont montré que, dans des tâches de temps de réaction de choix, les experts adoptaient une stratégie conservatrice afin de réduire le nombre d'erreurs. En effet, ils diminuaient leur temps de réponse uniquement pour des probabilités d'occurrences très élevées. D'une façon plus générale, en sports de balle, un jugement précis est basé sur plusieurs capacités perceptivo-cognitives telles que : (a) la récupération d'informations avancées sur l'orientation de la posture de l'adversaire, (b) l'identification des motifs de jeux, (c) l'exploration efficace de l'environnement visuel et (d) la détermination des options les plus probables de l'adversaire (Williams et Ford, 2008). Ces travaux soulignent l'importance des prises de décisions et des capacités d'anticipation des experts.

1.5.2 Capacité d'anticipation et de prise de décision des experts

L'anticipation permet de gagner du temps, elle représente un élément crucial dans le domaine des sports de balle. De nombreuses études, prenant comme support une grande variété de sports, ont rapporté des capacités supérieures d'anticipation des experts par rapport aux joueurs moins experts. De telles études indiquent que les experts prédisent mieux le déroulement de situations sportives à partir des sources d'informations visuelles détectées plus tôt dans l'environnement (Williams, Ford, Eccles, et Ward, 2011; Shim, Carlton, Chow, et Chae, 2005; Alves, Voss, Boot, Deslandes, Cossich, Inacio Salles, et Kramer, 2013; Helsen et Starkes, 1999; Mann, Williams, Ward, et Janelle, 2007; Voss, Kramer, Basak, Prakash, et Roberts, 2010; Ward et Williams, 2003; Williams *et al.*, 1999; Williams et Ward, 2007; Abernethy, 1990). Ces sources d'informations peuvent être des indices perceptifs prélevés sur le comportement adverse ou sur une organisation plus ou moins complexe (par exemple en sports collectifs) en fonction de connaissances sur les probabilités d'occurrences de certains événements basés sur les expériences antérieures.

Des études ont cherché l'origine de capacités supérieures d'anticipation des joueurs experts en sport. Par exemple, (Aglioti, Cesari, Romani, et Urgesi, 2008) ont étudié les capacités supérieures perceptives et motrices d'anticipation des joueurs experts de basket : dans une expérience de jugement perceptivo-cognitif les individus devaient évaluer la destination des tirs de basket à partir de plusieurs séquences vidéo de durées variables, par trois réponses possibles " IN : balle à l'intérieur du panier / OUT : balle en dehors du panier / I don't know : jugement non défini". Les participants étaient divisés en trois groupes : des joueurs experts pratiquants ayant une expertise visuo-motrice; des observateurs experts ayant une expertise visuelle et des novices sans aucune expérience en basket. En se basant sur les trois modalités de réponses, trois pourcentages ont été calculés : pourcentage de réponses correctes, pourcentage de réponses incorrectes, pourcentage de réponses incertaines. Les résultats ont montré que les joueurs experts de basket prédisent plus tôt et plus précisément la trajectoire du ballon de basket que les observateurs qui n'ont pas d'expérience motrice directe avec le basket et ceci particulièrement pour les vidéos de courte durée ne montrant qu'une partie de la trajectoire (séquence de 568 ms). En effet, le pourcentage de réponses correctes devient supérieur au pourcentage de réponses incertaines aux alentours de séquences vidéo d'une durée de 568 ms chez les experts, alors que chez les novices le passage de réponse incertaine à réponse correcte se fait à partir des séquences vidéo de 781 ms. Seuls les joueurs experts arrivaient à prédire

les actions et la trajectoire future du ballon en se basant sur des informations extraites à partir des indices cinématiques issus des mouvements du joueur. Les auteurs ont déduit que la capacité supérieure de prédiction/perception des joueurs experts pouvait être expliquée par leur expertise motrice supérieure et leur expérience visuelle acquise simultanément lors de performances sportives.

1.5.3 Identification des indices visuels du comportement adverse

Les indices sont définis comme des éléments partiels d'information qui vont être combinés et enrichis pour permettre de formaliser une information exploitable pour l'action. L'occlusion temporelle et spatiale est une des méthodes les plus utilisées pour comprendre les capacités d'identification et d'utilisation des indices chez les experts (e.g., (Paull et Glencross, 1997)). Elle a d'abord été basée sur la vidéo puis plus récemment sur la réalité virtuelle. Son but est de contrôler l'information visuelle pour identifier les indices pouvant être utilisés (Jackson et Mogan, 2007). Les réponses demandées peuvent être de nature verbale ou motrice.

L'occlusion temporelle consiste à étudier les effets des variations temporelles de visibilité et d'occultation d'une cible en mouvement. Elle est plus souvent utilisée pour déterminer quelle est la quantité d'information nécessaire pour prédire la position de la cible. Par exemple, des études ont ainsi montré que les experts en cricket et en tennis de table prédisent la localisation future de la balle à partir d'informations visuelles collectées pendant une courte période (200 à 500 ms), par exemple pour prédire l'emplacement du rebond d'une balle (Land et Furneaux, 1997; Land et McLeod, 2000; Hayhoe, McKinney, Chajka, et Pelz, 2012).

Dans l'occlusion spatiale, certaines des parties spécifiques du corps de l'adversaire lors de la simulation vidéo sont occultées, e.g. la raquette et le bras du serveur en tennis (Mecheri, Gillet, Thouvarecq, et Leroy, 2011). Cette technique permet d'identifier les parties du corps et les mouvements les plus informatifs afin de réaliser des prédictions. Les méthodes d'occlusion sont complétées aujourd'hui par des techniques de distorsion d'information grâce à la réalité virtuelle (Pollick, 1998; Huys, Cañal-Bruland, Hagemann, Beek, Smeeton, et Williams, 2009). Cet ensemble est associé aux techniques d'oculométrie qui permettent d'étudier l'orientation du regard. Ces travaux ont montré des stratégies visuelles de construction d'information en se focalisant sur les indices les plus importants et en cherchant à les mettre en relation (e.g.,

(Hagemann, Schorer, Cañal-Bruland, Lotz, et Strauss, 2010; Jackson et Mogan, 2007)). Par exemple, (Williams, Huys, Cañal-Bruland, et Hagemann, 2009) ont étudié les différences de stratégies oculaires dans des situations d'anticipation chez des joueurs experts et novices en tennis. Avec des séquences vidéo projetées, ils ont occulté certaines parties du corps ; notamment les épaules, les hanches ou les bras du joueur adverse. Les participants devaient prédire si les coups seraient dirigés à gauche ou à droite. Les résultats ont révélé que les joueurs de tennis experts prenaient des indices informationnels à partir des différentes zones du corps (épaules, hanches, jambes) et de la raquette, alors que leurs joueurs novices récupéraient uniquement les informations à partir de la zone bras-raquette. Par conséquent, les joueurs experts semblent utiliser une stratégie de récupération d'informations "globale", contrairement aux joueurs moins experts qui semblent principalement s'appuyer sur des informations locales (voir aussi (Huys *et al.*, 2009)). Des résultats similaires ont également été rapportés concernant le gardien de but de handball (Loffing et Hagemann, 2014). Lors de la présentation de vidéos de tirs de penalty où certaines parties du corps ont été occultées partiellement ou totalement, Loffing et Hagemann ont montré que les gardiens de but experts et novices étaient capables de prédire le type de lancer (tir plus ou moins difficile), mais seuls les joueurs experts ont utilisé davantage de sources d'information telles que les régions distales (bras et ballon) et les régions proximales (partie supérieure du corps). Ces différents exemples montrent que l'occlusion permet d'identifier les différentes stratégies de récupération d'informations entre experts et non-experts.

1.5.4 Utilisation des probabilités situationnelles

La prise en compte des probabilités de situations est définie comme la capacité d'un joueur à extraire l'information contextuelle pertinente face à un événement (e.g., (Williams et Ford, 2008)). Cette capacité des joueurs à utiliser l'information de probabilités de situations pour l'anticipation a ainsi été soulignée chez des sportifs, dans différentes disciplines, tels que des gardiens experts de handball (Mann, Schaefers, et Cañal-Bruland, 2014), des volleyeurs compétents (Loffing, Stern, et Hagemann, 2015), ou encore les experts en karaté (Milazzo, Farrow, Ruffault, et Fournier, 2016). Ces études suggèrent qu'avec de l'expérience et une expertise avancée les athlètes peuvent utiliser les informations de probabilité de situation de leur environnement afin d'anticiper.

(Farrow et Reid, 2012) ont, par exemple, voulu déterminer la contribution de la répétition des séquences de jeu pour anticiper. Ils ont mené une expérience dans laquelle les

participants devaient prédire l'emplacement des services de tennis qui leur étaient présentés sur un écran tactile au cours d'un set. Des régularités étaient introduites dans les séquences, par exemple le premier service joué toujours du même côté. L'étude a ainsi révélé que les régularités de situation de jeu étaient plus vite détectées et utilisées par les experts (joueurs seniors) que les moins experts (joueurs juniors).

Les joueurs peuvent aussi s'appuyer sur des indices contextuels tels que la position de l'adversaire sur le terrain pour prédire la direction future de la balle au tennis. (Loffing et Hagemann, 2014) ont montré que dans le tennis professionnel, les probabilités de direction des coups varient en fonction de la position du joueur. Les résultats de cette étude suggèrent que les joueurs expérimentés prennent en compte la fiabilité des sources d'information en pondérant différemment les indices contextuels et cinématiques disponibles.

Pour résumer, on peut se référer à la proposition de (Müller et Abernethy, 2012) selon laquelle l'anticipation des experts, permettant de guider le positionnement initial du corps, est produite à partir d'informations perceptives (issues de la cinématique du mouvement) et/ou des probabilités de jeu. Ensuite, d'autres informations sur la trajectoire de l'objet pourraient être utilisées pour affiner au mieux le mouvement afin de réussir l'interception. Selon la théorie cognitive, les anticipations perceptives et décisionnelles doivent être complétées par des anticipations motrices, c'est ce qui est abordé dans la partie suivante.

1.5.5 Utilisation des modèles internes

A notre connaissance, peu d'études ont abordé la question de l'expertise à partir de l'idée du développement de modèles internes plus élaborés. (Bringoux, Marin, Nougier, Barraud, et Raphel, 2000) ont montré que les experts en gymnastique avaient une représentation plus précise de la verticalité que des coureurs à pied, des joueurs de volleyball, handball et tennis. Les résultats obtenus ont montré que les experts en gymnastique perçoivent une modification de leur orientation corporelle plus rapidement que les sportifs issus d'une pratique ne nécessitant pas de contrôle élevé de l'orientation spatiale. Ce résultat suggère que l'expertise en gymnastique pourrait améliorer les caractéristiques fonctionnelles de certains systèmes sensoriels impliqués dans la perception de l'orientation du corps, mais également le développement de modèle interne de référence. Cela a également été envisagé dans d'autres sports. Par exemple, les tâches de frappe de balle dans le football exigent un soutien stable pour établir un contact précis avec le

ballon, anticipant les perturbations mécaniques générées par la jambe en mouvement. (Teixeira, de Oliveira, Romano, et Correa, 2011) ont soutenu l'hypothèse que les footballeurs experts développent une meilleure représentation interne pour exécuter le mouvement souhaité avec une meilleure stabilité par rapport aux joueurs non footballeurs. De même, (Paillard, Bizid, et Dupui, 2007) ont suggéré que les joueurs de football ayant un meilleur niveau de compétition et plus entraînés possédaient probablement un meilleur modèle interne de verticalité (une meilleure connaissance de l'orientation de l'axe du corps et de la verticalité) que les autres joueurs de foot. A notre connaissance, il n'y a que des preuves indirectes ou des conjectures concernant l'idée que l'expertise pourrait conduire à une amélioration des représentations internes du corps. Des preuves directes sont toujours nécessaires pour confirmer (ou invalider) ces adaptations possibles liées à l'expertise motrice.

1.5.6 L'expertise cognitivo-motrice

La performance des experts nécessite aussi une exécution efficace et précise du mouvement (voir (Williams et Grant, 1999)). Le développement de ces compétences cognitives et motrices contribue à la réussite de l'action à effectuer. Par exemple en sports de balle, les experts présentent une grande régularité et précision dans leurs actions. Comme cela a été précisé dans la partie précédente, il a été proposé que l'expertise soit liée à la capacité à programmer avec précision une action dont le déroulement et le temps d'exécution correspond à la perception du temps disponible (Schmidt, 1968; Tyldesley et Whiting, 1975) (voir section 1.2).

Dans ce cadre, (Tyldesley et Whiting, 1975) ont comparé les caractéristiques de mouvement (principalement le mouvement du coude) de trois groupes d'expertise en tennis de table (expert, intermédiaire, débutant) lors de frappes de balle en coup droit vers une zone cible précise. Les données ont montré que les experts et les intermédiaires étaient capables de reproduire un niveau élevé de précision et de régularité spatio-temporelle dans leur coup droit à travers la répétition des essais (voir Figure 17). En effet, des différences de trajectoire entre les points d'initiation du mouvement et du moment de contact balle-raquette ont été observées. Les auteurs ont constaté que, "pour les deux groupes, bien que l'emplacement et le moment d'initiation pouvaient différer de peu, le pattern complet avait toujours une durée uniforme avec des sous-sections régulières qui étaient toujours disposées proportionnellement dans le

temps"¹. Pour les experts, les patterns de mouvement étaient les plus reproductibles. L'analyse de la variabilité temporelle opérationnelle a montré une variabilité de l'ordre de 4 ms chez les experts. Ce qui revient pour les auteurs à simplifier la précision du timing à son déclenchement (dimension temporelle). Pour les intermédiaires, un décalage temporel et spatial a été constaté entre les différents mouvements. Enfin, pour les novices, la variabilité était importante aussi bien au niveau spatial que temporel se traduisant également par une moindre précision dans les frappes.

Tyldesley et Whiting ont conclu que, à mesure que les compétences se développent, les informations nécessaires, exigées pour le traitement impliqué, sont tirées d'une partie plus précoce de la trajectoire. Ceci servira en conséquence à atténuer les faibles perturbations dans la réponse en cours et permettra d'avoir une planification du mouvement de plus en plus précise. Autrement dit, avec la pratique sportive, les experts développent des programmes moteurs et des processus de paramétrisation plus efficaces qui leurs permettent d'être plus précis et moins variable. Cette moindre variabilité observée dans de nombreuses situations chez les experts permettrait par exemple dans les actions d'interception une réalisation de la tâche sur un mode proactif. La réussite de l'action dépendrait de la bonne estimation du temps moteur et du déclenchement de l'action au moment où le TTC est égal au temps moteur.

Il est à noter qu'à notre connaissance cette étude n'a pas donné lieu à d'autres recherches sur le contrôle du mouvement d'un expert dans les actions d'interception dans le cadre d'une approche cognitiviste. Une des raisons qui peut expliquer ce constat serait que cet article a répondu à toutes les questions autour du sujet, ou bien que l'intérêt de cette approche est limité ou insuffisant. Il existe en tout cas une autre approche de la motricité et de la perception différente développée à la suite des travaux de ([Gibson, 1979](#)). Celle-ci met l'accent sur la disponibilité des informations directement dans l'environnement et sur l'importance du couplage fonctionnel entre la perception et l'action. Dans la section suivante, nous allons présenter cette théorie et les ouvertures possibles permettant la compréhension de l'expertise en sports de balle.

1. "Though the initiation location and time may differ, the completed pattern always lasts a uniform length of time and the sequential subsections are always arranged proportionally through" d'après ([Tyldesley et Whiting, 1975](#)).

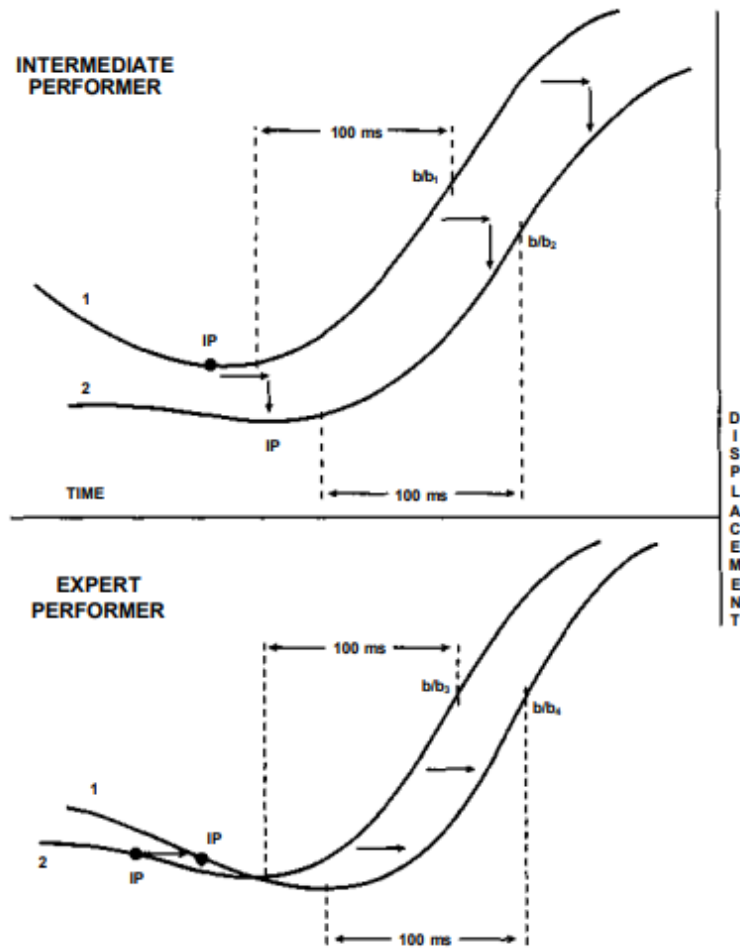


FIGURE 17: Profils de déplacement des mouvements à travers le temps pour les joueurs de tennis de table de niveau intermédiaire (courbes du haut) et experts (courbes du bas) effectuant un coup droit afin d'intercepter les balles provenant d'une machine de projection. Les données indiquent un niveau élevé de reproductibilité dans les patterns de mouvement des deux groupes. Les intermédiaires montrent un décalage temporel et spatial du point d'initiation (IP : initiation point) jusqu'au point de contact de la balle (BB) - contrairement aux experts qui ont un décalage de leur trajectoire uniquement sur le plan temporel. Les données des novices, qui ne sont pas reproduites ici, ont montré une faible cohérence de nature spatiale ou temporelle (Tyldesley et Whiting, 1975).

Chapitre 2

Approche écologique de la perception et de l'action

Sommaire

2.1	Principes généraux	47
2.2	Les lois de contrôle	49
2.3	Un exemple de loi de contrôle : le modèle de la vitesse requise	50
2.4	Un exemple de spécification optique de l'information : la variable optique tau	53
2.5	Adaptation et régulation de l'action face à des trajectoires à vitesse non- constante	54
2.6	L'expertise selon l'approche écologique	56
2.6.1	Délai visuo-moteur et adaptation face à des trajectoires imprévisibles	59

2.1 Principes généraux

À partir des années 1930, James Gibson a introduit une nouvelle façon de concevoir la perception et l'action qu'il a appelée approche écologique. L'idée mise en avant par Gibson propose l'existence d'un couplage continu entre information et mouvement. Ce concept est résumé par la phrase suivante : "We must perceive in order to move, but we must also move in order to perceive "¹ (Gibson, 1979) (p. 223). Une relation circulaire entre la perception

1. "Nous devons percevoir pour nous déplacer, mais nous devons aussi nous déplacer pour percevoir"

et l'action (mouvement) traduit le rapport cause-conséquence entre les actions et la manière dont on perçoit l'information sous forme cyclique. Les travaux de Gibson, résumés dans son ouvrage de 1979, ont souligné l'importance des flux informationnels (optique, acoustique, haptique) contenant des transformations sous forme d'invariants qui sont perçus directement et sont suffisamment informatifs pour ne pas nécessiter d'utiliser des représentations internes de l'environnement. Gibson a également introduit la notion d'affordances pour définir l'information en termes de possibilités d'action. Ainsi, l'information est perçue relativement aux possibilités d'action de l'individu. L'ensemble de ces éléments forment ce que Gibson appelle le système agent-environnement qui doit être étudié dans son cadre écologique d'interaction.

La théorie écologique est donc caractérisée par la relation circulaire entre la génération des actions en termes de forces produites et la perception de l'information en termes d'invariants dans le flux. Le module effecteur est piloté sur la base des informations perçues dans le flux et génère des actions qui elles-mêmes déterminent des variations du flux utile à l'action (Figure 18). Cela peut être formalisé en termes de lois de contrôle que nous allons présenter dans la partie qui suit et illustrer dans le cadre des actions d'interception.

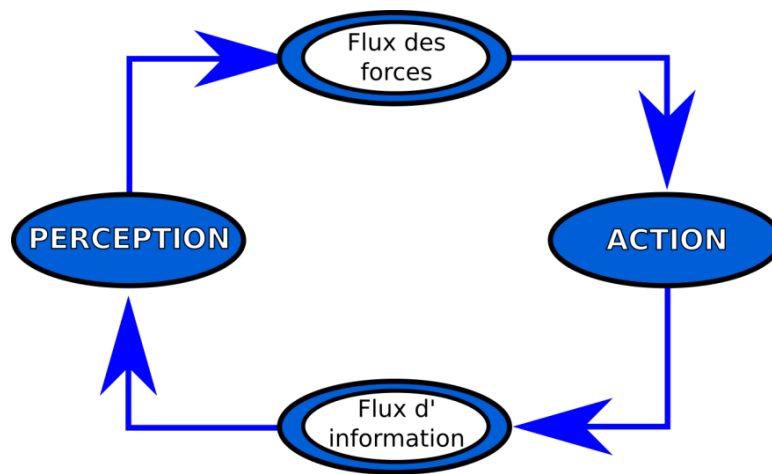


FIGURE 18: *Le cycle du couplage perception-action.*

2.2 Les lois de contrôle

Selon (Warren, 1988), une loi de contrôle permet de matérialiser la relation entre perception et action. La variable informationnelle permet la régulation adaptative de la variable d'action sur la base d'un couplage continu qui peut être formalisée de la façon suivante :

$$\Delta F = g(\Delta I) \quad (\text{Équation 4})$$

où le changement de force ΔF produit par l'acteur (e.g., impulsion générée par des muscles) correspond à une transformation g des changements d'informations ΔI perçus (e.g., : angle, longueur) à travers le flux optique. L'Équation 4 montre que les variations de force dépendent d'une fonction de variation d'information dans l'environnement. Ainsi, dans une tâche d'interception, un participant perçoit des informations à partir de son environnement (ΔI) et les utilise pour réguler son mouvement en générant des forces adaptées. Cette loi de contrôle correspond à une loi de spécification de l'action par les variations d'information. Réciproquement, les lois d'optique écologique expriment le changement du flux optique en fonction du changement du mouvement de l'agent, i.e. :

$$\Delta I = G(\Delta F) \quad (\text{Équation 5})$$

où G représente une fonction transformant le mouvement ΔF en un flux optique ΔI .

Ces lois de contrôle permettent de répondre à deux questions. La première, informationnelle, consiste à savoir quelle est l'information utilisée pour intercepter un mobile. La deuxième, intégratrice, vise à comprendre, d'une part, comment l'information est utilisée et, d'autre part, dans quelle mesure celle-ci est impliquée dans l'adaptation de la cinématique du mouvement. Un des exemples de loi de contrôle dans le domaine des actions d'interception est fourni par la loi de la vitesse requise proposée par (Peper *et al.*, 1994).

2.3 Un exemple de loi de contrôle : le modèle de la vitesse requise

Cette loi de contrôle illustre le principe de réduction d'écart entre le comportement courant et le comportement requis. Plus spécifiquement, il permet d'exprimer la vitesse requise de la main en fonction de la distance latérale courante "main-balle" dans une tâche d'interception à un axe et d'une estimation du temps de contact comme :

$$Vmreq = \frac{X_b - X_m}{TC1} \quad (\text{Équation 6})$$

où X_b est la projection de la position de la balle sur l'axe d'interception, X_m représente la position courante de la main sur le même axe, et $TC1$ est l'estimation de premier ordre du temps d'arrivée de la balle (TC) à un point donné sur ce même axe.

Cependant, les expériences ont montré que la vitesse requise ne peut pas être atteinte instantanément. (Peper *et al.*, 1994) ont alors proposé l'utilisation d'une fonction d'activation permettant l'évolution progressive de la vitesse initiale de la main à la vitesse requise. Le modèle mis à jour est le suivant :

$$Vmreq = \alpha(t) \frac{X_b - X_m}{TC1} \quad (\text{Équation 7})$$

Avec la fonction d'activation spécifiée, modélisée par une sigmoïde :

$$\alpha(t) = \frac{t^n}{\beta^n + \delta * t^n} A \quad (\text{Équation 8})$$

avec A l'amplitude de l'activation pour $t \geq 0$ (voir (Bullock et Grossberg, 1988)).

Dans l'expérience menée dans l'étude de (Peper *et al.*, 1994), les balles étaient rattachées à un fil et lâchées dans un mouvement de balancier (Figure 19). Les participants devaient intercepter la balle au point bas du mouvement de balancier. Peper et ses collaborateurs ont notamment observé que les participants à cette tâche avaient, pour différentes trajectoires

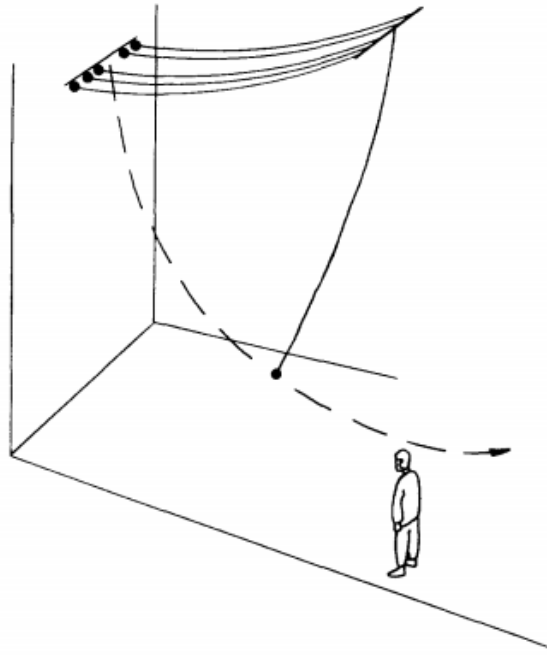


FIGURE 19: Représentation schématique de la configuration expérimentale : à partir d'un rail fixé au plafond (6,0 m au-dessus du sol) d'une grande salle d'expérience, 10 balles ont été suspendues en utilisant une ligne de pêche (4,95 m de long) (Peper et al., 1994).

de lancement de balle, des mouvements ayant des cinématiques très différentes pour un même point d'arrivée identique. Cette observation leur a permis de conclure que pour être au bon endroit et au bon moment, les participants utilisaient des trajectoires différentes en fonction de l'angle d'arrivée de la balle qui montraient l'absence de prédiction spatiotemporelle. Ceci signifie également l'adoption d'un mécanisme de contrôle de type prospectif dans lequel la recherche de l'information suffit à atteindre l'objectif fixé.

(Bootsma, Fayt, Zaal, et Laurent, 1997) ont, par la suite, proposé une amélioration du modèle de la vitesse requise dans le but de déterminer et spécifier la vitesse requise intégrée dans le mouvement. Ils ont ajouté une estimation de l'accélération de la main à partir de la différence entre la vitesse requise et la vitesse courante de la main, sous la forme :

$$A_m = \alpha \cdot V_{mreq} - \beta \cdot V_m \quad (\text{Équation 9})$$

où A_m est l'accélération de la main qui s'obtient par la différence entre la vitesse requise (V_{mreq}) et la vitesse courante de la main (V_m), et α et β sont des constantes.

La validité de ce modèle a été testée par (Montagne, Laurent, Durey, et Bootsma, 1999), l'objectif de ces travaux étant de confirmer la dominance du mode prospectif lors d'une tâche d'interception manuelle. Dans cette expérience réalisée dans le noir, avec un mouvement contraint à un déplacement le long d'un axe, les auteurs ont considéré des situations différentes pour la position de départ de la balle et l'angle initial entre la trajectoire linéaire à parcourir et l'axe d'interception. Le point d'arrivée était quant à lui le même que dans l'expérience de (Peper *et al.*, 1994). La main du participant pouvait être positionnée au niveau du futur point d'interception de sorte que si la main restait immobile, l'individu était assuré de la réussite de la tâche (Figure 20). Néanmoins, (Montagne *et al.*, 1999) ont montré que les mouvements des participants pouvaient se diriger vers la position initiale du mobile pour retourner ensuite vers la position initiale de la main. Les mouvements produits par la main confirment une relation avec les angles d'approche (rentrant ou sortant). Bien que la main du participant puisse être déjà placée au futur point d'interception, on a observé la présence de mouvements d'aller-retour (mouvements de rebroussement) sur l'axe du mouvement (Figure 21). Ces mouvements de rebroussement mettent à nouveau en évidence l'utilisation d'une loi de contrôle prospective pour réduire la distance latérale courante. Les résultats et les formalisations proposées dans cette étude ainsi que dans celle de (Peper *et al.*, 1994) ont par la suite été complétés et/ou discutés (Beek, Dessing, Peper, et Bullock, 2003; Dessing, Bullock, Peper, et Beek, 2002; Dessing et Craig, 2010; Jacobs et Michaels, 2006) sans que le principe de couplage et de régulation prospective ne soit remis en cause. Cette conception paraît suffisamment robuste pour offrir un bon modèle explicatif des processus perceptifs et moteurs impliqués dans les actions d'interception.

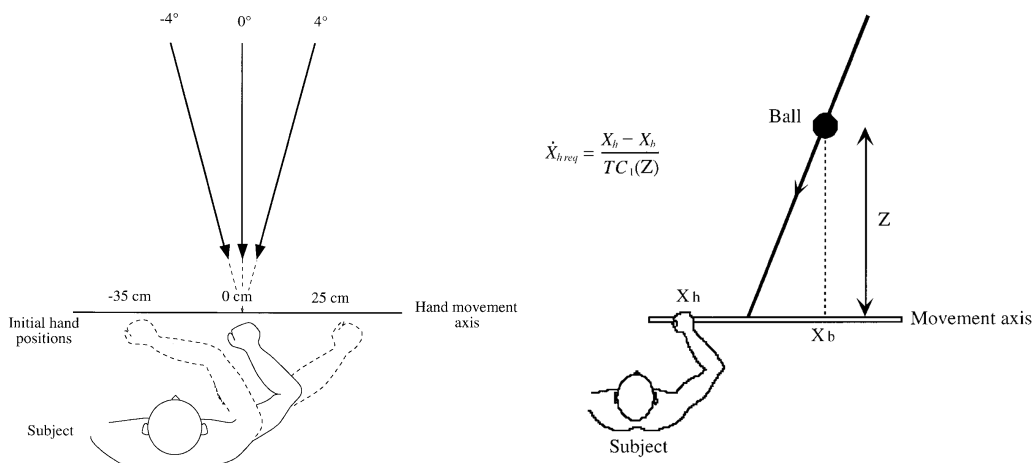


FIGURE 20: Représentation des conditions expérimentales (Montagne *et al.*, 1999).

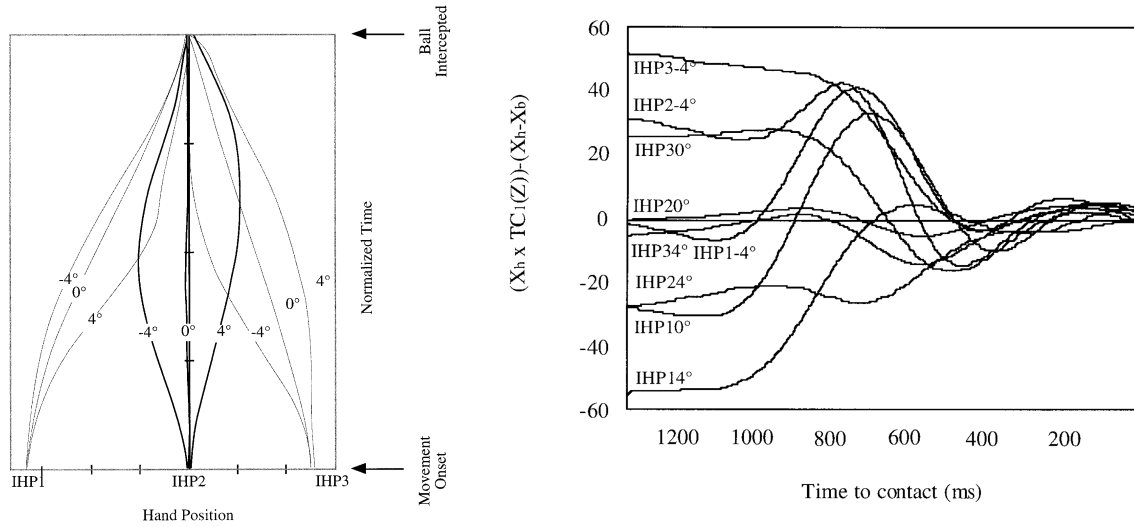


FIGURE 21: Trajectoires normalisées de la main au cours du temps lors d'une tâche d'interception dans les trois conditions de point de départ de la balle. (b) L'évolution de la différence entre le comportement requis et le comportement courant pour un essai selon les différentes conditions. Les courbes représentent la différence entre la distance horizontale et la distance établie dans le cas où la balle maintient sa vitesse constante jusqu'à l'axe d'interception. L'écart entre les deux distances s'annule avant 300 ms du temps de contact (Montagne et al., 1999).

2.4 Un exemple de spécification optique de l'information : la variable optique tau

Pour comprendre les interactions entre l'agent et son environnement, plusieurs variables ont été formalisées et étudiées. Dans les mouvements d'approche, les travaux de (Lee, 1976, 1980) ont donné une base à de nombreux travaux. Une des propositions réalisées par Lee correspond à l'expansion radiale d'un élément de l'environnement qui se rapproche d'un individu.

Cette expansion correspond à l'angle visuel formé par l'objet au point d'observation. Lee a formalisé cette expansion par la variable optique angulaire τ qui correspond au ratio entre la taille angulaire d'un objet θ et sa dérivée temporelle $\dot{\theta}$:

$$\tau = \frac{\theta}{\dot{\theta}} = TTC1 \quad (\text{Équation 10})$$

Il a également montré que cette variable correspondait au temps de pré-contact (*TTC*) lorsque la vitesse d'approche est constante, on parle alors de *TTC* de premier ordre (*TTC1*, e.g., (Benguigui *et al.*, 2003)).

Cette variable fournit une description formelle de l'information optique disponible pour l'acteur dans une situation d'approche. La variable optique τ traduit en effet les changements dans la matrice optique d'un organisme qui révèlent des sources potentiellement importantes pour l'action. Le *TTC* a ainsi été identifié comme étant une information potentiellement pertinente pour l'action dans le timing des actions dans diverses situations sportives, impliquant principalement une action d'interception (Bootsma et Peper, 1992; Gray et Sieffert, 2005; Lee et Young, 1985; Lee, Young, Reddish, Lough, et Clayton, 1983; Regan et Gray, 2000; Savelsbergh, Whiting, et Bootsma, 1991). Par exemple, (Savelsbergh *et al.*, 1991) ont montré un ajustement continu du geste en fonction de l'information extraite sur le diamètre d'une balle qui pouvait se dégonfler lors de son approche.

D'autres variables optiques ont été introduites telles que le tau global prenant en compte la dilatation du mobile au point d'observation, mais également la fermeture de l'angle formé par le mobile et le point d'arrivée pour des déplacements orientés vers un point de l'espace qui n'est pas le point d'observation (Bootsma et Oudejans, 1993) et par (Bootsma et Craig, 2002). Cependant, dans ce manuscrit nous ne détaillerons pas ces variables sachant que ce travail de thèse ne portera pas spécifiquement sur la formalisation et l'utilisation des variables optiques.

2.5 Adaptation et régulation de l'action face à des trajectoires à vitesse non-constante

Comme nous l'avons vu précédemment, l'équivalence entre la variable optique τ et le *TTC* n'est vraie que dans le cas d'approches à vitesse constante. Or, cela est assez rare en situation réelle du fait de forces diverses (friction, gravité, propulsion musculaire notamment) qui s'exercent sur les éléments en mouvement. C'est pour cette raison que la question de la prise en compte de l'accélération et la décélération a suscité de nombreux travaux.

Dans le chapitre précédent (chapitre 1), nous avons souligné que l'approche cognitive propose des modèles internes pour répondre à la difficulté ou l'impossibilité de percevoir l'accélération. Dans le cadre de l'approche écologique et des lois de contrôle prospectives il n'est pas nécessaire de connaître au préalable les caractéristiques de la trajectoire (e.g., variation de vitesse du fait de la force de gravité exercée sur le mobile). En revanche, il est proposé que la régulation continue de l'action (la boucle du couplage perception-action) puisse être suffisante pour réussir à intercepter une balle à vitesse non constante. Il est ainsi envisagé que la variable de premier ordre *TTC1* qui ne prend pas en compte la variation de vitesse puisse être suffisante pour permettre des actions précises. Cela se comprend par le fait que l'écart entre *TTC1* et le *TTC* réel tend à diminuer jusqu'à s'annuler à mesure que l'on s'approche du contact.

Dans ce cadre, (Lee *et al.*, 1983), ont étudié le timing d'une action de frappe de balle chutant verticalement de différentes hauteurs, la balle étant donc accélérée par la gravité. Les participants devaient sauter et frapper la balle qui tombait. Les auteurs ont analysé l'évolution des angles du coude et du genou pendant la phase d'extension. Les variations des angles ont révélé que les sujets orientaient leurs actions à partir d'une variable optique $\tau(\varphi)$. Cette variable correspond au temps restant à parcourir pour intercepter un objet ayant une vitesse constante. Il faut noter d'après la Figure 22 que plus le contact approche, plus $\tau(\varphi)$ se rapproche du *TTC* réel. Cela souligne l'absence de nécessité de prédire le *TTC* mais seulement la nécessité de réguler l'action en continu sur la base de la variable τ .

Dans une autre étude, (Lee, Port, et Georgopoulos, 1997) ont montré que l'accélération ou la décélération du stimulus engendrait davantage de pics de vitesse qu'à vitesse constante. Ces pics traduisent des mouvements d'ajustement pour adapter l'action aux variations de vitesse et renforcent l'idée de la non prise en compte des variations de vitesse sur un mode prédictif.

Les travaux de (Benguigui *et al.*, 2003) ont testé si les informations de premier ordre sont utilisées dans une tâche de jugement d'arrivée, consistant à estimer le moment d'arrivée d'un mobile sur une cible après occultation de la partie finale. Ils ont montré que l'accélération et la décélération n'étaient pas prises en compte et que des erreurs étaient commises avec des valeurs correspondant à l'utilisation de *TTC1*. Ce résultat a été confirmé dans une deuxième tâche qui consistait à lancer une balle pour intercepter indirectement un stimulus en mouvement, avec la particularité d'une absence de régulation possible une fois la balle lancée.

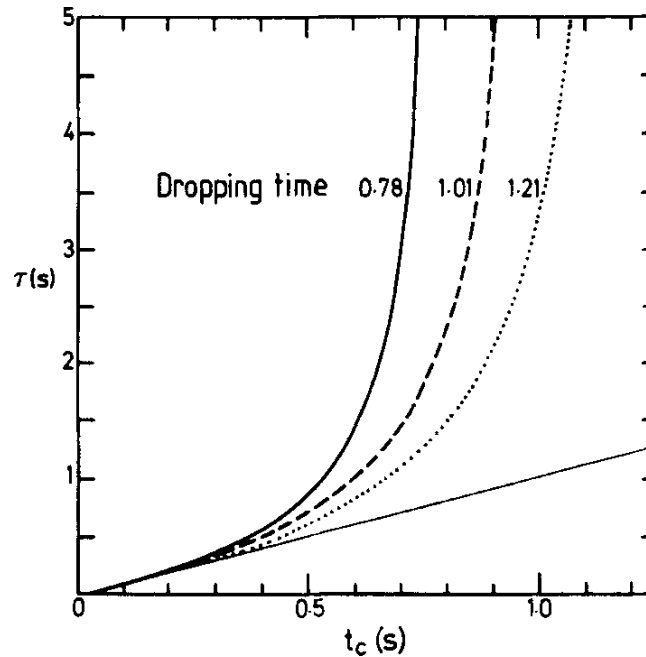


FIGURE 22: Évolution de $\tau(\varphi)$ (TTC estimé) en fonction du TTC réel. Les trois courbes paraboliques représentent les $\tau(\varphi)$ selon les différentes hauteurs de balles (0.78 s, 1.01 s, 1.21 s respectivement pour 3 m, 5 m, 7.2 m de hauteur). La ligne droite représente la fonction linéaire telle que $\tau(\varphi)$ correspond au TTC réel. Plus TTC réel tend vers 0, plus le $\tau(\varphi)$ est proche de TTC, ainsi $\tau(\varphi)$ est quasiment équivalent dès que TTC réel < 300 ms (Lee et al., 1983).

Il apparaît donc que les lois de contrôle prospectives permettent d'apporter des réponses satisfaisantes face à des trajectoires accélérées et décélérées sans véritable prise en compte des variations de vitesse mais par une adaptation continue du mouvement. Dans ce contexte, les experts en sports de balle devraient optimiser leur couplage perception-action particulièrement dans des situations marquées par des variations de vitesse importantes. C'est ce que nous allons voir dans la partie suivante.

2.6 L'expertise selon l'approche écologique

Selon l'approche écologique, la grande précision des experts serait basée sur la capacité à optimiser les lois de contrôles et les couplages mis en jeu ((Bootsma, Houbiers, Whiting, et van Wieringen, 1991), en tennis de table; (Scott, Li, et Davids, 1997), en saut en longueur; (Lenoir, Vansteenkiste, Vermeulen, et de Clercq, 2005), en volleyball). La pratique permettrait l'exploration, la découverte et l'exploitation ou l'optimisation pour produire des mouvements plus précis et efficaces (Savelsbergh et Van der Kamp, 2000).

L'étude de (Bootsma et Van Wieringen, 1990) a montré chez des experts en tennis de table que la variabilité de l'orientation de la raquette dans sa phase propulsive diminuait au fur et à mesure de l'approche du contact. Cela signifie la mise en œuvre des régulations continues pour atteindre le maximum de précision au moment le plus important qui est celui de la frappe de balle. Ces résultats contredisent de manière claire l'hypothèse prédictive du timing opérationnel de (Tyldesley et Whiting, 1975) selon laquelle, la variabilité devrait se manifester aussi bien au moment du contact balle/raquette qu'au moment de l'initiation du mouvement. Les auteurs de cette étude ont qualifié ce phénomène de régulation en entonnoir (funnel-like type of coupling). Ces changements se renforcent au fur et à mesure avec le niveau de pratique et montre que ces régulations sont à l'origine d'un meilleur couplage perception-action. Afin de réussir au mieux la tâche, il est nécessaire d'appliquer une régulation qui réduit l'écart entre le comportement requis et le comportement courant. Au final, la régularité des patrons moteurs observée chez les experts dans les tâches d'interception ne serait pas véritablement un déterminant de l'expertise, mais plutôt le résultat d'un couplage extrêmement précis entre l'approche du mobile et la régulation de l'action. (Bootsma et Van Wieringen, 1990)²).

Selon le même principe, l'étude de (Marin, BARDY, et Bootsma, 1999) a montré que les gymnastes experts avaient une faible variabilité d'orientation du corps dans le mouvement salto arrière, associée à une grande variabilité de la vitesse d'ouverture de l'angle tronc-cuisse par rapport aux gymnastes moins experts. Ces résultats indiquent que les experts ont une meilleure performance grâce à une meilleure régulation du mouvement. En effet, l'entraînement

2. (van Soest et Beek, 2010) ont récemment remis en question la pertinence des conclusions tirées par (Bootsma et Van Wieringen, 1990) concernant le mode de contrôle utilisé. Dans leur étude, (van Soest et Beek, 2010) ont considéré un cadre expérimental similaire à celui de (Bootsma et Van Wieringen, 1990) où les conditions de vision ont été manipulées dès le début du mouvement (vision complète ou obscurcie) ainsi que les essais ont été lancés au hasard, et d'une façon imprévisible pour les participants. Contrairement à l'étude de (Bootsma et Van Wieringen, 1990), ils n'ont observé aucune différence dans la cinématique du mouvement et la relation entre la variable optique tau et les variables motrices dans les deux conditions de vision. L'indisponibilité des informations visuelles n'affecte pas la trajectoire du bras du participant. Par ailleurs, ils ont mis en place une modélisation-simulation pour voir dans quelle mesure un schéma préprogrammé de stimulation musculaire, agissant sur les caractéristiques dynamiques du système musculo-squelettique, pouvait expliquer les schémas de mouvement observés et pouvait également donner lieu à un comportement qualitativement similaire à celui observé expérimentalement.

(Bootsma, Fernandez, Morice, et Montagne, 2010) dans une réponse à cet article ont souligné des lacunes méthodologiques et conceptuelles de la critique réalisée. Ils questionnent notamment le fait que (van Soest et Beek, 2010) ont obscurci la vision après le temps d'initiation du mouvement, plutôt qu'après un délai-visuo-moteur avant l'initiation du mouvement. De plus, le fait que la vision ait été supprimée de façon brutale ne permet pas de manipuler des variables optiques pertinentes, ceci pourrait avoir une influence sur le mode de contrôle. Aussi, (Bootsma et al., 2010) ont mentionné que les participants étaient d'un niveau d'expertise inférieur à ceux étudiés par (Bootsma et Van Wieringen, 1990). De plus, la simulation effectuée ne reposait que sur quelques essais d'un seul participant.

rend le cycle du couplage perception-action plus rapide et plus spécifique. Ainsi, les mouvements deviennent plus réguliers et le cycle devient plus dynamique (Bootsma et Van Wieringen, 1990; Carlton, 1992; McLeod, 1987).

De plus, de nouvelles modalités de couplages peuvent avoir lieu pour s'adapter à la nouvelle situation. (Montagne, Buekers, Camachon, de Rugy, et Laurent, 2003) ont examiné le comportement de régulation des participants à travers plusieurs étapes de processus d'apprentissage (Pré-test, test intermédiaire et post-test). Les participants devaient marcher sur un tapis roulant dans un environnement de réalité virtuelle et devaient traverser des paires de portes oscillantes. Les résultats ont montré qu'à l'issue de la période d'apprentissage, les participants ont développé des stratégies d'accélération et de décélération pour optimiser leurs mouvements, tandis qu'au départ de l'expérience, leurs comportements étaient plutôt limités et peu variés. Cela montre que le processus d'optimisation se caractérise par une exploration plus poussée du répertoire comportemental disponible et par l'affinement du couplage entre information et mouvement notamment dans les délais de mise en jeu des régulations de la boucle perception-action.

(Sarpeshkar, Mann, Spratford, et Abernethy, 2017) ont étudié la capacité d'interception de balle de baseball chez des joueurs de différents niveaux d'expertise (expert vs. intermédiaires) et avec deux tranches d'âge différentes (une gamme d'âge de 19 à 37 ans vs. une gamme de 16 à 18 ans). Les balles étaient projetées par un lance-balle et pouvaient avoir soit une trajectoire linéaire soit une trajectoire courbée avec différentes positions de rebond (9.5 m, 8 m ou 4.5 m de la zone de but) (Figure 23). Les résultats ont montré que les trajectoires curvilignes affectent les performances d'interception et retardent significativement le début de mouvement pour tous les participants, plus particulièrement pour les joueurs intermédiaires. Ce résultat est aussi en accord avec les études précédentes (e.g., (Craig, Bastin, et Montagne, 2011; Craig, Berton, Rao, Fernandez, et Bootsma, 2006)) qui montrent que les observateurs font plus d'erreurs lors de la prédiction future de l'emplacement d'arrivée lors de la balle avec des trajectoires curvilignes.

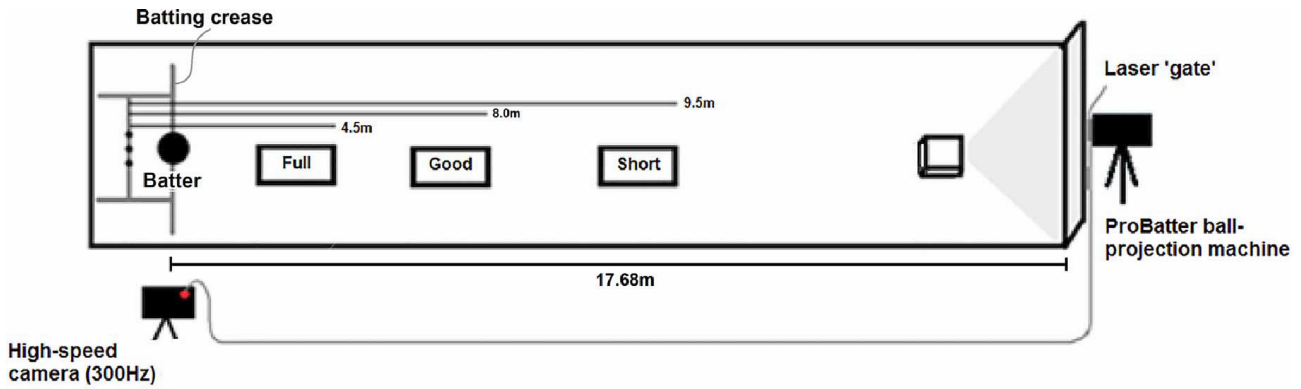


FIGURE 23: Schéma de l'expérience réalisée par (Sarpeshkar et al., 2017). Le batteur devait intercepter la balle projetée par une machine. Une caméra à haute vitesse d'acquisition enregistre les mouvements du batteur. Au moment où la balle était projetée, une LED était allumée. La balle pouvait rebondir à différents endroits (full, good, short).

2.6.1 Délai visuo-moteur et adaptation face à des trajectoires imprévisibles

Une façon pour tester l'efficacité du couplage perception-action est d'étudier la capacité à faire face aux transformations plus ou moins prévisibles de l'environnement (Savelsbergh et Van der Kamp, 2000) et à les surmonter (Benguigui, Baurès, et Runigo, 2008). Dans de telles situations, le temps nécessaire pour adapter le mouvement peut être considéré comme un déterminant de la performance. Dans ce contexte, pour capturer les caractéristiques de l'expertise, un certain nombre d'études se sont basées sur les actions d'interception dans les conditions de vitesse accélérée ou décélérée qui sollicitent de plus les mécanismes d'adaptation et de régulation. La vitesse d'un mobile peut changer d'une façon discrète avec un changement de direction (ex : faux rebond), un changement d'intensité (ex : frappe de balle), un changement qui se fait dans la continuité de la trajectoire avec une orientation différente de la trajectoire (ex : balle à effet) ou avec une modification d'intensité (ex : balle en chute libre) : plus la balle s'approche du sol plus elle accélère. De la même manière, le cas particulier du rebond de balle pourrait être une très bonne base pour étudier l'expertise. Afin de préserver un meilleur couplage perception-action lors de telles situations, les délais effectifs devraient être les plus courts possible (Benguigui et al., 2008). Ces délais représentent le temps où l'acteur détecte un changement de direction du mobile à suivre et le temps nécessaire pour coupler son mouvement avec la nouvelle direction du mobile. L'acteur s'adapte avec les nouvelles caractéristiques

cinématiques de la trajectoire du mobile suite à sa perturbation (Brenner et Smeets, 1997; Georgopoulos, 1997; McLeod, 1987; Carlton, Carlton, et Kim, 1991).

A cet égard, certaines études d'interception ont montré que des modifications soudaines de la trajectoire de l'objet permettaient de révéler des délais plus courts des mouvements d'adaptations chez les experts. Ces délais, classiquement appelés délais visuo-moteurs se définissent quand ils sont étudiés d'un point de vue comportemental comme le temps entre le moment d'apparition d'une information visuelle liée au changement de trajectoire et le moment où le participant effectue un changement fonctionnel pour suivre la cible (Brenner, Smeets, et De Lussanet, 1998; Carlton et Carlton, 1987; Tresilian, 1993).

D'après (Michaels, Zeinstra, et Oudejans, 2001), le délai visuo-moteur peut être estimé dans les actions d'interception entre 100 ms et 200 ms. Toutefois, certaines études ont estimé un délai visuo-moteur plus court comme c'est le cas dans l'étude de (Lee *et al.*, 1983) présentée précédemment où les délais visuo-moteur calculés pour estimer la régulation du mouvement sont de l'ordre de 50 ms à 135 ms. Les études sur l'occultation montrent que des occultations de la balle dans les 100 dernières ms n'altèrent pas la performance suggérant des délais visuo-moteur supérieurs à cette durée (Castiello, Paulignan, et Jeannerod, 1991; Paulignan, MacKenzie, Marteniuk, et Jeannerod, 1991; Whiting, Gill, et Stephenson, 1970). Dans leurs expériences déjà présentées, (Bootsma et Van Wieringen, 1990) et (Savelsbergh *et al.*, 1991), ont montré que la variabilité minimale se situait en moyenne autour de 100 ms avant le contact, délai correspondant selon les auteurs au délai visuo-moteur.

D'autres études ont montré qu'au cours des actions d'interception le délai visuo-moteur pouvait être plus long (e.g., (Brenner *et al.*, 1998)). Cela est particulièrement vrai pour l'initiation du mouvement pour laquelle l'inertie est plus grande que pour la régulation d'une action déjà en cours. Dans ce cas, les délais visuo-moteurs se situent plutôt autour de 200 ms (Benguigui *et al.*, 2003). En d'autres termes, la longueur du délai visuo-moteur est en fonction de l'utilisation de l'information. Dans le cas où l'information est sous un mode continu qui nécessite une régulation "on line", le délai visuo-moteur peut avoir des valeurs aux environs de 100 ms. Par contre, lorsque l'information est sous un mode discret et nécessite une initiation du mouvement et une correction très importante le délai visuo-moteur peut avoir des valeurs aux alentours de 200 ms. Les valeurs du délai visuo-moteur dépendraient du type d'information utilisé, des membres impliqués au cours du mouvement (e.g., l'action de frappe de balle avec une batte de cricket (McLeod, 1987)) et du niveau d'expertise du participant.

Concernant ce dernier point, l'étude menée par (Le Runigo *et al.*, 2005) a permis de tester l'expertise en sports de balle à travers une tâche d'interception. Des experts en tennis et des non-experts ont été testés dans une tâche où ils devaient déplacer horizontalement un chariot sur des rails pour intercepter une cible simulée par l'allumage successif de LED qui arrivait perpendiculairement à l'axe d'interception (voir Figure 24).

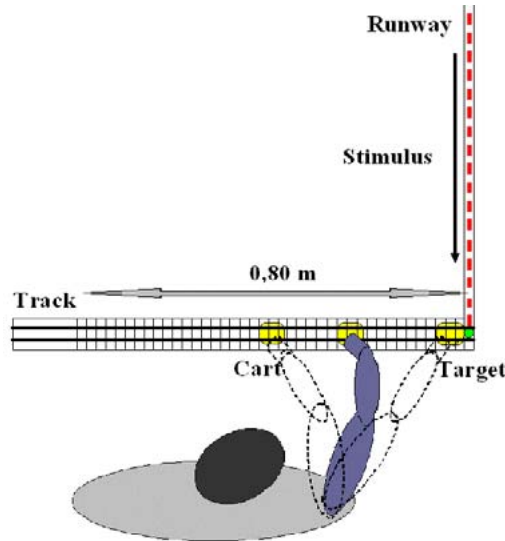


FIGURE 24: Le dispositif expérimental consiste à intercepter un objet en mouvement qui est simulé par l'allumage successif de LED. Le participant déplace horizontalement un chariot sur rails. Tiré de (Le Runigo *et al.*, 2005).

Dans les conditions normales, la cible se déplaçait à une vitesse constante de 2 m/s. Dans les conditions d'accélération ou de décélération, la vitesse du chariot pouvait changer soudainement 400 ms avant son arrivée sur la cible, de 2 m/s à 1 m/s (décélération) ou à 3 m/s (accélération). Les résultats expérimentaux ont montré qu'il n'y avait pas de différences significatives entre experts et novices à vitesse constante, mais que le groupe des experts était plus précis que les novices pour intercepter la cible dans les situations accélérées (respectivement 69 ms et 116 ms d'erreur constante EC) et décélérées (respectivement à -29 ms et -124 ms d'EC). Pour expliquer ces résultats, les auteurs ont montré des délais visuo-moteur plus courts chez les experts (177 ms) que chez les non-experts (208 ms) permettant de réguler plus tôt l'action et adapter leurs mouvements lors de changement de la vitesse (voir Figure 25).

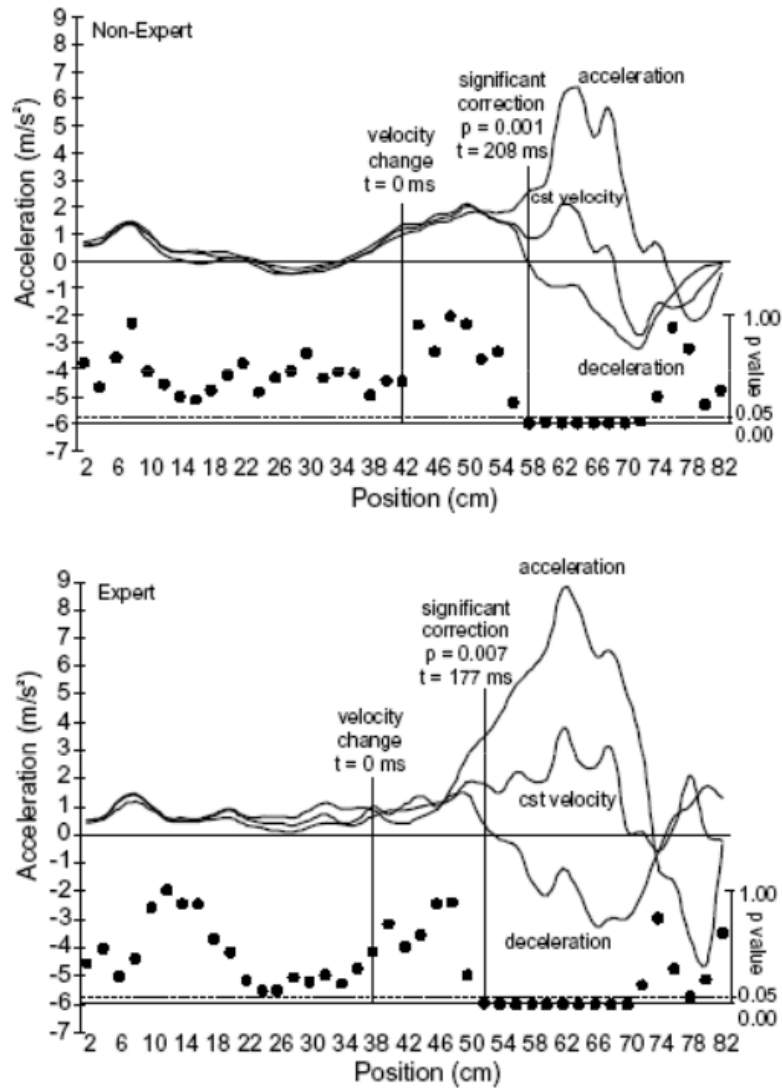


FIGURE 25: Évolution de l'accélération du chariot et des valeurs p de l'ANOVA dans les différentes conditions de vitesse (vitesse constante vs. accélération vs. décélération) en fonction de la position, pour les non-experts (en haut) et pour les experts (en bas). Les résultats montrent un délai visuo-moteur plus court chez les experts (177 ms) que les non-experts (208 ms) (Le Runigo et al., 2005).

Dans une étude adoptant le même principe, mais avec un dispositif de réalité virtuelle, (Le Runigo et al., 2010) ont comparé les performances des experts de tennis et des non-experts en utilisant une tâche d'interception simulée dans laquelle la balle pouvait être déviée de manière inattendue 400 ms avant le contact (Figure 26).

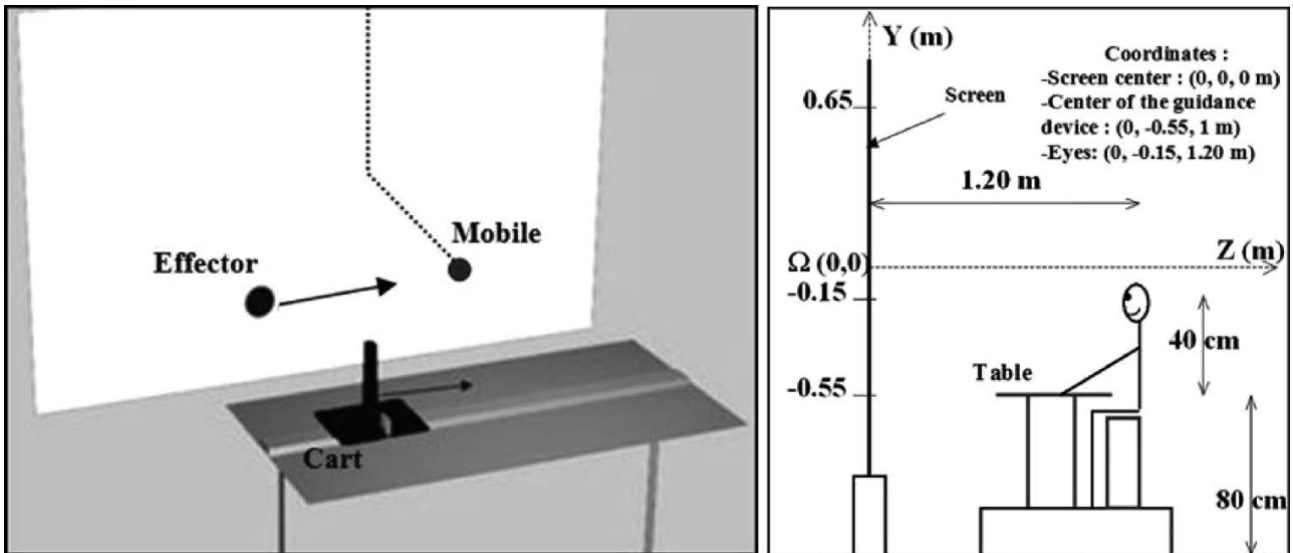


FIGURE 26: Le dispositif expérimental consiste à simuler un environnement d'interception dans un environnement virtuel (Le Runigo et al., 2010). Le participant déplace horizontalement un chariot sur rails. À gauche vue 3D, à droite vue latérale 2D du dispositif.

Les résultats ont montré que le paradigme de déviation de la balle discrimine l'expertise en tennis et que le délai visuo-moteur et le pic de vitesse sont les variables les plus significatives dans la différence entre experts et non-experts. Les experts ont été en mesure de minimiser les erreurs, de réagir plus tôt et de produire des mouvements avec une plus grande vitesse. Un délai visuo-moteur court chez les experts, associé à une capacité d'atteindre une vitesse plus élevée de la main après la déviation de la balle, était à l'origine d'une meilleure performance (voir Figure 27). Les résultats ont ainsi montré que les experts ont des capacités d'adaptations plus élevées qui leur permettent d'ajuster leurs mouvements face à des trajectoires imprévisibles de la balle.

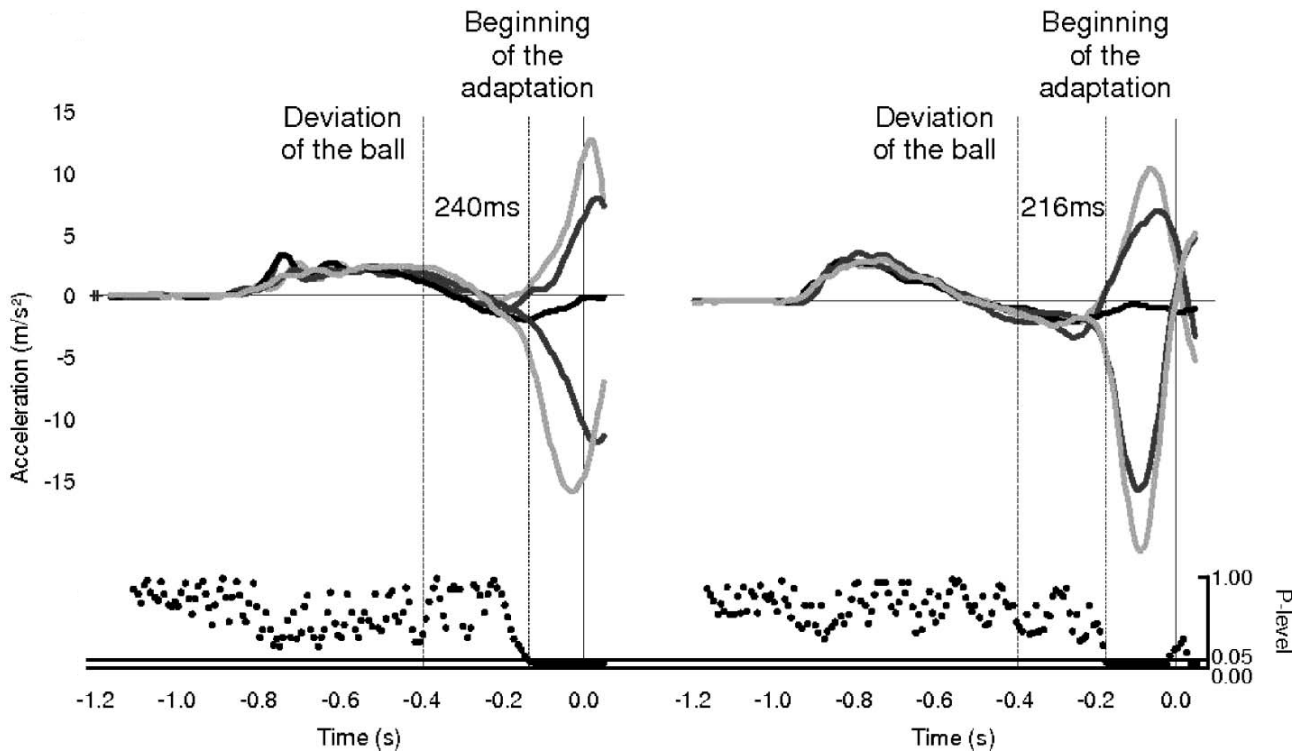


FIGURE 27: En haut, évolution de l'accélération avant interception dans les cinq trajectoires (Gg , Gp , M , Dp , Dg ; avec : G = Gauche, D = Droite, g = grande amplitude, p = petite amplitude). En bas, évolution de la valeur P de l'ANOVA. Lorsque $T=0s$, la balle est arrivée sur l'axe horizontal. À $T=0.4s$, la balle dévie. Le début de la première adaptation est détecté lorsque $P < 0.05$. Les résultats montrent un délai visuo-moteur plus court chez les experts (216 ms) que les non-experts (240 ms) (Le Runigo et al., 2010).

Le délai visuo-moteur apparaît donc comme un déterminant de l'expertise en sports de balle (Le Runigo et al., 2005, 2010). Les experts ont des délais visuo-moteur plus courts qui leur permettent de réguler avec une moindre inertie et donc plus précisément leurs actions, notamment face à des situations imprévisibles (Le Runigo et al., 2005, 2010). On peut supposer que ces moindres délais permettent d'être plus précis face à tout type de trajectoire en effectuant davantage d'ajustements dans des délais plus courts.

De manière plus générale, l'expertise serait liée selon l'approche écologique aux capacités des experts à explorer, optimiser et exploiter les lois de contrôle sur un mode prospectif, selon le niveau de difficulté de la tâche, pour maximiser l'efficacité du couplage perception-action. Dans ces conditions, la qualité du couplage se renforce entre information et mouvement afin de réussir la tâche. Dans le chapitre suivant, nous allons présenter les caractéristiques générales des tâches de poursuites visuo-manuelle qui paraissent présenter des

possibilités intéressantes pour étudier les processus prédictifs et prospectifs impliqués dans la production et la régulation du mouvement pour interagir avec des objets mobiles.

Chapitre 3

Tâche de poursuite visuo-manuelle

Sommaire

3.1	Introduction	66
3.2	Rappel historique des tâches de poursuite visuo-manuelle	67
3.3	Les tâches de poursuite visuo-manuelles selon les différentes approches . . .	69

3.1 Introduction

Dans le cadre de cette thèse, nous avons fait le choix d'utiliser dans plusieurs expériences des tâches de poursuite visuo-manuelle pour tester nos hypothèses prédictives et prospectives. Ces tâches consistent à déplacer un effecteur de manière à le maintenir le plus près possible d'une cible en mouvement soit en interaction avec l'écran d'affichage (directement avec la main ou un stylet), soit à l'aide d'un dispositif externe relié à l'écran (souris ou stylet). Ce choix a été motivé par le fait que ces tâches peuvent théoriquement impliquer à la fois des processus prédictifs d'anticipation de la trajectoire et des processus prospectifs de régulation continue. Globalement, ces tâches nécessitent un contrôle précis du mouvement et des adaptations face aux déplacements de la cible qui sont plus ou moins prévisibles comme c'est le cas dans les sports de balle. D'ailleurs, ces tâches de poursuite correspondent d'une certaine façon à des tâches d'interception continues ou successives permettant l'acquisition de données particulièrement consistantes. Elles pourraient, dans le cas de résultats probants

sur la discrimination de l'expertise en sports de balle, servir de base à l'élaboration de test d'identification de ces qualités chez les jeunes.

3.2 Rappel historique des tâches de poursuite visuo-manuelle

Les tâches de poursuite visuo-manuelle ont été très utilisées à partir des années cinquante, pour étudier les capacités du système perceptivo-moteur à faire face aux interactions dans un environnement en mouvement (Adams, 1991; Conklin, 1957; Elkind, 1953; Garvey et Mitnick, 1957; Hartman et Fitts, 1955; Holding, 1959; Mather et Puchat, 1983; McRuer et Krendel, 1959b,a; Noble, Fitts, et Warren, 1955; Notterman et Tufano, 1980; Poulton, 1952a,b, 1957). D'autres travaux plus récents ont continué à explorer ces tâches de poursuite (e.g., (Wimmers, Beek, et van Wieringen, 1992; Byblow, Chua, et Goodman, 1995; Peper et Beek, 1998; Buekers, Bogaerts, Swinnen, et Helsen, 2000; Liao et Jagacinski, 2000; Wilson, Collins, et Bingham, 2005). Plusieurs techniques ont été mises au point pour mettre en œuvre ces tâches. Par exemple, (Davol, Hastings, et Klein, 1965) ainsi que (Dunham, Allan, et Winter, 1985) ont utilisé le dispositif expérimental de (Wilhelmine, 1922) qui est représenté par un appareil à poursuite rotative avec lequel les participants devaient maintenir un contact entre un stylet tenu à une main et une cible posée sur un disque en mouvement rotatoire (Voir Figure 28).

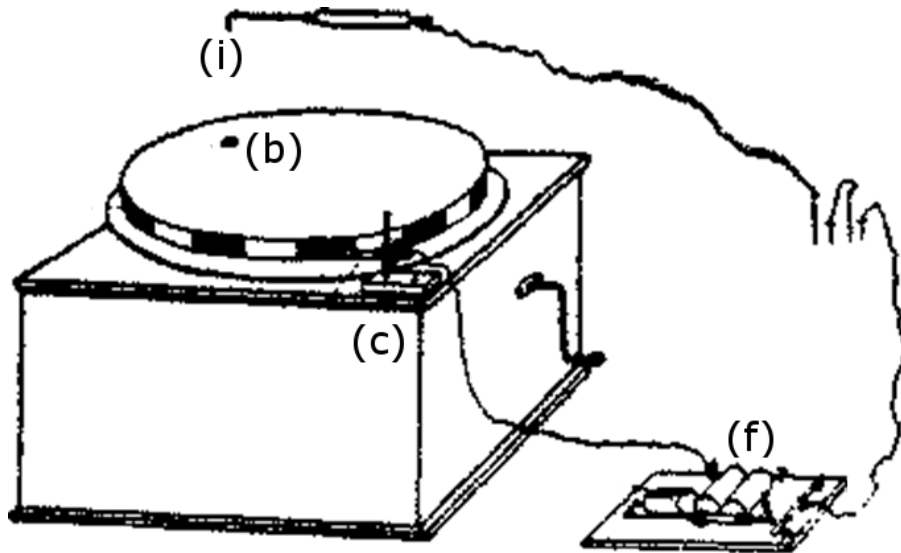


FIGURE 28: Dispositif expérimental proposé par (Koerth, 1922), repris par (Davol et al., 1965) ainsi que (Dunham et al., 1985). Le participant devait poursuivre la cible (b) et l'intercepter à l'aide d'un stylet (i). La cible peut avoir plusieurs vitesses. Le commutateur (c) incrémente à l'aide d'un compteur (f) si le contact entre le stylet du participant et la cible est maintenu au bout de 100 ms.

(van der Meulen, Gooskens, Denier van der Gon, Gielen, et Wilhelm, 1990) ont utilisé deux rails de diodes électroluminescentes (LED), l'une indiquant le déplacement de la cible et l'autre le déplacement de l'effecteur. Le participant devait déplacer l'effecteur à l'aide d'une poignée pour suivre la cible. (Mounoud, Viviani, Hauert, et Guyon, 1985) ainsi que (Zanone, 1990) ont utilisé une tâche qui consiste à suivre le plus précisément possible le déplacement d'une cible lumineuse rouge projetée sur un écran avec un marqueur lumineux blanc en appliquant des rotations de l'avant-bras. Les participants étaient positionnés devant un écran. L'avant-bras droit était fixé à une attelle en métal qui pouvait tourner sans friction sur le plan horizontal (Figure 29). Le mouvement de l'avant-bras mobilisait un potentiomètre monté sur l'axe de rotation (P) de l'attelle. Une source lumineuse blanche à l'extrémité de l'attelle projetait un marqueur circulaire sur l'écran. Du côté opposé de l'écran, une autre source lumineuse rouge (L) était projetée sur un miroir galvanométrique (G). En appliquant une rotation du miroir, il était possible de déplacer horizontalement la lumière rouge (T) sur l'écran. La sortie du potentiomètre de l'attelle, ainsi que la commande de rotation du miroir étaient enregistrées par un système d'acquisition pour sauvegarder l'évolution des mouvements angulaire de l'avant-bras et de l'angle de rotation du miroir.

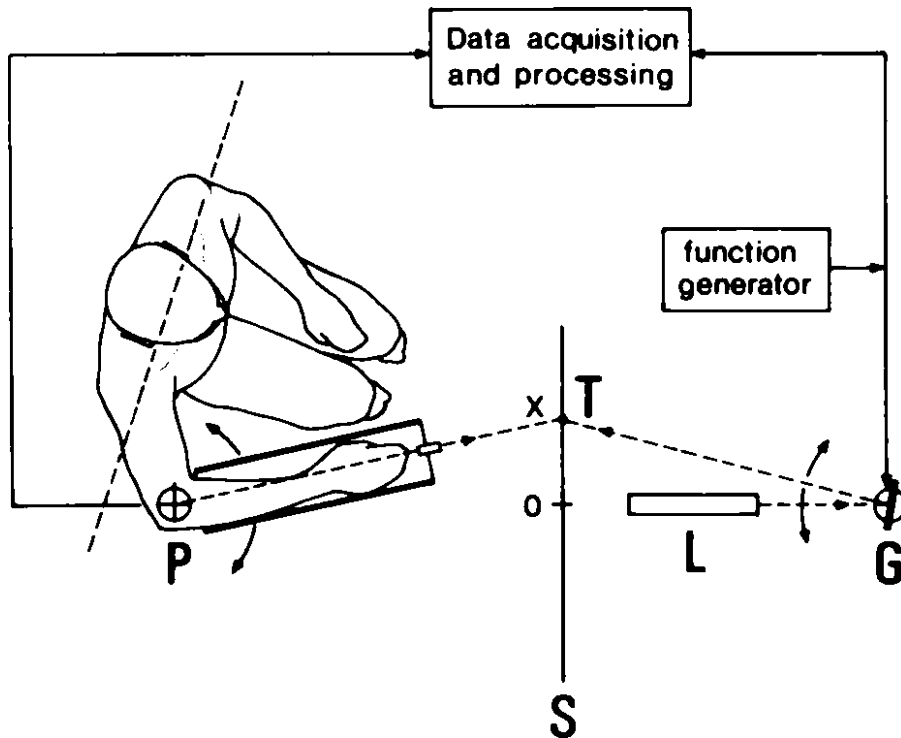


FIGURE 29: Présentation du dispositif expérimental de (Mounoud et al., 1985). Le participant contrôlait la position (x) du marqueur lumineux sur l'écran (S) en appliquant des rotations de son avant-bras. Un potentiomètre (P) mesurait les angles de la rotation de l'axe de l'avant-bras. Une source lumineuse (L) est réfléchié par un miroir d'un galvanomètre (G) et projetait un second marqueur (T) sur l'écran. Les angles de l'avant-bras et du miroir étaient enregistrés pour mesurer la précision de la tâche.

3.3 Les tâches de poursuite visuo-manuelles selon les différentes approches

Les tâches de poursuite visuo-manuelle ont été étudiées dans un premier temps dans le cadre de l'approche cognitive. Il a été proposé que pour réussir à poursuivre une cible, il soit nécessaire d'adopter un contrôle en feedforward dans lequel la poursuite se fait grâce à une succession de prédiction-programmation anticipée du mouvement de l'effecteur par rapport à ceux de la cible. Ainsi, les participants utilisent la trajectoire de la cible pour construire une représentation interne de son mouvement. Cette représentation peut être utilisée pour prédire quand et où l'objet se dirigera et où il réapparaîtra dans le cas d'une occlusion temporaire (e.g., (Spelke, Katz, Purcell, Ehrlich, et Breinlinger, 1994)). L'anticipation de la position de la

cible se fait ainsi à l'aide de modèles internes qui jouent un rôle important dans le contrôle des mouvements de poursuite.

Dans le cas où la vitesse de la cible à suivre est faible, la rétroaction visuelle en ligne, qui tient compte de la position et de l'erreur de la vitesse, est suffisante pour apporter les corrections nécessaires et à accomplir la tâche. Cependant, lorsque la vitesse de la cible augmente, la poursuite montrera inévitablement davantage d'erreurs par rapport au mouvement de la cible. Par conséquent, il est nécessaire de mettre à jour le programme moteur en cours sur la base des informations entrantes. Par exemple, dans une tâche de poursuite (cible-curseur), il est possible de percevoir si le curseur se trouve sur la cible ou non. Cependant, les corrections basées sur cette information de retour ne seraient pas suffisantes en raison du délai visuo-moteur : la cible est simplement en train de bouger trop vite et la correction serait faite trop tard, engendrant une mauvaise performance de poursuite. Cela souligne la nécessité d'un modèle prédictif incluant à la fois la position future de la cible, sa vitesse et son éventuelle accélération. Le modèle prédictif doit être mis à jour régulièrement. Ceci va être réalisé constamment à l'aide d'informations visuelles et proprioceptives sur les mouvements effectués au cours de l'exécution de la tâche. Dans ce contexte, les tâches de poursuite ont par exemple été fréquemment utilisées pour étudier le développement des mécanismes de régulation du mouvement. Il a ainsi été possible de montrer une stratégie de poursuite séquentielle dans laquelle des segments de trajectoire courts et successifs sont planifiés et exécutés en tant que mouvements balistiques indépendants chez les enfants de 5 à 9 ans ([Hauert, Zanone, et Mounoud, 1990](#)). A l'âge de 15 ans, il semble que la stratégie en feed-forward soit en place ([Zanone, 1990](#)).

Toujours dans ce même cadre théorique, ([Viviani, Campadelli, et Mounoud, 1987](#)) ont étudié le comportement des participants dans une tâche de poursuite visuo-manuelle. Cinq trajectoires bidimensionnelles à vitesse variable ont été improvisées par un participant (Figure 30). Ces cinq trajectoires ont servi de trajectoires de la cible dans la condition normale (condition N). Une transformation de ces trajectoires a été appliquée pour rendre la vitesse constante, ce qui correspond aux trajectoires transformées (condition T). Parmi les nombreuses variables traitées, une des principales et la plus caractéristique a été le délai instantané δ entre la cible et l'effecteur (c'est-à-dire le temps requis pour que l'effecteur, en fonction de sa vitesse, rejoigne la cible à chaque instant, ce qui revient à calculer une erreur temporelle). Pour calculer ce délai, le rapport entre l'erreur de position et la vitesse de la cible a été opéré :

$$\frac{T(t) - P(t)}{P'(t)} = \delta(t) \quad (\text{Équation 11})$$

avec P la position de l'effecteur, P' la vitesse de l'effecteur, T la position de la cible.

Les résultats ont montré que la performance s'améliorait à travers la répétition des essais. En effet, la stratégie de poursuite est modifiée de façon significative dans la condition T (cible ayant une vitesse tangentielle constante) par rapport à la condition N (cible ayant une accélération). Le choix de la stratégie adoptée repose sur l'ajustement d'un coefficient pondérant l'erreur de vitesse, qui représente le degré de couplage. Les auteurs ont aussi développé un modèle de poursuite basé sur les variables suivantes : l'erreur de position, l'erreur de vitesse et le délai instantané (le délai instantané moyen des participants était de 104 ms). L'adéquation de ce modèle a été testée à l'aide d'une analyse de régression multiple. Les résultats de cette validation du modèle ont montré une moyenne du coefficient de corrélation de 0,92.

Plus récemment, les tâches de poursuite visuo-manuelle ont été utilisées d'un point de vue dynamique pour étudier le couplage perception-action. Dans ce contexte, (Buekers *et al.*, 2000) ont étudié l'influence de la force du couplage perception-action sur la performance de poursuite. Un stimulus lumineux se déplaçait de droite à gauche avec quatre conditions possibles : deux conditions de visualisation (intermittent vs. continu) et deux modes de synchronisation (poursuite en phase, c'est-à-dire dans la même direction que la lumière et d'antiphase, c'est-à-dire que le bras se déplace dans la direction opposée) (Figure 31). Les participants devaient synchroniser le mouvement de leur bras avec la lumière du stimulus. Les résultats ont révélé une meilleure synchronisation lorsque le bras et la lumière étaient dans la même direction et dans la condition de visualisation continue. Cela s'appuie sur la nécessité d'avoir premièrement un contrôle permanent du geste dans une tâche, et deuxièmement qu'une même direction renforce l'unité perceptive du flux optique et la rend plus exploitable. La force du couplage perception-action a donc un impact sur la qualité de synchronisation du mouvement dans les conditions les plus difficiles.

Bien que de nombreux travaux aient utilisé les tâches de poursuite visuo-manuelle, elles gardent un potentiel très important à explorer notamment pour questionner les modes prédictifs et prospectifs du contrôle moteur. Concernant ce deuxième mode de contrôle, peu d'études ont été envisagées pour tester l'efficacité des couplages perception-action au sens écologique sous la

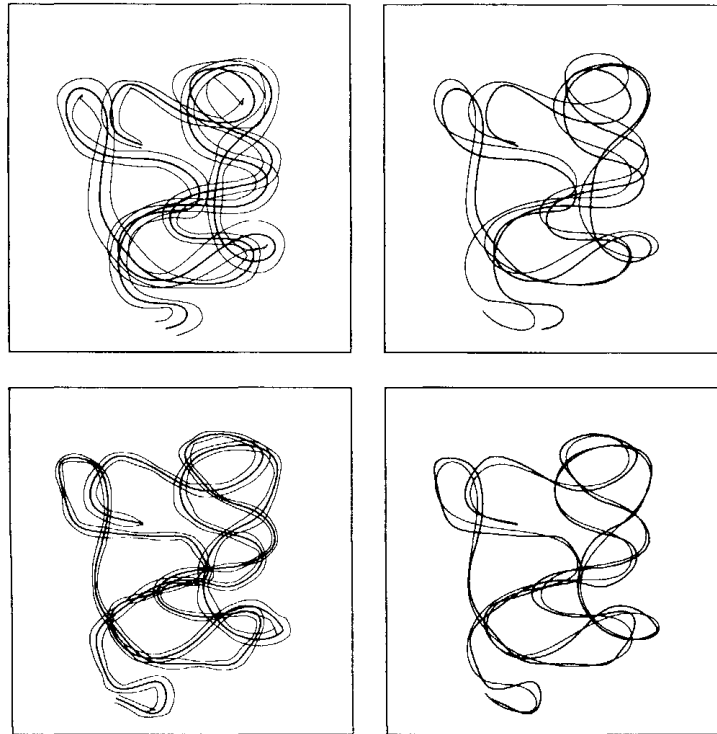


FIGURE 30: Exemples typiques de trajectoires de poursuite entre deux sujets (un sujet par ligne). Le sujet présenté sur la 1ère ligne est le moins précis et le plus variable, tandis que celui de la 2ème ligne est le plus cohérent et précis. Dans la 1ère colonne, la ligne épaisse représente la trajectoire moyenne de l'effecteur, les deux lignes fines autour de la ligne épaisse représentent l'enveloppe de la variabilité de la trajectoire de l'effecteur. Dans la 2ème colonne, la ligne épaisse représente la trajectoire moyenne de l'effecteur, la ligne fine représente la trajectoire moyenne de la cible (Viviani et al., 1987).

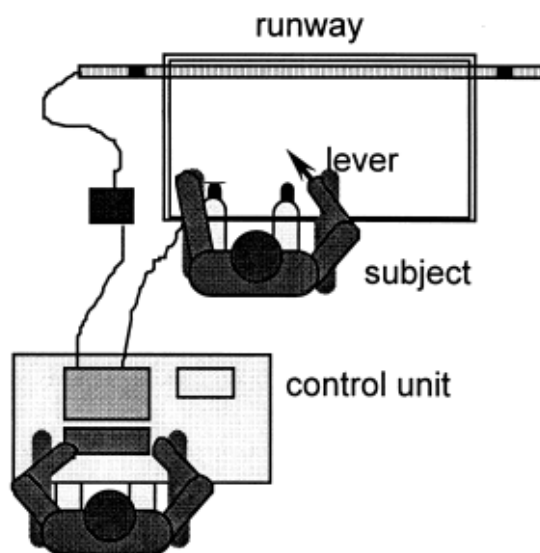


FIGURE 31: Présentation du dispositif expérimental de synchronisation du mouvement du bras (Buckers et al., 2000). Le participant devait suivre à l'aide d'un levier la lumière qui peut se déplacer sur un rail de 640 LED. Les mouvements du bras doivent être exécutés de façon synchrone avec le mouvement de lumière qui traverse de gauche à droite et inversement le rail.

forme de lois de contrôle. Nous chercherons ainsi à montrer des éléments de réponse par rapport à l'implication de processus prédictifs et/ou prospectifs à l'aide des mesures discrètes. Dans ce but, nous manipulerons précisément les paramètres cinématiques des cibles pour faire varier le degré de prédictibilité des mouvements de la cible avec des vitesses constantes, accélérées, décélérées, des rebonds sur les parois de l'espace de déplacement et des déviations inattendues.

Chapitre 4

Intérêt de la réalité virtuelle pour étudier la perception et l'action

Sommaire

4.1 Introduction	74
4.2 Réalité virtuelle au service de l'étude des processus perceptifs et moteurs dans le sport	75

4.1 Introduction

L'intérêt de la réalité virtuelle est de créer des simulations numériques dans des environnements immersifs. La réalité virtuelle a été développée durant les années 1960, pour faciliter la formation du personnel de l'aviation militaire (e.g., (Arnaldi, Fuchs, et Tisseau, 2003)), en reproduisant virtuellement des situations réalistes d'opérations. La description donnée par Fuchs en 1996 permet de comprendre les enjeux de la réalité virtuelle¹. La réalité virtuelle regroupe plusieurs technologies afin de créer un environnement artificiel, permettant au participant d'être immergé et d'interagir dans un monde non-réel mais pouvant s'en rapprocher. Plusieurs définitions de la réalité virtuelle sont possibles selon la technologie utilisée (pour

1. "La finalité de la réalité virtuelle est de permettre à une personne (ou à plusieurs) une activité sensorimotrice et cognitive dans un monde artificiel, créé numériquement, qui peut être imaginaire, symbolique ou une simulation de certains aspects du monde réel", (Fuchs, 1996).

percevoir) et les périphériques d'interaction (pour se déplacer) (McMenemy et Ferguson, 2007). Ces derniers permettent de traduire les intentions et les actions des participants. Par exemple, le mouvement du stylet d'une tablette peut être perçu comme une intention de l'action de "suivre". Ce suivi pourrait correspondre au suivi d'un ballon dans un sport de balle, afin de l'intercepter. Les informations données par le participant via les périphériques sont traitées par l'ordinateur et permettent de générer un nouvel état du monde virtuel en temps réel. Toutefois, la mise à jour de l'environnement n'est pas immédiate, et une prise en compte particulière doit être accordée à la latence des différents composants. Celle-ci doit être suffisamment faible pour ne pas influencer le degré d'immersion du participant dans le monde virtuel (Arnaldi *et al.*, 2003). La latence pourrait être issue de certaines limites technologiques telles que la vitesse de calcul à la seconde, la fréquence d'acquisition des périphériques, ou la fréquence d'affichage.

Dans ce contexte, l'immersion peut être définie pour le participant comme l'impression d'être dans un environnement cohérent lui permettant de percevoir et d'agir comme il pourrait le faire en situation réelle (Burdea et Coiffet, 1993; Larrue, 2011). La réalité virtuelle doit présenter un environnement à la fois vraisemblable et contrôlable. Les champs d'applications de la réalité virtuelle sont vastes et nous ne pouvons pas en dresser une liste exhaustive.

Les différentes sections de cette partie sont organisées de la façon suivante. La première section présente différents intérêts de la réalité virtuelle. Dans une deuxième section, nous allons présenter quelques exemples pour illustrer la diversité des utilisations de la réalité virtuelle pour étudier les processus perceptivo-cognitifs dans le domaine sportif (e.g., (Abernethy et Zawi, 2007; Bideau, Kulpa, Vignais, Brault, Multon, et Craig, 2009; Ward, Williams, et Bennett, 2002)). La troisième section traite des limites de la réalité virtuelle. La dernière section précise l'approche que nous avons adoptée concernant la réalité virtuelle pour mener nos expériences.

4.2 Réalité virtuelle au service de l'étude des processus perceptifs et moteurs dans le sport

Les environnements virtuels peuvent potentiellement servir pour tester et entraîner des sportifs de différents niveaux en reproduisant les situations rencontrées sur le terrain. La réalité virtuelle peut ainsi être utilisée comme outil pour analyser et comprendre les performances dans le sport (e.g., (Bideau, Kulpa, Vignais, Brault, Multon, et Craig, 2010)). De plus, la réalité

virtuelle paraît être un bon outil pour étudier les informations qui permettent de guider l'action dans un contexte sportif. En effet, de nombreux travaux se sont intéressés à l'utilisation de la réalité virtuelle pour comprendre les stratégies visuelles, ainsi que les processus perceptifs et moteurs impliqués lors de tâches d'interception (Chardenon, Montagne, Buekers, et Laurent, 2002; Fink, Foo, et Warren, 2009; Zaal et Bootsma, 2011). De même, la réalité virtuelle a permis d'étudier les habiletés nécessaires à l'exécution de tâches motrices complexes telles qu'intercepter une balle (Multon, Kulpa, et Bideau, 2011). D'autres travaux ont développé des environnements virtuels dans lesquels les participants pouvaient jouer au tennis contre un avatar (Molet, Aubel, Capin, Carion, Lee, Magnenat-Thalmann, Noser, Pandzic, Sannier, et Thalmann, 1999; Noser, Pandzic, Capin, Thalmann, et Thalmann, 1996). Les travaux de (Craig *et al.*, 2006) ont étudié la capacité d'estimation de la trajectoire de la balle avec différentes courbures lors d'un coup franc au football. (Bideau, Kulpa, Ménardais, Fradet, Multon, Delamarche, et Arnaldi, 2003) ont travaillé sur la comparaison entre un environnement virtuel immersif avec des avatars vs. un environnement réel. L'objectif était de vérifier si les réponses des gardiens de but dans un environnement virtuel étaient similaires à celles produites au cours d'une expérience en situation réelle. Ensuite, sur la base de ces travaux, ils ont mené d'autres études sur les stratégies visuelles des gardiens de but en handball dans l'environnement virtuel validé (Bideau, Multon, Kulpa, Fradet, Arnaldi, et Delamarche, 2004; Vignais, Bideau, Craig, Brault, Multon, et Kulpa, 2009; Vignais, Kulpa, Craig, et Bideau, 2010; Vignais, Kulpa, Brault, Presse, et Bideau, 2015).

Pour comprendre quelles informations sont utilisées par un joueur pour détecter une feinte, Brault et ses collègues ont créé et animé un attaquant virtuel au rugby à partir de capture de mouvement sur des joueurs de haut-niveau (Brault, Bideau, Kulpa, et Craig, 2012). Cette technologie permet aux participants d'explorer visuellement leur environnement et d'étudier le couplage perception-action. (Vignais *et al.*, 2015) ont simulé un environnement virtuel de handball pour étudier la performance des gardiens de but de handball dans une tâche de jugement d'emplacement de balle et dans une autre d'interception directe avec une balle virtuelle. Leur but était aussi de comparer la technologie la plus appropriée pour étudier la capacité d'analyse visuelle dans des situations sportives simulées : clips vidéo vs. environnements virtuels. Ils ont par exemple montré que les pourcentages de bonnes réponses étaient plus élevés pour la tâche conçue en réalité virtuelle que pour la tâche avec les clips vidéo.

L'utilisation de la réalité virtuelle présente plusieurs avantages par rapport à d'autres méthodes telles que la présentation de clips vidéo (Abernethy, Thomas, et Thomas, 1993; Bideau

et al., 2010; Williams, Davids, Burwitz, et Williams, 1994). Non seulement des informations stéréoscopiques par la vision binoculaire sur la profondeur peuvent être extraites, mais aussi, le rendu 3D de la scène est recalculé de façon dynamique en tenant compte du suivi de la tête du sujet. Ces avantages permettent de renforcer l'immersion du participant dans le monde virtuel (Sanchez-Vives et Slater, 2005; Slater, Khanna, Mortensen, et Yu, 2009). Dans l'étude de (Vignais *et al.*, 2009), les gardiens de but pouvaient interagir librement et bouger leur tête sans contraintes à la fois dans les tâches de jugement et dans les tâches d'interception. Pour cela, trois projecteurs étaient synchronisés pour projeter un environnement 3D sur un large écran cylindrique et des lunettes stéréoscopiques ont été utilisées pour permettre aux joueurs de percevoir la scène en 3D. Le dernier grand intérêt de la réalité virtuelle est de donner la possibilité de contrôler de manière systématique toutes les informations fournies aux participants, tout en garantissant la reproductibilité des essais. C'est précisément pour cette raison que la réalité virtuelle est de plus en plus utilisée pour l'étude des processus perceptifs et moteurs dans le sport.

Dans cette partie nous avons présenté quelques expériences qui ont démontré l'utilité de la réalité virtuelle comme un outil pour mener des expériences spécifiques. Un élément important de validité de la réalité virtuelle est de montrer des comportements comparables à ceux produits dans le monde réel. Si on prend le cas de l'expertise et que l'on utilise la réalité virtuelle pour l'étudier, cette dernière doit, par exemple, être en mesure de révéler les différences entre experts et novices. La technologie et la sophistication des dispositifs sont finalement secondaires au regard de cet objectif. C'est précisément ce dernier objectif que nous avons poursuivi dans ce travail de thèse.

Problématique générale

Les recherches réalisées dans le domaine de la performance sportive ont montré que dans le cadre de l'approche cognitiviste, l'expertise pouvait s'appuyer sur des qualités d'anticipation et de prédiction des événements dans l'environnement, notamment par rapport aux actions adverses ou face à des situations tactiques, mais également des trajectoires de balle (e.g. (Abernethy, 1987, 1991; Williams, Davids, Burwitz, et Williams, 1993; Tyldesley et Whiting, 1975)). Même si, à notre connaissance, cela n'a jamais été explicitement formulé, ces qualités pourraient/devraient être aussi caractérisées par l'utilisation de modèles internes prédictifs reposant sur une intériorisation des propriétés physiques de l'environnement ; par exemple la gravité telle que cela a été proposé par l'équipe de Lacquaniti et collaborateurs (e.g., (Zago et Lacquaniti, 2005a)).

D'un autre côté, des travaux fondés sur l'approche écologique proposée par (Gibson, 1979) considèrent que le mouvement est régulé selon un mode prospectif, c'est-à-dire sans internalisation des propriétés de l'environnement avec une recherche d'invariants qui suffisent à la réalisation d'actions efficaces. L'expertise dans ce cadre pourrait reposer sur l'optimisation du couplage perception-action au niveau des lois de contrôle telles qu'elles ont été définies par (Warren, 1988, 2006). Dans ce cadre, les travaux princeps de (Bootsma et Van Wieringen, 1990) ont montré que la plus grande précision et régularité des experts était le résultat d'un meilleur couplage. (Le Runigo *et al.*, 2005, 2010) ont mis en évidence des adaptations et régulations optimisées des experts face à des trajectoires imprévisibles.

Afin d'alimenter ce débat et d'apporter des données empiriques pour le faire progresser, nous avons choisi d'utiliser la réalité virtuelle qui permet de générer et manipuler des environnements de différents niveaux de complexité. Nous avons également abordé la question de l'expertise en sports de balle afin de révéler l'implication et l'optimisation de processus perceptivo-cognitifs et/ou perceptivo-moteurs dans ce type de tâche. Pour cela nous avons mis en place des situations expérimentales dont nous supposons qu'elles sollicitent les mêmes processus impliqués dans des tâches réelles. Dans le cadre d'une littérature qui n'est pas univoque, nous avons eu pour objectif de tester différentes hypothèses qui peuvent paraître opposées, mais qui pourraient être complémentaires (Benguigui *et al.*, 2008; Van der Kamp, Rivas, Van Doorn, et Savelsbergh, 2008). Cela pourrait correspondre à une approche intégratrice dans laquelle il s'agirait d'identifier les différents processus mis en jeu entre prédiction et prospection et déterminer leur implication respective. Cette nouvelle approche remet en cause les postulats exclusifs de chacune des deux approches, mais elle permettrait d'avoir une compréhension plus complète de la perception et de la motricité.

Il est ainsi possible de supposer que l'expertise puisse être liée à des mécanismes prédictifs de discrimination optimisés permettant par exemple de mieux prédire les trajectoires (e.g., (Mann *et al.*, 2007)) et/ou à des mécanismes prospectifs permettant de mieux réguler l'action sans a priori sur les trajectoires de balle (Bootsma et Van Wieringen, 1990). Néanmoins, dans le cadre des limites qui ont été identifiées dans la théorie des modèles internes appliqués à la perception et au contrôle de l'action face aux trajectoires de balle complexes (Baurès *et al.*, 2007), nous avons émis l'hypothèse d'effets plus prononcés de l'expertise dans le registre perceptivo-moteur que dans le registre perceptivo-cognitif. Ces effets plus prononcés devraient se manifester par des régulations et des adaptations optimisées.

Dans une première partie expérimentale, nous avons réalisé trois expériences en réalité virtuelle et avec des vidéos en prenant comme support l'activité basket. Le but était d'identifier des spécificités chez les experts en sports de balle, en explorant les processus perceptivo-cognitifs et perceptivo-moteurs. Pour cela, nous avons d'abord mis en place deux expériences de jugement pour tenter de différencier les experts des non-experts au niveau de leurs capacités perceptivo-cognitives. Ces tâches consistaient à évaluer la hauteur d'un rebond de basket modifié. Nous avons d'abord proposé une tâche conçue dans un environnement virtuel dans laquelle soit le coefficient de rebond, soit la gravité étaient modifiés. Ensuite, nous avons utilisé des séquences vidéo filmées en situation réelle dans laquelle seul le coefficient de rebond était modifié. Cette deuxième expérience a été conçue pour nous assurer que les résultats obtenus dans la première expérience n'étaient pas directement liés à l'environnement virtuel utilisé. Dans ces deux tâches, il était possible de tester l'hypothèse que l'expertise pouvait se manifester par de meilleures capacités de discrimination développées particulièrement par les experts, et ceci grâce à l'utilisation de modèles internes plus précis des propriétés de la trajectoire de balle développés dans le cadre de leur expertise.

Dans une troisième expérience utilisant l'environnement virtuel de la première expérience, nous avons mis en place une tâche perceptivo-motrice de poursuite. Dans cette expérience, nous avons fait l'hypothèse que les experts manifesteraient des capacités d'adaptation supérieures grâce à des régulations optimisées. Dans cette expérience, nous nous attendions à des résultats plus discriminants entre les experts et les non-experts, démontrant des capacités de régulation plus importantes. Ainsi, nous avons prévu dans une seconde partie de réaliser trois autres expériences pour tester plus précisément les qualités des régulations chez les experts et de vérifier la possibilité de montrer ces qualités dans un environnement virtuel même très

schématique. Il est à noter que des résultats inverses nous auraient amenés à revoir très largement cette seconde partie expérimentale.

Les deux premières expériences de cette seconde partie ont été conçues dans un environnement très schématique en 2D avec des trajectoires plus ou moins prévisibles (vitesse constante, vitesse accélérée, rebonds et déviations inattendues). Nous avons émis l'hypothèse que même dans un environnement avec une tâche très schématique, il était possible de révéler des différences entre experts et non-experts à condition de solliciter suffisamment la mise en jeu de processus de régulation du mouvement. Nous avons ainsi supposé que les experts seraient plus particulièrement efficaces dans les conditions les moins prévisibles, c'est-à-dire marquées par des accélérations et des changements de trajectoires.

Enfin, dans la continuité de ces deux dernières expériences, nous avons mis en place une troisième expérience de poursuite, mais cette fois dans un environnement 3D. L'objectif était de montrer que l'ajout de la composante de profondeur révélerait davantage les effets de l'expertise dans la mesure où les experts sont particulièrement impliqués dans cette dimension de l'environnement.

Deuxième partie

Études expérimentales

Chapitre 1

Première partie expérimentale : Étude des processus perceptivo-cognitifs et perceptivo-moteurs des experts en sports de balle

Sommaire

1.1	Introduction de la première partie expérimentale	84
1.2	Expérience 1 : Étude des jugements perceptivo-cognitifs dans un environnement virtuel sur des trajectoires modifiées d'un ballon de basket chez des experts et non-experts	86
1.2.1	Introduction	86
1.2.2	Méthode	87
1.2.3	Résultats	95
1.2.4	Discussion	99
1.3	Expérience 2 : Etude des jugements perceptivo-cognitifs dans un environnement réel (séquences vidéo) sur des trajectoires modifiées d'un ballon de basket chez des experts et non-experts	102
1.3.1	Introduction	102
1.3.2	Méthode	102
1.3.3	Résultats	108
1.3.4	Discussion	109

1.4	Expérience 3 : Etude des coordinations perceptivo-motrices dans un environnement virtuel sur des trajectoires modifiées d'un ballon de basket chez des experts et non-experts	110
1.4.1	Introduction	110
1.4.2	Méthode	112
1.4.3	Résultats	117
1.4.4	Discussion	125
1.5	Conclusion	128

1.1 Introduction de la première partie expérimentale

Comme nous l'avons déjà évoqué dans le chapitre 2, l'approche cognitive suggère l'utilisation de modèles internes prédictifs se basant sur une intériorisation des propriétés des trajectoires de balle telle que la gravité (e.g., (Zago et Lacquaniti, 2005b; Bosco *et al.*, 2012; Russo *et al.*, 2017)). De plus, nous avons vu que les études de (Hayhoe *et al.*, 2005) et (Diaz *et al.*, 2013) ont montré qu'une anticipation d'un rebond de balle est possible, et ceci grâce à une représentation des propriétés dynamiques de l'environnement. En effet, dans ces études, les participants avaient une plus grande imprécision dans la poursuite de la balle (plus de saccades ont été observées) quand une balle élastique était utilisée à la place de la balle de tennis. Cette imprécision diminuait rapidement après quelques essais. Selon ces différents auteurs les modèles internes permettraient la prédiction de l'état futur des trajectoires. Par ailleurs, ces modèles internes pourraient être mis à jour rapidement lorsque des erreurs apparaissent.

En complément, de nombreuses recherches ont montré que les experts en sports de balle ont des capacités d'anticipation et de prédiction supérieures qui leur permettent de prédire l'évolution de certaines situations sportives (e.g., (Loffing et Hagemann, 2014; Williams *et al.*, 2009) ; voir la section 2.6). Par exemple, l'étude d'(Aglioti *et al.*, 2008) a montré dans une tâche de jugement de trajectoires de tir au basket-ball, que les joueurs experts parvenaient à prédire la trajectoire du ballon lors de lancers francs avec une meilleure précision que des non-experts en se basant sur des informations issues des actions de lancer du joueur. Selon les auteurs, cette meilleure précision provient de leurs expériences motrices et visuelles du tir qui leur permet de faire le lien entre le geste et sa réussite.

Dans le cadre de ces travaux qui proposent de démontrer d'une part que les experts ont des meilleures capacités d'anticipation et de prédiction et d'autre part que les modèles internes pourraient permettre de prédire les trajectoires de balle, l'objectif de cette première partie expérimentale était de vérifier si les experts en sports de balle étaient capables de mieux identifier des modifications des propriétés de trajectoire. En effet, dans la perspective qui vient d'être décrite, les experts devraient développer des modèles internes plus élaborés et précis par leurs expériences et cela devrait se traduire par de meilleures capacités à détecter des modifications des propriétés habituelles de ces trajectoires. Ceci devrait être un déterminant de l'expertise dans la capacité à se représenter des trajectoires de balle pour mieux les anticiper et devrait se manifester dans des tâches uniquement perceptives.

Nous avons ainsi réalisé deux expériences de jugements, ayant pour but de déterminer les seuils de perception des modifications des propriétés physiques de la trajectoire. Nous avons mis en place une première expérience de jugement de trajectoires d'un ballon de basket, dans un environnement virtuel 3D, avec des joueurs experts en basket et des non-experts afin de tester l'utilisation de représentations plus précises pour détecter des modifications de la gravité ou du coefficient de rebond (CR). Il est à noter que la question de la mise en jeu des représentations n'est pas uniquement fondamentale, elle peut avoir un apport dans la pratique sportive. En effet, la capacité de détection des modifications des propriétés physiques de la trajectoire pourrait être mise en jeu pour s'adapter à des conditions de pratique qui peuvent changer. C'est par exemple le cas quand les joueurs disputent un match avec un ballon différent de celui habituellement utilisé ou dans une salle avec un revêtement qu'ils ne connaissent pas. Une deuxième expérience de jugement a été réalisée en utilisant des séquences vidéo. Cette expérience avait comme objectif de confirmer les résultats de la première expérience et de vérifier qu'ils n'étaient pas dus seulement à un environnement virtuel trop éloigné de la réalité.

1.2 Expérience 1 : Étude des jugements perceptivo-cognitifs dans un environnement virtuel sur des trajectoires modifiées d'un ballon de basket chez des experts et non-experts

1.2.1 Introduction

Pour tester une possible supériorité des experts au plan perceptivo-cognitifs dans la capacité à détecter des modifications des propriétés de l'environnement grâce à des représentations ou modèles internes plus élaborés, nous avons réalisé une expérience de jugement de trajectoires de ballon avec des joueurs experts en basket et des non-experts. Cette expérience a été réalisée dans un environnement virtuel représentant un terrain de basket pour manipuler les paramètres cinématiques de rebond d'un ballon, ainsi que de gravité. Les participants devaient évaluer la hauteur du rebond de ballon en indiquant si ce rebond était trop haut ou trop bas par rapport à leurs attentes. Dans le cas d'utilisation de représentations plus précises des rebonds et/ou des effets de la gravité, il était attendu que les experts détectent mieux les modifications de trajectoires (avec un seuil de détection moins élevé et dans des délais plus courts). De plus, nous avons fait l'hypothèse que les participants, et particulièrement les experts, détecteraient plus rapidement les trajectoires de balle modifiées brutalement (issues de la modification du CR) que ceux modifiés progressivement (trajectoires issues de la modification de la gravité). En complément, l'hypothèse d'un effet de "Range" ("Range effect" que l'on peut traduire en effet de "Gamme") a été testé. Cet effet est observé lorsqu'on présente des variations d'une condition autour d'une valeur centrale de manière équilibrée et que les participants n'ont pas de valeur de référence préalablement établie. Dans ce cas, il considère implicitement que la valeur centrale est la référence et l'on observe une tendance à répondre autour de la valeur centrale de l'échantillon. Dans le cadre de l'hypothèse d'un modèle interne plus élaboré chez les experts, nous avons supposé que les experts seraient moins impactés par l'effet de Gamme et plus éloignés de la valeur centrale de la distribution pour être plus proche de la valeur de référence habituelle (la gravité terrestre et le coefficient de rebond habituel d'un ballon de basket).

1.2.2 Méthode

Population

Nous avons testé deux groupes différents, un premier d'experts et un second de non-experts. Le groupe des experts comprenait 16 joueurs de basket experts composé de neuf hommes et sept femmes (joueurs professionnels évoluant en Nationale 1 dans la ligue française, ayant au minimum 10 ans de pratique), avec une moyenne d'âge de 24 ans (± 4.11). Le groupe des non-experts était composé de 14 non-experts répartis en six hommes et huit femmes ayant peu ou pas de pratique sportive de sports de balle, avec une moyenne d'âge de 29 ans (± 6).

Dispositif expérimental

Le dispositif se composait d'un ordinateur de marque ACER qui pilotait le déroulement de scènes virtuelles de basket programmées avec le logiciel Virtools ©, un outil qui permet de créer des scènes en 3D. L'ordinateur permettait de projeter une image sur un écran semi-circulaire (5 × 2 m) par l'intermédiaire d'un vidéoprojecteur 3D de marque Optoma.

L'environnement virtuel a été conçu aux dimensions d'un terrain de basket de 28 × 15 m (Figure 32). Un joueur de basket a été placé au milieu de la scène. Ces éléments étaient fournis pour donner aux participants une métrique leur permettant de référencer leur jugement sur la hauteur du rebond du ballon. L'emplacement de la caméra virtuelle était configuré de telle façon que le participant se perçoive comme étant à 18 mètres de distance du milieu du terrain.

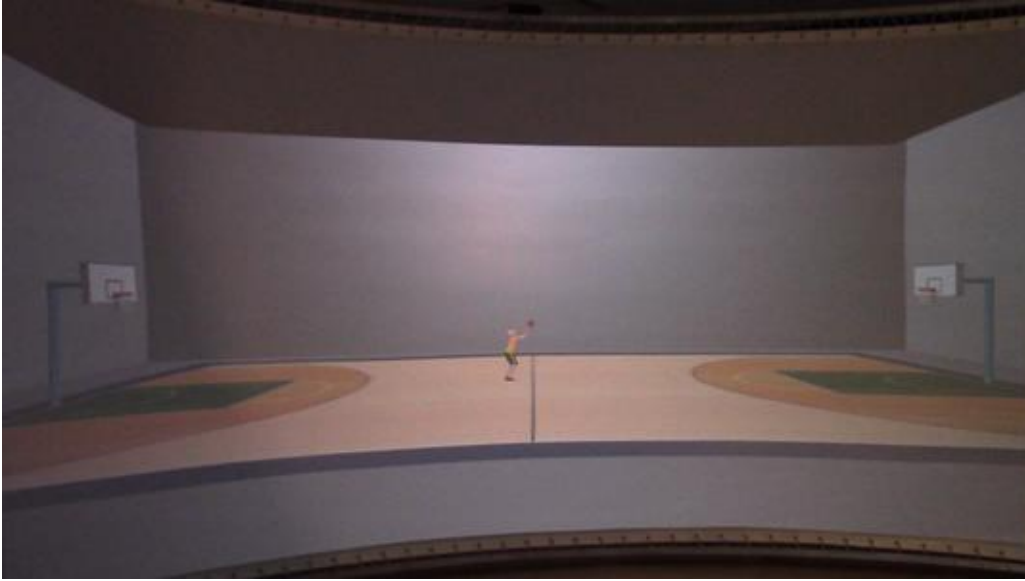


FIGURE 32: *Présentation de l'environnement virtuel conçu pour la tâche de jugement de la trajectoire post-rebond. Les panneaux de basket et le bonhomme ont été conçus dans la scène pour donner aux participants un référentiel de taille dans l'environnement.*

Tâche

La tâche de jugement perceptivo-cognitif de type psychophysique consistait à indiquer à l'aide d'un pavé numérique si les trajectoires présentées rebondissaient trop haut ou trop bas par rapport à ce qui est attendu. Il s'agissait d'appuyer sur l'une des deux touches "8" ou "2". Elles étaient respectivement marquées par une étiquette "H" (haut) et "B" (bas). Les trajectoires pouvaient être manipulées suite à une modification des valeurs de gravité ou du coefficient de rebond au moment du premier rebond. Le but était de déterminer le seuil de sensibilité dans la détection d'anomalie de hauteur de rebond liée à des modifications des constantes physiques de l'environnement. Plus de détails sur la tâche sont présentés dans la procédure.

Caractéristiques des trajectoires et conditions expérimentales

Le ballon avait une texture d'un ballon de basket et un diamètre de 24 cm dans l'environnement virtuel ce qui correspond à la taille d'un ballon de basket utilisé dans les catégories seniors telle que défini par les règles de la Fédération Internationale de Basket. Au début de l'essai, le ballon était placé dans les mains du joueur au centre de l'écran. Il était ensuite animé d'un déplacement vers le haut et vers la droite avant de rebondir plusieurs fois au sol

selon des principes cinématiques décrits ci-dessous. La durée de l'essai avait été programmée de manière à laisser voir une trajectoire de trois paraboles et deux rebonds (Figure 33). Toutes les caractéristiques des trajectoires programmées sont présentées dans le Tableau 1.

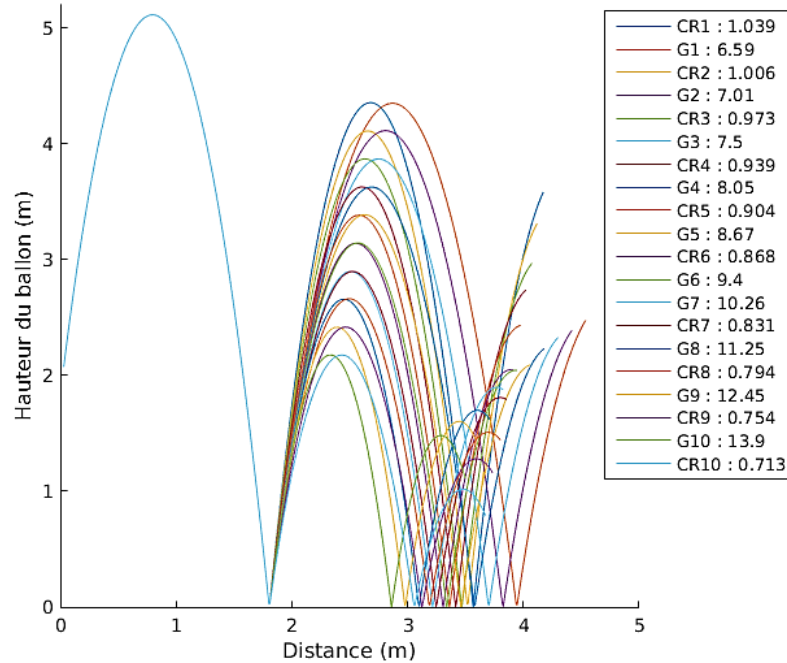


FIGURE 33: Représentation des trajectoires du ballon avec 20 trajectoires dans la condition de Gamme haute, avec la modification de la gravité (10 valeurs de gravité possibles : de G1 à G10) et la modification du coefficient de rebond (10 valeurs possibles : de CR1 à CR10) après le premier rebond pour une vitesse horizontale (1 m/s). Ces trajectoires sont dupliquées également avec une vitesse de 2 m/s pour construire le bloc de 40 essais.

Pour créer une certaine variabilité dans nos trajectoires et éviter que les participants ne prennent des repères de position fixe sur l'écran pour effectuer leur jugement, nous avons programmé pour chacune des trajectoires deux vitesses initiales horizontales (sur l'axe x) ($V_{x1} = 1\text{ m/s}$ et $V_{x2} = 2\text{ m/s}$). En revanche, la vitesse verticale sur l'axe y était de 8.37 m/s pour toutes les trajectoires, afin d'avoir la même hauteur de 5.11 m pour la trajectoire pré-rebond et une hauteur post-premier rebond dans les conditions physiques normales de 3 m. La résistance de l'air a été appliquée à chacune des trajectoires en s'appuyant sur l'équation suivante :

$$r = \frac{1}{2}C_x\rho S v^2 \quad (\text{Équation 12})$$

Tableau 1: Caractéristiques des 24 trajectoires modifiées. Chaque bloc est constitué de 20 trajectoires (soit de 1 à 20 ou de 5 à 24) dupliquées avec deux vitesses horizontales (1 m/s et 2 m/s).

Trajectoires	Hauteur			Durée de la	Durée de la	
G : Gravité	max post	Gravité	Coefficient	première	deuxième	Durée total de
CR : coefficient	rebond	(m/s^2)	de rebond	parabole	parabole	présentation (s)
de rebond	(m)			(s)	(s)	
G1	4.32	6.59	0.85	1.84	2.28	4.8
CR1	4.32	9.81	1.039	1.84	1.87	4.39
G2	4.08	7.01	0.85	1.84	2.15	4.67
CR2	4.08	9.81	1.006	1.84	1.81	4.33
G3	3.84	7.5	0.85	1.84	2.01	4.53
CR3	3.84	9.81	0.973	1.84	1.76	4.28
G4	3.6	8.05	0.85	1.84	1.88	4.4
CR4	3.6	9.81	0.939	1.84	1.7	4.22
G5	3.36	8.67	0.85	1.84	1.75	4.27
CR5	3.36	9.81	0.904	1.84	1.65	4.17
G6	3.12	9.4	0.85	1.84	1.62	4.14
CR6	3.12	9.81	0.868	1.84	1.58	4.1
G7	2.88	10.26	0.85	1.84	1.49	4.01
CR7	2.88	9.81	0.831	1.84	1.52	4.04
G8	2.64	11.25	0.85	1.84	1.36	3.88
CR8	2.64	9.81	0.794	1.84	1.46	3.98
G9	2.4	12.45	0.85	1.84	1.23	3.75
CR9	2.4	9.81	0.754	1.84	1.39	3.91
G10	2.16	13.9	0.85	1.84	1.11	3.63
CR10	2.16	9.81	0.713	1.84	1.32	3.84
G11	1.92	15.7	0.85	1.84	0.98	3.5
CR11	1.92	9.81	0.67	1.84	1.24	3.76
G12	1.68	18.1	0.85	1.84	0.85	3.37
CR12	1.68	9.81	0.624	1.84	1.16	3.68

où S désigne l'aire de la section du ballon en mouvement dans un plan perpendiculaire à la vitesse, v^2 la vitesse du ballon au carré (en m/s), C_x le coefficient de frottement "aérodynamique" du ballon équivalant dans le cas de notre ballon de basket à 0.54 qu'on appelait aussi le coefficient de traînée et p la masse volumique de l'air, soit 1.204 kg/m^3 dans des conditions de température et de pression standards (20°C et 1013 hPa).

Après le premier rebond, les ballons pouvaient prendre 12 valeurs différentes de gravité et 12 coefficients de rebond différents (Tableau 1). Le coefficient de rebond, appelé aussi coefficient de restitution, est défini comme le rapport entre la vitesse du ballon après et avant le rebond ($e = v \text{ après} / v \text{ avant}$). Il peut être calculé aussi en appliquant la racine du rapport entre la hauteur d'un rebond h_n et la hauteur du rebond précédent h_{n-1} . Il indique la quantité de vitesse conservée après la collision du ballon avec le sol. Afin de déduire le coefficient de rebond dans les conditions de jeux, nous nous sommes reposés sur le règlement officiel de basket en vigueur¹, dans lequel il est indiqué dans l'article 7.3 que le ballon doit "être gonflé à une pression telle que, si on le fait tomber sur le terrain de jeu d'une hauteur de 1800 mm environ, hauteur mesurée depuis la partie inférieure du ballon, il rebondisse à une hauteur comprise entre 1200 mm et 1400 mm, hauteur mesurée jusqu'à la partie supérieure du ballon".

A partir de ces conditions de trajectoires, deux blocs de 40 essais ont été programmés. Chacun de ces blocs était constitué de 10 hauteurs de rebond différentes qui étaient obtenues soit avec une modification de gravité et soit avec une modification de Coefficient de rebond, ce qui résultait par un total de 20 trajectoires post rebond différentes. La variation de hauteur des trajectoires dans chacun des deux blocs était de $\pm 24 \text{ cm}$ par rapport à la hauteur normale de rebond. A noter que chaque trajectoire était dupliquée avec les deux vitesses horizontales énoncées ci-dessus pour un total de 40 essais par blocs.

Afin de tester l'hypothèse liée à l'effet de Gamme, nous avons constitué deux différents blocs. Le premier bloc avec une Gamme haute et le second avec une Gamme basse. Dans la condition de Gamme haute, les 10 hauteurs post-rebond du ballon étaient programmées avec une étendue de 2.16 à 4.32 m pour une valeur centrale de 3.24 m. Dans la condition de Gamme basse, les 10 hauteurs post-rebond du ballon étaient programmées avec une étendue de 1.68 à 3.84 m pour une valeur centrale de 2.76 m.

1. http://www.ffbb.com/sites/default/files/sallesEtterrains/6-document_fiba-equipement_du_basketball_2014_-_vf2017-01-31.pdf

Procédure

Au début de l'expérience, une fiche de présentation de la tâche et une fiche de renseignement ont été données aux participants. De plus, un questionnaire a été proposé pour estimer le degré de motivation et de concentration avant et après le test ainsi que le degré de réalisme de la simulation (permettant d'évaluer la part de subjectivité dans les résultats et pour vérifier s'il pouvait y avoir des différences entre experts et non-experts sur ces dimensions), (voir Annexe A pour toutes les fiches présentées aux participants). Cette procédure a été mise en œuvre pour toutes les expériences de cette thèse. Néanmoins, les résultats n'ont jamais montré de différence entre experts et non-experts et nous avons fait le choix de ne pas présenter ces résultats. Des questions concernaient l'âge, la pratique sportive et la pratique des jeux vidéo étaient posées afin de pouvoir exclure certains participants ou éventuellement contrôler certains effets. Nous avons inclus les participants entre 18 et 40 ans, avec une pratique de jeu vidéo inférieur d'une heure par semaine, car d'après Sekular et ses collaborateurs en 2008, la pratique des jeux vidéo pourrait influencer les résultats sur ce type de tâches. Ensuite, les participants étaient équipés de lunettes 3D et du pavé numérique pour donner les réponses avec leur main préférentielle.

Les participants étaient ensuite informés du scénario de la tâche qu'ils allaient juger : "Vous allez voir des ballons de basket lancés vers le haut et qui rebondissent au sol. Vous devrez indiquer en pressant l'un des deux boutons du clavier si le ballon de basket a rebondi 'Trop haut' ou 'Trop bas' après le premier rebond par rapport à la hauteur que vous attendiez." Les participants avaient pour consigne de répondre aussitôt qu'ils se sentaient capables de juger le rebond du ballon. Il a été indiqué aux participants que la priorité devait être donnée au jugement de la hauteur, mais que le temps de réponse était pris en compte.

Avant chaque essai, un décompte ("3, 2, 1") était réalisé afin de prévenir le participant du départ du ballon. Chaque participant devait passer 3 fois le même bloc, ce qui lui faisait un total de 120 essais. Les essais à l'intérieur de chaque bloc étaient présentés dans un ordre aléatoire. Les participants étaient répartis aléatoirement dans une des deux conditions de Gamme "haut" ou "bas".

Variables dépendantes et analyses

Pour chaque participant, les réponses "trop haut" et "trop bas" ont été enregistrées afin de les transformer en réponses de types binaires pour chacune des conditions (i.e., la valeur "1" est retournée dans le cas où les participants considèrent que le ballon a rebondi trop haut, sinon la valeur "0" est retournée). A partir de ces données et pour chacune des deux conditions de cinématique que pouvaient être la modification de la gravité (G) ou la modification du coefficient de rebond (CR), nous avons calculé pour chaque participant des fonctions logistiques à partir des réponses "trop haut". A noter que nous aurions pu choisir les réponses "trop bas" sans que cela ne change la logique d'analyse ni les résultats.

Ces fonctions sont classiquement utilisées pour décrire les performances dans les tâches sensorielles de type psychophysique (e.g., (Treutwein et Strasburger, 1999)) et sont de la forme :

$$f(x) = \frac{1}{1 + e^{-(x-\alpha)/\beta}} \quad (\text{Équation 13})$$

Dans cette équation, la valeur de α désigne le centre de la courbe appelé aussi le biais (PSE : Point of Subjective Equality). Dans notre expérience, α correspondait à la hauteur à laquelle le participant obtenait un score de 50% de réponse "trop haut" (ou "trop bas" en l'occurrence) dans la reconnaissance de la hauteur de la trajectoire. Idéalement, ce pourcentage devait être situé au niveau de la valeur d'un rebond normal en l'occurrence 3 m. Un effet de Gamme pouvait être attendu avec un décalage de l'estimation de la valeur centrale attendue.

La variable β quant à elle indique la pente de la courbe, appelée le JND (Just Noticeable Difference). Dans notre expérience, β correspondait à la moitié de l'étendue de hauteur entre les scores de 25% à 75% de réponse "trop haut". Cette valeur traduit aussi l'étendue de la transition entre les réponses considérées comme certaines (inférieures à 25% et supérieures à 75%). Plus cette valeur est réduite, meilleure est la discrimination et donc le jugement perceptivo-cognitif.

Les temps de réponse ont été mesurés pour chaque essai en prenant en compte l'intervalle de temps entre le rebond du ballon et l'appui sur l'une des deux touches du clavier. Pour chaque participant, nous avons analysé les temps de réponse en ajustant une fonction polynomiale du second degré sous la forme $f(x) = ax^2 + bx + c$ à partir de chacune des valeurs

obtenues dans les différentes conditions de modification de cinématique². Dans cette fonction, a est le coefficient de courbure et renseigne sur l'allure générale de la courbe. Si a tend vers 0, le paramètre x^2 aura peu d'influence donc la courbe sera plus plate, c'est-à-dire que le temps de réponse variera linéairement par rapport à la hauteur du ballon. Dans ce cas, l'évolution du temps de réponse est constante en fonction des hauteurs du ballon. La valeur centrale de distribution correspond à la hauteur pour laquelle la valeur du temps de réponse est maximale, c'est-à-dire la hauteur du ballon x tel que $2 * ax + b = 0$ qui indique la valeur de modification de cinématique pour laquelle les participants ont mis le plus de temps à répondre, traduisant une difficulté à décider. À partir de cette fonction, nous avons aussi obtenu des R^2 que nous avons transformé en score Z de Fisher pour l'analyse de variance et qui renseigne sur la variabilité des réponses.

Les scores Z de Fisher, le biais (PSE) et le JND provenant des courbes logistiques appliquées aux jugements de chaque participant ainsi que le coefficient de courbure, le temps de réponse, la valeur centrale de distribution et les scores Z de Fisher provenant des fonctions polynomiales appliquées aux données de temps de réponse de chaque participant ont été analysés en utilisant des analyses de variance univariée (ANOVA) selon un plan factoriel $2 \times 2 \times 2$ (Expertise \times Gamme \times Cinématique) avec l'Expertise (experts en basket et non-experts) comme facteur catégoriel, la Gamme avec les deux conditions (condition de Gamme basse et condition de Gamme haute) et la modification de cinématique de la trajectoire au rebond (avec une modification gravité (G) ou une modification de coefficient de rebond (CR) comme facteurs à mesures répétées.

Pour l'ensemble de ces analyses, le seuil de significativité retenu a été de $p < .05$. Nous avons fait le choix de ne présenter des figures que pour les effets principaux impliquant plus de deux modalités et qui ne se retrouvent pas dans des interactions. Sinon, nous avons choisi de ne présenter que les interactions du plus haut niveau.

2. Nous avons également utilisé une fonction gaussienne sous la forme $f(x) = \left(\frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}}\right) e^{-(x-\mu)^2/2\sigma^2}$ mais les coefficients de détermination (R^2) étaient moins élevés que pour la fonction polynomiale ce qui nous a conduit à choisir cette dernière.

1.2.3 Résultats

Scores Z de Fisher, Biais, JND

L'ensemble des moyennes des trois variables est présenté dans le Tableau 2.

Tableau 2: Moyennes et Ecart-type des R^2 , Biais et JND en fonction des Gammes et des prédicteurs CR-G pour les deux groupes de participants.

		R^2		Biais		JND	
		G modifiée	CR modifié	G modifiée	CR modifié	G modifiée	CR modifié
experts	Gamme 2.76	0.96 (± 0.05)	0.98 (± 0.01)	2.89 (± 0.18)	2.89 (± 0.22)	0.13 (± 0.06)	0.14 (± 0.05)
	Gamme 3.24	0.98 (± 0.01)	0.99 (± 0.02)	3.10 (± 0.18)	3.15 (± 0.18)	0.13 (± 0.05)	0.14 (± 0.05)
non-experts	Gamme 2.76	0.93 (± 0.04)	0.96 (± 0.03)	2.98 (± 0.31)	2.88 (± 0.25)	0.18 (± 0.12)	0.18 (± 0.12)
	Gamme 3.24	0.98 (± 0.02)	0.99 (± 0.01)	3.09 (± 0.26)	3.11 (± 0.27)	0.16 (± 0.10)	0.13 (± 0.07)

Pour les scores Z de Fisher et la variable JND, l'ANOVA à mesures répétées ne montre pas d'effet significatif de l'expertise, de la Gamme et de la modification de cinématique CR-G ni aucune interaction entre ces facteurs. Les experts ne détectent pas mieux que les non-experts les modifications de trajectoires de ballons après le rebond quel que soit le type de modification CR ou G.

Pour la variable Biais, l'ANOVA indique un effet significatif de la Gamme ($F(1,26)=5.86$, $p<.05$, $\eta^2=0.18$), les participants passés dans la condition de Gamme haute ayant un biais significativement plus important ($M = 3.11$ m) que les participants passés dans la condition "2.76" ($M = 2.91$ m). Par contre, elle ne montre pas d'effet significatif de l'expertise et de la modification de cinématique CR-G ni aucune interaction entre ces facteurs. Les experts ne sont pas moins influencés dans le jugement perceptivo-cognitif par l'effet de Gamme (Figure 34).

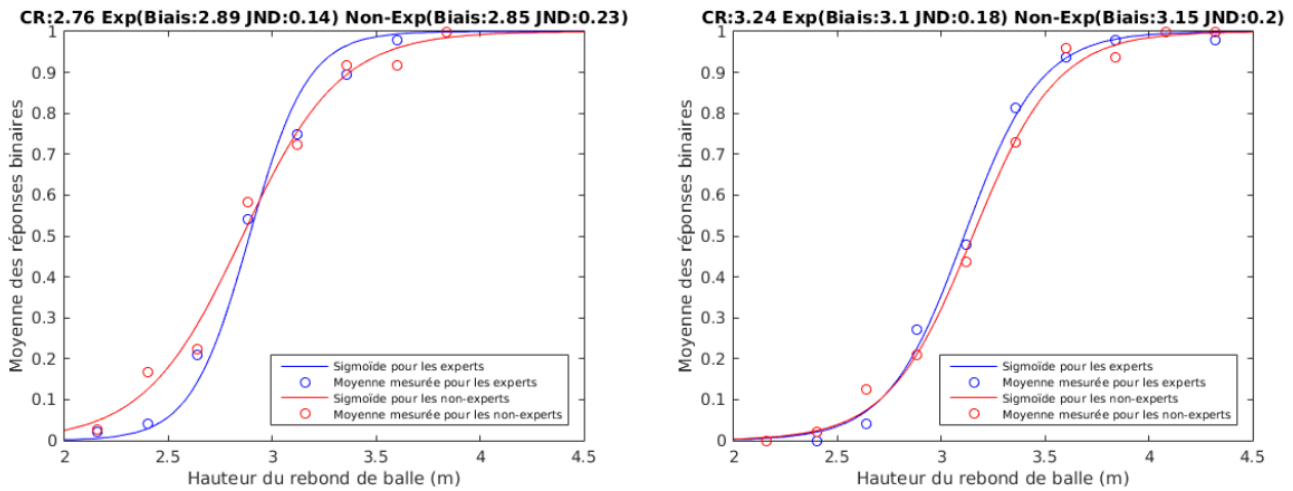


FIGURE 34: Moyenne des réponses "trop haut" des experts (en bleu) / non-experts (en rouge) en fonction de la hauteur de ballon post-rebond pour les deux conditions (2.76 : Gamme basse, 3.24 : Gamme haute) dans le cas où les trajectoires sont modifiées en CR. Les courbes sont ajustées sur une sigmoïde, le biais (PSE : point of subjective equality) correspondant à la hauteur à laquelle le participant obtenait un score de 50% dans la reconnaissance de l'amplitude de la trajectoire) et JND (just noticeable difference) correspondant à la valeur de hauteur pour laquelle le participant obtenait un score de 75% dans la reconnaissance de l'amplitude de la trajectoire.

Temps de réponse

Les résultats des deux groupes dans les deux conditions de Gamme (basse et haute) en fonction des différentes hauteurs de la trajectoire post-rebond du ballon sont représentés dans la Figure 35. Les courbes polynomiales d'un sujet représentatif pour chacun des deux groupes et pour chacune des deux conditions sont présentées dans la Figure 36 à titre d'exemple. L'ensemble des moyennes des scores Z de Fisher, de la valeur centrale de distribution de la courbe ajustée et du coefficient de courbure (a) est présenté dans le Tableau 3.

Tableau 3: Moyennes et Ecart-type des R^2 des temps de réponses, sommet de la courbe ajusté et "a" en fonction des Gammes et des prédicteurs CR-G pour les deux groupes de participants.

		Temps de réponse (ms)		R^2		Valeur centrale de distribution : "le sommet"		Coefficient de courbure a	
		G modifié	CR modifié	G modifié	CR modifié	G modifié	CR modifié	G modifié	CR modifié
Experts	Gamme	903	941	0.54	0.66	3.06	3.04	-0.24	-0.27
	2.76	(±173)	(±363)	(±0.15)	(±0.10)	(±0.33)	(±0.19)	(±0.10)	(±0.12)
	Gamme	1276	1193	0.64	0.63	3.37	3.33	-0.47	-0.49
	3.24	(±492)	(± 486)	(± 0.25)	(± 0.16)	(± 0.29)	(± 0.24)	(± 0.30)	(± 0.30)
Non-experts	Gamme	1105	1105	0.54	0.49	3.36	3.38	-0.29	-0.19
	2.76	(± 315)	(± 426)	(± 0.27)	(± 0.24)	(± 0.92)	(± 0.64)	(± 0.20)	(± 0.20)
	Gamme	1059	1001	0.54	0.67	4.14	3.51	-0.24	-0.26
	3.24	(± 239)	(± 213)	(± 0.15)	(± 0.12)	(± 1.49)	(± 0.46)	(± 0.21)	(± 0.19)

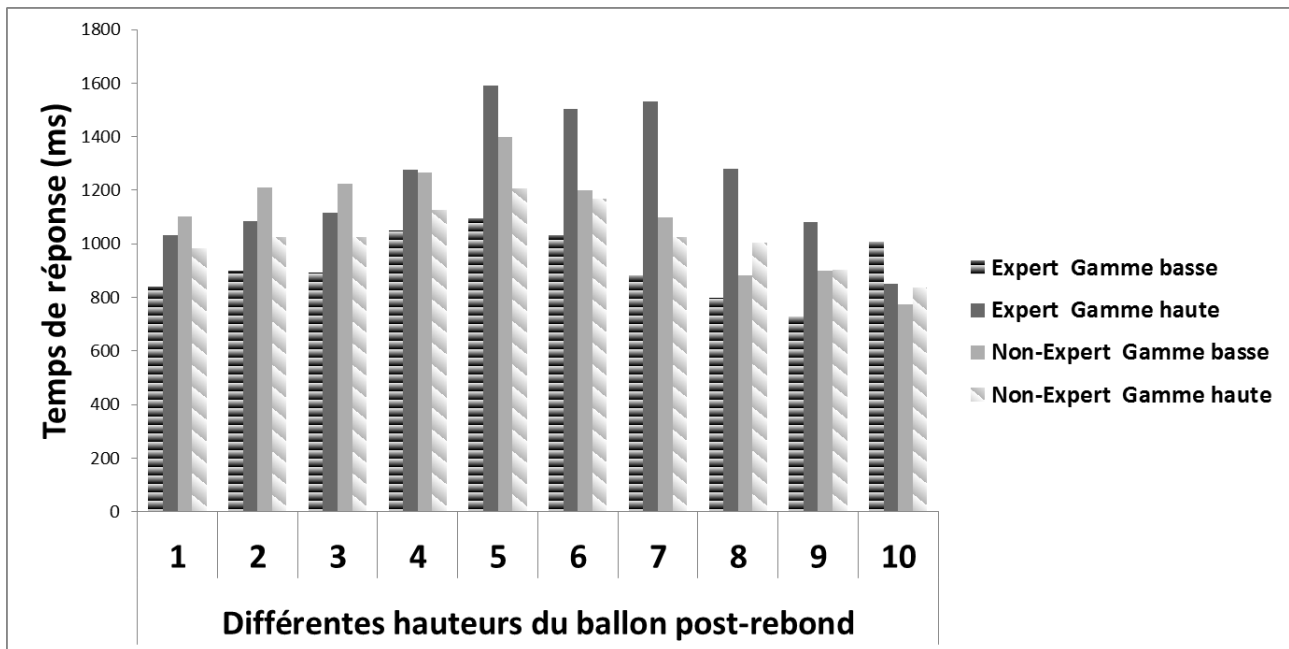


FIGURE 35: Moyennes des temps de réponses pour les deux groupes dans les deux conditions de Gamme (basse et haute) en fonction des différentes hauteurs de la trajectoire post-rebond du ballon (de 1 à 10 : peut correspondre de 2.16 à 4).

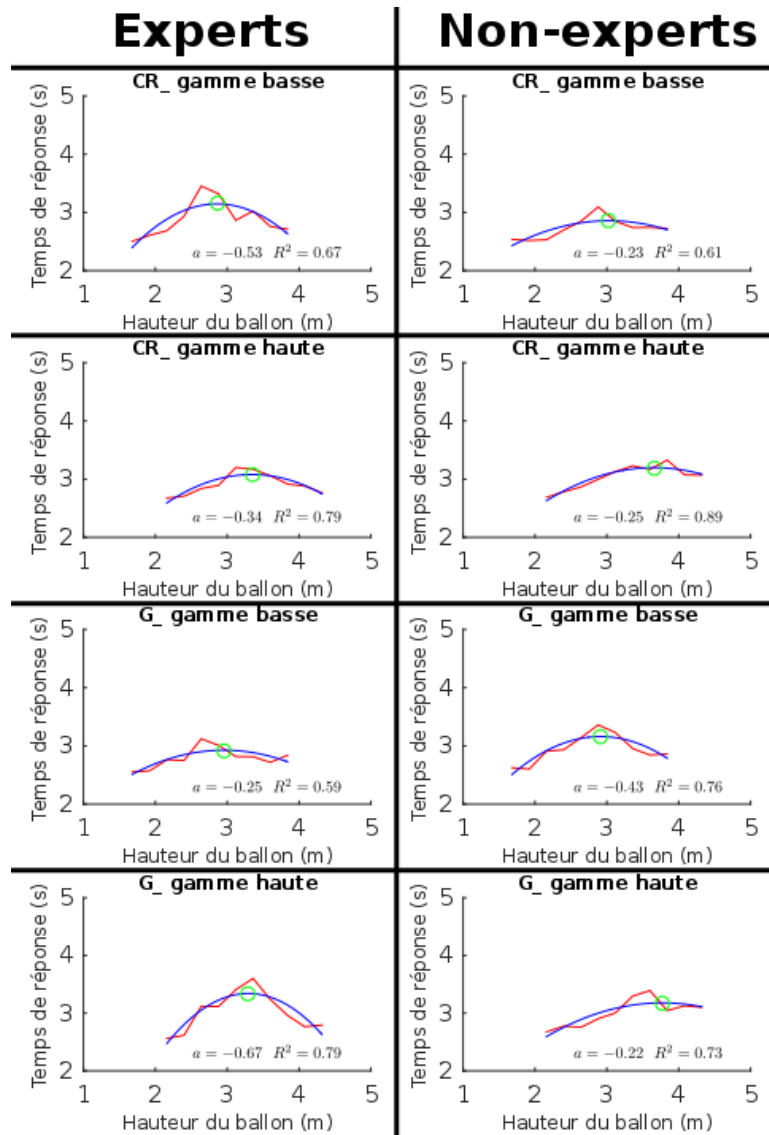


FIGURE 36: Deux sujets représentatifs des groupes experts et non-experts. En rouge les moyennes des temps de réponse (s) en fonction de la hauteur du ballon (m). Les courbes sont affichées pour chaque condition de Gamme (basse ou haute) et pour chaque condition de modification de cinématique (CR ou G). Une courbe polynomiale (en bleu) a été ajustée, avec a le coefficient de courbure et R^2 le coefficient d'ajustement. Le sommet de la courbe polynomiale est représenté par un cercle vert et correspond à la hauteur du ballon pour lequel le temps de réponse est maximal.

Pour les temps de réponses, les scores Z de Fisher, l'ANOVA ne montre pas d'effet significatif des facteurs Expertise, Gamme et de la modification de cinématique CR-G. L'interaction entre ces trois variables est significative pour les scores Z de Fisher ($F(1,26)=7.15$, $p<.05$, $\eta^2=0.21$) (Figure 37). Le test post hoc de Newman-Keuls ne permet pas de trouver une interprétation ou signification à cette interaction, aucune différence entre les experts et les non-experts n'a été révélée. Pour le coefficient de courbure (a) et pour la valeur centrale

de distribution (le sommet), l'ANOVA à mesures répétées ne montre pas d'effet significatif de l'expertise, de la Gamme et de la modification de cinématique CR-G.

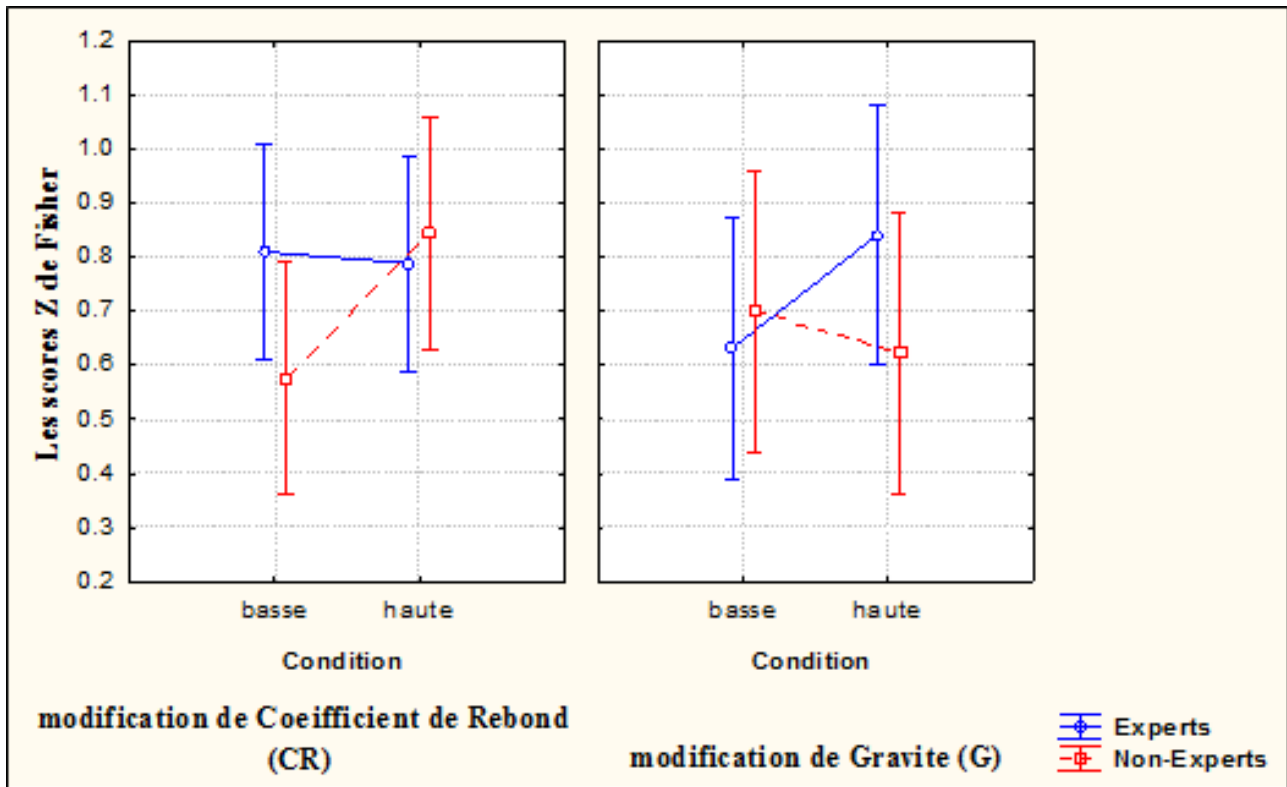


FIGURE 37: Triples interactions des scores Z de Fisher² entre les facteurs expertise, condition (1, 2) et prédicteur (CR-G).

1.2.4 Discussion

Cette expérience avait pour but de tester la capacité d'experts en basket par rapport à des non-experts à détecter des modifications de trajectoires de balle avec comme hypothèse des représentations plus élaborées du fait de leur pratique et de la possible utilité de ces représentations.

Dans l'ensemble, les résultats apparaissent comme cohérents avec une bonne sensibilité des participants par rapport aux changements de trajectoires (voir Tableau 2). Les temps de réponse sont relativement courts et se distribuent de façon homogène pour les deux groupes en fonction de la difficulté. Plus la modification de la trajectoire est importante, plus le temps de réponse diminue. Même si un effet de Gamme est présent, celui-ci reste limité, ce qui montre que les participants ont bien répondu par rapport à des représentations qui leur sont propres

et pas seulement par rapport à la moyenne des trajectoires présentées. Cet effet de Gamme pourrait aussi être expliqué par le fait que le processus de comparaison entre la trajectoire attendue et la trajectoire perçue manque de précision. Ceci est en phase avec une récente étude de (Joerges *et al.*, 2018) dans laquelle il était demandé aux participants d'identifier entre deux trajectoires présentées successivement quelle était la trajectoire avec la gravité la plus grande. Les résultats ont suggéré que l'extraction de la gravité puisse ne pas être très précise même dans le cas où toutes les informations sont disponibles.

Contrairement à notre hypothèse, les variations dues aux modifications du coefficient de rebond (modification discrète au rebond) n'ont pas été mieux perçues que celles liées aux modifications de la gravité (qui apparaissaient progressivement après le rebond). De plus, l'analyse du coefficient de courbure a , la valeur centrale de distribution et les scores Z de Fisher provenant des fonctions polynomiales appliquées aux données de temps de réponse de chaque participant n'ont pas montré de différence entre les trajectoires modifiées en CR et celles modifiées en gravité. Ceci pourrait s'expliquer par la ressemblance des paramètres cinématique entre les deux conditions. En effet, dans la mesure où les trajectoires avaient été programmées pour avoir une même hauteur, il est apparu après un examen des caractéristiques cinématiques de la trajectoire que la combinaison des paramètres de position et de vitesse après rebond étaient finalement très similaires entre les conditions de perturbation de gravité et de coefficient de rebond (les vitesses moyennes de la balle entre le premier rebond et le temps de réponse moyen de tous les participants pour les trajectoires modifiées par la gravité, et les trajectoires modifiées par le CR sont respectivement de 3.93 m/s et 3.85 m/s). Ces paramètres quasi-similaires n'auraient sans doute pas conduit à fournir des possibilités de détection différentes.

Les résultats montrent aussi que les experts ne sont pas meilleurs que les non-experts dans cette tâche de jugement perceptivo-cognitif de rebond de basket. Leurs biais de réponse et leur sensibilité ne sont pas plus réduits. Ils ne détectent pas plus rapidement les modifications de trajectoires de balles (voir Tableau 2). Ils sont tout autant affectés que les non-experts par l'effet de "Gamme".

Bien que confrontés très fréquemment à des trajectoires et des rebonds de balle, ces résultats suggèrent que les experts n'ont pas développé de représentations plus précises des effets de la gravité et des rebonds de ballon leur permettant d'identifier avec plus de précision des modifications de trajectoires liées à des changements de propriétés physiques de l'environnement. On ne peut évidemment pas considérer qu'il n'y a pas de représentation

de la trajectoire puisque la reconnaissance est assez précise et que l'effet de Gamme est limité, c'est simplement qu'elle n'est pas plus précise que celle des non-experts.

On peut ainsi proposer que ces résultats confirment et en même temps contredisent l'hypothèse des modèles (ou représentations) internes (Hayhoe *et al.*, 2005; Zago *et al.*, 2008). Ils la confirment dans la mesure où la tâche est réalisée avec cohérence traduisant l'utilisation d'une représentation et d'attente par rapport au rebond. Ils la contredisent par le fait que cette capacité ne paraît pas être déterminante de la pratique du haut niveau. Cela n'apparaît d'ailleurs même pas comme ce qui pourrait être appelé un sous-produit de l'expertise. C'est-à-dire une compétence non déterminante de l'expertise, mais développée en parallèle de la pratique du fait de l'implication intensive dans des situations où ces informations sont disponibles, tel que cela a par exemple été défini par (Aglioti *et al.*, 2008), qui ont testé trois groupes de joueurs de basketball (des joueurs experts, observateurs experts, non-experts). Par conséquent, on peut supposer que cette représentation n'est pas nécessaire à la performance de haut-niveau dans le basket pour s'adapter et interagir avec les trajectoires de balles.

Nos résultats s'inscrivent donc dans la continuité des propositions de (Baurès *et al.*, 2007) et suggèrent que l'expertise en sports de balle n'est pas liée à l'utilisation de modèles internes correspondant à des représentations précises de la cinématique des trajectoires de balle. Ils sont également en cohérence avec ceux de (Craig *et al.*, 2006) qui ont montré que les experts en football ne parvenaient pas à prédire précisément les trajectoires avec un effet latéral lors de l'occultation de la partie finale et commettaient des erreurs de jugement importantes.

Ces interprétations doivent être prises avec précaution du fait d'un raisonnement qui se fonde sur une absence de différence significative entre les deux groupes, ce qui d'un point de vue statistique a une validité limitée notamment avec un environnement virtuel. En effet, l'utilisation de la réalité virtuelle pourrait expliquer l'absence de différence entre experts et non-experts. On peut suggérer qu'un possible manque de réalisme de notre environnement ait pu niveler les réponses et empêcher les experts de prélever les informations nécessaires pour les comparer avec leurs attentes (voir section 4.2 pour plus de détails sur la réalité virtuelle et les indices de perception de profondeur nécessaires pour l'immersion). Seule la reproduction de ces résultats et d'autres démonstrations pourront permettre de donner plus de certitudes dans ces interprétations. C'est ce qui a été fait dans la suite de cette thèse avec le questionnaire du réalisme de la situation à partir de séquences vidéo (expérience 2) et l'implication de la

motricité permettant la régulation de l'action après des perturbations de rebond (expérience 3).

1.3 Expérience 2 : Etude des jugements perceptivo-cognitifs dans un environnement réel (séquences vidéo) sur des trajectoires modifiées d'un ballon de basket chez des experts et non-experts

1.3.1 Introduction

Comme indiqué en fin de discussion de l'expérience précédente, nous avons jugé nécessaire de réaliser une seconde expérience de jugement de trajectoires de balles modifiées en utilisant des séquences vidéo pour confirmer les résultats obtenus. Cette nouvelle expérience sert donc d'étude de contrôle des résultats de la première expérience. Le but était de vérifier que les résultats obtenus dans la première expérience n'étaient pas liés à l'environnement virtuel utilisé qui aurait pu masquer, de par son caractère non naturel, de possibles différences entre experts et non-experts. La présente expérience repose sur l'utilisation de séquences vidéo de ballons de basket dont le coefficient de rebond était modifié par une pression d'air dans le ballon plus ou moins importante (voir Tableau 4 pour les caractéristiques de ces trajectoires, et Figure 38 pour une représentation théorique de ces trajectoires). De la même manière que dans l'expérience 1, les participants devaient évaluer la hauteur du rebond à l'aide d'un pavé numérique.

1.3.2 Méthode

Population

Notre population était composée de 32 participants qui n'ont pas participé à la première expérience : 16 experts en basket (11 hommes et cinq femmes, avec une moyenne d'âge de 26 ans (± 3.7)) ; avec une fréquence de pratique de cinq entraînements par semaine ; ayant un niveau

national) et 16 non-experts (neuf hommes et sept femmes, avec une moyenne d'âge de 31 ans (± 6.3)), répartis équitablement sur les deux blocs programmés (i.e., 8 experts et 8 non-experts passés dans le bloc 1, 8 experts et 8 non-experts passés dans le bloc 2).

Matériel, dispositif expérimental et conditions expérimentales

Pour réaliser nos supports expérimentaux, nous avons enregistré des séquences vidéo de trajectoires de ballon de basket dans un gymnase. Au total 12 séquences ont été filmées dans lesquelles le ballon était lancé d'une hauteur de 6 m et rebondissait trois fois. Pour avoir la même trajectoire pré-rebond du ballon, nous avons mis en place un dispositif mécanique de lancement (voir Figure 39). Ensuite, pour faire varier la hauteur post-rebond du ballon, nous avons modifié la pression d'air afin d'obtenir des coefficients de rebond différents. Ainsi, les ballons surgonflés rebondissent plus haut que la normale tandis que les ballons sous-gonflés rebondissent plus bas que la normale. De la même manière que l'expérience 1, nous nous sommes appuyés sur le règlement officiel de basket afin de déduire le coefficient de rebond du ballon (voir chapitre 2). Nous avons utilisé 12 pressions différentes dont nous vérifions les correspondances de hauteur de rebond afin d'obtenir les rebonds souhaités (voir Tableau 4).

Nous avons ensuite traité les séquences vidéo avec les logiciels Kinovéa et Adobe Premier pour les uniformiser de telle sorte que chaque séquence commence dès la sortie du ballon du dispositif mécanique et se termine après le 3ème rebond. Les 240 ms correspondaient à la durée minimale entre le 3ème rebond et l'arrêt du ballon de la même façon que dans l'expérience 1. Le Tableau 4 présente les 12 trajectoires du ballon. La hauteur du ballon après le premier rebond a été mesurée à partir des séquences vidéo et peut varier de 1.90 m à 3.58 m (Tableau 4, Figure 38). Nous avons fait figurer dans la scène un panneau de basket à hauteur réglementaire et un personnage sur le côté droit pour donner aux participants un référentiel de taille dans l'environnement comme dans l'expérience 1 (Figure 40).

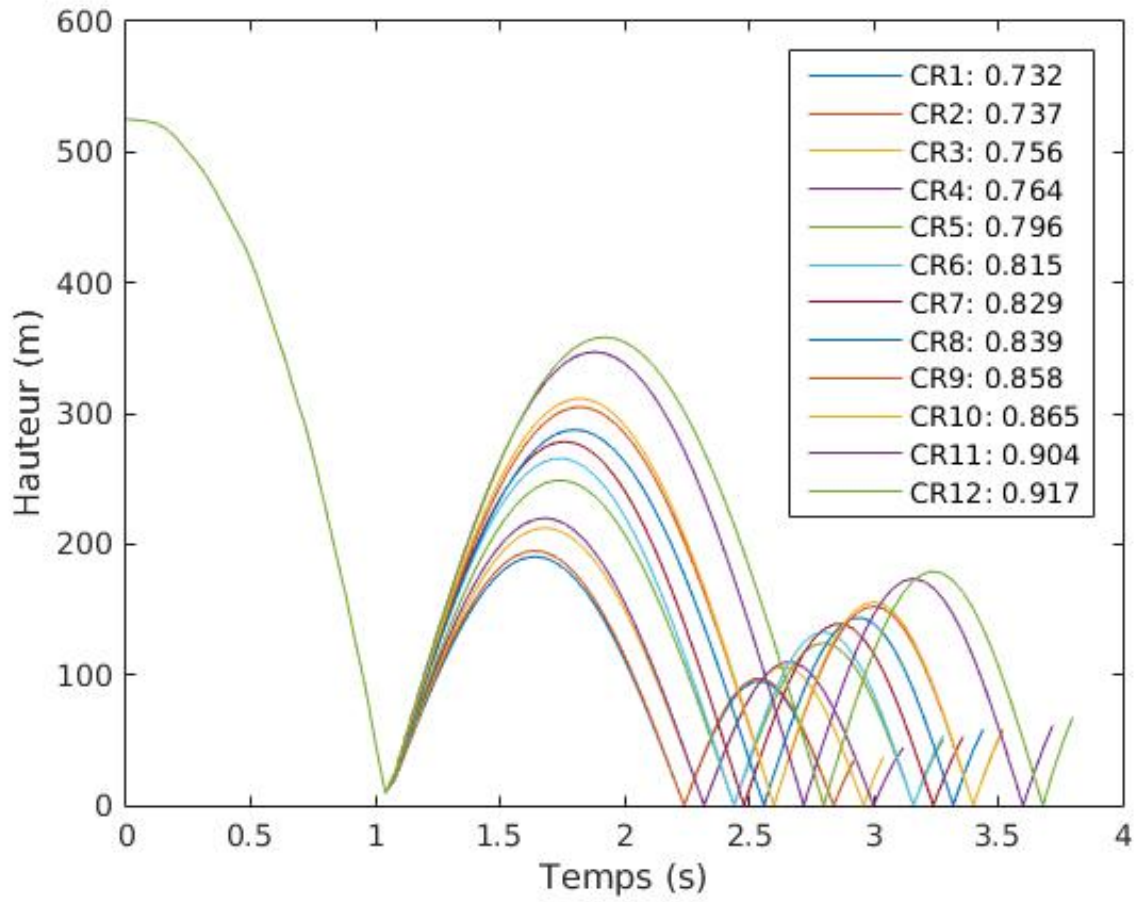


FIGURE 38: Représentation théorique des trajectoires du ballon de basket suite aux modifications du coefficient de rebond.



FIGURE 39: Dispositif mécanique de lancement du ballon de basket.

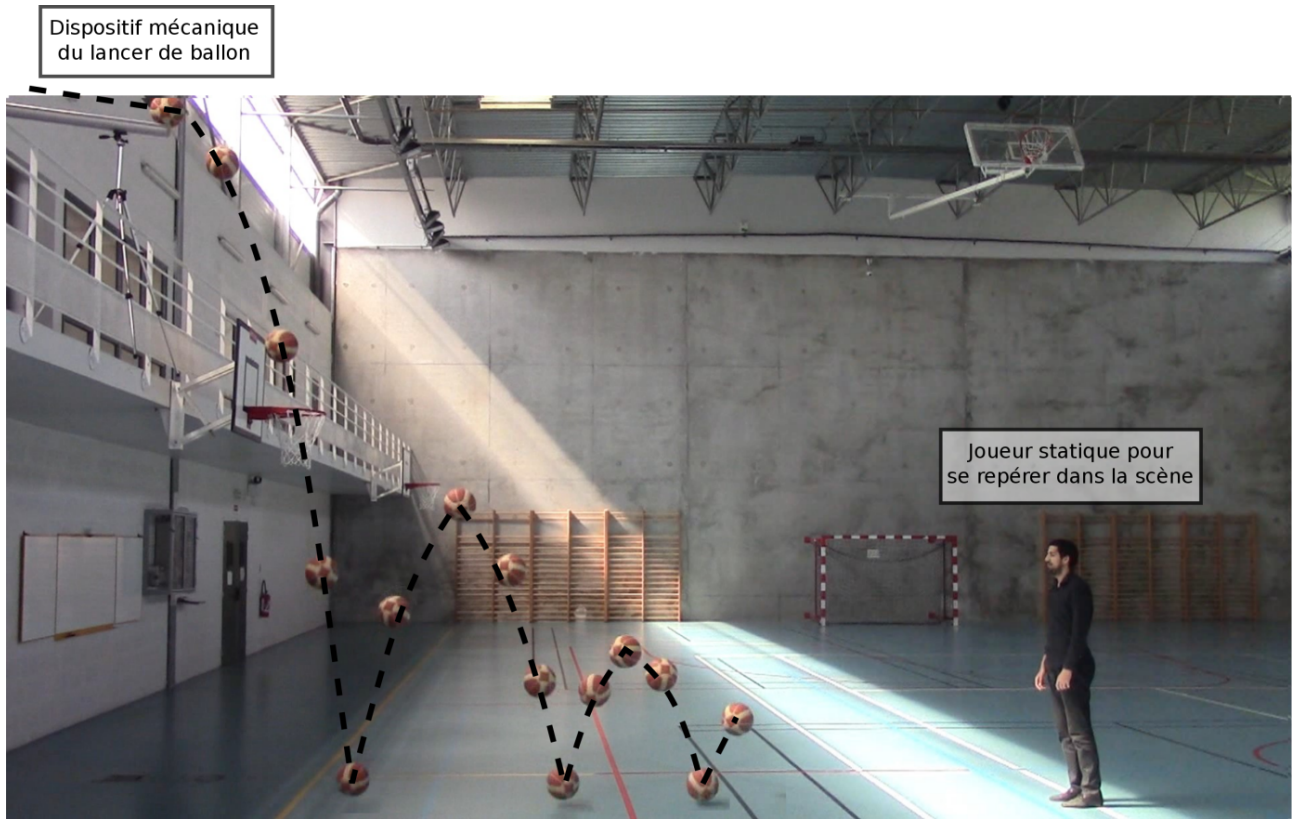


FIGURE 40: Présentation de la scène avec un exemple de trajectoire du ballon de basket.

Tableau 4: Caractéristiques des 12 trajectoires du ballon de basket utilisées lors de l'expérience 2.

Trajectoires	Hauteurs max après le premier rebond (cm)	Coefficient de rebond	Durée totale de la trajectoire (ms)
1	190.40	0.732	3360
2	194.92	0.737	3320
3	212.38	0.757	3520
4	219.86	0.765	3560
5	248.90	0.797	3760
6	265.67	0.815	3800
7	278.39	0.829	3920
8	287.55	0.839	3880
9	304.85	0.858	4120
10	311.47	0.866	4120
11	347.09	0.905	4360
12	358.37	0.917	4400

De la même manière que dans l'expérience 1, nous avons programmé deux blocs afin de tester l'effet de Gamme. Chaque bloc était constitué de 10 vidéos avec des hauteurs différentes obtenues avec une modification du coefficient de rebond. Dans la condition de Gamme haute, les 10 hauteurs de ballon post-rebond étaient programmées avec une étendue de 2.12 à 3.58 m donc avec une valeur centrale de 2.84 m. Dans la condition de Gamme basse, les 10 hauteurs de ballon post-rebond étaient programmées avec une étendue de 1.90 à 3.11 m donc avec une valeur centrale de 2.51 m.

Nous avons programmé les séquences vidéo avec le logiciel E-Prime qui permettait de piloter l'enchaînement des séquences vidéo et d'enregistrer les réponses et le temps mis pour répondre. Nous avons utilisé comme dispositif d'expérience un ordinateur portable avec un écran de 15 pouces et de dimension $30,5 \times 22,9$ cm.

Pour chacune des deux Gammes, chaque vidéo était présentée trois fois constituant 30 essais. Lors de l'expérience, les essais d'un bloc étaient lancés aléatoirement.

Procédure

Nous avons suivi la même procédure que celle présentée dans l'expérience 1. Pour rappel, au début de l'expérience, une fiche de renseignement devait être remplie par chacun des participants ainsi qu'une fiche de présentation des tests (voir Annexe A). Après l'étape de renseignements, le participant était assis devant l'ordinateur et avait à disposition un pavé numérique étiqueté pour donner les réponses avec sa main préférentielle (sur le numéro 8 une étiquette jaune avec le mot "HAUT" dessus, sur le numéro 2 une étiquette vert avec le mot "BAS" dessus).

De la même manière que l'expérience 1, le participant était informé du scénario de la tâche qu'il allait juger. Le participant devait répondre dès qu'il pouvait juger de la hauteur de la trajectoire du ballon de basket après le premier rebond. Le décompte ("3, 2, 1") était réalisé avant chaque scène pour avertir le participant du lancement du ballon. Après chaque séquence un écran noir apparaissait et durait environ deux secondes, afin de donner plus de temps de jugement. Chaque participant devait passer un bloc de 30 essais.

Variables dépendantes et analyses

Nous avons procédé avec la même approche que dans l'expérience 1 pour analyser avec le logiciel Matlab les variables dépendantes. Pour l'ensemble de nos participants, les réponses enregistrées sont transformées en réponses binaires (i.e., les participants considèrent que le ballon rebondit trop haut par rapport à leurs attentes, la valeur de 1 est attribuée sinon la valeur 0 est attribuée). Ces réponses nous ont permis de calculer une fonction logistique pour chaque participant. Nous avons repris la même fonction logistique déjà décrite à la section 1.4. Nous avons obtenu le biais, le JND et le R^2 . Dans le cas d'absence d'effet de Gamme, le Biais devait être situé à 2.68 m.

Les temps de réponse ont été calculés pour tous les essais, à partir du début de la chute du ballon jusqu'à l'appui sur l'une des deux touches du pavé numérique. Comme dans l'expérience 1 ; ils ont été ajustés pour chaque participant une fonction polynomiale du second

degré représentée sous la forme : $f(x) = ax^2 + bx + c$, ensuite nous avons calculé le R^2 (suivie d'une transformation de Fisher), la valeur centrale de distribution (hauteur lorsque le temps de réponse est maximal) et coefficient de courbure (a l'indicateur de la largeur de la courbe).

Comme dans l'expérience 1, toutes ces variables ont été analysées à partir d'une analyse de variance univariée (ANOVA) dans Statistica selon un plan factoriel 2×2 (Expertise \times Gamme) avec l'Expertise (experts en basket et non-experts) comme facteur catégoriel, la Gamme (avec deux condition basse et haute) comme facteur à mesures répétées. Le seuil de significativité α a été fixé à .05.

1.3.3 Résultats

R^2 , Biais, JND

Pour les variables R^2 et JND, l'analyse de la variance n'a pas montré d'effet significatif de l'expertise ni de la Gamme. Les experts ne discriminent pas mieux la hauteur de la trajectoire de ballon modifiée que les non-experts. Également pour la variable Biais, l'analyse n'a pas montré un effet significatif de l'expertise, les experts ne sont pas meilleurs dans le jugement perceptivo-cognitif du rebond de basket. Par contre, l'analyse a montré un effet significatif de la Gamme ($F(1,28)=51.37$, $p<.05$, $\eta^2=0.64$), les participants passés dans la condition haute ayant une moyenne de réponses significativement plus importante ($M = 2.81$ m) que les participants passés dans la condition basse ($M = 2.40$ m). L'ensemble des moyennes pour les variables Biais et JND sont présentées dans le Tableau 5.

Tableau 5: Moyennes et Ecart-type des Biais et JND en fonction des Gammes pour les deux groupes de participants.

	Gamme	Biais	JND
experts	Gamme 2.51	2.38 (± 0.05)	0.13 (± 0.05)
	Gamme 2.84	2.76 (± 0.05)	0.11 (± 0.02)
non-experts	Gamme 2.51	2.43 (± 0.5)	0.11 (± 0.03)
	Gamme 2.84	2.85 (± 0.6)	0.09 (± 0.009)

Temps de réponse

Pour le R^2 et pour le sommet, l'analyse de variance ne montre aucun effet significatif de l'Expertise ni de la Gamme. Il n'y a pas d'effet d'interaction entre les facteurs Expertise et Gamme. Pour l'indice de largeur de la courbe (a), l'ANOVA à mesure répétée ne montre aucun effet significatif de l'Expertise ou de la Gamme mais par contre un effet d'interaction entre ces deux facteurs a été révélé ($F(1,28)=6.74$, $p<.05$, $\eta^2=6.74$) (Figure 41). Cette interaction indique que les experts sont différents des non-experts uniquement dans la Gamme basse ce qui paraît difficile à interpréter. Il est difficile de donner une interprétation à cette interaction.

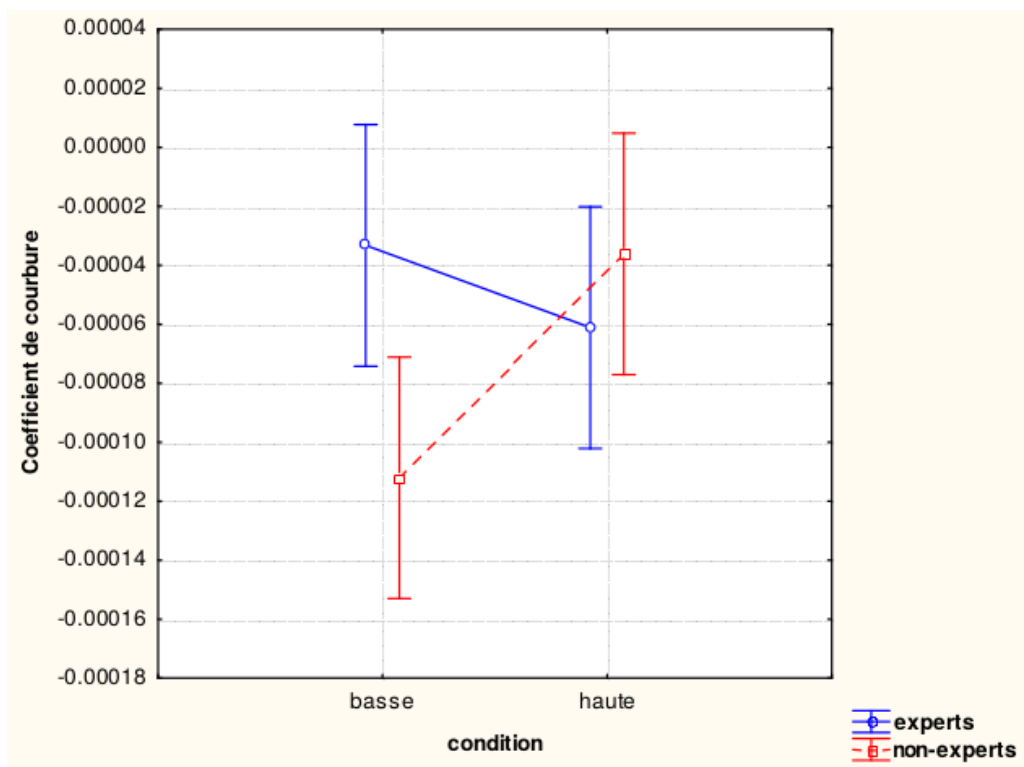


FIGURE 41: Interactions entre les facteurs expertise et condition de Gamme (basse et haute).

1.3.4 Discussion

Les résultats sont en concordance avec ceux de la première expérience et révèlent que les experts en sports de balle ne sont pas plus précis dans leur jugement de la hauteur du rebond (absence de différence pour biais, JND) et pas plus rapides que les non-experts. Ceci renforce l'hypothèse selon laquelle les experts n'ont pas développé un modèle interne plus précis que les non-experts qui leur permettraient de mieux prédire la hauteur du ballon.

À nouveau, cette interprétation est fondée sur une absence de différence ce qui fragilise une possible conclusion. Pour dépasser cette limite et proposer une hypothèse alternative testée dans un cadre expérimental similaire, nous avons mis en œuvre dans la suite de cette thèse une expérience qui implique la motricité des participants en leur demandant de suivre la trajectoire de balle avec un curseur à déplacer par l'intermédiaire d'un stylet sur une tablette graphique. Le fait d'ajouter une composante motrice à la tâche avait pour but de tester les capacités de régulation perceptivo-motrice d'experts en basket et de montrer une possible différence avec les non-experts et ainsi que l'expertise est mieux identifiable pour les interactions avec les trajectoires de balle au plan perceptivo-moteur qu'au plan strictement perceptivo-cognitif.

1.4 Expérience 3 : Etude des coordinations perceptivo-motrices dans un environnement virtuel sur des trajectoires modifiées d'un ballon de basket chez des experts et non-experts

1.4.1 Introduction

Après deux expériences portant sur les processus perceptivo-cognitifs, nous avons prévu de tester les processus perceptivo-moteurs dans un même environnement expérimental que l'expérience 1. Dans la continuité des travaux de (Le Runigo *et al.*, 2005, 2010) présentés dans la section 2.6, nous avons voulu étudier les adaptations du mouvement face aux modifications déjà utilisées dans les deux premières expériences. Pour cela, nous avons fait le choix d'utiliser une tâche de poursuite. Même si ce type de tâche est peu fréquent dans les sports de balle, elle constitue une base intéressante pour étudier dans des durées plus longues la qualité de régulation perceptivo-motrice et des adaptations produites.

Nous avons utilisé dans l'environnement virtuel de la première expérience une tâche consistant à poursuivre avec un effecteur placé dans l'environnement virtuel un ballon de basket sur toute sa trajectoire avant et après rebonds avec, comme dans l'expérience 1, de possibles changements de propriétés du champ gravitaire (l'accélération verticale appliquée au ballon) ou bien des propriétés de rebond du ballon (modification du coefficient de rebond). En se

référant aux résultats de l'expérience 1, les trajectoires ont été programmées de telle sorte que la modification des trajectoires était perceptible.

Nous avons fait l'hypothèse que les experts devraient être moins perturbés que des non-experts du fait que les experts développent des capacités d'adaptation et de régulation perceptivo-motrice leurs permettant d'être plus précis dans leurs actions.

Plusieurs études ont supporté cette hypothèse et peuvent être groupées en deux catégories selon le type d'approche utilisée. D'un côté, les études qui s'inscrivent dans une approche basée sur le développement des représentations plus précises (modèles internes), permettent d'exécuter les actions avec de meilleures régulation et précision et/ou de stabilité (Bringoux *et al.*, 2000; Teixeira *et al.*, 2011; Paillard *et al.*, 2007). D'un autre côté, les études issues d'une approche basée sur le développement des capacités prospectives des experts et de leurs qualités de couplage perception-action, permettent des adaptations plus rapides et précises dans des actions d'interceptions face à des changements de trajectoires inattendues (e.g., (Le Runigo *et al.*, 2005, 2010)). Pour résumer, le but était de déterminer si les meilleures performances des experts dans les sports d'interception sont liées à une meilleure capacité de régulation perceptivo-motrice.

Bien que les modèles cognitivistes intègrent des systèmes de régulation en cours d'exécution, il faut remarquer que ces régulations sont opérées sur la base de références internalisés qui vont permettre d'ajuster le mouvement si un écart est détecté entre ce qui est produit et ce qui est attendu (Schmidt, 1975, 1982; Wolpert et Flanagan, 2001). Face à des perturbations imprévisibles, ces systèmes ne paraissent pas vraiment appropriés sauf à redévelopper un nouveau modèle interne (e.g., (Teixeira *et al.*, 2011)) et reprogrammer le mouvement (Teixeira, Dos Santos Lima, et Franzoni, 2005). Cela prend nécessairement du temps et plusieurs essais pour développer un nouveau modèle interne. Les lois de contrôle proposées par l'approche écologique paraissent de ce point de vue plus appropriés (Warren, 2006). En effet, dans le cas d'une perturbation imprévisible, il peut potentiellement se produire une augmentation de l'écart entre l'état requis et l'état courant du mouvement (Montagne *et al.*, 1999). Toutefois, comme la loi de contrôle s'appuie sur des invariants toujours disponibles dans la relation individu-environnement et qui n'ont pas besoin d'être internalisés, la régulation est toujours possible.

Dans ce contexte, si les experts sont d'emblée plus performants que les non-experts, on pourra supposer que c'est sur la base d'un modèle de contrôle prospectif optimisé que les experts manifesteront cet avantage. L'optimisation se situera très certainement et principalement dans les délais de régulation (Le Runigo *et al.*, 2005, 2010).

1.4.2 Méthode

Population

Deux groupes ont participé à cette expérience ; le premier groupe d'experts comprenait dix basketteurs de niveau national et professionnel (du même niveau des joueurs testé dans Populationl'expérience 1), avec une moyenne d'âge de 28 ans (± 4.71). Le deuxième groupe comprenait 13 non-experts en basket et en sport de ballon répartis en sept hommes et six femmes³ avec une moyenne d'âge de 26.08 ans (± 6.06).

Dispositif expérimental, conditions expérimentales et tâche utilisée

Nous avons utilisé le même dispositif de réalité virtuelle que celui décrit dans l'expérience 1. Nous avons adapté la projection de la scène 3D sur l'écran, le rendu de la scène couvrait une surface de 4 m \times 1.74 m sur l'écran. Nous avons ajouté pour cette tâche de poursuite une tablette graphique INTUOS 4 reliée à l'ordinateur afin d'interagir avec la scène visuelle en poursuivant le ballon à l'écran à l'aide du stylet sur la tablette graphique. Le stylet était représenté à l'écran par un cercle semi-transparent (l'effecteur) qui avait une taille de 48 cm de diamètre dans l'environnement virtuel (le double du ballon de basket). Afin que les déplacements de la main des participants se limitent à la surface de la tablette (46.2 \times 30.8 cm), la tablette et le système de réalité virtuel étaient calibrés de façon à ce qu'un centimètre réel corresponde à un mètre virtuel . L'emplacement de la caméra virtuelle était configuré de manière à ce que la scène 3D soit perçue par le participant comme s'il était situé à 18 mètres de distance du centre du terrain. Au début de l'essai, cet effecteur était positionné sur le ballon. Le ballon commençait alors son déplacement dans un délai aléatoire de 0 à 2 s. La tâche consistait

3. Des analyses de contrôle avec le genre comme facteur ont été réalisées sans montrer de différence entre les hommes et les femmes. Cela nous a conduits à grouper les données.

Tableau 6: Caractéristiques des trajectoires post premier rebond proposées dans l'expérience 3.

Type de trajectoires	Hauteur max post-rebond	Gravité	Coefficient de rebond	Temps du 1 ^{er} arc	Temps du 2 ^{ème} arc	Temps du 3 ^{ème} arc
Gravité haute (GH)	3.84	7.5	0.85	1.84	2.01	1.57
Gravité Basse (GB)	2.16	13.9	0.85	1.84	1.11	0.89
Trajectoire Normale (TN)	3	9.81	0.85	1.84	1.55	1.23
Coefficient de rebond haut (CRH)	3.84	9.81	0.973	1.84	1.76	1.56
Coefficient de rebond bas (CRB)	2.16	9.81	0.713	1.84	1.32	0.89

à déplacer l'effecteur pour suivre le ballon au plus près. La Figure 42 illustre le dispositif mis en place pour l'expérience.

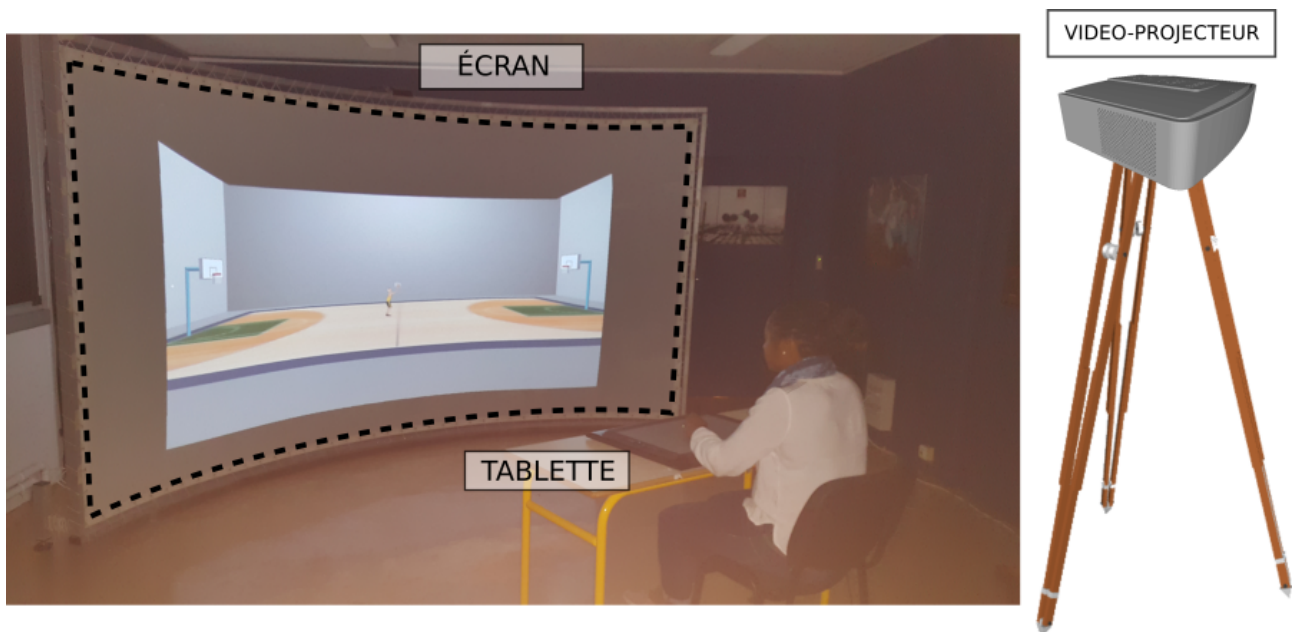


FIGURE 42: Illustration du dispositif expérimental avec l'écran semi circulaire et le vidéo-projecteur. Le participant était assis derrière la table, sur laquelle reposait la tablette graphique. Il avait pour consigne de suivre le ballon affiché avec un stylet qu'il déplaçait sur la tablette. Le ballon était lancé au milieu de la scène alors qu'il était tenu par un joueur virtuel fixe. La taille du ballon, celle du terrain, du joueur virtuel et la hauteur des paniers étaient cohérentes entre elles et permettaient de mieux se repérer dans la scène afin de renforcer l'immersion avec les nouvelles dimensions.

Toutes les trajectoires ont été programmées avec la même vitesse initiale horizontale (2 m/s) et la même vitesse verticale (8.37 m/s) correspondant à l'expérience 1. Après le premier rebond, le ballon pouvait atteindre trois hauteurs maximales différentes : basse (2.16 m), normale (3 m) et haute (3.84 m). Les hauteurs basses et hautes étant obtenues soient avec une modification de gravité, soit une modification du coefficient de rebond (Figure 43). Les caractéristiques de ces trajectoires sont représentées dans le Tableau 6.

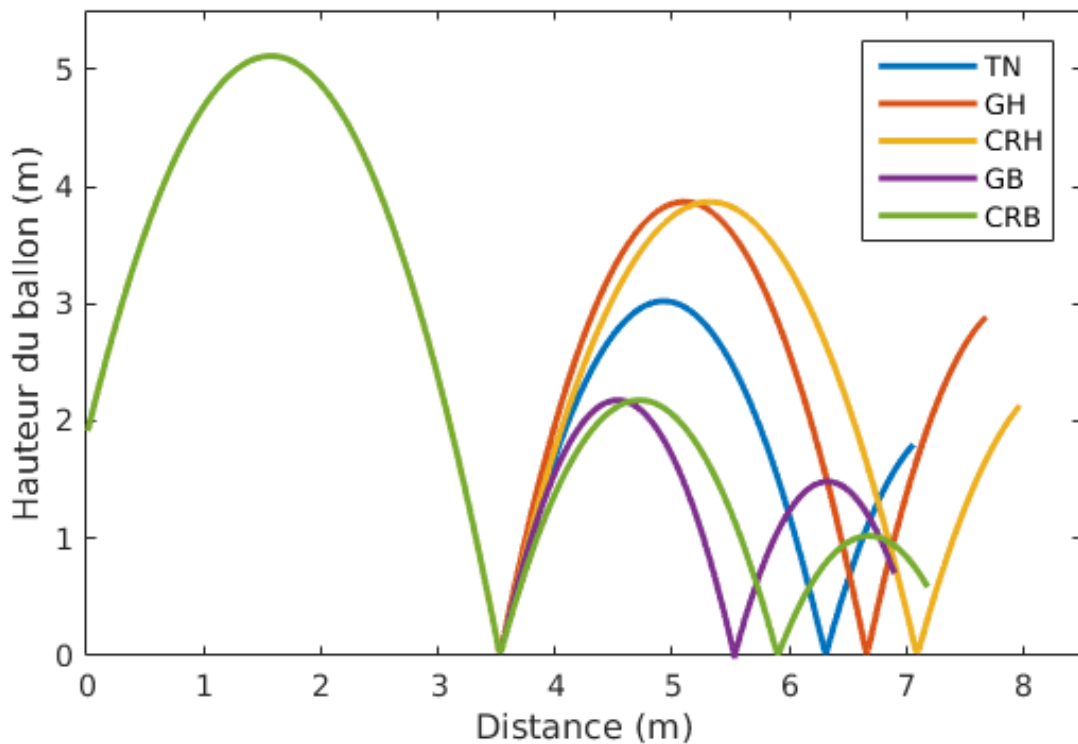


FIGURE 43: Représentation graphique des différentes trajectoires de ballon en faisant varier le CR et la Gravité, avec TN : Trajectoire Normale ; GH : trajectoire avec Gravité Haute ; CRH : trajectoire avec Coefficient de Rebond Haut ; GB : trajectoire avec Gravité Basse ; CRB : trajectoire avec Coefficient de Rebond Basse.

Nous avons programmé 48 essais répartis en huit blocs. Chaque bloc pouvait être composé de sept, six ou de cinq essais de même type. Le nombre des essais était choisi aléatoirement afin de ne pas permettre aux participants de repérer une régularité dans le changement de type de trajectoire ce qui aurait été théoriquement possible si les trajectoires avaient été changées toujours au même numéro d'essai. Le but était d'observer les adaptations dans le premier essai de changement face à une nouvelle trajectoire apparaissant de manière imprévisible. Le second but était d'observer les adaptations avec la répétition des essais au cours d'un bloc d'essai.

Le test commençait par un bloc de trajectoires normales et alternait successivement entre trajectoire normale et trajectoire modifiée de manière aléatoire pour ces dernières. Il y

avait donc quatre blocs de conditions normales et quatre blocs de conditions modifiées (GH, CRH, GB, CRB).

Procédure

Nous avons repris une procédure similaire à l'expérience 1. Au début de l'expérience, une fiche de renseignement a été remplie par chacun des participants. Les participants étaient informés du déroulement de la scène (déplacement et rebonds du ballon notamment) et de la tâche à réaliser (les différentes fiches sont présentées dans l'Annexe A). Ils avaient un temps de familiarisation avec le déplacement de l'effecteur pour intégrer le ratio entre leur mouvement sur la tablette et les mouvements à l'écran. Chaque participant devait réaliser 48 essais. Lorsque le participant était prêt, l'expérimentateur appuyait sur la touche "Entrée" pour animer la scène. Au cours de cette expérience, l'ordinateur enregistrait les positions x (horizontale) et Y (verticale) du ballon et de l'effecteur dans l'environnement virtuel à une fréquence d'acquisition de 120 Hz.

Variables dépendantes et analyses

Dans le but d'étudier les performances de nos participants, nous avons calculé les variables temporelles et cinématiques suivante à partir du logiciel Matlab :

1. Le temps de réaction correspondait au temps après le départ du ballon du premier déplacement de l'effecteur lorsqu'il atteignait une vitesse seuil de 2 cm/s en virtuel.
2. L'erreur constante⁴ sur l'axe y (EC) avant rebond correspondait à la différence de position sur l'axe vertical Y entre le centre de l'effecteur et le centre du ballon du début de l'essai jusqu'au premier rebond. Nous n'avons analysé cette variable que sur l'axe vertical Y pour répondre directement à nos hypothèses et aux effets des modifications de la gravité et du coefficient de rebond après rebond qui modifient la composante verticale de la trajectoire (voir variable suivante). Une valeur positive de cette variable signifie que l'effecteur est au-dessus du ballon, alors qu'une valeur négative signifie qu'il est au-dessous du ballon. Afin d'examiner plus précisément

4. Le choix a été fait de se limiter à l'erreur constante et de ne pas traiter les données pour ajouter une erreur absolue (la valeur absolue de l'écart entre la position de la cible et la position de l'effecteur) afin de préserver le signe de l'erreur. Ceci nous permet d'identifier la direction des erreurs.

les adaptations des participants au cours de la première portion de la trajectoire balistique et d'analyser le mouvement des experts et des non-experts face à une trajectoire curviligne, nous avons découpé la période pré-rebond en neuf portions temporelles de 200 ms (avec l'exception de la première qui était de 240 ms pour tenir compte du temps de réaction des non-experts qui était de cette amplitude).

3. L'EC post-rebond correspondait à la différence de position sur l'axe Y entre le centre de l'effecteur et le centre du ballon pendant les 900 ms qui suivaient le rebond ; la durée de 900 ms a été choisie parce qu'elle permet d'analyser toutes les trajectoires entre le premier et le deuxième rebond, même pour les rebonds les plus courts suivant une augmentation de la gravité ou une diminution du coefficient de rebond. De la même manière que dans la période avant rebond, nous avons souhaité examiner de façon plus fine les adaptations des participants face aux trajectoires modifiées et notamment dans le décours temporel post-rebond. Pour cela nous avons découpé la période post rebond en six portions temporelles de 150 ms afin de déterminer si les experts et non-experts étaient perturbés et s'adaptaient de manière différentes.

Afin d'enlever un possible effet d'apprentissage de la tâche de poursuite (et non une adaptation aux conditions changeantes pour chaque bloc), les EC ont subi une transformation. Pour chacun des deux groupes dans les conditions pré-rebond et post-rebond, nous avons calculé la moyenne des EC pour chacun des huit blocs (en ne prenant que le nombre minimum d'essai communs, c'est-à-dire cinq). Ensuite, nous avons ajusté les données selon une fonction logarithmique népérien représentée par $f(x) = a \ln(x) + b$, avec le couple (a, b) de nombres réels inconnues à trouver, et $f(x)$ correspondant aux valeurs théoriques de chaque bloc pour chaque groupe et \times l'identifiant du bloc. Cette fonction logarithmique est connue pour rendre compte des apprentissages avec une pente importante correspondant aux premiers essais et une pente qui s'adoucit avec l'avancée des essais (eg., (Fitts et Posner, 1967; Welford, 1968; Kolers, 1975; Reisberg, Baron, et Kehler, 1980; Newell, 1980)). Au final, nous avons soustrait l'effet d'apprentissage aux données en appliquant à chacune des valeurs la soustraction de la valeur prédite par la fonction logarithmique et en ajoutant la valeur moyenne du groupe dans le bloc pour éviter que toutes les valeurs soient centrées sur zéro.

Le temps de réaction des experts en basket et des non-experts ont été comparé avec une analyse de variance univariée (ANOVA) à un facteur.

L'EC avant rebond a été analysé selon un plan factoriel $2 \times 9 \times 5$ (Expertise \times Portion \times Essai) avec l'Expertise (experts en basket et non-expert) comme facteur catégoriel et les Portions Temporelles (9 Portions Temporelles, chacune ayant une durée de 200 ms sauf pour la première qui comme indiqué était de 240 ms) et le facteur Essai (1 à 5 essais) comme facteur à mesures répétées (en prenant le nombre minimale d'essais communs pour chaque bloc), à partir d'une analyse de variance univariée (ANOVA).

L'EC post rebond a été analysé selon un plan factoriel $2 \times 5 \times 6 \times 5$ (Expertise \times Cinématique \times Portion Temporelle \times Essai) avec l'Expertise (experts en basket et non-expert) comme facteur catégoriel et avec la Cinématique (GB, CRB, TN, GH, CRH ; rappel : GB : trajectoire avec Gravité Basse, CRB : trajectoire avec Coefficient de Rebond Bas, TN : Trajectoire Normale, GH : trajectoire avec Gravité Haute, CRH : trajectoire avec Coefficient de Rebond Haut), les Portions Temporelles (6 Portions Temporelles chacune ayant une durée de 150 ms) et le facteur Essai (1 à 5 essais) comme facteurs à mesures répétées, à partir d'une analyse de variance univariée (ANOVA). Pour l'ensemble de ces analyses, le seuil de significativité α a été fixé à .05. Des comparaisons a posteriori de Newman-Keuls ont été réalisées pour examiner la nature des effets significatifs, chaque fois que cela était nécessaire.

1.4.3 Résultats

La Figure 44 représente l'ensemble des trajectoires de poursuite pour les différentes conditions de modification de la cinématique post rebond. Ces figures montrent clairement que les experts (courbes vertes) sont plus proches de la balle que les non-experts en bleu.

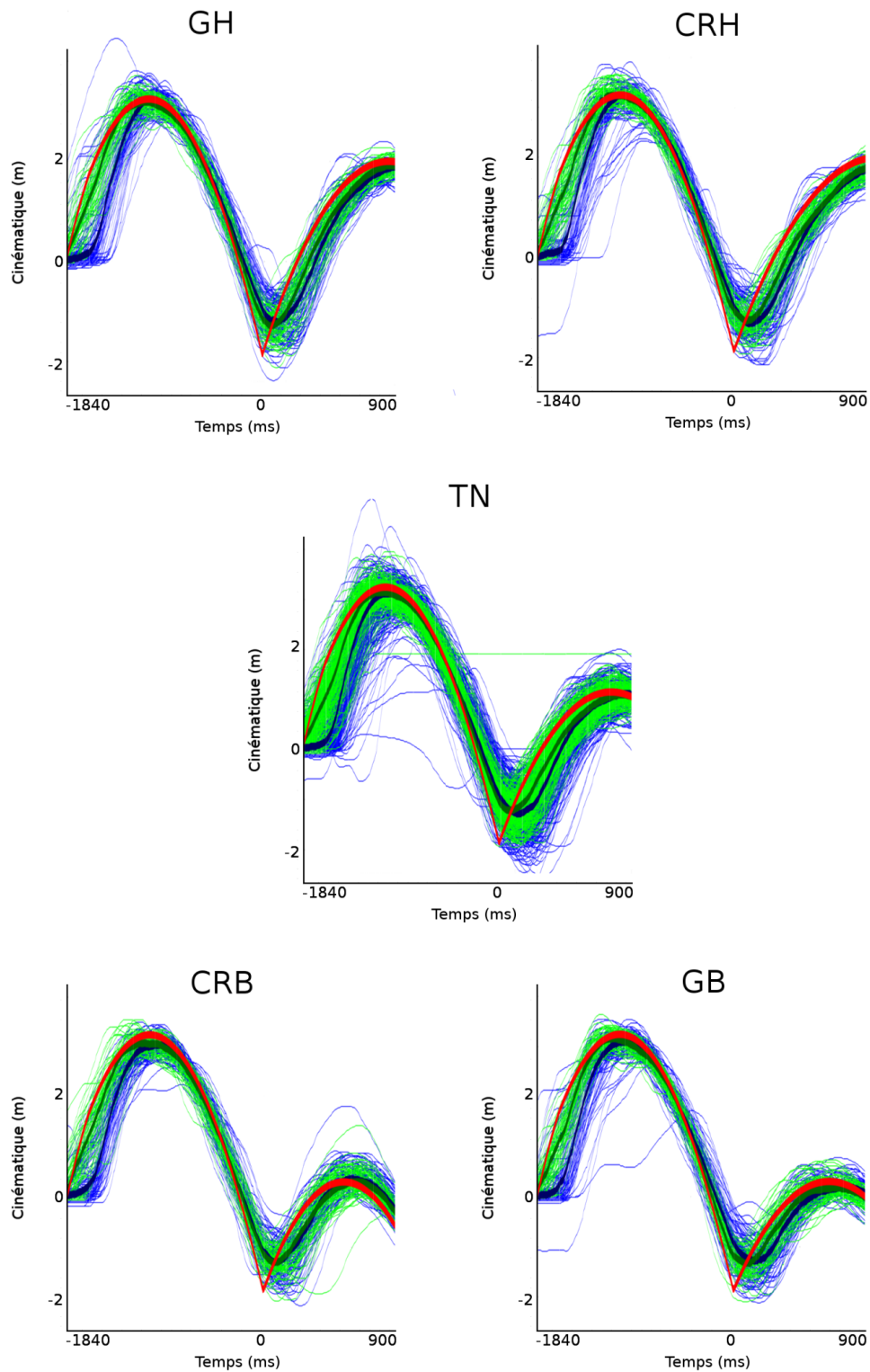


FIGURE 44: Affichage de l'ensemble des essais réalisés par tous les participants sur l'intervalle $[-1840, 900]$ ms, où $t=0$ ms correspond au moment du rebond, selon les différentes conditions de la cinématique (GB, CRB, TN, GH, CRH). La ligne rouge, bleue foncée et verte foncée représentent respectivement, la trajectoire de la balle, la trajectoire médiane des non-sportifs, la trajectoire médiane des experts. Le zéro indique le moment du rebond.

Temps de réaction

L'ANOVA montre un effet significatif de l'expertise ($F(1,21)=7.37$, $p<.05$, $\eta^2=.25$). Les experts ont des temps de réactions significativement plus courts que le groupe des non-experts (173 ms vs. 239 ms).

EC avant rebond

L'ensemble des essais est présenté dans la Figure 45 sans tenir compte des conditions de modification de la cinématique puisqu'elle ne se produisait qu'après le rebond. L'ANOVA montre un effet significatif de l'expertise ($F(1,21)=33.15$, $p<.05$, $\eta^2=.84$) du facteur Portions Temporelles ($F(8,168)=215.50$, $p<.05$, $\eta^2=.91$). Un effet d'interaction est présent entre les facteurs Expertise et Portions Temporelles ($F(8,168)=33.85$, $p<.05$, $\eta^2=.61$). Le post hoc de Newman-Keuls sur l'effet de l'interaction Expertise \times Portions Temporelles indique que les experts ont significativement une EC avant rebond plus réduite dans les trois premières portions (du début de l'essai à 640 ms) que les non-experts. Il n'y a ensuite plus de différence entre les non-experts et les experts pour les portions 4, 5, 6, 7, 8 avec des EC très proche de zéro. Enfin, une tendance statistique de ($p=0.059$) suggère une plus grande précision des experts dans les 200 ms avant le rebond (Figure 46).

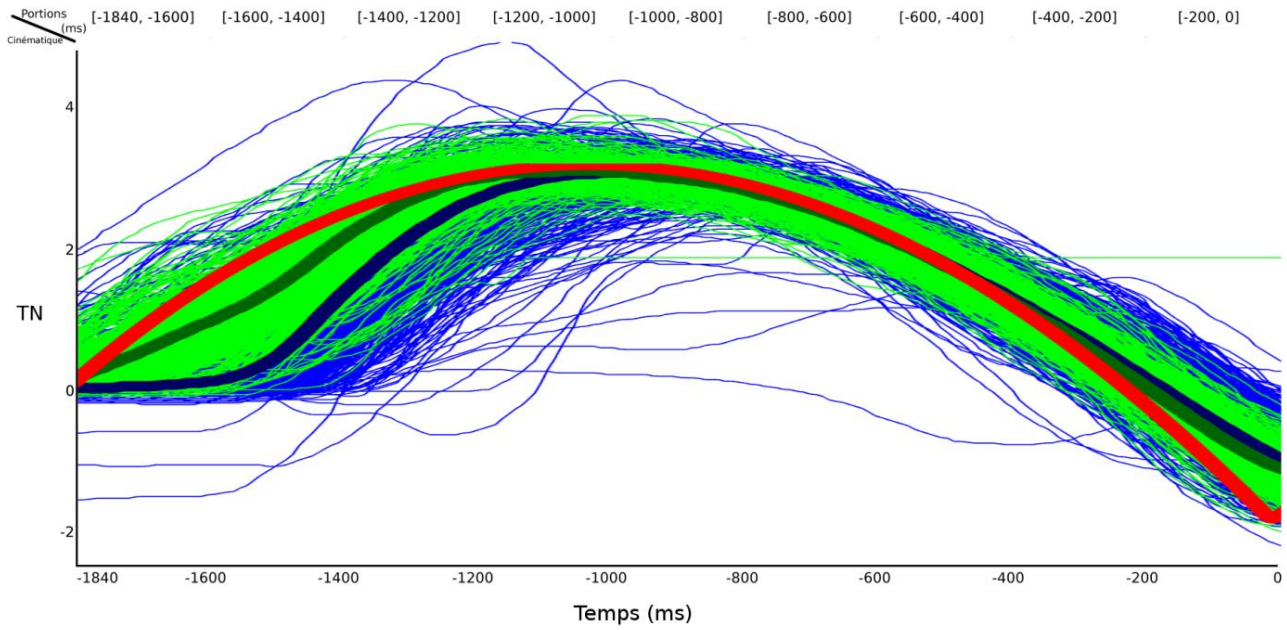


FIGURE 45: Affichage de l'ensemble des essais réalisés de tous les participants dans la période avant rebond par portions de 200 ms (sauf pour la première portion était de 240 ms). La ligne rouge, bleu foncée et verte foncée représentent respectivement, la trajectoire de la balle, la trajectoire médiane des non-sportifs, la trajectoire médiane des experts.

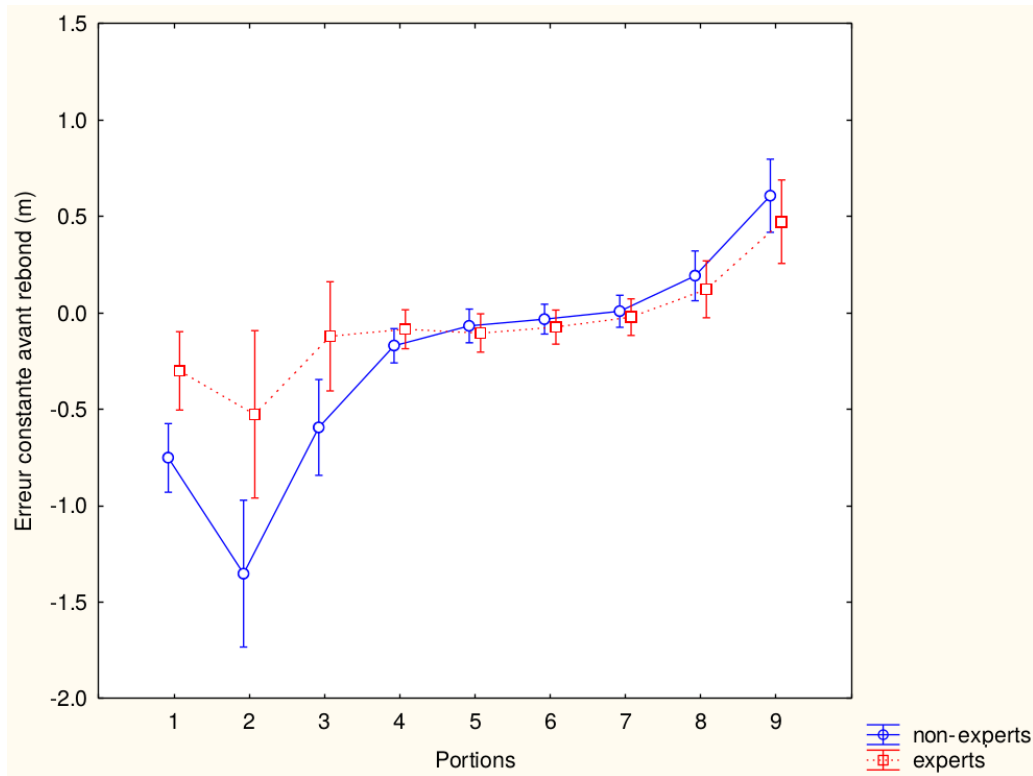


FIGURE 46: *EC avant rebond en m des experts et des non-experts en fonction des neuf Portions Temporelles (de 1840 ms à 0 où $t=0$ ms correspond au moment du rebond et avec 1 : portion de -1840 à -1600 ms, 2 : portion de -1600 à -1400 ms, 3 : portion de -1400 à -1200 ms, 4 : portion de -1200 à -1000 ms, 5 : portion de -1001 à -800 ms, 6 : portion de -800 à -600 ms, 7 : portion de -600 à -400 ms, 8 : portion de -400 à -200 ms, 9 : portion de -200 ms à 0).*

EC post-rebond

L'ensemble des essais est présenté dans la Figure 49. L'ANOVA montre un effet significatif de l'expertise ($F(1,21)=8.35$, $p<.05$, $\eta^2=.28$), du facteur Cinématique ($F(4,84)=55.60$, $p<.05$, $\eta^2=0.72$) et du facteur Portions Temporelles ($F(5,105)=130.91$, $p<.05$, $\eta^2=0.86$). Des effets d'interactions sont présents entre les facteurs Cinématique et Expertise ($F(4,84)=3.67$, $p<.05$, $\eta^2=.15$), les facteurs Portions Temporelles et Expertise ($F(5,105)=6.84$, $p<.05$, $\eta^2=.24$), une triple interaction s'est révélée entre les facteurs Cinématique, Portions Temporelles et Essai ($F(80,1680)=1.83$, $p<.05$, $\eta^2=0.08$). Le post hoc de Newman-Keuls sur l'effet de l'interaction Cinématique \times Expertise indique que les experts ont significativement une EC post-rebond similaire aux non-experts dans les conditions de Cinématiques GB et CRB. L'EC des experts se différencie des non-experts pour les Cinématiques TN, GH et CRH (Figure 47).

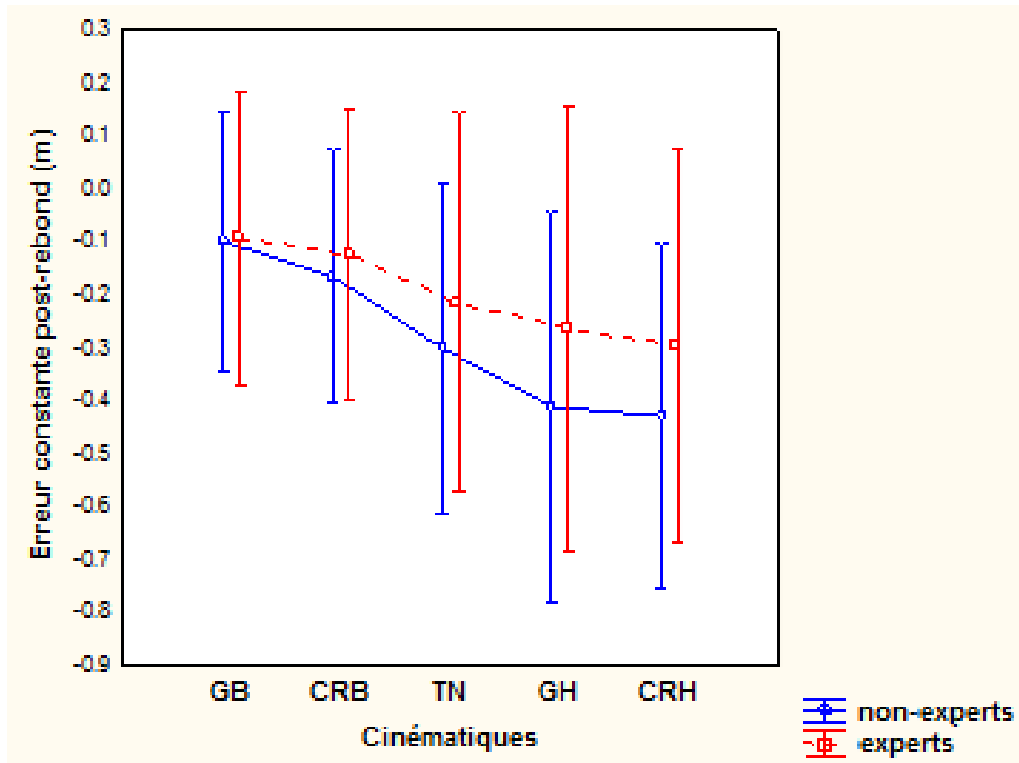


FIGURE 47: EC post-rebond en m en fonction des Cinématiques (GB (1); CRB (2); TN (3); GH (4); CRH (5)).

Le post hoc de Newman-Keuls sur l'effet de l'interaction Portions Temporelles \times Expertise indique que l'EC post-rebond entre experts et non-experts n'est pas significativement différent du début de l'essai jusqu'à 150 ms. Par contre de 150 ms à 450 ms, les experts ont une EC plus réduite que les non-experts. A partir de 450 ms l'EC des experts et non-experts n'est plus différente (Figure 48).

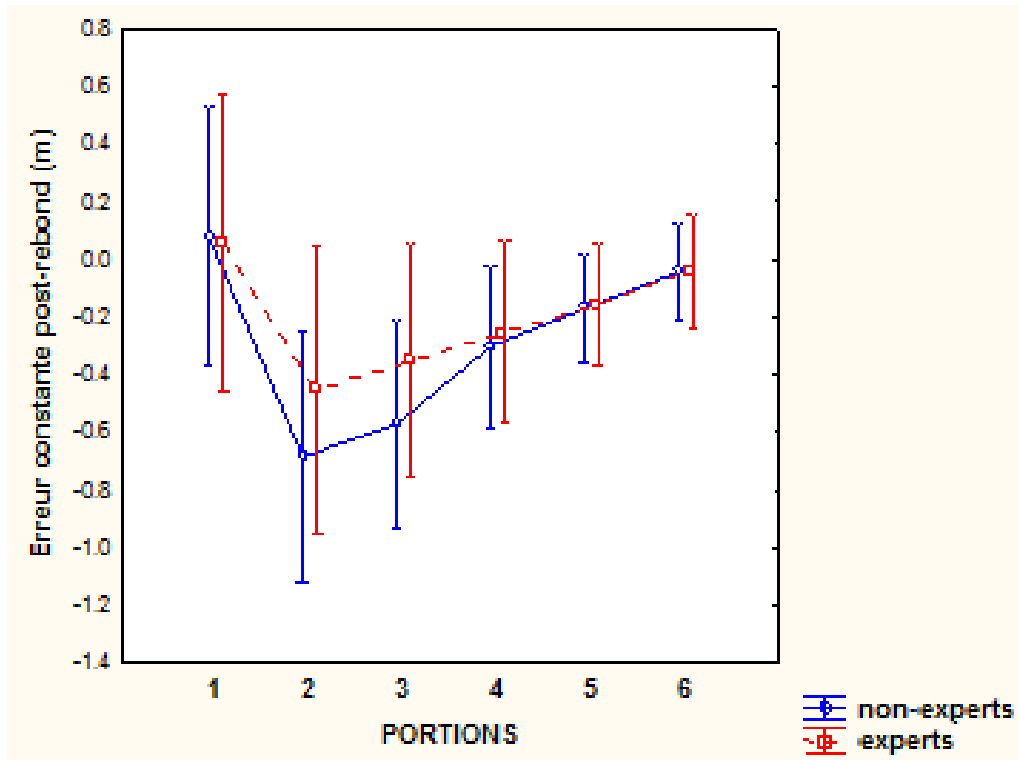


FIGURE 48: *EC post-rebond en m des experts et des non-experts en fonction des six Portions Temporelles (de 0 à 900 ms avec 1 : portion de 0 à 150 ms, 2 : portion de 150 à 300 ms, 3 : portion de 300 à 450 ms, 4 : portion de 450 à 600 ms, 5 : portion de 600 à 750 ms, 6 : portion de 750 à 900 ms).*

Le post hoc de Newman-Keuls sur l'effet de la triple interaction Cinématique \times Portions Temporelles \times Essai indique que l'EC post-rebond diminue avec les essais pour les Portions Temporelles de 300 ms à 750 ms uniquement pour les Cinématiques GB et CRB (Figure 50). Une analyse descriptive de la Figure 48 fait ressortir que le différentiel post rebond entre les conditions de variation du rebond diminue avec les essais particulièrement pour les portions 150-300 et 300-450 ms. La figure 49 illustre la poursuite du ballon post-rebond de tous les participants et de toutes les conditions de la cinématique dans la période de poursuite [0,900] ms. Nous remarquons que pour la majorité des conditions cinématiques les deux participants sont perturbés dans la portion [0,150] ms, ensuite nous remarquons une adaptation plus rapide du sujet expert que du sujet non-expert entre la portion [150, 600] ms. Enfin, les deux sujets convergent vers une adaptation similaire à partir de 600 ms.

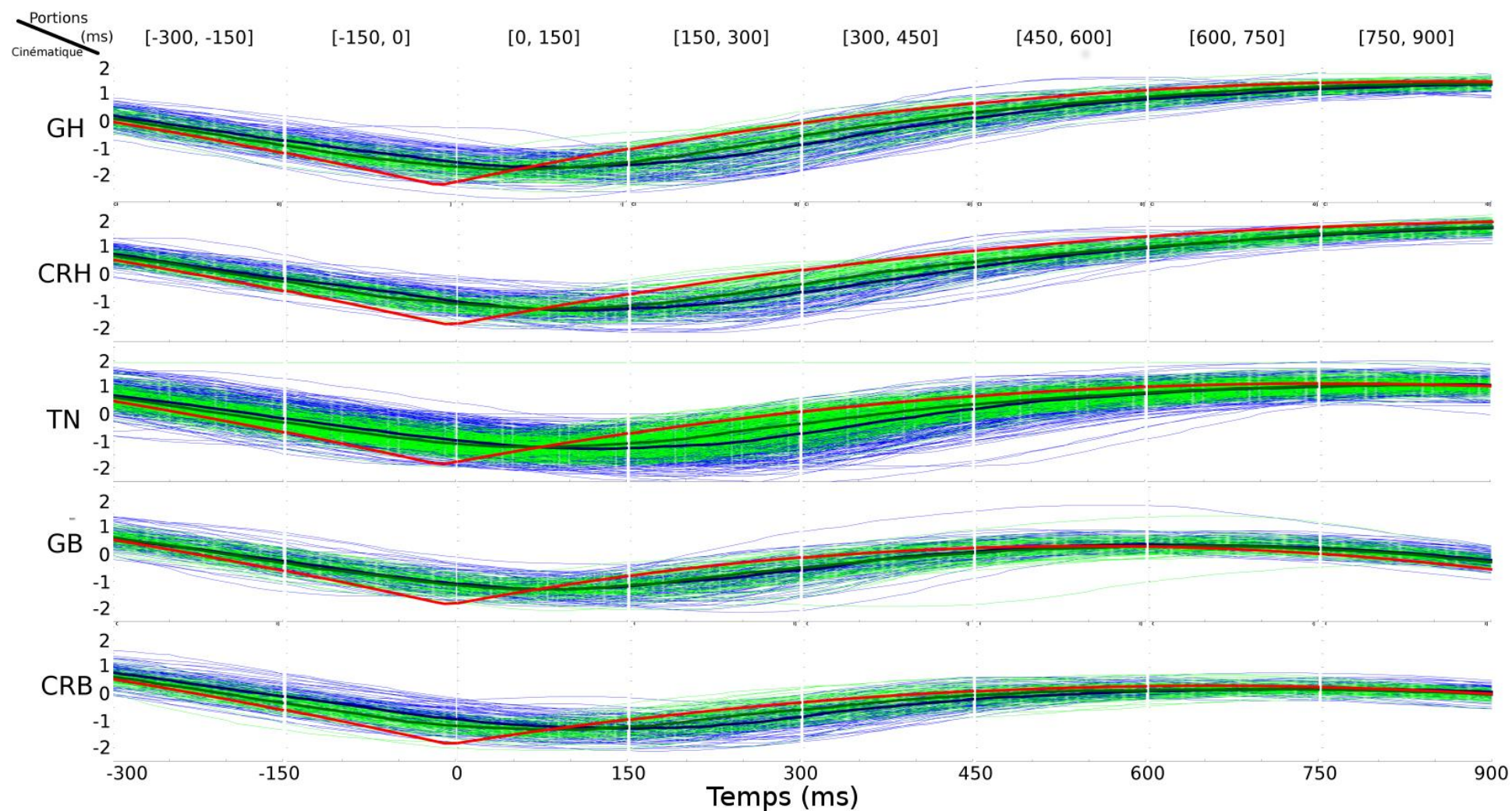


FIGURE 49: Affichage de l'ensemble des essais réalisés de tous les participants par portions de 150 ms. De haut en bas, changement de la cinématique (GB, CRB, TN, GH, CRH). De gauche à droite, changement de l'intervalle des portions. Les lignes rouge, bleue foncée et verte foncée représentent respectivement, la trajectoire de la balle, la trajectoire médiane des non-sportifs, la trajectoire médiane des experts. Le zéro indique le moment du rebond. A noter que les deux portions avant le rebond sont ajoutées avant pour donner une représentation de ce qui se passe juste avant le rebond.

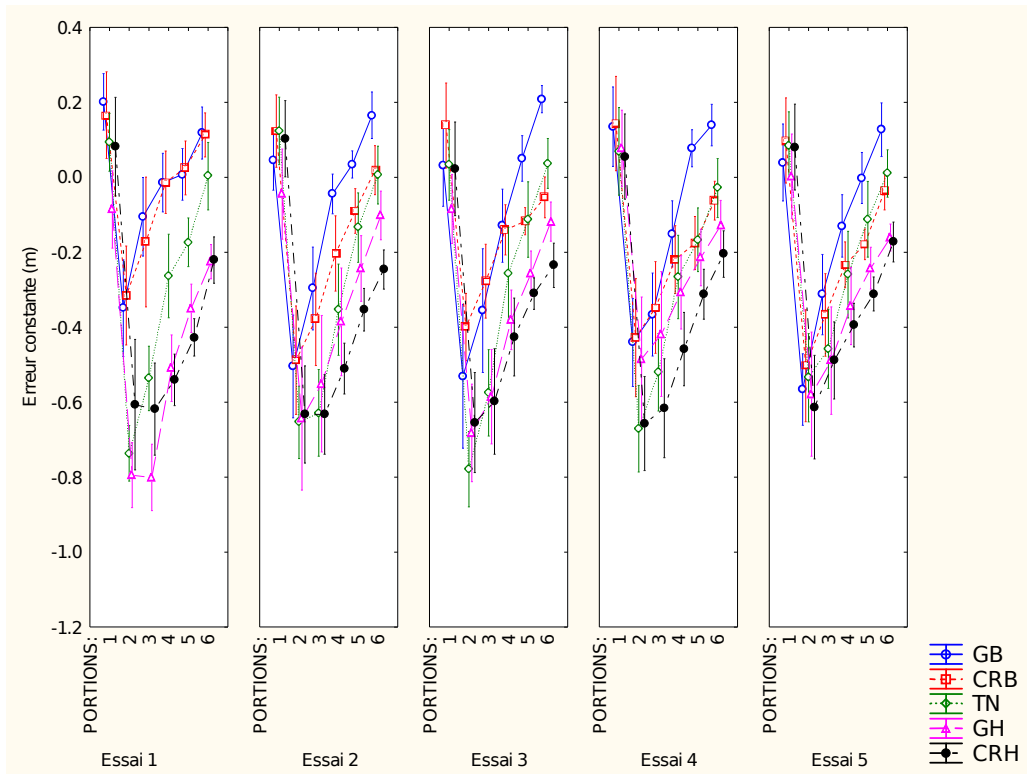


FIGURE 50: *EC post-rebond en m de tous les participants des cinq essais en fonction des six Portions Temporelles (de 0 à 900 ms avec 1 : portion de 0 à 150 ms, 2 : portion de 150 à 300 ms, 3 : portion de 300 à 450 ms, 4 : portion de 450 à 600 ms, 5 : portion de 600 à 750 ms, 6 : portion de 750 à 900 ms) et des cinq Cinématiques (GB, CRB, TN, GH, CRH).*

1.4.4 Discussion

Après avoir étudié les capacités de détection de modifications des propriétés habituelles d'une trajectoire de ballon de basket et montré que les experts n'étaient pas meilleurs dans ce type de tâche, cette expérience visait à tester les capacités de régulation et d'adaptation du geste dans une tâche perceptivo-motrice et à montrer que les experts se différenciaient des non-experts dans ce type de tâche.

D'une manière générale et confirmant notre hypothèse, cette tâche a montré de nombreuses différences entre experts et non-experts. Concernant la cinématique (Figures 44, 45 et 49), il apparaît que la tâche de poursuite a été réalisée correctement avec un suivi assez proche de la balle. Les experts réagissent plus vite et leurs cinématiques apparaissent moins variables et plus proches de la trajectoire de balle. Cela est confirmé par les analyses sur le temps de réaction et sur l'EC dans la première période après le départ de la balle.

Dans la portion qui précède le rebond, les experts apparaissent plus proches de la balle que les non-experts (Figures 45 et 46). D'une manière générale et indépendamment de l'expertise, ce dernier comportement est assez remarquable. Il apparaît que les participants prennent de la distance par rapport au rebond. Ils ne tentent pas de suivre la balle pendant cette phase. Ils sont plutôt sur une stratégie d'attente pour recapturer la balle dans la phase post-rebond (Figure 49). Ce type de comportement a été observé au niveau des mouvements oculaires dans l'étude de (Land et McLeod, 2000) et dans l'étude de (Diaz *et al.*, 2013) présentées dans la section 1.4. L'origine de ce comportement peut provenir de la complexité du rebond et la difficulté à produire le mouvement exact du rebond avec une inversion soudaine dans la composante verticale. Ce type de comportement correspond à une attente des effets du rebond. Il est à noter que les experts attendent moins et sont au plus près dans les 200 ms avant le rebond (Figures 45 et 46). Ce résultat pourrait indiquer que les experts tout comme les non-experts n'ont pas développé des représentations internes très précises du rebond qui permettraient de programmer un mouvement reproduisant cette forme. Au contraire, ils attendent que le rebond soit passé pour recapturer la balle. Ensuite, les ajustements des experts et des non-experts ne sont pas différents ce qui était notre interprétation sur une possible absence de représentation plus précise chez les experts.

En revanche, dans les deux phases qui suivent la phase post rebond, c'est-à-dire de 150 à 450 ms, les experts se différencient des non-experts en étant plus proches de la balle. Cela apparaît plus précisément dans les conditions de déviation haute et la condition de rebond normal. Le fait que cette différence ne se manifeste pas spécifiquement pour la condition normale ou à l'inverse dans les conditions modifiées permet de penser que les experts n'ont pas d'attentes plus précises par rapport à la trajectoire habituelle. Cela montre plutôt que ces différences sont dépendantes des contraintes et notamment de l'amplitude et/ou de la vitesse post rebond. Ces conditions plus contraignantes peuvent ainsi expliquer l'apparition des différences liées à l'expertise, traduisant des capacités d'adaptations supérieures chez les experts par rapport aux non-experts (Figure 45).

La différence qui apparaît dans la période 150 à 450 ms entre experts et non-experts correspond clairement à la mise en jeu de régulations plus rapides et/ou plus précises. Elle peut aussi témoigner de délais de régulation (délais visuo-moteurs) plus courts pour ajuster en continu leur action (Le Runigo *et al.*, 2005, 2010). Dans cette période, les processus perceptivo-moteurs ont donc permis aux experts de réduire les erreurs. Dans la mesure que nous n'avons pas eu de différences entre les différentes catégories, la question peut être posée de savoir si ce

sont les perturbations de la gravité et du coefficient de rebond qui doivent être compensées ou surtout celle de la perturbation du rebond. En effet le rebond est une source importante de perturbation de la trajectoire dans la mesure où la direction de la trajectoire change, certes à un moment prévisible, mais de manière radicale. Le fait que la condition dite "normale" ne se distingue pas dans les analyses tend à montrer que le rebond est l'élément le plus perturbant dans ces trajectoires (Figures 50 et 49).

Les non-experts parviennent à ajuster leur mouvement dans des délais plus longs, mais rejoignent la précision des experts dans la portion entre 450 et 900 ms, même s'il reste apparemment une variabilité plus importante (Figures 48 et 49). Il faut dire aussi que cette portion correspond à la fin de la phase montante et au sommet du premier rebond dans laquelle la vitesse verticale tend à diminuer considérablement du fait l'accélération gravitaire en sens opposé. De ce fait les angles de déviation du vecteur vitesse sont plus petits, ce qui rend la tâche plus simple à réaliser.

L'interaction entre les différents facteurs, cinématiques, portions de mouvement et essais (Figure 48) montre qu'indépendamment de l'expertise, les participants minimisent rapidement leurs erreurs par rapport aux différentes conditions de modifications de la trajectoire. Il apparaît néanmoins que le pattern d'erreur général reste le même : c'est-à-dire une erreur importante post-rebond qui est progressivement réduite au cours des portions et au cours des essais qui suivent. Cela peut correspondre à une adaptation des attentes du rebond par rapport à des conditions de gravité ou de coefficient de rebond qui ont changé. Sur cet aspect, les experts ne se distinguent pas non plus des non-experts.

En résumé, l'expérience 3 nous a permis de tester les capacités de régulation et d'adaptation dans une tâche perceptivo-motrice et de montrer que les experts pouvaient se différencier dans ces conditions nécessitant un lien entre perception et action. En effet, l'analyse de l'erreur constante dans la phase pré et post-rebond a confirmé notre hypothèse principale, selon laquelle les capacités de régulation perceptivo-motrice permettaient de discriminer l'expertise en sports de balle. De plus, les résultats ont montrés que durant la phase [-200,150] ms, les participants se sont basés sur une stratégie d'attente du rebond et de recapture de la balle ; dans cette période la différence entre experts et non-experts est très limitée.

1.5 Conclusion

Au cours de cette première partie, il a été possible de montrer, à travers des expériences dans le même environnement virtuel, que la discrimination de l'expertise est possible quand la tâche implique des processus perceptivo-moteur et non quand elle implique seulement les processus perceptivo-cognitifs. Nous pouvons donc faire l'hypothèse que la poursuite implique des processus de régulations du mouvement tels que ceux impliqués dans les actions d'interception (Carlton, 1992; Le Runigo *et al.*, 2005; McLeod, 1987; Bootsma et Van Wieringen, 1990).

Dans la continuité de ces résultats et des travaux qui viennent d'être rappelés, il est apparu intéressant d'exploiter les principes des tâches de poursuite pour mieux identifier comment elles peuvent révéler des différences entre experts et non-experts. Il faut reconnaître qu'au premier abord, cette tâche présente des spécificités qui peuvent paraître très schématiques et éloignées des tâches dans lesquels les experts en sports de balle développent leur expertise. Les résultats de l'expérience 3 permettent néanmoins de supposer que cette tâche peut être discriminante de l'expertise, car impliquant ou nécessitant des régulations perceptivo-motrice qui sont particulièrement développées par les experts. En d'autres termes, ces résultats suggèrent un transfert des capacités d'ajustement et de régulation des experts dans des tâches virtuelles de poursuite.

Avec cet objectif, nous avons développé une tâche de poursuite 2D dans un espace délimité avec des rebonds et de possibles déviations inattendues de la trajectoire. Nous avons fait l'hypothèse que dans cette tâche qui peut paraître schématique, les experts manifesteraient une précision plus grande avec des capacités d'adaptation supérieures, particulièrement dans les situations les plus contraignantes (poursuite aux alentours du rebond et poursuite des trajectoires accélérées). Plus précisément, nous proposons une hypothèse temporelle sur une réduction du temps de perturbation lié aux rebonds chez les experts, ce qui leur permettrait une meilleure régulation de l'action et d'avoir plus de temps pour ajuster le mouvement de l'effecteur vers la cible. Nous avons également proposé une hypothèse cinématique qui repose sur un nombre de réductions d'écart par rapport à la cible plus élevée attendu chez les experts traduisant des régulations du mouvement plus nombreuses. Par la suite, dans l'expérience 5, nous avons complexifié la tâche de poursuite 2D, en mettant en place non seulement des situations de poursuite de déviation prévisible par des rebonds mais aussi

des déviations imprévisibles. Nous avons fait l'hypothèse que les experts devraient avoir une meilleure performance liée à leur capacité de régulation face aux déviations imprévisibles. Par ailleurs, dans cette expérience, nous avons ajouté une hypothèse temporelle en lien avec le délai visuo-moteur calculé à partir de l'écart entre l'apparition de la déviation et la première correction effectuée. Notre hypothèse, dans la perspective des travaux de ([Le Runigo et al., 2005, 2010](#)) était que les experts devaient avoir un délai visuo-moteur plus court que les non-experts et que l'identification de ce délai visuo-moteur devait aussi permettre d'expliquer leur plus grande précision dans la tâche de poursuite d'une manière générale. En effet, on peut supposer qu'un délai visuo-moteur plus court permet des ajustements plus rapides et plus fréquents et par conséquent d'être plus précis dans ce type de tâche. Enfin, une sixième expérience de poursuite a été réalisée dans un environnement en 3D. L'objectif était de vérifier que l'ajout d'une dimension, importante dans les interactions avec l'environnement (i.e., la profondeur), permettrait de montrer des différences encore plus nettes entre experts et non-experts par une sollicitation plus spécifique des processus déterminants de l'expertise.

Chapitre 2

Deuxième partie expérimentale : Etude des régulations perceptivo-motrices des experts en sports de balle

Sommaire

2.1	Introduction de la seconde partie expérimentale	131
2.2	Expérience 4 : Sport expertise in perception-action coupling revealed in a visuomotor tracking task	131
2.2.1	Abstract	131
2.2.2	Introduction	132
2.2.3	Method	134
2.2.4	Data Analysis	138
2.2.5	Results	138
2.2.6	Discussion	143
2.3	Expérience 5 : Capacité d'adaptation face à des déviations imprévisibles et rôle du délai visuo-moteur dans une tâche de poursuite visuo-manuelle . . .	146
2.3.1	Introduction	146
2.3.2	Méthode	147
2.3.3	Résultats	154
2.3.4	Discussion	160
2.4	Expérience 6 : Poursuite visuo-manuelle en immersion 3D	163

2.4.1	Introduction	163
2.4.2	Méthode	164
2.4.3	Résultats	170
2.4.4	Discussion	176

2.1 Introduction de la seconde partie expérimentale

Dans cette seconde partie expérimentale, nous avons également tenté de dépasser la démarche classique des études sur l'expertise qui comparent des experts experts à des non-experts (le plus souvent non-experts). Ainsi, nous avons distingué les experts en fonction de leur niveau de pratique et de leur volume d'entraînement. Un niveau super-experts a été défini quand les joueurs étaient des professionnels qui pratiquaient à un niveau national et avaient plus de dix ans de pratique avec une fréquence d'au moins cinq entraînements par semaine. Un niveau experts a aussi été défini quand les joueurs pratiquaient à un niveau régional avec une pratique entre deux et dix ans et avec une fréquence de deux entraînements par semaine en plus des matches. Le niveau non-experts était composé de participants qui n'avaient jamais ou peu pratiqué de sports de balle.

2.2 Expérience 4 : Sport expertise in perception-action coupling revealed in a visuomotor tracking task

Cette étude a fait l'objet d'une publication([Mallek, Benguigui, Dicks, et Thouvarecq, 2017](#)) et est présentée de manière intégrale en anglais.

2.2.1 Abstract

We compared the visuomotor coordination of tennis players with different levels of expertise (Super-Experts; Experts and non-Experts) in a visuomotor tracking (VMT) task. Participants were asked to track a moving target which could rebound on the sides of a 2D screen. Results indicated that the VMT task allowed the discrimination of expertise. Multiple

regression analysis revealed that performance could be explained by the temporal adaptation of participants to rebounds and the number of movement adaptations. Compared to Non-Experts, the Experts had a shorter perturbation time with higher adaptation and regulation. This corresponds to a better perception-action coupling and the predominant use of a prospective control process. Results also indicate that perception-action coupling capacities are transferable to virtual tasks, and allow us to reveal processes of visuomotor coordination that differentiate experts and novices.

Keywords : perception-action coupling ; expertise ; tracking task ; fast-ball sports

2.2.2 Introduction

Success in fast-ball sports requires highly-skilled athletes to control precisely timed visuomotor behaviors under tightly constrained spatiotemporal conditions. In baseball, for example, in order to intercept a ball thrown at 145 km/h the spatiotemporal window for accurate performance is tightly balanced between a range of only ± 9 ms and ± 1.27 cm (Gray, 2002). In tennis, the returner has less than 600 ms to reach the ball and to return a serve delivered at 200 km/h (Jackson et Mogan, 2007). Thus, success in sports requires an optimal coordination between perception and action, whereby players have a very short period of time to adapt and control actions to intercept and return a projectile with a precise and powerful shot.

The study of the population of sport experts has helped to determine the processes that underpin skilled actions (Ericsson et Smith, 1991; Yarrow, Brown, et Krakauer, 2009). In ball sports, researchers have studied differences in perceptual-cognitive processes between respective experts and non-experts (Williams et Ericsson, 2005). These efforts have contributed to a large body of literature, which indicates that experts are better than novices at anticipating the actions of opponents on the basis of contextual and biological motion information (Triolet, Benguigui, Le Runigo, et Williams, 2013).

Expertise in ball sports can also be explained on the basis of the control and scaling of actions relative to perceptual information (Bootsma et Van Wieringen, 1990). One way to examine such relations between perception and action is to study the capacity of participants to adapt their movements relative to changes in a task with increasingly complex demands (e.g., (Benguigui *et al.*, 2008)). Specific to changes in ball trajectories, many factors such as rebounds,

wind, and frictions create a high level of uncertainty and require the on-line adaption of movements within a short visual-motor delay (VMD) (Benguigui *et al.*, 2003). The prospective control of movement offers a means to explain accurate behaviour in such situations as this process is based on the continuous adaptation of actions to the on-going information without any need for prediction (e.g., (Jacobs et Michaels, 2006)). The principle is to continuously reduce or cancel the discrepancy between the actual and the necessary movement. (Le Runigo *et al.*, 2010) showed that when the velocity of a target unexpectedly changed, experts adapted their actions earlier to the new velocity. They suggested that this difference, combined with the ability to reach a high velocity of the hand after the deviation of the ball, could explain the better precision of experts in ball sports.

Given the proposed differences in the precise control of actions between experts and non-experts, the aim of the current study is to examine whether expertise in ball sport could be revealed by a visuomotor tracking (VMT) task. We expected that accuracy in the VMT task, where the goal is to pursue and to continuously match the trajectory of the target, strongly depends upon precise perception-action coupling (Le Runigo *et al.*, 2010). Further to studies that have examined expertise using judgments in response to simulated sport scenarios (e.g., (Williams, Ward, Knowles, et Smeeton, 2002)) or real-time interactions in sport tasks (e.g., (Dicks, Davids, et Button, 2010)), we aimed to examine whether expertise can be revealed by a VMT task with strict spatiotemporal demands that require precise perception-action coupling processes.

The current study contains demanding spatiotemporal constraints during the VMT task with accelerations and sudden changes in the direction of the target following rebounds on the sides of a 2D square. As movement control for interacting with moving targets is known to be based on first-order information corresponding to the velocity of the target (e.g., (Bootsma *et al.*, 1997)), sudden or continuous changes in the velocity should increase the difficulty of tracking and require more adaptations and accurate regulation in movement (e.g., (Le Runigo *et al.*, 2010)). Three groups of participants (Non-Experts, Experts and Super-Experts in ball sports), were tested with the aim of differentiating between Experts and Non-Experts and also within Experts with different level of expertise. We expected that performance in the task would be a function of the level of expertise specifically in the more demanding conditions (i.e., accelerated condition and tracking following a rebound). We also expected that temporal variables such as the initiation time of the effector following the first movement of the target and the time elapsed prior to the first interception of the target would act as indicators of the

inertia of perception-action. Further, movement adaptations and regulations should explain the accuracy to complete the task and the differences according to the level of expertise.

2.2.3 Method

Participants

Three groups were tested; the Super-Experts (Super-Exp) group included 13 international level tennis players (8 men and 5 women), among the best 600 in the world, 22.17 ± 5.04 years old; the Experts (Exp) group included 14 intermediate players (11 men and 3 women), in the range of "good" to "very good", based on the French tennis federation's regional classification, 21.12 ± 1.3 years old. The Non-Experts (Non-Exp) group included 13 participants (8 men and 5 women), 23.89 ± 5.48 years old, who had no experience of playing interceptive sports nor did they play any sports that could be considered as "fast-ball" (e.g., tennis). Finally, as a rigorous experimental check, none of the participants reported intensively playing video games (more than one hour a day); this point was carefully considered as it is known that this could affect the findings of the VMT task (e.g., (Bavelier, 2006)). All the participants had normal or corrected vision. Informed consent was signed prior to testing. The study was approved by the local Ethics Committee in accordance with the Code of Ethics of the World Medical Association (Declaration of Helsinki).

Experimental device for visuomotor tracking task

We used a Samsung screen (Sync Master F2380) with an area of 50.8×28.7 cm and a projection resolution of 1920×1080 , a digital tablet INTUOS 4 sampled at 100 Hz using a stylus for tracking. Both devices were connected to a laptop, in order to project the visual scene and obtain the tracking movement data. Experimental conditions were realized through custom-written software "Poursuite" developed in collaboration with Richard Kulpa and Benoit Bideau (Laboratory of Movement, Sport, Health, University of Rennes 2). The screen was positioned at a height of 93 cm and the screen had a dimension of 31×31 cm. This resulted in a visual angle of $23.4^\circ \times 23.4^\circ$ when the participant sat at a fixed distance of 55 cm from the screen.

Experimental conditions

Participants were asked to track a moving target corresponding to a red disc (radius = 0.5 cm) on the screen with an effector consisting of a red circle (radius = 0.6 cm). The effector was controlled through the use of a stylus on the graphic tablet with direct correspondence between the stylus and the effector movement on the screen. Initially, the target could be viewed as a fixed figure in the centre of the screen appearing inside a 22.19×22.19 cm square. When the participant was ready, and after having positioned the effector on the target, the experimenter started the trial by pressing a button. The target started moving for 10 s after a randomized delay of between 0.5 to 2 s. After each trial, feedback was provided as a percentage value representing the duration the effector's trajectory matched that of the target during the trial.

The moving target had an initial velocity of 10 cm/s, and the velocity vector was randomly oriented in different directions on each trial. The velocity could remain constant throughout the trial (constant velocity condition) or accelerated by a constant acceleration of 5 cm/s^2 (accelerated condition). The acceleration vector was oriented in different directions from one trial to the next and always changed direction relative to the initial velocity vector. The moving target rebounded on the side of the square with a restitution coefficient of 1, meaning that both velocity and acceleration were held constant. Participants performed four trials as part of a task familiarisation procedure that included horizontal, vertical and diagonal displacement trajectories of the target. Participants then completed 12 trials, six in each acceleration condition, which were presented in a randomized order.

Dependent variables

Five different dependent variables were recorded in order to quantify the initial temporal and kinematic characteristics of the effector : (i) Initiation time, which was the time elapsed between the first time that the target moved and the first movement of the effector ; (ii) First interception time, which was the time elapsed between the first time that the target moved and the moment when the effector was equivalent to the position of the moving target for the first time ; (iii) Movement time was the time elapsed between initiation time and first interception time ; (iv) Peak velocity corresponded to the peak velocity of the effector that

occurred after initiation time; and (v) Time-to-peak-velocity corresponded to the time of the first peak velocity of the effector after initiation time.

In a pre-analysis of the data we observed that participants were not able to track the target around the rebounds with the same accuracy as in the rest of the trials. Consequently, we divided each trial into two interlaced periods of tracking : rebound tracking (following a rebound) and free tracking (without any rebounding) (see Figure 51). To determine these periods, two intermediate variables were calculated : time of divergence and time of convergence. In order to calculate these variables, indicators angle α and threshold angle α were used, as follows : Angle α was the angle between the direction of the moving target and the direction of the effector at each instant. Threshold angle α corresponded to the angle for which we considered that the accuracy of the pursuit was significantly affected. This threshold was calculated in a free tracking area defined by a square in the centre of the square (equal to 50% of the total area of the square), where the participant's control of movement was not directly influenced by rebounds on the side of the display. The calculation corresponded to the mean angle plus two standard deviations and yielded a 25° angle as a threshold for detecting a change in the accuracy of the tracking.

Time of divergence corresponded to the time when three successive angle α started expanding at a rate exceeding the threshold angle during the rebound time interval from -500 ms, to +500 ms around the rebound. Time of convergence corresponded to the time when three successive angle α were lower than the threshold angle, in the time interval from the time of divergence to 500 ms, after the rebound. The rebound perturbation period was delimited from the time of divergence to time of convergence. The free tracking period was delimited from time of convergence to time of divergence of the next rebound (Figure 51).

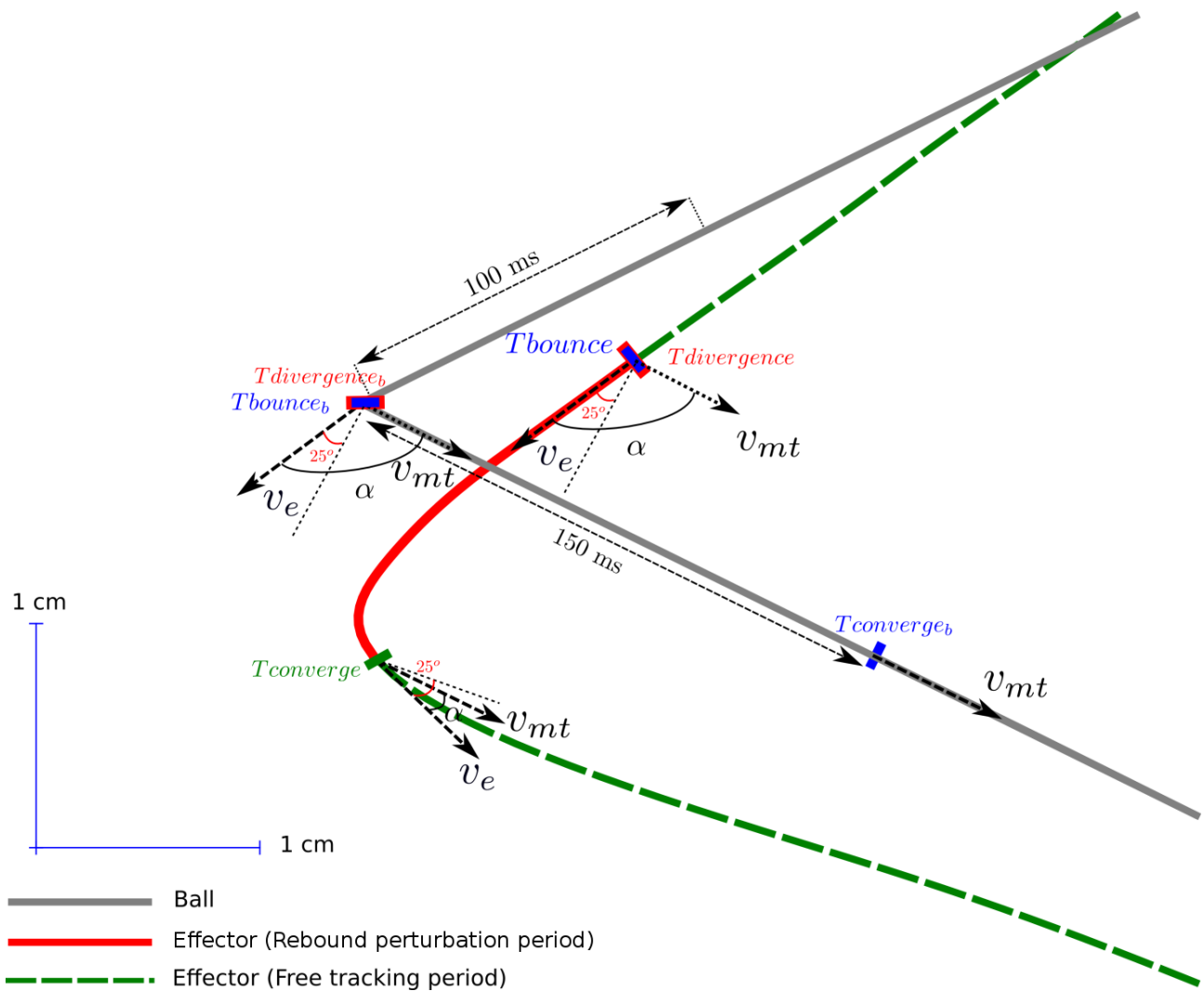


FIGURE 51: Illustration of various indicators to identify rebound perturbation period and free tracking period. $\alpha = \arccos\left(\frac{V_{mt}}{\|V_{mt}\|} \cdot \frac{V_e}{\|V_e\|}\right)$ with V_{mt} and V_e corresponding respectively to the Vector moving Target and to the Vector Effector. The Time of divergence ($T_{divergence}$) was determined when $\alpha \geq 25^\circ$. Whereas the time of convergence ($T_{convergence}$) was determined when $\alpha < 25^\circ$. rebound perturbation = $[T_{divergence} - T_{convergence}]$.

Distance to target was calculated to evaluate performance during tracking. This measure corresponded to the average distance (in cm) between the effector and the moving target. Number of gap reductions referred to the number of times per second when participants reduced the distance between the effector and the target.

2.2.4 Data Analysis

All analyses were performed with the Matlab programming software based on an initial low-pass Butterworth filter with a cut off frequency of 10 Hz. Initiation time, first interception time and duration of rebound perturbation period were analyzed using a mixed factorial analysis of variance (ANOVA) with Expertise as a between-subject effect (Super-Exp vs. Exp vs. Non-Exp) \times Acceleration (Constant velocity; Accelerated velocity) as a within-subject effect. Distance to target and number of gap reductions were analysed using an Expertise (Super-Exp vs. Exp vs. Non-Exp) \times tracking period (rebound perturbation period; free tracking period).x Acceleration (Constant velocity; Accelerated velocity) analysis ANOVA with mixed-design. Differences in temporal and kinematic movement variables were statistically examined between the groups as a function of the different conditions (tracking period and acceleration conditions). Then, we evaluated the origin of the distance to target performance variable for each participant using a forward stepwise regression with initiation time, rebound perturbation period, number of gap reductions and time-to-peak-velocity as predictors. Statistical significance was set at $p < .05$ for all tests. Newman-Keuls post hoc analyses were used when necessary to follow-up main and interaction effects.

2.2.5 Results

The initial temporal and kinematic characteristics of the effector are summarised in Table 7. Analysis of initiation time revealed a significant effect for Expertise ($F(2,39) = 4.55$, $P < .05$, $\eta^2 = .14$). Post hoc analyses indicated a significant difference between Non-Exp (207 ± 23 ms) and Exp (189 ± 15 ms) as well as Super-Exp (187 ± 19 ms), but no significant difference between Exp and Super-Exp (Table 1). There was also a significant effect of Expertise on first interception time ($F(2,39) = 3.71$, $P < .05$, $\eta^2 = .16$). Super-Exp had a shorter first interception time than both Exp and Non-Exp ($M_{Super-Exp} = 482 \pm 98$ ms; $M_{Exp} = 546 \pm 116$ ms; $M_{Non-Exp} = 556 \pm 95$ ms). The results also revealed a significant effect for acceleration ($F(1,39) = 21.21$, $P < .05$, $\eta^2 = .35$). Participants had a shorter first interception time in the constant velocity conditions (490 ± 95 ms) than accelerated conditions (570 ± 105 ms). Movement time only showed a significant effect for acceleration ($F(1,39) = 28.13$, $P < .05$, $\eta^2 = .41$). Participants had a shorter movement time in the constant velocity conditions (292 ± 80 ms) than in the accelerated conditions (378 ± 102 ms). Time-to-peak-velocity showed a

Tableau 7: Characteristics of temporal and kinematic variables for the different groups of expertise in the initiation of movement.

	Non-Exp	Exp	Super-Exp
Initiation time (ms)	207 ± 28	189 ± 17	187 ± 21
Movement Time (ms)	349 ± 87	357 ± 116	295 ± 91
First interception time (ms)	556 ± 95	546 ± 116	482 ± 98
Time-to-peak velocity (ms)	479 ± 46	440 ± 49	409 ± 44
Peak velocity value (cm/s)	7.74 ± 0.8	7.40 ± 0.67	8.02 ± 1.43

significant effect for Expertise ($F(2,39) = 11.09, P < .05, \eta^2 = .36$). Post hoc analyses showed a significant difference between three groups (Non-Exp (479 ± 46 ms); Exp (440 ± 49 ms); Super-Exp (409 ± 44 ms)). Peak velocity value only showed a significant effect for Acceleration ($F(1,39) = 7.56, P < .05, \eta^2 = .16$). Participants have a smaller peak velocity value in the constant velocity conditions (7.53 ± 1.02 cm/s) than accelerated conditions (7.89 ± 1.01 cm/s).

Distance to target analysis revealed a significant effect of Expertise ($F(2,39) = 6.66, P < .05, \eta^2 = .25$): Non-Exp (0.72 ± 0.13 cm) had a significantly greater distance to target than Exp (0.61 ± 0.08 cm) and Super-Exp (0.57 ± 0.11 cm) but no significant difference was observed between Super-Exp and Exp. The results also revealed a significant effect of the tracking period ($F(1,39) = 39.59, P < .05, \eta^2 = .50$) and of Acceleration ($F(1,39) = 84.67, P < .05, \eta^2 = .68$). Participants had a smaller Distance to target in the free tracking period than during the rebound perturbation period (respectively, 0.61 vs. 0.66 cm) and for constant velocity than for accelerated velocity (0.53 ± 0.13 vs. 0.74 ± 0.16 cm). The tracking period \times Acceleration interaction revealed a significant effect ($F(1,39) = 57.02, P < .05, \eta^2 = .59$). Post hoc analyses demonstrated that the difference between tracking period emerged only for the accelerated condition, participants had a longer distance to target in the rebound perturbation period (0.79 ± 0.17 cm) than during the free tracking period (0.68 ± 0.14 cm) (Figure 52). No other significant interactions were observed.

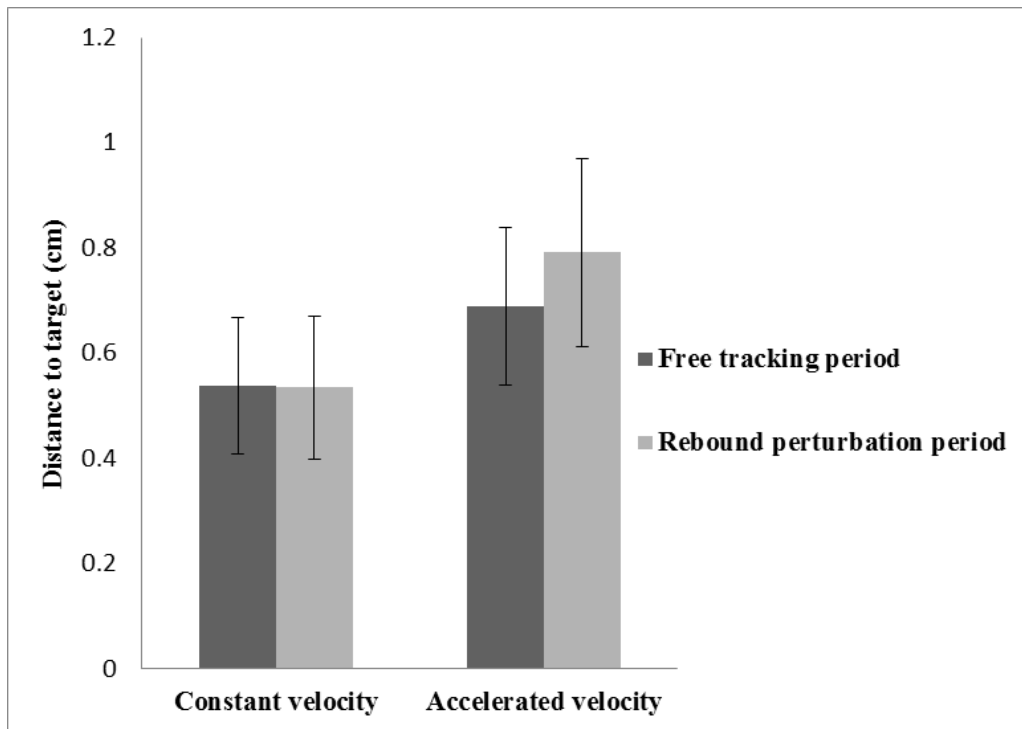


FIGURE 52: Distance to target according to tracking period and acceleration.

Rebound perturbation period analysis showed a significant effect of Expertise ($F(2,39) = 7.7, P < .05, \eta^2 = .28$). Post hoc analyses showed a significant difference between Non-Exp (228 ± 29 ms) and Exp ($M_{Exp} = 203 \pm 19$ ms) as well as Super-Exp (193 ± 22 ms), but no significant difference between Exp and Super-Exp. There was also a significant effect for Acceleration ($F(1,39) = 10.58, P < .05, \eta^2 = .21$) revealing that the rebound perturbation period was longer in the accelerated condition (217 ± 26 ms) than in the constant velocity condition (201 ± 37 ms). Number of gap reductions analysis showed a significant effect of Expertise ($F(2,39) = 4.92, P < .05, \eta^2 = .20$). Post hoc testing showed a significant difference between Non-Exp ($M_{Non-Exp} = 2.57 \pm 0.63$) vs. Exp ($M_{Exp} = 2.84 \pm 0.91$) and Non-Exp vs. Super-Exp ($M_{Super-Exp} = 2.90 \pm 0.91$), but no significant difference between Exp and Super-Exp. A significant effect for the tracking period ($F(1,39) = 163.30, P < .05, \eta^2 = .80$) and of Acceleration ($F(1,39) = 7.21, P < .05, \eta^2 = .15$). Participants produced a higher number of gap reductions for the rebound perturbation period than free tracking period (3.47 ± 0.78 vs. 2.06 ± 0.28) and for accelerated velocity in comparison with constant velocity (2.85 ± 0.99 vs. 2.68 ± 0.83). The tracking period \times Expertise interaction was significant ($F(2,39) = 3.68, P < .05, \eta^2 = .15$). Post hoc revealed that the group difference occurred only in the rebound perturbation period. Specifically, Non-Exp (3.07 ± 0.55) demonstrated a smaller number of gap

reductions in comparison with Exp (3.66 ± 0.56) and Super-Exp (3.71 ± 0.71) (Figure 53). No other interactions were observed.

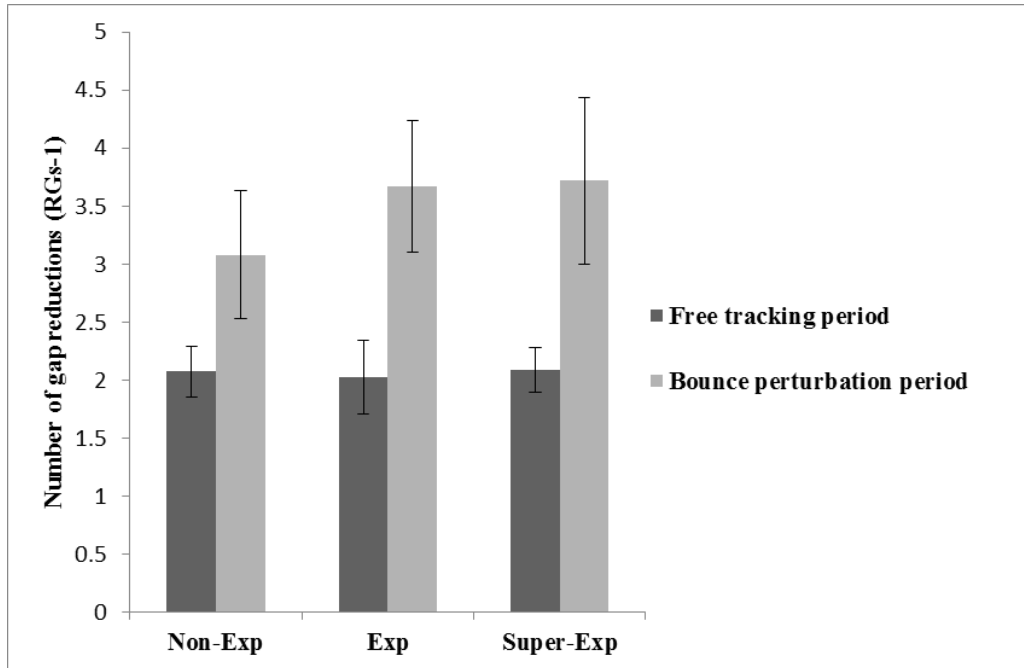


FIGURE 53: Number of gap reductions according to expertise and tracking period.

To determine whether the number of gap reductions could predict rebound perturbation period a simple regression was conducted and yielded the following relation : rebound perturbation period = $(-49.47 \times \text{number of gap reductions}) + 346.66$, $r^2 = .32$

Predicting distance to target for Non-Exp, Exp and Super-Exp

In order to determine which variables could explain the performance in the task (i.e., distance to target), we used a forward stepwise regression. For each participant, the distance to target score was used as a dependent variable and initiation time, rebound perturbation period, number of gap reductions, and time-to-peak-velocity were used as independent variables or predictors.

In the first step, the number of gap reductions was the best predictor of distance to target, with a significant correlation .74 ($F(1,40) = 50.72$), and explained 55% of the total variance. In the second step, rebound perturbation period was entered into the predictive equation and was found to explain an additional 14% of the total variance. In the third step,

initiation time was added and explains 1% of the total variance. In final step, time-to-peak-velocity was added and explains a supplementary 3% of the total variance. In the final equation, number of gap reductions ($\beta = -0.50$), duration of rebound perturbation period ($\beta = 0.44$), initiation time ($\beta = 0.23$), and time-to-peak-velocity ($\beta = -0.22$) explained 74% of the total variance, with significant correlation of .86 ($F(4,37) = 25.90$) (Figure 54).

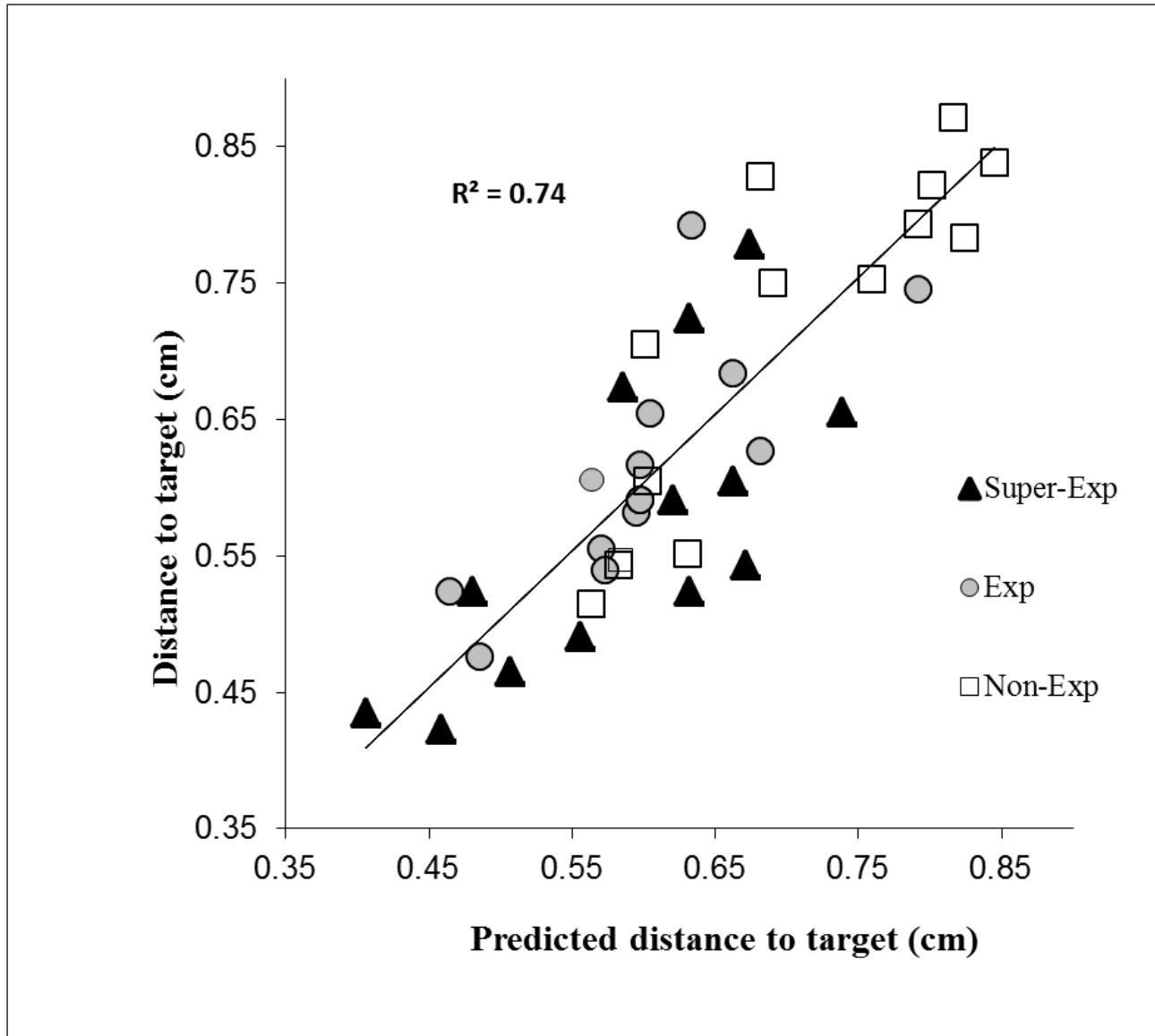


FIGURE 54: Distance to target as a function of predicted distance to target on the basis of multiple regression analysis with duration of number of gap reductions, rebound perturbation period, initiation time, and time-to-peak-velocity as predictors. The equation of this prediction can be written as follows : Predicted distance to target = $[-0.19 \times \text{number of gap reductions}] + [0.002 \times \text{rebound perturbation period}] + [1.39 \times \text{initiation time}] + [-0.57 \times \text{time-to-peak-velocity}] + [0.74]$.

2.2.6 Discussion

The purpose of this study was to examine whether perception-action coupling capacities are a possible determinant of expertise in fast-ball sports. We aimed to ascertain whether these supposed superior capacities could be revealed through the completion of a VMT task that had a varying level of difficulty according to the rebounds of the target and the variation of the target velocity (e.g., (Bennett et Benguigui, 2013; Le Runigo *et al.*, 2005, 2010)). In addition to differences between Exp and Non-Exp¹, we also aimed to examine whether differences between Exp and Super-Exp were revealed within the experiment.

The results revealed a significant effect of expertise on initiation time, first interception time and time to peak velocity. Super-Exp initiated their movement response and intercepted the target earlier than Exp and Non-Exp; likewise their peak velocity occurred earlier than Non-Exp. Movement time and peak velocity value did not reveal differences between the different groups of expertise. These results show that the shorter time to intercept the target is the result of a shorter latency in the adaptation of movement, which is in line with previous expertise studies in ball sports (e.g., (McRobert, A. et Tayler, M., 2005; Renshaw et Fairweather, 2000)). Analysis of distance to target showed that Experts performed better in the tracking task than Non-Exp. Even though the VMT task does not have the same demands of performance as on a tennis court, the results indicate that this task allows the discrimination of expertise and requires processes that may be commensurate with those required within fast-ball sports. The evidence from the current study indicates that it may not be necessary to sample sport specific situations within an experiment to reveal differences between experts and non-experts (see also, (Faubert, 2013)). That is, assuming that demanding laboratory tasks for perception-action coupling can be sufficient.

For all participants, the accuracy of pursuit decreased in the accelerated conditions. This observation is consistent with the hypothesis that the perceptual-motor system has greater difficulties in adapting to accelerated moving objects than those with constant velocities (e.g., (Bennett et Benguigui, 2013, 2016; Watamaniuk et Heinen, 2003)). It is known that interceptive actions are based on first-order information corresponding to the velocity rather than second-order information corresponding to acceleration (e.g., (Bootsma *et al.*, 1997)). Consequently, accelerated conditions require continuous adaptations of movement and require a stronger

1. As we had two groups of experts (Super-Exp and Exp), we use the term "Expert" in a general sense and Super-Exp and Exp to discuss differences between the two groups.

involvement of regulatory mechanisms (e.g., (Benguigui *et al.*, 2003)). Although the occurrence of rebounds could be anticipated (i.e., participants could see that the target would contact the side of the display), they led to decreases in tracking accuracy which increased the distance to target during the rebound perturbation period. The experts out-performed non-experts in this condition with a smaller distance to target and a shorter duration of this period. This finding is in line with previous results, which have revealed that changes in the direction of a target increases difficulty in visuomotor coordination as they require a large degree of movement adaptation (Le Runigo *et al.*, 2005, 2010). This highlights that deviations in ball trajectories, as a consequence of a rebounds, may be a particularly interesting situation with which to examine expertise in future work. Previously, eye-tracking studies have revealed that experts make specific fixations during bounce periods to pick-up information about the new direction of the ball leading to accurate interception (Ripoll et Fleurance, 1988; Land et McLeod, 2000).

The analysis of the number of gap reductions revealed greater movement regulation in Super-Exp compared to Non-Exp specifically during the tracking period, immediately before/after the rebound. The results lend support for the possibility that prospective regulation is a key determinant in the task. The larger number of gap reductions enhanced tracking accuracy and enabled the experts to be more precise in controlling their movements, as regulated by online information. The correlation between the number of gap reductions and the duration of the rebound perturbation period can be interpreted as evidence supporting this assumption. Confirming previous work (Bootsma et Van Wieringen, 1990; McLeod, 1987), these results suggest that Experts have optimised their perception-action coupling to regulate and adapt their movements in a more accurate manner.

The stepwise regression revealed that the rebound perturbation period and number of gap reductions variables were the best predictors of performance in the task. This analysis and the regression, as shown in Figure 54, offers a further means to understand expertise effects in the VMT task. Although ANOVA did not reveal significant differences in performances between Exp and Super-Exp groups, Figure 54 indicates that the three groups are well defined, with most of the Super-Exp placed on the bottom-left of the plot (which indicates better performance), most of Experts in the middle and Non-Exp on the upper-right of the plot (which indicates poorer performance). One can notice the presence of some variance with some Super-Exp and Non-Exp who had intermediate performances, while Exp were distributed between the Super-Exp and Non-Exp group performances (Figure 54). This stepwise regression analysis reveals the lack of homogeneity in the different groups, which might be explained by

the multi-factorial characteristic of expertise and inter-individual variability between experts (Davids et Baker, 2007). For instance, evidence indicates that expertise in sports is predicated on a number of interacting attributes including action capabilities (e.g., (Dicks *et al.*, 2010)), psychological skills (e.g., (Thelwell, Weston, et Greenlees, 2007)) or physiological characteristics (e.g., (Joyner et Coyle, 2008)). Thus, experts could have a relative weakness in their visuomotor coordination, and subsequently they could compensate for this through strengths in other attributes. Consequently, variations in such characteristics are likely to give rise to differences in perceptual capacities (Withagen et Chemero, 2009).

The VMT task used in the current experiment was a simulated interceptive task, which prevents specific generalizations being made about performance in sport specific contexts. However, the functional coupling between perception and action demanded by the task was sufficient to reveal an expertise effect. For instance, the bounce tracking period simulated trajectory deviations that may be comparable to those experienced in sport situations (e.g., bounce in tennis game). Future work could focus on testing the paradigm of deviated trajectories with not only expected but also unexpected deviations and to examine perceptual-motor skills in a high-dimensional context such as in a 3D virtual reality experiment (Bideau *et al.*, 2010). Such constraints could allow the discrimination of different level of expertise which could provide an opportunity to develop tests of talent identification. This also opens the question about the possibility of developing virtual reality tasks to train perceptual-motor skills (Faubert, 2013). Although it is likely that such technologies would only offer a supplement to typical training methods, there are suggestions that such training may be beneficial to athletes, particularly as part of rehabilitation programs (Appelbaum et Erickson, 2016).

To conclude, the results from the current study suggest that the VMT task allowed the discrimination of tennis expertise. Experts initiated earlier movements to adapt and to regulate their actions in comparison with Non-Exp and therefore, they appeared to be able to transfer their perception-action coupling capacities to the VMT task. These results are in accordance firstly with the temporal hypothesis that referred to earlier movement initiation and less delay in movement adaptations for experts and secondly with the movement kinematic adaptation hypothesis, that referred to a better ability for experts to regulate actions (Le Runigo *et al.*, 2005, 2010). The differences within experts were highlighted in the most complex and demanding conditions of movement control confirming that a part of expertise lies in the ability to develop prospective control.

2.3 Expérience 5 : Capacité d'adaptation face à des déviations imprévisibles et rôle du délai visuo-moteur dans une tâche de poursuite visuo-manuelle

2.3.1 Introduction

La tâche utilisée dans l'expérience 4 peut paraître éloignée des situations sportives que rencontrent les experts en sports de balle. Cependant les résultats indiquent que cette tâche implique des contraintes et des mécanismes de régulation perceptivo-motrice permettant de discriminer l'expertise. Contrairement à ce qui est fréquemment proposé, il apparaît donc que ce n'est pas véritablement la validité écologique de la tâche, d'ailleurs toujours difficile à définir, qui compte pour capturer les déterminants de l'expertise, mais bien la sollicitation des processus expliquant l'expertise à des niveaux de contraintes suffisamment élevés. Ainsi, ([Pinder, Davids, Renshaw, et Araújo, 2011](#)) met l'accent sur l'importance de solliciter les processus étudiés plus que sur la nécessité de ressemblance du design expérimental avec la tâche réelle. Cette sollicitation forme la base du concept de "représentative design" proposé par ([Brunswik, 1956](#)), qui consiste à élaborer des expériences qui mettent précisément en jeu les processus impliqués dans le comportement que le chercheur vise à étudier. Dans ses travaux, il définit le terme "représentative" par le fait que l'expérience devrait intégrer les caractéristiques de la situation réelle et non pas à rechercher à concevoir une expérience qui soit la plus réaliste possible. En ce sens, on peut considérer que notre tâche de poursuite, aussi schématique et éloignée soit-elle des actions d'interception que peuvent rencontrer des joueurs de basket ou de tennis, sollicite bien des mécanismes perceptivo-moteurs qui les distinguent des non-experts et qui contribuent à leur performance de haut-niveau dans ce domaine.

À la suite des résultats de l'expérience 4, nous avons souhaité tester les capacités d'adaptation des experts et des non-experts en ajoutant des déviations imprévisibles. Dans la continuité des travaux de ([McLeod, 1987](#); [Carlton, 1992](#); [Le Runigo et al., 2005, 2010](#)), nous pouvons suggérer que des mécanismes de régulation optimisés se développent avec l'entraînement et pourraient être particulièrement révélés dans des situations de poursuite pouvant être par moment totalement imprévisibles. Cette optimisation pourrait se traduire par des adaptations plus rapides et plus précises pour permettre aux experts de mieux ajuster

l'action face aux changements brusques de la trajectoire de la cible, et pour être plus précis pour recapturer la cible après la déviation.

Deux hypothèses qui peuvent être complémentaires ont été proposées pour tenter d'expliquer l'origine d'une meilleure précision chez les experts. La première est temporelle et porte sur une réduction du temps de correction du mouvement chez les experts, ce qui leur permettrait une meilleure régulation de l'action et plus de temps pour ajuster le mouvement de l'effecteur à la cible. C'est-à-dire que les experts auraient un délai visuo-moteur ou une latence du couplage perception-action plus courte pour réguler l'action (Le Runigo *et al.*, 2005, 2010). Une deuxième hypothèse cinématique repose sur un nombre de réductions d'écart par rapport à la cible plus élevé chez les experts traduisant des corrections ou régulations plus nombreuses.

2.3.2 Méthode

Participants

Pour les mêmes raisons que dans l'expérience précédente (voir section 2.2) trois groupes ont été testés : un groupe de super-experts composé de 10 joueurs de tennis internationaux avec une moyenne d'âge de 26 (± 4.14) ans et avec une pratique de sept à neuf fois par semaine, un groupe d'experts composé de huit joueurs d'un niveau intermédiaire avec une moyenne d'âge de 23 (± 2.14) ans et avec une pratique de trois fois par semaine et un groupe de non-experts composé de huit participants ayant peu ou pas de pratique sportive de sports de balle, avec une moyenne d'âge de 31 (± 6.5) ans. Dans le formulaire de consentement à remplir par chacun des participants, nous avons contrôlé le nombre d'années de pratique de sports de balle et de jeux vidéo. Aucun des participants n'a été sollicité dans une autre tâche qui composent cette thèse.

Matériel expérimental

Nous avons utilisé un écran Fujitsu de surface $37,6 \times 21,2$ cm avec une résolution de 1280×720 , une tablette INTUOS 4 permettant de poursuivre la cible par l'intermédiaire d'un stylet. La fréquence d'acquisition associée au stylet était de 60 Hz qui était ré-échantillonnée à 100Hz. L'écran et la tablette étaient tous les deux connectés à un ordinateur portable de marque Fujitsu avec un micro-processeur Intel Core i5. Pour cette tâche, nous

avons utilisé le même logiciel que celui présenté dans l'expérience précédente et développé par Richard Kulpa du laboratoire M2S de l'Université de Rennes 2 dans le cadre d'une collaboration impliquant également Benoit Bideau du même laboratoire et Nicolas Benguigui (CESAMS Unicaen). Le participant se trouvait à une distance de 55 cm de l'écran. La scène virtuelle occupait une surface de 31×31 cm sur l'écran et un angle visuel de $23.4^\circ \times 23.4^\circ$ (voir Figure 55).



FIGURE 55: Démonstration de la tâche de poursuite visuo-manuelle 2D.

Conditions expérimentales et tâche utilisée

Nous avons repris les conditions expérimentales de l'expérience précédente (voir section 2.2). Au début de l'expérience, une fiche de renseignement a été remplie par chacun des participants (voir Annexe B). Pour rappel, nous avons demandé au participant de suivre la cible en mouvement avec le stylet de la tablette graphique. Le curseur était représenté par un cercle rouge et la cible par un disque rouge. Lorsque le participant était prêt, l'expérimentateur lançait l'essai en pressant la touche ENTER. La balle commence à se déplacer après un délai aléatoire compris entre 0,5 et 2 secondes. Au cours de sa trajectoire, la cible pouvait avoir des déviations prévisibles. En effet, elle était susceptible de rebondir sur les côtés d'un carré de 22.18 cm de côté avec un coefficient de rebond de 1 (le vecteur vitesse orthogonal aux côtés changeait de signe). Elle pouvait également avoir des déviations imprévisibles, en déviant à 90° par rapport à sa direction courante. Cela correspondait à une inversion aléatoire de signe de

la vitesse en x ou en y. Dans cette tâche, la cible avait une vitesse constante (14 cm/s). Il n'y avait pas d'accélération puisque cette question avait été traitée dans l'expérience précédente et que des variations de vitesse pouvaient influencer sur la difficulté d'adaptation du mouvement après les déviations.

Au cours de son déplacement, la cible pouvait avoir de zéro à trois déviations par essai. Les déviations étaient programmées dans un carré central de 14.68 cm de côté placé au centre du carré délimitant l'espace de déplacement de la cible, pour éviter d'avoir une trop courte durée entre la déviation et le rebond qui suivait qui n'aurait pas permis de modifier le mouvement en cours. Chaque essai durant 15 s et à la fin de chaque essai, un pourcentage de recouvrement de l'effecteur sur la cible était calculé et affiché à l'écran comme un indicateur de réussite de la tâche (Figure 49).

Pour se familiariser avec le dispositif expérimental, quatre essais étaient d'abord proposés. Ces essais comprenaient des trajectoires verticales, horizontales et diagonales de la cible pour permettre aux participants d'explorer les différents espaces de déplacement et le ratio de déplacement de l'effecteur par rapport aux mouvements produits. Ensuite, le participant réalisait 40 essais (deux blocs de 20), correspondant à 5 essais dans chacune des quatre conditions 0, 1, 2 ou 3 déviations.

Variables dépendantes

Toutes les analyses ont été effectuées avec le logiciel de programmation Matlab. Les données ont été préalablement filtrées avec un filtre passe-bas de Butterworth avec une fréquence de coupure de 10Hz.

En tenant compte des différentes conditions de déplacement de la cible, des analyses de l'expérience 4 (voir section 2.2) et d'observations préalables (Figure 56), nous avons fractionné nos essais en trois périodes différentes : une période aux alentours du rebond, une période post-déviations et une période sans perturbation (en dehors des rebonds et déviations). Sur la base des mêmes principes que ceux utilisés dans l'expérience 4, les périodes aux-alentours du rebond, ainsi que les périodes post-déviations ont été délimitées entre le temps de divergence de la cible et de l'effecteur et le temps de convergence, tandis que les périodes sans perturbation allaient du temps de convergence d'une perturbation au temps de divergence de la prochaine perturbation (rebond ou déviation).

Pour rappel de la méthode, afin d'identifier le temps de divergence et le temps de convergence, nous avons adopté une approche similaire à l'expérience 4 en calculant des valeurs seuil de divergence et de convergence. Pour cela, nous avons calculé deux valeurs seuils. La première correspondait à l'angle alpha entre la direction de l'effecteur et la direction de la cible. Pour cette variable, un angle réduit indique des déplacements orientés dans la même direction. A partir de cette variable, nous avons calculé la valeur moyenne pour chaque participant lors des poursuites sans déviations dans une surface de 50% centrée sur la zone de déplacement globale (Figure 56). Le seuil alpha correspondait à la moyenne de l'angle alpha plus deux écart-types. La seconde correspondait à la distance à la cible qui permettait de calculer un seuil de la même façon que pour l'angle alpha. Au final, ces calculs réalisés sur l'ensemble des participants ont permis de déterminer un seuil de distance de 1.36 cm un seuil alpha de 21°. Quand la distance à la cible et que l'angle alpha dépassaient ces seuils, une divergence était détectée et lorsque ces variables revenaient à l'intérieur de ces seuils une convergence était détectée.

Nous avons aussi repris des variables dépendantes déjà décrites dans l'expérience 4 (voir section 2.2). Pour les variables temporelles, nous avons calculé : temps de réaction, temps de la première interception, Durée de la période de perturbation aux alentours du rebond. Pour les variables relatives à la cinématique, nous avons calculé pour chaque période de poursuite : Distance à la cible et le Nombre de réduction de l'écart.

Nous avons ajouté certaines variables spécifiques à la présente expérience qui sont décrites ci-dessous :

- * Le délai visuo-moteur correspondait à l'intervalle de temps entre le changement de direction de la cible (temps de déviation) et le temps de la première correction de la trajectoire de l'effecteur. Cette correction était détectée après la déviation dès que l'angle entre le vecteur vitesse de la cible et celui de l'effecteur devenait inférieur au seuil alpha. La recherche du temps de première correction était effectuée à partir du temps de déviation jusqu'à la prochaine perturbation. 94% des déviations programmées ont eu un temps de convergence et ont été analysées.
- * Le temps d'interception post-déviation correspondait à la durée entre la déviation et la première interception de la cible. L'interception était détectée de la même façon qu'avec le temps de la première interception après rebond. La recherche de l'interception a été effectuée dans un l'intervalle compris entre le temps de déviation et le temps de la perturbation suivante.

- * La Durée de la période de perturbation après la déviation correspondait à la durée entre le temps de déviation et le temps de convergence calculé comme décrit ci-dessus. La recherche du temps de convergence a été effectuée entre le temps de déviation et temps de la prochaine perturbation (Figure 57).
- * Le temps de la première interception post-rebond correspondait à la durée entre le temps de divergence et la première interception de la cible. Une interception était détectée lorsque la distance entre l'effecteur et la cible devenait inférieure à la somme entre le rayon de la cible et de l'effecteur (1.1 cm). La recherche de l'interception a été effectuée dans un l'intervalle compris entre le temps de divergence et temps de la prochaine perturbation.

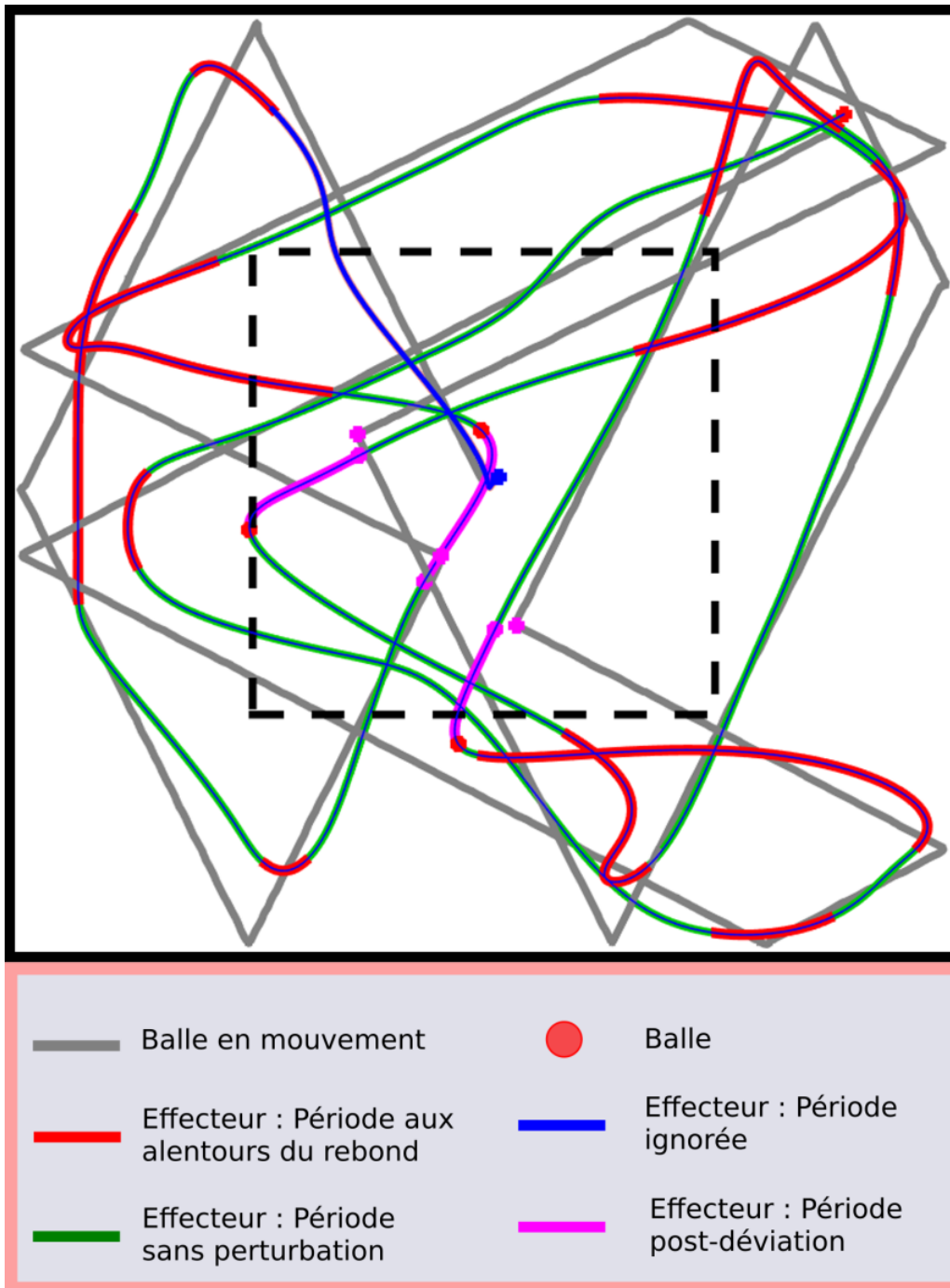


FIGURE 56: Exemple de la trajectoire cible-effecteur dans un essai. Trajectoire de la cible en mouvement (en gris), trajectoire de l'effecteur dans la période sans perturbation (en vert), trajectoire de l'effecteur dans la période post-déviante (en rose) et trajectoire effecteur dans la période aux alentours du rebond rouge et période ignorée (en bleu).

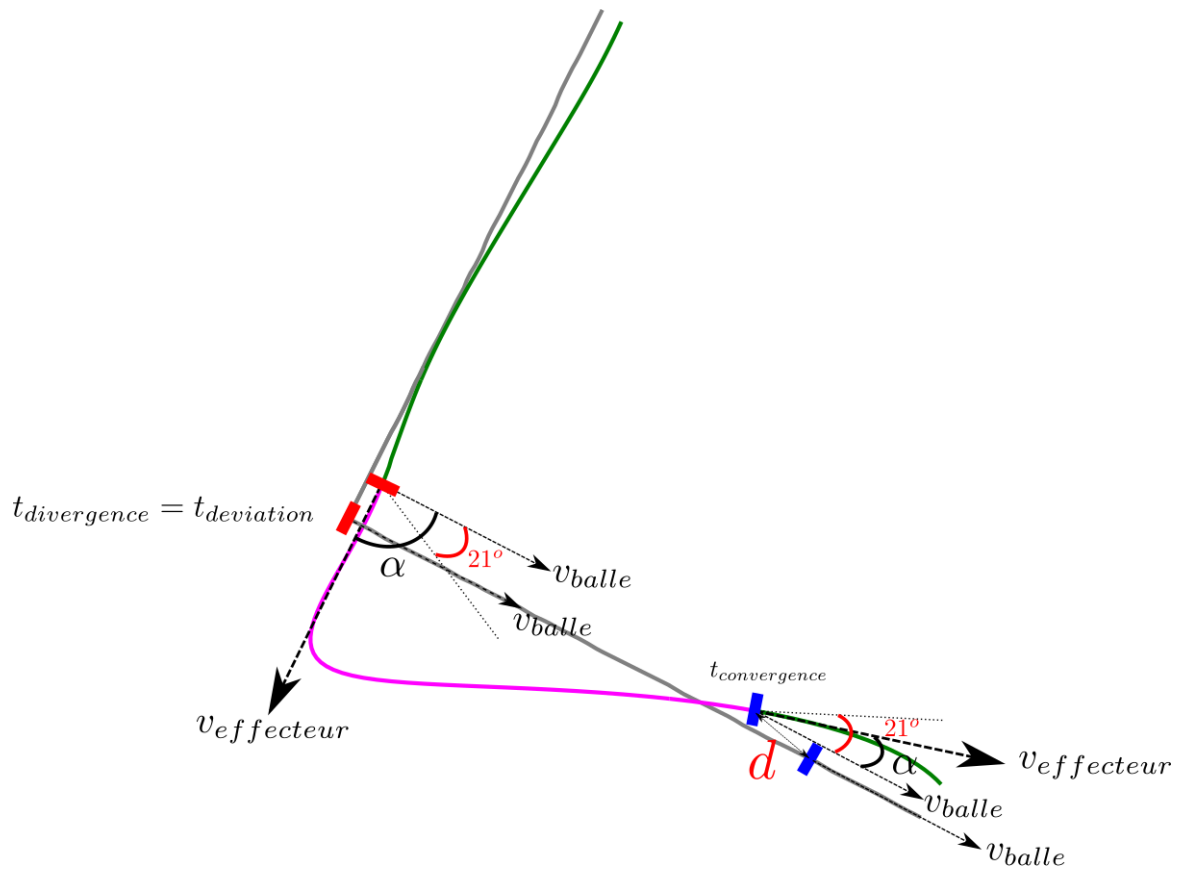


FIGURE 57: Illustration des différents indicateurs pour identifier la période post-déviations. Cette dernière est délimitée par un temps de divergence et un temps de convergence. Le temps de divergence correspondait au temps de déviation. Le temps de convergence a été déterminé lorsque α était inférieur au seuil α et que la distance était inférieure à la distance seuil (d).

La Figure 58 affiche l'évolution des variables distances et des angles dans un essai. Des angles supérieurs à 60° sont présents aux alentours des perturbations (rebonds et déviations), de même la distance est supérieure à 1.5 cm, ceci montre que le sujet est perturbé aux alentours des rebonds.

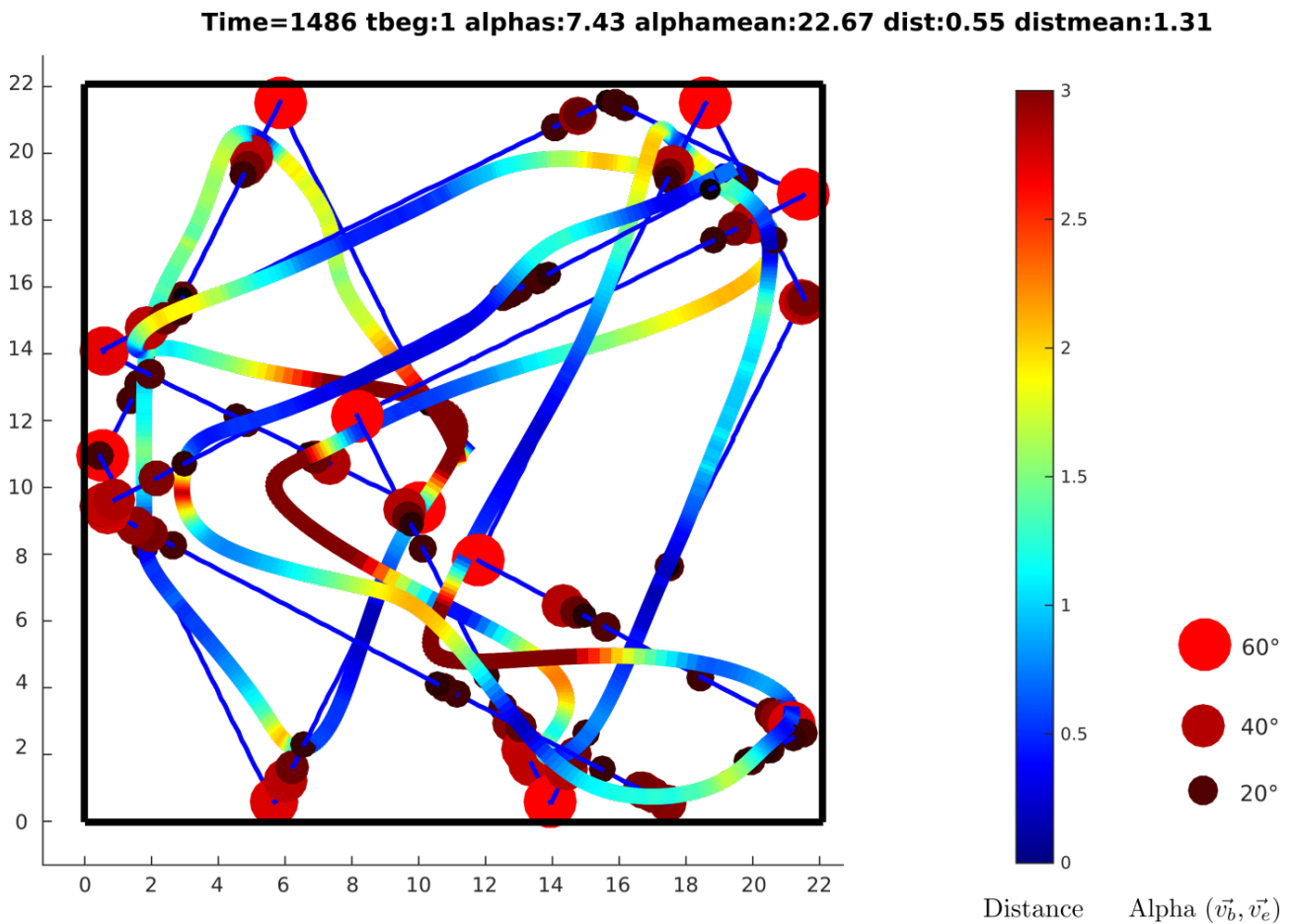


FIGURE 58: Exemple de la trajectoire cible-effecteur dans un essai avec des indicateurs de la qualité de poursuite. La coloration de l'effecteur indique la distance balle-effecteur. Les ronds indiquent l'angle formé entre le vecteur vitesse de la balle et le vecteur vitesse de l'effecteur.

2.3.3 Résultats

Les variables temps de réaction, temps de première interception, Durée de la période de perturbation aux alentours du rebond, temps d'interception post-rebond, Durée de la période de perturbation après la déviation, délai visuo-moteur et temps d'interception post-déviations ont été analysées en utilisant une analyse de variance (ANOVA) à un seul facteur avec Expertise comme facteur catégoriel (super-experts vs. experts vs. non-experts).

La Distance à la cible et le Nombre de Réduction d'écart ont été analysés suivant le plan factoriel : Expertise (super-experts vs. experts vs. non-experts) \times période de poursuite

(période aux alentours du rebond, période post-déviations, période sans perturbation) avec une ANOVA univariée.

Dans un deuxième temps, nous avons calculé quelles variables prédisaient le mieux la performance dans la tâche c'est-à-dire le maintien de la distance à la cible pour l'ensemble des participants en utilisant une analyse de régression multiple avec temps de réaction, temps de première interception, Durée de la période de perturbation aux alentours du rebond, temps d'interception post-rebond, Durée de la période de perturbation après la déviation, délai visuo-moteur et temps d'interception post-déviations et le nombre de Réduction d'écart comme prédicteurs.

Pour tous les tests, le seuil de significativité α a été fixé à .05. Des comparaisons a posteriori de Newman-Keuls ont été réalisées pour examiner la nature des effets significatifs, chaque fois que cela était nécessaire.

Distance à la cible

L'analyse de la variance sur la distance à la cible a révélé un effet significatif de l'Expertise ($F(2.23)=8.25$, $p<.05$, $\eta^2=0.41$) : les non-experts avaient une distance à la cible significativement plus grande que celle des experts et super-experts mais aucune différence significative n'a été observée entre les super-experts et les experts ($M_{non-experts} = 2.12$ cm, $M_{experts} = 1.91$ cm, $M_{super-experts} = 1.93$ cm). Une différence significative entre les différentes périodes a été observée ($F(2.46)=1941.52$, $p<.05$, $\eta^2=0.98$). Les participants avaient une distance à la cible plus grande dans la période post-déviations ainsi que dans la période aux alentours des rebonds que dans la période sans perturbation (respectivement : $M_{période_post_déviations} = 3.19$ cm, $M_{période_rebond} = 1.61$ cm, $M_{période_sans_perturbation} = 1.15$ cm). L'interaction Expertise \times Période de poursuite a révélé une tendance d'effet ($F(4.46)=2.453$, $p=0.059$, $\eta^2=0.17$). A partir de la Figure 59, nous pouvons remarquer que le groupe des non-experts dans la période de poursuite aux alentours de rebond et après les déviations semble avoir une distance à la cible plus grande que les experts et super-experts. Aucune différence significative entre les différents groupes dans la période de poursuite sans perturbation n'a été observée (voir Figure 59).

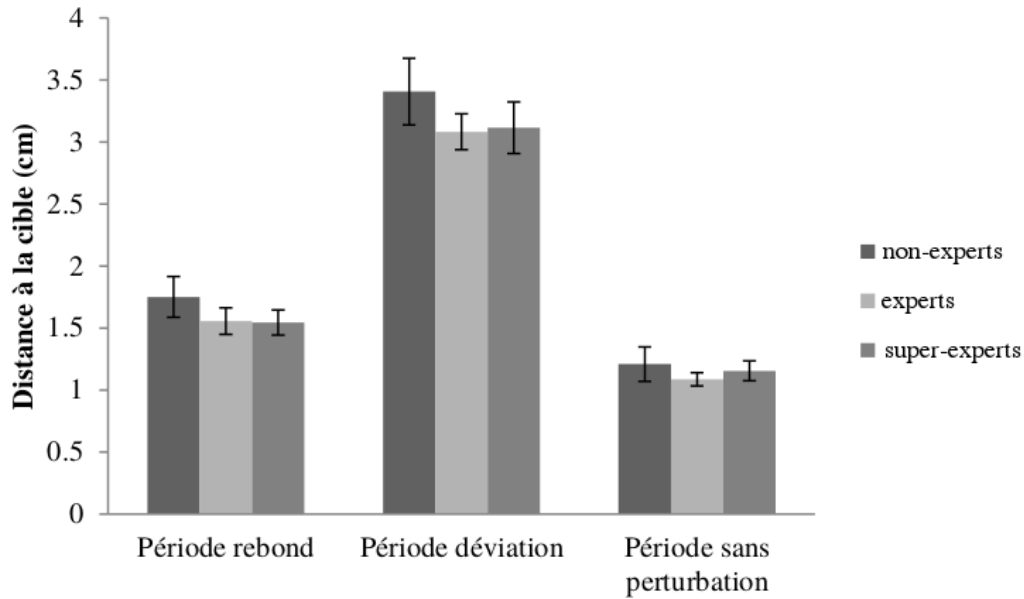


FIGURE 59: Distance à la cible selon l'interaction Expertise \times Période de poursuite.

Nombre de réductions d'écart

L'analyse de la variance sur la variable nombre de réductions d'écart (NRE) a révélé un effet significatif de l'Expertise ($F(2.23)=4.85$, $p<.05$, $\eta^2=0.29$). Le post-hoc Newman-Keuls a montré que les non-experts avaient significativement moins de Réduction d'écart que les experts et super-experts mais aucune différence significative n'a été observée entre les super-experts et experts ($M_{non-experts} = 2.45$ NRE/s, $M_{experts} = 3$ NRE/s, $M_{super-experts} = 2.96$ NRE/s). Une différence significative entre les différentes périodes a été observée ($F(2.46)=321$, $p<.05$, $\eta^2=0.93$).

Les participants avaient un nombre de réductions d'écart plus réduit dans la période après déviation que dans la période sans perturbation ($M_{période_post_déviati\text{on}} = 0.52$ NRE/s vs. $M_{période_sans_perturbation} = 2.59$ NRE/s). De même, le nombre de Réduction d'écart dans la période sans perturbation est plus faible que dans la période aux alentours des rebonds ($M_{période_sans_perturbation} = 2.59$ NRE/s vs. $M_{période_rebond} = 5.33$ NRE/s). L'interaction Expertise \times Période de poursuite a révélé un effet significatif ($F(4.46)=5.44$, $p<.05$, $\eta^2=0.32$). L'interaction montre une différence significative entre le groupe des non-experts d'une part et les groupes experts et super-experts d'autre part dans la période de poursuite aux alentours du rebond. Aucune différence significative n'a été trouvée entre les différents groupes dans la période de poursuite sans perturbation (voir Figure 60).

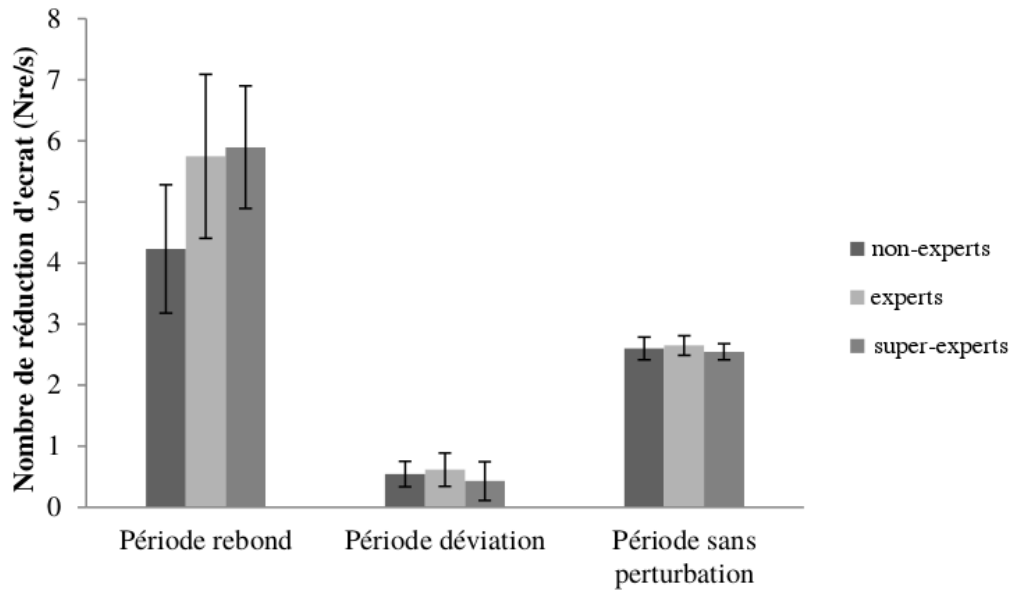


FIGURE 60: Nombre de Réduction d'écart selon l'interaction Expertise \times la période de poursuite. L'interaction montre une différence significative entre le groupe des non-experts vs. experts et super-experts dans la période de poursuite aux alentours du rebond.

Temps de réaction

L'analyse de variance sur le temps de réaction a montré un effet significatif de l'Expertise ($F(2,23)=26.73$, $p<.05$, $\eta^2=0.69$). Le test post hoc a montré une différence significative entre les non-experts ($M_{non-experts} = 261$ ms) vs. experts ($M_{experts} = 223$ ms) et entre les non-experts vs. super-experts ($M_{super-experts} = 215$ ms), mais aucune différence significative entre les experts et les super-experts. (Figure 61).

Temps de la première interception

L'analyse de la variance sur le temps de première interception a montré un effet significatif de l'Expertise ($F(2,23)=20.47$, $p<.05$, $\eta^2=0.37$). Le test post hoc a montré que les super-experts avaient un temps de première interception plus court comparé aux deux autres groupes experts et non-experts ($M_{super-experts} = 639$ ms, $M_{experts} = 740$ ms, $M_{non-experts} = 767$ ms) (Figure 61).

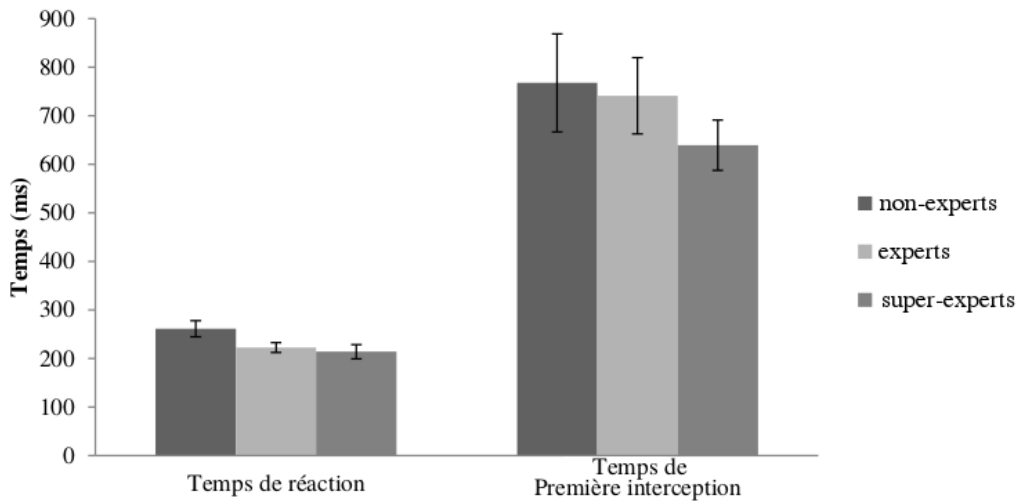


FIGURE 61: Temps de réaction et temps de première interception en fonction de l'Expertise.

Durée de la période de perturbation aux alentours du rebond

L'analyse de variance indique un effet principal du facteur Expertise, $F(2,23) = 7.92$, $p < .05$, $\eta^2 = 0.40$). Le test post hoc a montré que les non-experts étaient plus longuement perturbés par le rebond que les experts et les super-experts ($M_{super-experts} = 307$ ms, $M_{experts} = 313$ ms, $M_{non-experts} = 376$ ms).

Temps de la première interception après les rebonds

L'analyse de variance sur le temps d'interception après les rebonds a montré un effet significatif de l'Expertise ($F(2,23)=7.72$, $p<.05$, $\eta^2=0.40$). Le post-hoc de Newman-Keuls a montré une différence significative entre les non-experts ($M_{non-experts} = 296$ ms) vs. experts ($M_{experts} = 224$ ms) et non-experts vs. super-experts ($M_{super-experts} = 220$ ms), mais aucune différence significative entre les experts et super-experts.

Durée de la période de perturbation après la déviation

L'analyse de variance indique un effet principal du facteur Expertise, $F(2,23) = 6.70$, $p < .05$, $\eta^2 = 0.36$). Le post-hoc de Newman-Keuls a montré que les non-experts étaient plus longuement perturbés par les déviations que les deux autres groupes experts et super-experts ($M_{super-experts} = 286$ ms, $M_{experts} = 294$ ms, $M_{non-experts} = 318$ ms).

Délai visuo-moteur après la déviation

L'analyse de variance a indiqué un effet principal du facteur Expertise, $F(2,23) = 6.52$, $p < .05$, $\eta^2 = 0.36$). Le post-hoc de Newman-Keuls a montré que les super-experts et les experts avaient un délai visuo-moteur plus court que les non-experts, par contre il n'y avait pas de différence entre les super-experts et les experts. ($M_{super-experts} = 223$ ms, $M_{experts} = 228$ ms, $M_{non-experts} = 253$ ms).

Temps d'interception après la déviation

L'analyse de variance a indiqué une tendance sur l'effet du facteur expertise, $F(2,23) = 2.84$, $p = .07$, $\eta^2 = 0.20$). Les moyennes du temps d'interception après déviation des super-experts étaient considérablement plus petits que ceux des non-experts et des non-experts. ($M_{super-experts} = 727$ ms, $M_{experts} = 773$ ms, $M_{non-experts} = 820$ ms).

Prédiction de la performance dans la tâche de poursuite (Distance à la cible) pour l'ensemble des participants à partir des différentes variables dépendantes

D'une manière similaire à l'expérience 4, nous avons réalisé une régression multiple pas à pas ascendante (voir section 2.2) pour déterminer quelles variables étaient les meilleurs prédicteurs de la performance de poursuite (i.e., la distance à la cible). Pour chaque participant, la distance à la cible moyenne dans les trois périodes de poursuites a été utilisée comme variable dépendante et conformément à nos hypothèses temporelle et cinématique le temps de réaction, délai visuo-moteur et le nombre de Réduction d'écart ont été utilisés comme variables indépendantes (prédicteurs).

Au premier pas de l'analyse, le délai visuo-moteur est apparu comme le meilleur prédicteur de la Distance à la cible avec un coefficient de corrélation .68 ($F(1,24)=21.68$) et a expliqué 47% de la variance totale. Dans une deuxième étape, le nombre de Réduction d'écart est rentré dans l'équation et a permis d'expliquer une variance additionnelle de 17%.

Dans l'équation finale, délai visuo-moteur ($\beta = 0.59$) et le nombre de Réduction d'écart ($\beta = -0.42$) expliquaient 64% de la variance totale avec une corrélation significative de 0.80 ($F(2,23)=20.47$) (voir Figure 62).

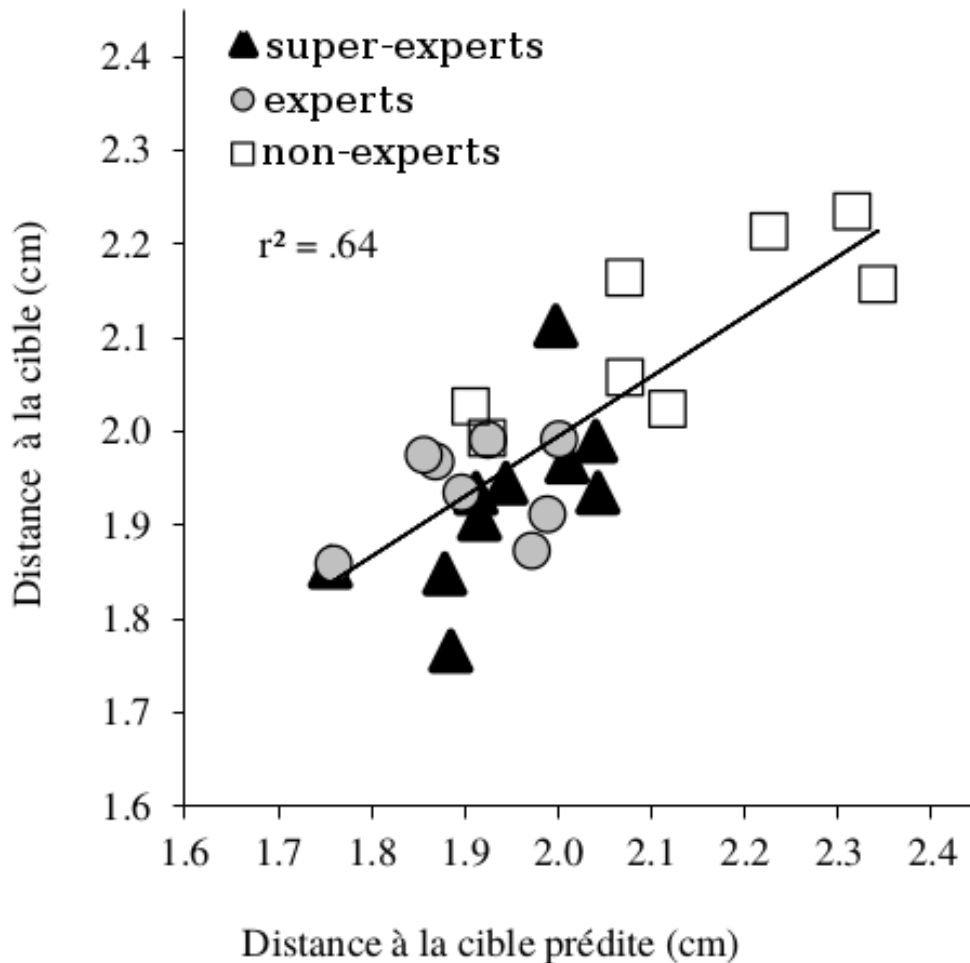


FIGURE 62: Distance à la cible en fonction de la Distance à la cible prédite basée sur une analyse de régression multiple. L'équation permettant de prédire la distance à la cible s'écrit sous la forme suivante : $Distance \ à \ la \ cible \ prédite = (3.89 \times \text{délai visuo-moteur}) + (-0.134 \times \text{Nombre de Réduction d'écart}) + [1.45]$.

2.3.4 Discussion

Cette expérience visait à confirmer les résultats de l'expérience 4 et à examiner les capacités de régulation du mouvement notamment au niveau du délai visuo-moteur. Confirmant nos hypothèses, les résultats indiquent que cette tâche de poursuite 2D, aussi schématique soit-elle, est discriminante de l'expertise au niveau de la variable de performance (distance à la cible) mais aussi pour d'autres variables temporelles et de régulation. Ceci s'est particulièrement manifesté dans les périodes les plus contraignantes post-déviations et après rebonds.

Les résultats obtenus confirment très largement notre hypothèse sur l'importance des délais de régulation temporelle dans la tâche de poursuite et dans l'expertise dans les actions d'interception. En effet les experts et les super-experts réagissent plus rapidement que les non-experts. Les super-experts interceptent la balle plus tôt que les non-experts et les experts après son départ. De plus, les experts et super-experts ont montré un délai visuo-moteur plus courts que les non-experts. Ces résultats confirment ceux de (Le Runigo *et al.*, 2005) qui indique que les experts sont plus rapides que les non-experts pour adapter leurs actions notamment au niveau temporel et disposent de capacités d'adaptation supérieures face à des trajectoires déviées. Ils suggèrent que les experts ont des capacités de régulations supérieures aux non-experts pour faire face à la déviation de la cible (Le Runigo *et al.*, 2005, 2010; Bootsma et Van Wieringen, 1990; Sarpeshkar *et al.*, 2017; Mallek *et al.*, 2017). Ces capacités permettent notamment dans cette expérience de réduire les périodes de perturbation autour des rebonds et des déviations.

Les délai visuo-moteur obtenus dans notre expérience sont assez similaires à ceux de (Le Runigo *et al.*, 2010) (250 ms) et (Benguigui *et al.*, 2003) (195 ms) dans le cadre d'une tâche d'interception. Toutefois, les résultats de délai visuo-moteur restent supérieurs à ceux présentés par (Day et Lyon, 2000) au cours d'une tâche de pointage. Les différences qui peuvent apparaître au niveau des délai visuo-moteur peuvent être expliquées du fait de différences de tâches et d'effecteur (Benguigui *et al.*, 2008; Michaels *et al.*, 2001). Il faut remarquer que la mesure des délai visuo-moteur est toujours dépendante des contraintes et des paramètres de la tâche et des outils utilisés (Benguigui *et al.*, 2008). De ce fait, des comparaisons très précises inter-études n'ont pas forcément une grande pertinence. Les analyses sur le délai visuo-moteur ont surtout leur pertinence pour comparer des conditions ou des groupes de participants dans des conditions similaires comme dans la présente expérience.

Il est à noter qu'il n'a pas été possible de différencier les experts et les super-experts sur la base des variables principales. Toutefois, des différences apparaissent pour les variables temps de la première interception et le temps de première interception après déviation. Cela suggère des pistes de développement de cette tâche en mettant l'accent sur ces aspects. L'analyse de régression permet d'éclairer en partie cette absence de différence sans doute liée à une variabilité intra-groupe assez importante (Figure 62).

Dans cette analyse de régression multiple et cette figure qui l'illustre, le délai visuo-moteur et le nombre de réductions d'écart permettent d'expliquer 64% de la variance de la distance à la cible. On peut donc supposer que la diminution du délai visuo-moteur permet

aux participants de minimiser les erreurs avec des délais de régulation plus courts tout au long de la tâche. Autrement dit, cela suggère qu'un élément essentiel pour réduire les erreurs et optimiser le mouvement de poursuite et d'une manière générale pour se coordonner à des objets en mouvement, se situe au niveau des délais de régulation qui permettent, par exemple, de réduire les périodes de perturbations aux alentours du rebond et des déviations mais aussi d'être plus précis dans la poursuite tout au long de la tâche pour réduire au minimum l'écart entre le mouvement requis et le mouvement produit (ou courant e.g., (Montagne *et al.*, 1999)).

Concernant le nombre de réductions d'écart, il est aussi considéré comme un indicateur des adaptations produites au cours du geste et il s'est révélé être également un indicateur de la performance dans cette tâche. Les experts et non-experts ayant les quantités d'adaptation les plus élevées sont aussi ceux commettant le moins d'erreurs.

La Figure 62 indique des regroupements de participants en fonction des groupes (tel qu'il est le cas dans l'expérience 4, (Mallek *et al.*, 2017)) : les super-experts sont placés majoritairement en bas à gauche (qui indique une meilleure performance), les experts sont au milieu, et les non-experts sont en haut à droite du graphique (qui indique une faible performance). Il apparaît des positionnements atypiques d'experts en position haute et de non-experts en position basse. Comme indiqué pour l'expérience 4, la performance en sports de balle est plurifactorielle et il est envisageable que l'on puisse être performant dans ces activités tout en étant relativement peu performant au niveau des régulations perceptivo-motrices. Inversement, des non-experts dans ces activités peuvent avoir de bonnes capacités de régulation, peut-être développée dans des activités qui pourrait leur conférer un statut d'experts et pourraient être considérés comme étant des experts dans cette tâche.

Il apparaît au final que l'analyse de régression permet de prédire pour une large part l'expertise dans les sports de balle sur la base des variables indépendantes mesurées dans cette expérience. L'identification des participants experts peut se faire sur la base de leurs précisions dans cette tâche et de leur délai visuo-moteur ainsi que de leur fréquence de réductions d'écart. Ce qui signifie que les capacités de régulation et d'adaptation des experts face à des trajectoires prévisibles et surtout non-prévisibles sont révélatrices du niveau d'expertise. En termes de perspectives appliquées, cette tâche de poursuite apparaît comme prometteuse pour l'identification et le suivi dans l'expertise dans les sports de balle et potentiellement utilisable comme test de détection.

2.4 Expérience 6 : Poursuite visuo-manuelle en immersion 3D

2.4.1 Introduction

Après avoir étudié la poursuite visuo-manuelle en 2D et montré qu'elle permettait de distinguer entre les experts et non-experts en sports de balle, nous avons utilisé une tâche de poursuite visuo-manuelle en 3D. La tâche développée consistait à suivre une cible (une balle) qui se déplaçait dans un cube à l'aide d'un effecteur (une sphère) déplacé par un capteur de mouvement électromagnétique. Cette expérience mettait en œuvre une simulation en 3D avec l'ajout de la profondeur associée à des lunettes stéréoscopiques. La stéréoscopie consiste à afficher deux images différentes (une pour chaque œil) pour donner des informations de profondeur. Au final, la scène proposée contenait les indices informationnels de profondeur suivant : l'occultation, la taille relative, la disparité binoculaire, les ombres. Pour des raisons techniques, nous avons décidé de ne pas inclure davantage d'indices de profondeur².

Dans ce contexte, ([Bideau et al., 2010](#)) ont montré que la stéréoscopie donne des informations importantes sur la profondeur qui manque avec une scène virtuelle 2D. Les travaux de ([Tinjust, Allard, et Faubert, 2008](#)), ont affirmé que la vision stéréoscopique permet de mieux discriminer la position relative des objets dans l'espace à travers une tâche de poursuite d'objets multiples. De plus, ([de Lussanet et Lappe, 2012](#)) ont montré que la perception de la profondeur permet une meilleure précision des réponses dans une tâche de jugement de l'orientation des

2. La profondeur est caractérisée par la présence de plusieurs indicateurs visuels ([Cutting et Vishton, 1995](#)). Neuf indicateurs visuels principaux d'information sont définis : 1) l'occultation qui correspond au chevauchement des objets selon leur positions relatives dans l'environnement 2) la taille relative qui correspond à la différence de taille entre deux objets de même dimension à des distances différentes 3) la densité relative qui correspond à la variation de la densité des textures selon la distance, plus la texture est éloignée, plus la densité sera grande 4) la hauteur dans le champ visuel 5) la perspective aérienne, correspond à la variation de visibilité d'un objet liée aux conditions atmosphériques (ex : objet dans le brouillard, jour clair, sous l'eau) ; 6) la perspective de mouvement, aussi appelée parallaxe, correspond au fait que les déplacements relatifs des objets liés à nos propres déplacements qui font qu'un objet proche bouge plus rapidement qu'un objet lointain 7) la convergence, correspond à l'angle formé entre la direction du regard et l'axe optique vers l'horizon 8) l'accommodation, correspond au changement de la forme du cristallin des yeux et agit sur la mise au point de la netteté des objets selon leur profondeur ; 9) la disparité binoculaire, correspond à la différence de l'objet perçu entre chaque œil. Six autres indicateurs secondaires peuvent également être définis : les gradients de texture, la perspective linéaire, la luminance, la profondeur cinétique, l'occultation cinétique (désoccultation), et enfin la gravité. Un autre indice de la profondeur est l'ombrage stereopsis, et correspond à la différence d'ombrage de la scène perçu entre chaque œil ([Puerta, 1989](#)). La présence de ces indicateurs dans un environnement virtuel permet de renforcer l'illusion de profondeur et agit sur l'immersion du participant.

sujets en 3D. Ces résultats sont en lien avec ceux de (Jackson et Blake, 2010) qui se sont intéressés à savoir si le système visuel représente l'orientation d'un humain mobile en 3D. Ils ont montré que les signaux neuronaux de la perception du mouvement intègrent les informations de la forme, du mouvement et de la profondeur 3D de la direction du sujet mobile.

Dans le contexte de l'expertise, (Faubert, 2013) a montré, dans des tâches de poursuite d'objets multiples² impliquant la 3D, que les athlètes experts ont de meilleures capacités d'apprentissage par rapport aux non-experts. En lien avec ces travaux, (Romeas, Guldner, et Faubert, 2016) ont montré, à travers une tâche similaire où l'expertise a été révélée, que les capacités perceptivo-cognitive pouvaient être transférées dans un environnement virtuel 3D et que cet environnement permettait l'entraînement et l'amélioration des qualités en lien avec la prise de décision.

Compte tenu de ces précédents travaux, nous avons émis l'hypothèse que l'ajout de la profondeur dans notre tâche de poursuite renforcerait la difficulté de la tâche, tout en permettant une meilleure distinction entre les experts et les non-experts, du fait de la présence et de l'importance de cette dimension dans les interactions qui caractérisent les sports de balle. Nous nous attendions à une meilleure précision et des adaptations plus nombreuses et plus précises chez les experts, par rapport aux non-experts. D'une façon similaire que dans la tâche 2D, nous avons émis l'hypothèse que les rebonds et l'augmentation de la vitesse complexifieraient la tâche, mais impacteraient moins la performance des experts.

2.4.2 Méthode

Participants

Cinquante-trois participants en bonne santé et possédant une vision normale, ont participé à cette expérience. Les participants ont été sélectionnés pour former deux groupes distincts : un premier groupe de 28 experts composé de joueurs de tennis et de basket possédant un niveau national (huit femmes et 20 hommes). L'âge moyen du groupe des experts était de 24 ans ($\pm 3,8$). Un deuxième groupe de 25 participants non-experts en sports de balle était composé de sept femmes et 18 hommes. Les non-experts ne pratiquaient pas les sports de balle en dehors du cadre scolaire. L'âge moyen de ce groupe était de 23 ans ($\pm 2,2$). Les participants n'avaient pas une pratique de jeux vidéo qui dépassait deux heures par semaine.

Matériel expérimental

Nous avons utilisé le même dispositif de réalité virtuelle présenté dans les expériences 1 et 3. Dans cette expérience, le rendu de la scène virtuelle a été projeté par un vidéoprojecteur Acer 5360 (avec une fréquence d'affichage de 120 Hz), sur un écran incurvé de 5×2 m de surface. Les participants ont été équipés de lunettes stéréoscopiques permettant l'immersion 3D. L'environnement virtuel a été conçu avec le logiciel Virtools. L'appareil de capture de mouvement 3D était le Polhemus de Fastrak, constitué d'un appareil relié à une station de capture et à l'ordinateur. Les variables acquises étaient la position 3D : X (déplacement sur l'axe horizontal), Y (déplacement sur l'axe vertical), Z (déplacement sur l'axe de profondeur). La fréquence d'acquisition était de 120Hz. Le déplacement du capteur Polhemus permettait de bouger l'effecteur dans l'environnement virtuel. Un mouvement de 1 cm par le participant dans l'environnement réel correspondait à 15 cm dans l'environnement virtuel.

Tâche utilisée et condition expérimentale

La tâche consistait à suivre à l'aide d'un effecteur une cible en mouvement qui pouvait rebondir sur les parois d'une boîte virtuelle. Cette boîte avait comme dimension (dans l'environnement virtuel) 4 m de hauteur, 4 m de largeur et 2.86 m de profondeur, soit un volume de 45.76 m^3 (voir Figure 63). Le rendu de la boîte était perçu comme si le participant se trouvait à une distance de 7 m. Le coefficient de rebond était de 1, ainsi la cible conservait sa vitesse courante après un rebond. La cible et l'effecteur avaient tous les deux un rayon de 10 cm.

Durant l'essai, la cible pouvait changer de couleur pour donner un feed-back à l'utilisateur sur la proximité entre l'effecteur et la cible et ceci particulièrement pour la distance en profondeur plus difficile à percevoir. Une coloration dégradée de la cible informait le participant sur sa proximité avec la cible : du rouge (dans le cas où l'effecteur est proche de la cible) au bleu (dans le cas où l'effecteur est loin de cible). Un second feed-back était affiché à la fin de l'essai et correspondait à la distance moyenne durant l'essai entre l'effecteur et la cible.

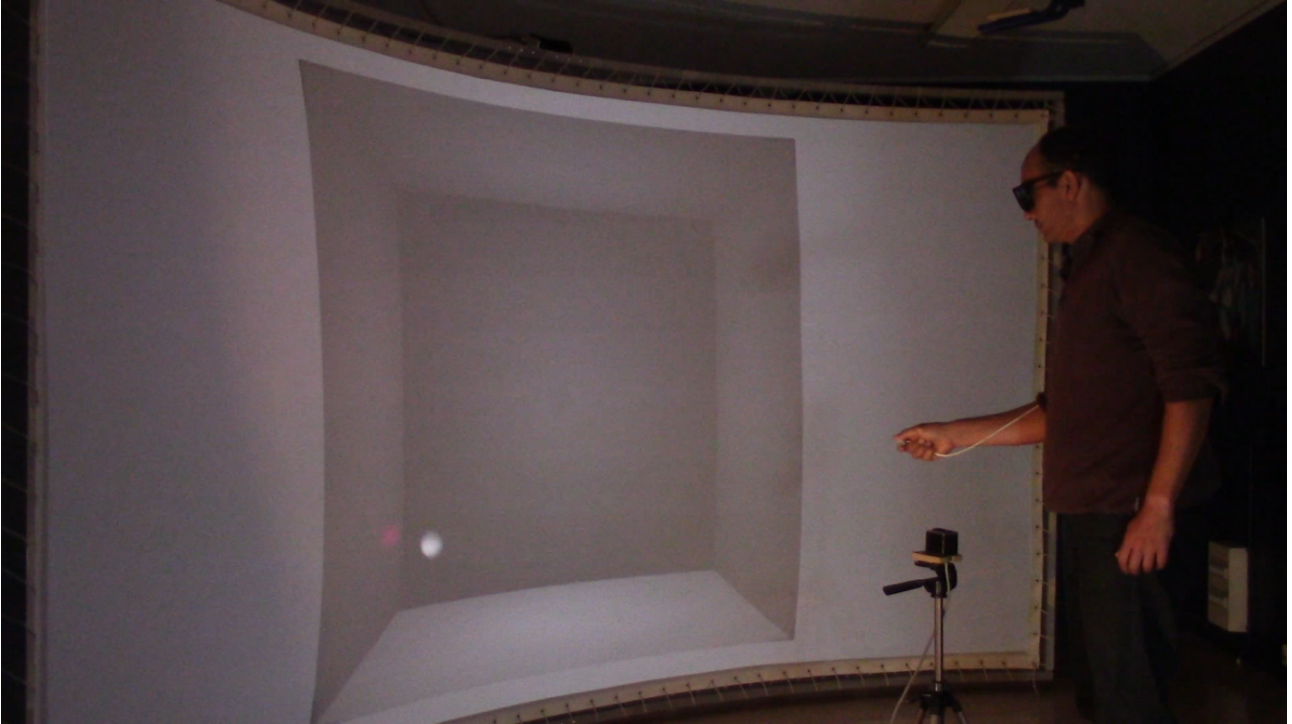


FIGURE 63: *Démonstration de la tâche de poursuite visuo-manuelle 3D sur l'écran incurvé. Le participant était debout et avait reçu comme consigne de suivre une cible dans le cube à l'aide du capteur électromagnétique.*

Nous avons programmé quatre blocs de six essais chacun, avec une durée de 15 s par essai. Chaque bloc contenait trois essais à vitesse lente (1.5 m/s) et trois essais à vitesse rapide (2.25 m/s). Afin de créer de la variabilité dans les trajectoires de la cible, nous avons configuré les essais en permutant le signe du vecteur vitesse sur chacun des axes. Tous les participants ont passé les quatre blocs d'essais, soit 24 essais au total.

Procédure

Au départ, les participants devaient remplir une fiche de renseignements et indiquer leur niveau de pratique de sports de balle. Une fiche de présentation de la tâche était communiquée aux participants afin qu'ils puissent prendre connaissance des objectifs de l'expérience et des détails de la tâche : capteur, durée des essais, nombre de passages (voir Annexe B pour les différentes fiches présentées aux participants). Ensuite, le participant se mettait à une distance de 2 m de l'écran, dans une pièce sombre, éclairée seulement par le vidéoprojecteur en tenant le capteur dans sa main préférentielle. Avant le lancement de l'essai le participant pouvait

déplacer son effecteur sur les huit coins du cube, afin de se familiariser avec le dispositif et l'environnement 3D.

Variables dépendantes

De la même façon que l'expérience 4, nous avons divisé nos essais en deux différentes périodes : période aux alentours du rebond et période sans perturbation (en dehors des rebonds) (voir Figure 64). Nous nous sommes basés sur la même procédure de découpage (voir section 2.2). Pour rappel, les périodes aux alentours du rebond étaient délimitées du temps de divergence au temps de convergence, tandis que les périodes sans perturbation allaient du temps de convergence d'une perturbation au temps de divergence de la prochaine perturbation.

Nous avons adopté une approche similaire à l'expérience 4 et 5 afin d'identifier le temps de divergence et le temps de convergence (voir section 2.3 pour plus de détails), nous avons pris en compte l'évolution de l'angle et de la distance entre l'effecteur et la cible. Nous avons calculé le seuil alpha et la distance seuil dans un cube qui représente 50% du volume de la boîte globale. Le seuil de distance a été déterminé à partir du calcul de la moyenne des distances cible-effecteur plus deux écart-type dans le mini-cube et correspondait à 1.06 cm. Avec une approche similaire, nous avons calculé l'angle alpha seuil et celui-ci correspondait à 66° . La Figure 65 affiche l'évolution des variables distances et des angles dans un essai 3D. Des angles supérieurs à 60° sont présents aux alentours des perturbations (rebonds et déviations), ceci montre que le sujet est perturbé aux alentours des rebonds.

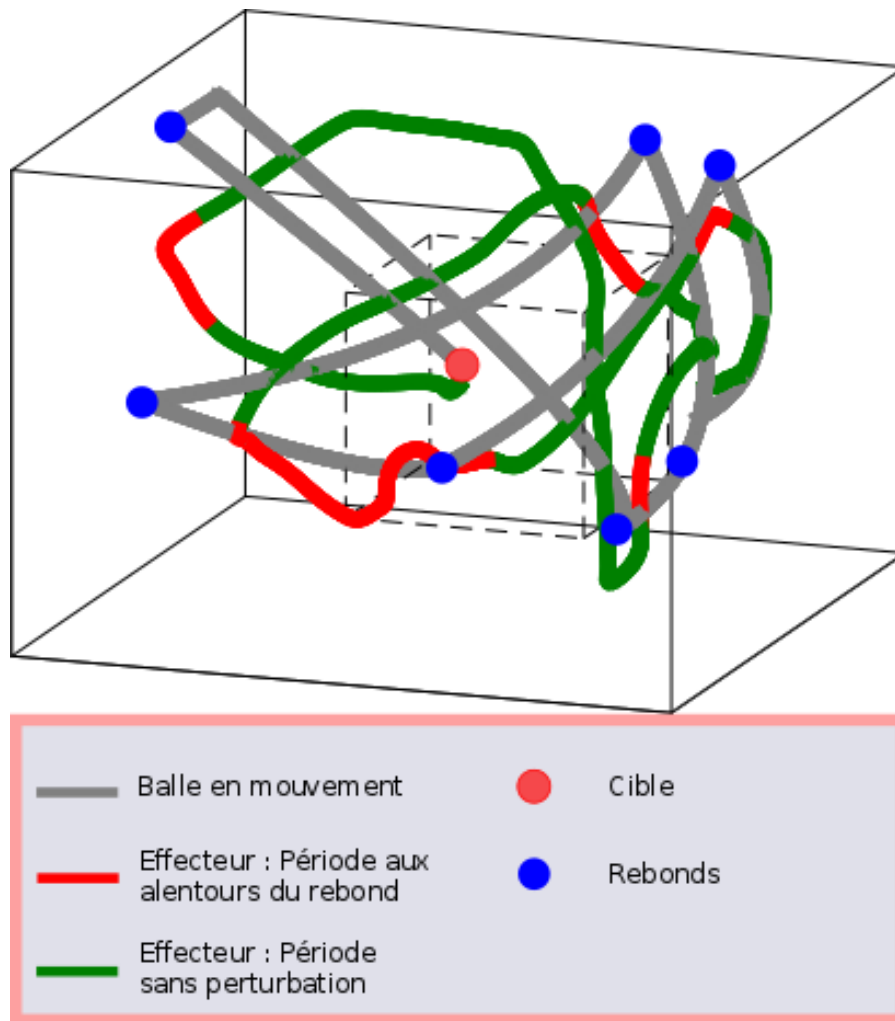


FIGURE 64: Exemple de la trajectoire cible-effecteur dans un essai dans la boîte de poursuite. Trajectoire de la cible en mouvement en gris, trajectoire de l'effecteur dans la période sans perturbation en vert, trajectoire de l'effecteur dans la période aux alentours du rebond rouge. Le mini-cube représente la zone qui n'a pas été affectée par le rebond. Il a été utilisé pour estimer le seuil de distance et de l' α .

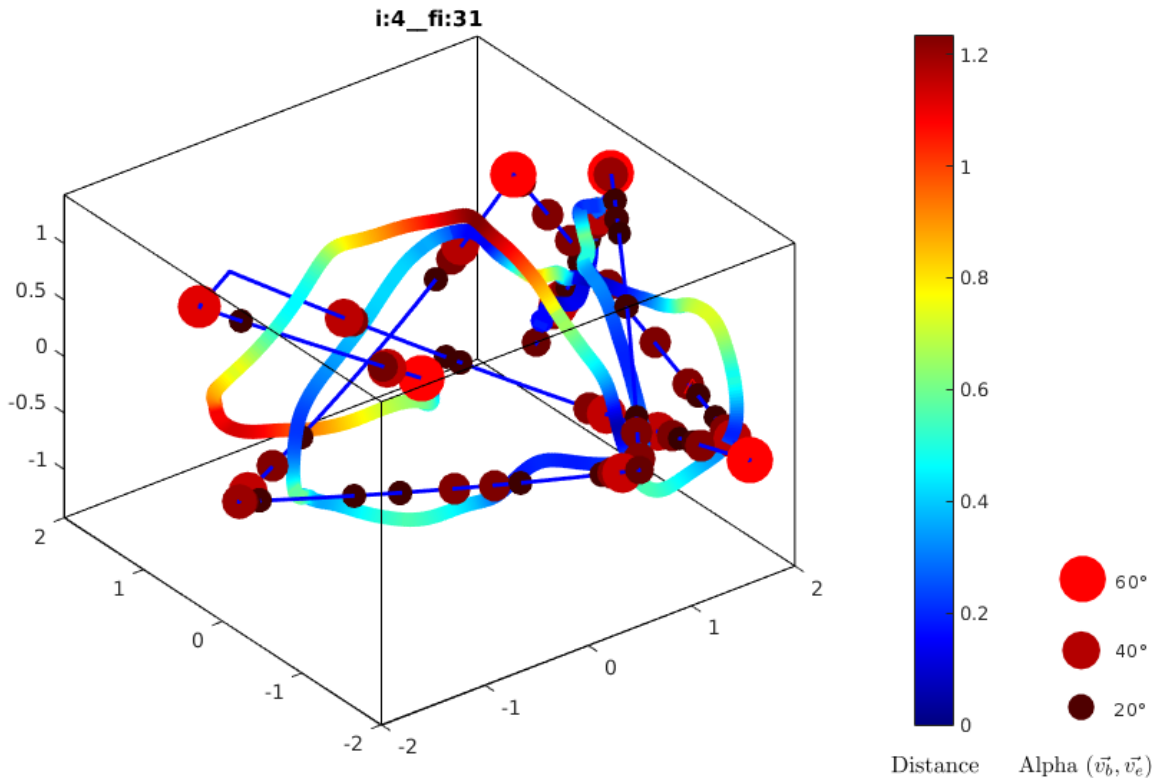


FIGURE 65: Exemple de la trajectoire cible-effecteur dans un essai 3D avec des indicateurs de la qualité de poursuite. La coloration de l'effecteur indique la distance balle-effecteur. Les ronds indiquent l'angle formé entre le vecteur vitesse de la balle et le vecteur vitesse de l'effecteur.

Nous avons repris des variables dépendantes similaires à celles utilisées précédemment dans l'expérience 4 et 5 (voir section 2.2 et 2.3). Comme variables temporelles, le temps de réaction, le temps de la première interception, et la Durée de la période de perturbation aux alentours du rebond ont été calculées et analysées suivant le plan factoriel : Expertise comme facteur catégoriel (experts vs. non-experts) \times le facteur Vitesse (vitesse lente vs. vitesse rapide). Pour les variables relatives à la cinématique, nous avons analysé tout d'abord la Distance à la cible et le Nombre de réduction d'écart, ensuite nous avons voulu analyser plus en détails et explorer l'évolution de ces deux variables sur chacun des trois axes : sur l'axe horizontal (X), sur l'axe vertical (Y) et sur l'axe de profondeur (Z) afin de déterminer si les experts se différenciaient plus dans la profondeur. Pour cela nous avons créé les variables suivantes : Distance à la cible sur l'axe X, Distance à la cible sur l'axe Y, Distance à la cible sur l'axe Z, Nombre de réductions d'écart sur l'axe X, Nombre de réductions d'écart sur l'axe Y, Nombre de réductions d'écart sur l'axe Z. Toutes ces variables ont été analysées suivant le plan factoriel : expertise comme

facteur catégoriel (experts vs. non-experts) \times le facteur Vitesse (vitesse lente vs. vitesse rapide) \times Période de poursuite (poursuite aux alentours du rebond vs. poursuite sans perturbation).

Pour tous les tests le seuil de significativité α a été fixé à .05. Des comparaisons a posteriori de Newman-Keuls ont été réalisées en complément pour examiner la nature des effets significatifs, chaque fois que cela était nécessaire.

2.4.3 Résultats

Temps de réaction

L'analyse de variance sur le temps de réaction a montré un effet significatif de l'Expertise ($F(1,51)=4.64$, $p<.05$, $\eta^2=0.08$), par contre aucun effet du facteur Vitesse ni d'interaction entre les deux facteurs n'a été observée. Les experts ont un temps de réaction plus court que les non-experts ($M_{experts} = 220$ ms vs. $M_{non-experts} = 232$ ms).

Temps de première interception

L'analyse de la variance sur le temps de première interception n'a pas montré d'effet d'Expertise. Par contre, un effet sur le facteur Vitesse a été révélé ($F(1,51)=10.94$, $p<.05$, $\eta^2=.17$). Les participants avaient un temps de première interception plus court dans la condition de poursuite à vitesse lente ($M = 2.21$ s) que dans la condition de la vitesse rapide ($M = 2.5$ s).

Distance à la cible

L'analyse de la variance sur la distance à la cible globale n'a pas révélé d'effet significatif de l'Expertise. Cependant, un effet sur le facteur vitesse a été montré ($F(1,51)=154.55$, $p<.05$, $\eta^2=.75$) et sur le facteur Période de poursuite ($F(1,51)=42.84$, $p<.05$, $\eta^2=.45$). Un effet d'interaction entre les facteurs Période de poursuite \times Vitesse ($F(1,51)=6.17$, $p<.05$, $\eta^2=.10$) est présent. Le post hoc de Newman-Keuls sur l'effet de l'interaction indique que les participants sont plus précis dans la condition de vitesse lente que dans la condition de la vitesse rapide et

qu'ils ont une moins bonne précision dans la période de poursuite aux alentours du rebond que dans la période sans perturbation (voir Figure 66). Aucune autre interaction n'a été observée.



FIGURE 66: Distance à la cible selon l'interaction Période de poursuite \times Vitesse.

Distance à la cible sur l'axe X

L'analyse de la variance sur la distance à la cible sur l'axe X (horizontal) a montré un effet significatif pour le facteur Expertise ($F(1,51)=10.80$, $p<.05$, $\eta^2=.17$), ainsi que pour le facteur période de poursuite ($F(1,51)=56.79$, $p<.05$, $\eta^2=.52$) et pour le facteur vitesse ($F(1,51)=371.82$, $p<.05$, $\eta^2=.87$). La Distance à la cible sur l'axe X pour les experts était plus petite que celle des non-experts (0.15 m vs. 0.17 m). Pour tous les participants, la Distance à la cible sur l'axe X est plus courte dans la période sans perturbation que dans la période aux alentours du rebond (0.15 m vs. 0.16 m). Les participants ont une distance plus courte en vitesse lente ($M = 0.14$ m) qu'en vitesse rapide ($M = 0.17$ m). Aucune interaction entre ces trois facteurs n'a été observée.

Distance à la cible sur l'axe Y

L'analyse de la variance sur la distance à la cible sur l'axe Y (vertical) a montré un effet significatif pour le facteur Expertise ($F(1,51)=13.67$, $p<.05$, $\eta^2=.21$), ainsi que pour le facteur période de poursuite ($F(1,51)=15.80$, $p<.05$, $\eta^2=.23$) et pour le facteur vitesse ($F(1,51)=507.81$, $p<.05$, $\eta^2=.90$). Un effet significatif sur l'interaction entre le facteur Période de poursuite \times

Expertise a été observé ($F(1,51)=4.62$, $p<.05$, $\eta^2=.08$). Les participants ont une distance à la cible plus courte en vitesse lente ($M = 0.16$ m) que dans la condition vitesse rapide ($M = 0.20$ m). L'interaction Période de poursuite \times Expertise montre que les experts ont une distance à la cible sur l'axe Y plus petite que les non-experts dans la période sans perturbation ainsi que dans la période aux alentours du rebond (Figure 67). Aucune autre interaction n'a été observée.

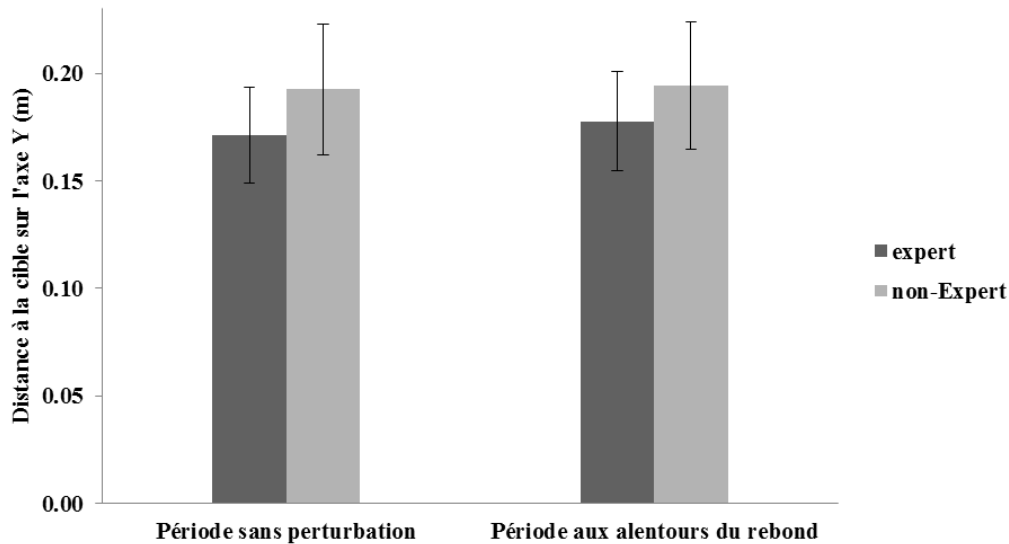


FIGURE 67: Distance à la cible sur l'axe Y selon l'interaction Période de poursuite \times Expertise.

Distance à la cible sur l'axe Z

L'analyse de la variance sur la distance à la cible sur l'axe Z n'a pas montré un effet significatif pour le facteur Expertise. Cependant un effet principal a été observé sur le facteur période de poursuite ($F(1,51)=157.89$, $p<.05$, $\eta^2=.75$), ainsi que sur le facteur vitesse ($F(1,51)=109.04$, $p<.05$, $\eta^2=.68$). Un effet d'interaction est présent entre les facteurs Période de poursuite \times Vitesse ($F(1,51)=42.04$, $p<.05$, $\eta^2=.45$). Le post hoc de Newman-Keuls sur l'effet de l'interaction Période de poursuite \times Vitesse indique que les participants ont une distance à la cible plus petite lors d'une vitesse lente et dans la période sans perturbation que lors d'une vitesse dans la période aux alentours du rebond (voir Figure 68). Aucune autre interaction n'a été observée.

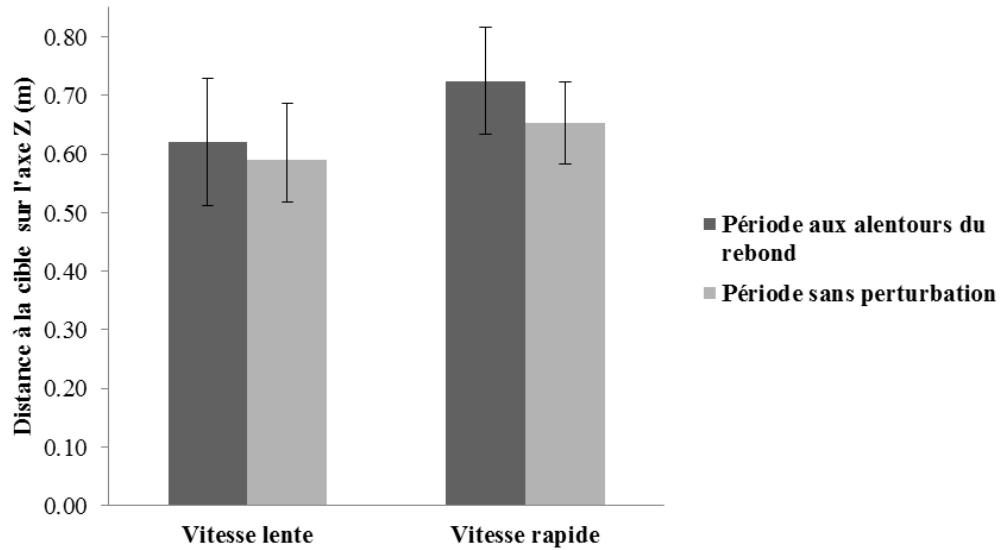


FIGURE 68: Distance à la cible sur l'axe Z selon l'interaction Période de poursuite \times Vitesse.

Durée de la période de perturbation autour du rebond

L'analyse de variance n'a pas indiqué d'effet principal du facteur Expertise, par contre un effet sur le facteur Vitesse a été révélé ($F(1,51)=105.63$, $p<.05$, $\eta^2=.67$). Les participants ont une durée de perturbation aux alentours du rebond plus courte dans la condition de la vitesse lente ($M= 511$ ms) que dans la condition de vitesse rapide ($M = 586$ ms). Aucune interaction entre les deux facteurs n'a été montrée.

Nombre de réduction d'écart global

L'analyse de la variance sur le Nombre de réduction d'écart n'a pas révélé d'effet principal sur les trois facteurs Expertise, Période de poursuite et Vitesse. Aucune interaction n'a été observée.

Nombre de réduction d'écart sur l'axe X

L'analyse de la variance sur le Nombre de réduction d'écart sur l'axe X n'a pas révélé d'effet principal sur le facteur Expertise. Cependant un effet principal a été observé sur le facteur période de poursuite ($F(1,51)=324.24$, $p<.05$, $\eta^2=.86$), ainsi que sur le facteur vitesse

($F(1,51)=29.04$, $p<.05$, $\eta^2=.36$). L'interaction Période de poursuite \times Vitesse a été observée ($F(1,51)=9,69$ $p<.05$, $\eta^2=.15$). Cette interaction montre que les participants ont plus de nombre de réductions d'écart dans la période de poursuite aux alentours du rebond ($M = 2.1$ Nbre/s) que dans la période de poursuite sans perturbation ($M = 1.76$ Nbre/s) et qu'ils ont aussi plus de réductions d'écart dans la condition de vitesse rapide ($M = 1.98$ Nbre/s) que dans la condition de vitesse lente ($M = 1.88$ Nbre/s) (Figure 69). Aucune autre interaction n'a été observée.

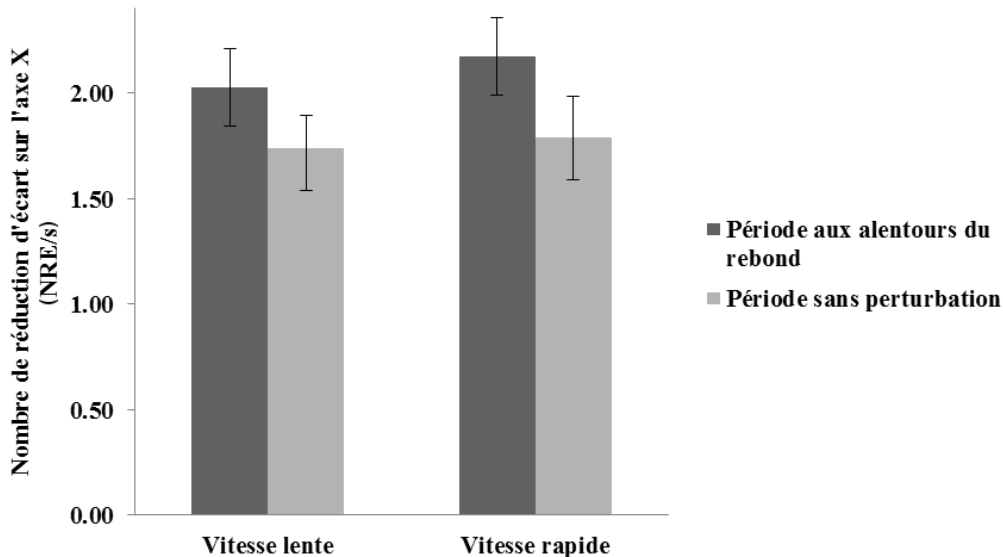


FIGURE 69: Nombre de réduction d'écart sur l'axe X selon l'interaction Période de poursuite \times Vitesse.

Nombre de réductions d'écart sur l'axe Y

L'analyse de la variance sur le Nombre de réduction d'écart sur l'axe Y n'a pas révélé d'effet principal sur le facteur Expertise. Cependant un effet principal a été observé sur le facteur période de poursuite ($F(1,51)=200.50$, $p<.05$, $\eta^2=.79$), ainsi que sur le facteur vitesse ($F(1,51)=32.61$, $p<.05$, $\eta^2=.38$). L'interaction Période de poursuite \times Vitesse a été observée ($F(1,51)=9.84$, $p<.05$, $\eta^2=.16$). Les participants ont un nombre de réduction d'écart sur l'axe Y est plus grand dans la poursuite aux alentours de rebond ($M = 2.13$ NRE/s) et dans la condition de vitesse rapide ($M = 2.05$ NRE/s) que dans la période de poursuite sans perturbations ($M = 1.87$ NRE/s) et dans la condition de vitesse lente ($M = 1.95$ NRE/s) (Figure 70).

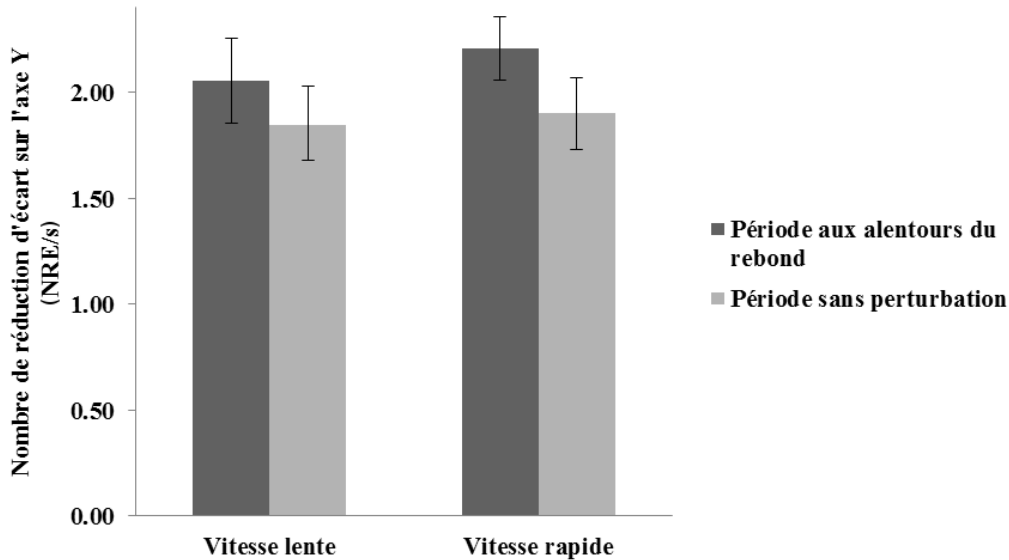


FIGURE 70: Nombre de réduction d'écart sur l'axe Y selon l'interaction Période de poursuite \times Vitesse.

Nombre de réductions d'écart sur l'axe Z

L'analyse de la variance sur le Nombre de réductions d'écart sur l'axe Z n'a pas révélé d'effet principal, ni sur le facteur Expertise, ni sur le facteur Période de poursuite. Cependant un effet sur le facteur Vitesse a été observé ($F(1,51)=14.93$, $p<.05$, $\eta^2=.22$). Les participants ont un nombre de réductions d'écart sur l'axe Z dans la condition de vitesse lente plus grand ($M = 4.08$ NRE/s) que dans la condition de vitesse rapide ($M = 3.83$ NRE/s). L'interaction Période de poursuite \times Vitesse a été observée ($F(1,51)=6.61$, $p<.05$, $\eta^2=.11$). Cette interaction montre que dans la condition de poursuite aux alentours de rebond, les participants ont un nombre de réductions d'écart sur l'axe Z qui est plus grand dans la condition de vitesse lente ($M = 4.19$ NRE/s) que dans la condition de vitesse rapide ($M = 3.78$ NRE/s). Une triple interaction entre les facteurs Expertise \times Période de poursuite \times Vitesse a été observée ($F(1,51)=5.39$, $p<.05$, $\eta^2=.09$). Celle-ci indique que dans la condition de poursuite aux alentours du rebond, le nombre de réductions d'écart sur l'axe Z est plus grand pour les experts dans la condition de Vitesse lente qu'en condition rapide (4.36 NRE/s vs. 3.74 NRE/s) (Figure 71). Aucune autre interaction n'a été observée.

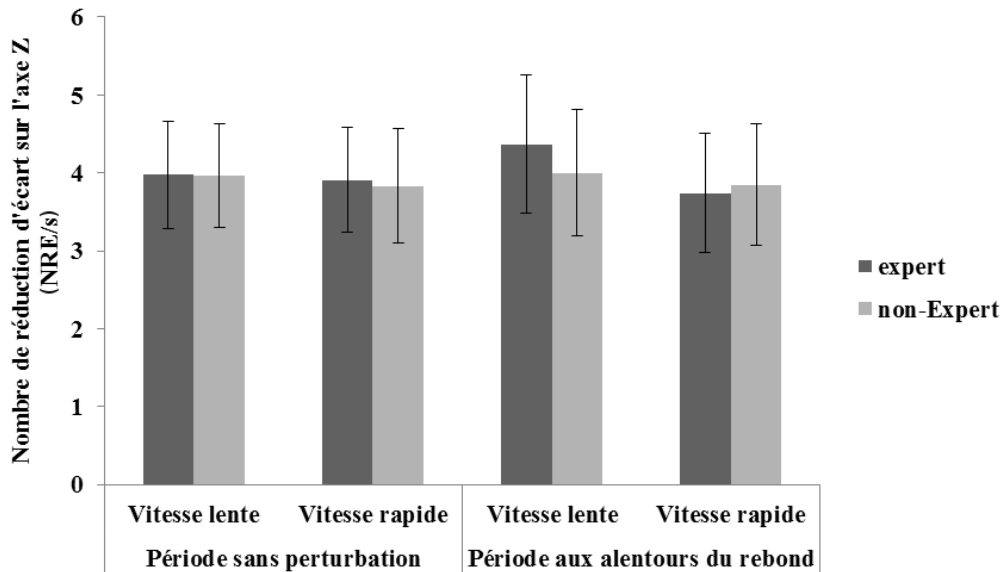


FIGURE 71: Nombre de réduction d'écart sur l'axe Z selon la triple interaction Expertise \times Période de poursuite \times Vitesse.

2.4.4 Discussion

Cette expérience avait pour but de confirmer les résultats des expériences précédentes en ajoutant une dimension de profondeur à la tâche. Il a par exemple été montré que la réalité virtuelle comprenant la 3D permettait de mieux révéler l'expertise par rapport à des clips vidéo (Vignais *et al.*, 2015). De ce fait, nous avons émis l'hypothèse que l'ajout de la profondeur dans la tâche de poursuite permettrait de mieux identifier certains déterminants de l'expertise en sports de balle du fait de l'importance de cette dimension dans les interactions qui caractérisent les interactions dans ces activités et que les experts se différencieraient encore une fois davantage que les non-experts dans la poursuite aux alentours du rebond.

Les résultats montrent de manière cohérente une baisse de la précision de la poursuite pour tous les participants dans le cas où la vitesse augmente et dans la période de poursuite aux alentours du rebond. Ces résultats sont en accord avec ceux trouvés dans les tâches de poursuite en 2D (expériences 4 et 5) et confirme notre hypothèse selon laquelle la présence des rebonds et l'augmentation de la vitesse complexifient la tâche. Ceci est vrai pour les deux groupes sans qu'il soit possible de les différencier même dans les conditions les plus complexes.

Il apparaît donc que contrairement à notre hypothèse, la tâche de poursuite 3D ne s'est pas révélée discriminante de l'expertise. Les analyses spécifiques sur chacun des trois axes

montrent que les experts ont une meilleure précision que les non-experts sur l'axe horizontal et vertical, mais aucune différence n'a été relevée sur l'axe de la profondeur. Cette précision est cohérente au regard des résultats des expériences 4 et 5 en 2D. Il apparaît que l'ajout de profondeur a complexifié la tâche de manière très importante. En effet, les erreurs dans la profondeur sont près de 5 fois supérieures à celles produites en hauteur et en largeur. L'ajout de la profondeur pose donc un problème (perception de la profondeur) et/ou perceptivo-moteur (interaction dans la profondeur). Les experts ne sont pas meilleurs dans ces conditions. Ceci pourrait tout d'abord suggérer que cela est lié à une difficulté perceptivo-motrice pour réaliser une tâche de poursuite en 3D qui ne correspondrait pas à des situations rencontrées en sports de balle. Ceci pourrait aussi être le résultat d'un manque d'indices permettant de percevoir la position dans la profondeur de la balle et de l'effecteur tels que la parallaxe qui n'était pas présente dans notre tâche. Ainsi (Miles, Pop, Watt, Lawrence, et John, 2012) proposent que l'absence de la parallaxe peut produire une déformation de la perception de la profondeur, et que la compensation du rendu ne se fasse pas dans le cas où l'utilisateur change de point de vue. Même si les déplacements des participants étaient très limités dans notre expérience, il est possible que cette absence de mise à jour du point d'observation a pu limiter de manière importante la perception de la profondeur. Cette limite pourrait expliquer l'ampleur des erreurs dans la profondeur qui pourrait avoir joué comme un effet plancher, ne permettant pas de révéler l'optimisation de processus développés chez les experts.

Il n'est donc pas possible en l'état de trancher sur l'origine des erreurs dans la profondeur qui peut être liée à une insuffisance d'indices dans la perception de la profondeur et/ou au fait que les participants n'ont pas réussi à effectuer les corrections nécessaires, en raison de l'ajout de la profondeur qui a complexifié la tâche.

Davantage de régulations ont été observées pour tous les participants sur l'axe horizontal et vertical autour des rebonds, c'est-à-dire dans les conditions les plus contraignantes, avec un nombre de réductions d'écart respectivement de 2.13 vs. 1.87, ainsi que dans la condition de vitesse rapide et que dans la condition de vitesse lente respectivement 2.05 vs. 1.95. Ceci est cohérent avec les résultats de l'expérience 4 et 5 qui ont montré que plus de corrections ont été réalisées autour des rebonds, périodes nécessitant plus de régulations du mouvement.

Sur le plan temporel, les experts réagissent plus rapidement que les non-experts (220 ms vs 232 ms) ce qui est conforme aux expériences précédentes. Bien que le temps de la première interception ait été plus court dans la condition de vitesse lente que dans la condition

vitesse rapide (2.21 s vs. 2.5 s), il a été bien plus long en moyenne que dans les expériences précédentes (Expérience 4 : 0.528 s, Expérience 5 : 0.715 s). Cette durée très allongée témoigne de la complexité de la tâche pour pouvoir intercepter la cible. Il faut d'ailleurs noter qu'aucune différence significative n'a été observée entre les experts et non-experts pour cette variable.

En conclusion, cette expérience est peu concluante sur l'apport de la profondeur pour discriminer l'expertise dans une tâche de poursuite. Cela pourrait signifier que la tâche de poursuite est trop complexe sur l'axe de profondeur et écrase des différences qui apparaissent clairement en 2D. Néanmoins, ces résultats sont peut-être liés au manque d'indices fournis pour la perception de la profondeur. Dans ces conditions, une simulation plus élaborée pourrait permettre de mieux évaluer l'apport de la profondeur sur les mécanismes perceptivo-moteur de l'expertise.

Discussion générale, limites et perspectives

Contexte et objectifs de la thèse

Ce travail avait pour objectif d'identifier certains déterminants de l'expertise en sports de balle au niveau des processus perceptivo-cognitifs et/ou perceptivo-moteurs par l'intermédiaire de dispositifs de réalité virtuelle. Pour cela, nous avons procédé à une démarche en deux temps. Dans un premier temps, nous avons cherché à différencier les experts³ des non-experts au niveau de leurs capacités perceptivo-cognitives à travers une tâche de jugement de trajectoire de balle. Dans un second temps, nous avons testé les capacités de régulation et d'adaptation du geste dans une tâche perceptivo-motrice de poursuite visuo-manuelle en utilisant le même environnement virtuel. Les résultats s'étant révélés discriminants de l'expertise concernant la partie perceptivo-motrice et non pour la partie perceptivo-cognitive, cela nous a conduits à explorer davantage les processus de régulations perceptivo-motrices. Pour cela, nous avons exploité des tâches de poursuite de balle avec des trajectoires prévisibles et imprévisibles dans différentes dimensions spatiales. Dans ce dernier chapitre, nous allons synthétiser les résultats et les analyser afin de tenter de mieux comprendre les processus impliqués permettant l'acquisition de l'expertise dans les actions d'interception en sports de balle.

Limites des tâches de jugement perceptivo-cognitif pour identifier l'expertise en sport de balle et questionnement sur l'optimisation des modèles internes

D'une manière générale, les résultats obtenus dans les deux premières expériences ont montré que les Experts en sports de balle comme les non-experts parvenaient à détecter avec une assez bonne précision les modifications de certaines caractéristiques des rebonds et de la gravité. Cela indique une capacité à se représenter les effets d'un rebond et de la gravité. Peut-on parler de modèles internes ? La question reste ouverte (Baurès *et al.*, 2007). Le fait de tester des Experts et des non-experts avait précisément pour but de tester l'éventuelle optimisation de ces représentations. Les analyses des performances dans des tâches de jugement n'ont pas permis de discriminer l'expertise en sport de balle au niveau des capacités strictement perceptives. En

3. Dans ce chapitre, nous utiliserons la notation "Experts" pour désigner l'ensemble des experts et super-experts, la distinction entre les deux groupes ayant été relativement limitée sauf dans certaines variables temporelles et dans les analyses de régression multiple.

effet, les Experts n'ont pas montré une meilleure précision dans la détection des modifications des propriétés des rebonds et de la gravité. D'autre part, les Experts et les non-experts ont été affectés de la même façon par l'effet de Gamme. Enfin, les Experts n'ont pas réagi plus rapidement que les non-experts. Même s'il est reconnu que la perception de l'accélération d'une trajectoire est peu précise (Benguigui *et al.*, 2003; Bennett et Benguigui, 2016; Craig *et al.*, 2006), il était possible d'attendre selon l'hypothèse des modèles internes, à ce que les Experts aient une plus grande précision et/ou rapidité dans la détection des modifications des propriétés d'accélération et du rebond (e.g., (Hayhoe *et al.*, 2005, 2012; Zago *et al.*, 2008)). En effet, si les modèles internes jouent un rôle déterminant pour atteindre un haut niveau de performance, ils devraient être particulièrement développés chez les Experts du fait de leur pratique intensive et de leurs performances supérieures. Cependant, nos résultats ne confirment pas cette hypothèse.

Pour autant, ces résultats ne remettent pas pour autant en cause les études qui montrent que les Experts ont des capacités perceptivo-cognitives plus développées que les non-experts pour prédire la gestuelle des joueurs tels que dans le badminton (Abernethy et Zawi, 2007), dans le tennis (Ward *et al.*, 2002), le basketball (Hohmann, Troje, Olmos, et Munzert, 2011; Aglioti *et al.*, 2008) ou pour prédire des mouvements biologiques (Romeas et Faubert, 2015; Romeas *et al.*, 2016). Ces capacités de prédiction supérieures viennent certainement d'une meilleure capacité de sélection de l'information et/ou d'une meilleure représentation interne des liens entre la production du mouvement biologique et les effets produits (e.g., (Romeas et Faubert, 2015; Bischoff, Zentgraf, Lorey, Pilgramm, Balser, Baumgartner, Hohmann, Stark, Vaitl, et Munzert, 2012)). La différence avec ces études est que la tâche que nous avons mise en place ne propose pas de percevoir la gestuelle des joueurs mais plutôt les trajectoires de balle. Il apparaît ici que les Experts ne sont pas meilleurs à détecter des variations de ces trajectoires non-conformes à ce qui se produit dans des environnements habituels.

Nos deux premières expériences étaient à notre connaissance les premières à poser la question de l'expertise sportive sur la base des travaux des équipes de Lacquaniti sur le modèle interne de la gravité (e.g., (Bosco *et al.*, 2012; Russo *et al.*, 2017) et de (Hayhoe *et al.*, 2005, 2012)) sur la perception des rebonds. Il est bien évident que l'absence de différences significatives entre Experts et non-experts dans nos résultats ne permet pas de conclure définitivement sur l'absence d'optimisation des modèles internes chez les Experts et de l'implication limitée de ces modèles et de leur utilisation. Mais il s'agit ici d'une première tentative de réponse à cette question qui remet en cause l'importance de ces modèles internes. D'autres expériences seront nécessaires pour confirmer ou infirmer nos résultats.

Intérêt des tâches de poursuite visuo-manuelle virtuelle pour identifier l'expertise dans les sports de balle

Utilisant le même environnement virtuel que dans l'expérience 1, il a été possible de montrer clairement dans l'expérience 3 que l'expertise en sports de balle peut être discriminée à condition d'ajouter une dimension de régulation motrice à la tâche. Cela nous a amenés à poursuivre cette thèse en approfondissant la question de l'intérêt des tâches de poursuite visuo-manuelle pour capturer certains déterminants de l'expertise en sports de balle. Pour cela, nous avons utilisé différentes conditions plus ou moins prévisibles avec des vitesses constantes ou accélérées, des rebonds prévisibles, des déviations imprévisibles et des déplacements dans la profondeur. Nous avons émis l'hypothèse que plus les trajectoires étaient difficiles à prédire, plus les mécanismes de régulation seraient dominants et plus la distinction entre Experts et non-experts apparaîtrait clairement, car mettant en jeu les mêmes processus que ceux impliqués en condition réelle (Ericsson et Starkes, 2003).

Importance de l'implication des régulations perceptivo-motrices et de la réduction des délais

Conformément à notre hypothèse, les résultats ont montré que les différences entre Experts et non-experts apparaissaient particulièrement en présence de modifications des trajectoires (accélération, rebond, déviation). De plus, les Experts ont montré des capacités supérieures à réguler leurs mouvements (plus de réductions d'écart de la distance à la cible) dans les conditions les plus contraignantes (Le Runigo *et al.*, 2005, 2010; Bootsma et Van Wieringen, 1990). Cette réduction de l'écart entre le mouvement optimal et le mouvement effectué pour réussir l'action peut correspondre à des processus prospectifs (Peper *et al.*, 1994; Montagne *et al.*, 1999) et au développement des capacités de couplage perception-action optimisées chez les Experts (e.g., McLeod, 1987; Carlton *et al.*, 1991)). Ceci s'est d'ailleurs traduit par de nombreux résultats montrant que les Experts ont des délais de mise en jeu des réactions (temps de réaction, temps de la première interception) et régulations (délai visuo-moteur) plus courts que les non-experts. L'optimisation des couplages perception-action pourrait correspondre à une diminution des latences de régulation (Benguigui *et al.*, 2008; Le Runigo *et al.*, 2005,

2010). La comparaison entre ces variables temporelles montre que le temps de réaction et le délai visuo-moteur étaient quasi similaires pour tous les participants (temps de réaction à 233 ms vs délai visuo-moteur à 235 ms pour l'expérience 5). En effet, ces résultats montrent que les délais requis pour corriger la cinématique du mouvement en cours étaient similaires à ceux nécessaires pour produire un mouvement discret. Ces résultats vont à l'encontre de ceux de (McLeod, 1987) qui propose que la correction de la cinématique intervient plus tôt que son initiation, car la relation entre information et mouvement permet de diminuer les inerties temporelles des corrections. Dans notre expérience, le changement de trajectoire de la balle issue de la déviation était tellement important, qu'il pourrait être décrit comme un début de mouvement pour le participant.

Il est vrai que ces résultats pourraient être interprétés dans la perspective proposée par (Teixeira *et al.*, 2005) dans laquelle les participants auraient recours à une reprogrammation du mouvement pour s'adapter aux changements de trajectoire et à l'augmentation de l'écart à la cible. Toutefois, le temps nécessaire pour réaliser une reprogrammation du mouvement pourrait impacter la réussite de la tâche d'interception. Par exemple, suite à un changement imprévu, le moment d'arrivée de la cible change, ce qui peut engendrer un processus incomplet dans la réorganisation temporelle.

Néanmoins, comme nous l'avons décrit dans le cadre théorique, les modèles prospectifs paraissent ici bien plus économiques pour expliquer les comportements mis en jeu. Par ailleurs, il est intéressant de noter les stratégies mises en place à proximité des rebonds qui correspondent à des déviations prévisibles de la trajectoire. A ce niveau, il est apparu des stratégies d'attente qui suggèrent des représentations des conséquences du rebond. Ce comportement est similaire à celui décrit par (Land et McLeod, 2000) et (Diaz *et al.*, 2013) concernant les mouvements oculaires autour des rebonds de balle. On peut noter néanmoins le caractère approximatif de cette stratégie et l'absence de différence entre les Experts et non-experts du fait que les propriétés du rebond soient susceptibles d'être modifiées (expérience 3) ou pas (expériences 4, 5, 6). Il faut également remarquer l'absence de différences entre Experts et non-experts. En effet, la complexité des rebonds implique un changement brutal de la direction de la balle, Experts comme non-experts ont adopté une stratégie d'attente. Des représentations internes seraient présentes mais plutôt pour se préparer à recapturer la balle à l'aide des processus de régulations perceptivo-motrices. Il est possible d'envisager que le nombre de répétitions relativement faible n'a pas permis aux participants d'intégrer plus précisément les propriétés des rebonds et ainsi minimiser cette phase d'attente. C'est d'ailleurs ce qui a semblé se dessiner dans les résultats

de l'expérience 3 dans laquelle la Figure 50 montre une amélioration de la proximité de la balle y compris autour du rebond avec la répétition de quelques essais. Toutefois, ces stratégies d'attente n'ont pas été discriminantes de l'expertise.

Il est étonnant de noter que l'ajout de la profondeur dans notre dernière expérience a masqué les effets de l'expertise au lieu de mieux les révéler comme nous l'attendions. Une explication de ce résultat pourrait être que la tâche de poursuite 3D n'était pas suffisamment immersive pour solliciter des processus développés par les Experts (manque d'indices de profondeur, (Craig *et al.*, 2006; Craig, Goulon, Berton, Rao, Fernandez, et Bootsma, 2009)). Une autre interprétation serait que la poursuite dans la dimension de la profondeur est trop complexe et écrase les différences entre Experts et non-experts. D'ailleurs, les analyses sur les axes verticaux et horizontaux ont montré que les différences entre Experts et non-experts étaient bien présentes.

Des tâches prédictives de l'expertise dans les sports de balle : importance des délais de corrections

Comme précisé dans la partie précédente, il est donc apparu que les tâches de poursuite visuo-manuelles étaient discriminantes de l'expertise en sports de balle. Même s'il n'a pas été possible de différencier clairement les experts et super-experts tels que nous les avons définis (voir expériences 4 et 5) sauf pour les variables temps de la première interception et temps d'interception après la déviation, cette démonstration a été renforcée par les analyses de régressions multiples. Ainsi les différents résultats (Figure 54, Figure 62) ont montré des distributions très cohérentes avec les niveaux d'expertise en termes de performances et de prédictions. Il ressort sur ces figures (Figure 54, Figure 62) que les super-experts étaient les mieux positionnés et que les non-experts étaient les moins bien positionnés tandis que les experts occupaient une place intermédiaire. Toutefois, il est apparu des cas atypiques avec quelques non-experts très bien placés, possédant donc visiblement des capacités perceptivo-motrices développées peut-être dans d'autres domaines ou lors de pratiques non contrôlées dans cette expérience (autres activités physiques ou jeux vidéo qui ont été minimisés dans les réponses aux questionnaires, ou qualités intrinsèques).

Il est apparu aussi des super-experts assez mal positionnés. Les facteurs qui influencent la performance tels que la génétique (Davids et Baker, 2007), les différences inter-individuelles et même le stress (Thelwell *et al.*, 2007) étant nombreux et interagissant, il est donc possible que certains sportifs atteignent un très haut niveau de pratique avec certaines lacunes dans certains domaines, compensées par d'autres qualités physiques et physiologiques très fortes (Joyner et Coyle, 2008). Ainsi, ayant testé des joueurs de basketball, il n'est pas impossible que certains basketteurs aient atteint le haut niveau avec des qualités morphologiques de taille et/ou des qualités neuro-musculaires de vitesse de course et de détente qui sont dépendants de leurs postes sur le terrain et qui leurs permettent d'être spécifiquement performant (Walters et Holling, 1990), même avec certaines lacunes au niveau des coordination visuo-motrices.

Il s'est confirmé dans ces régressions multiples que les variables temporelles étaient déterminantes de la performance dans la tâche et de l'expertise. En effet, un délai visuo-moteur plus court chez les experts représente un gain de temps qui joue un rôle important dans la performance. Ainsi, les participants peuvent corriger leurs mouvements et réduire les périodes de perturbation (durée de poursuite aux alentours des rebonds et des déviations), ce qui leur permet d'être plus précis dans leurs actions pour réussir la tâche. Ces résultats, confirment notre hypothèse temporelle pour expliquer l'origine de l'expertise dans une tâche de poursuite et par extrapolation une part de l'expertise dans les sports de balle.

Il apparait donc que les tâches de poursuite représentent une opportunité pour discriminer l'expertise en sports de balle en se basant sur l'analyse des performances (du délai visuo-moteur et du nombre de réduction de l'écart pour l'expérience 5), dans le cas où les contraintes de la tâche sont suffisamment élevées. Cela peut paraître surprenant si l'on considère le côté assez schématique des tâches proposées, qui paraissent éloignées de la pratique et de la spécificité de l'expertise. Toutefois, travailler sur une tâche schématique est maintenant présenté comme une possibilité des études de l'expertise (e.g., (Helsen et Starkes, 1999; Beauchamp et Faubert, 2011)). Mais il ne faut sans doute pas confondre la ressemblance des tâches et la sollicitation des processus déterminants. Même si nos tâches étaient schématiques, elles sollicitaient fortement les couplages perception-action qui selon nos hypothèses sont déterminants de l'expertise. Il faut d'ailleurs dire que les tâches de poursuite peuvent correspondre à une tâche d'interception continue dans laquelle il faut capturer en permanence, avec le plus de précision possible, la cible. En ce sens, la tâche de poursuite ressemble aux tâches d'interception auxquelles sont confrontés les experts.

Ces résultats offrent des perspectives de développement pour des tests de détection et des procédures de suivi, d'entraînement ou de ré-entraînement des sportifs pendant des périodes de convalescence ou de reprise d'entraînement. Il serait ainsi possible de maintenir un entraînement des liens perception-action même en cas de blessure et d'arrêt de la pratique. Les effets bénéfiques d'un tel entraînement pourraient être évalués, tel que cela a été fait pour les capacités perceptivo-cognitives dans des tâches de poursuite d'objets multiples. En effet, (Faubert et Sidebottom, 2012; Romeas et Faubert, 2015) ont montré que l'entraînement avec le NeuroTracker et une tâche de poursuite d'objets multiples, conçu dans environnement schématique, permet non seulement de discriminer l'expertise mais aussi d'entraîner les capacités perceptivo-cognitives. De plus, ces capacités perceptivo-cognitives apparaissent comme transférables à des situations sportives réelles (comme par exemple dans le football, (Romeas et Faubert, 2015)).

Une approche intégrative de l'expertise

Notre première partie expérimentale a montré la possible utilisation des représentations internes pour identifier des modifications des caractéristiques des trajectoires de balle chez les Experts et les non-experts. Cependant, ces représentations n'ont pas permis de discriminer le niveau d'expertise et ne semblent donc pas être plus développées chez les Experts. Nous avons aussi montré l'implication des processus de régulation perceptivo-motrice suite aux ajustements et aux adaptations des participants face à des perturbations de la cinématique. Dans ce contexte, on peut suggérer la possible utilisation de ces deux processus d'une façon hybride ou complémentaire dans le cadre d'une approche intégrative. En effet, les représentations pourraient être impliquées dans différents cas, notamment 1) dans des tâches de prédiction de trajectoires d'objet en chute libre (e.g., (Lacquaniti et Maioli, 1989b; McIntyre *et al.*, 2001; Senot *et al.*, 2005)); 2) dans une première réponse impliquant une vision macroscopique du mouvement à réaliser (i.e., adoption de stratégie d'attente face aux rebonds ou à une perturbation imprévisible) (e.g., (Van der Kamp *et al.*, 2008)); ou 3) dans le cas d'absence d'information (occultation) (e.g. (Whiting et Sharp, 1974)). A l'opposé, les processus de régulation perceptivo-motrice seraient plus appropriés et plus efficaces dans les conditions où les informations visuelles sont présentes et lorsqu'il est nécessaire de faire face à des perturbations nécessitant des ajustements et des adaptations en continu pour atteindre une grande précision.

Cette proposition d'approche intégrative n'est pas récente et était déjà proposée dans les travaux de (Bridgeman, Lewis, Heit, et Nagle, 1979) et (Milner et Goodale, 1995). En effet, (Tresilian, 1995) a proposé une approche à deux niveaux pour représenter les processus perceptivo-moteurs et cognitifs impliqués dans une tâche d'interception. Le premier niveau utiliserait des informations pour la régulation d'action en continu. Le second serait utilisé en cas d'occultation, de prédiction ou d'anticipation pour extrapoler l'action ou la trajectoire de la balle.

Même si ces deux processus semblent différents, ils pourraient être complémentaires. En effet, les processus prédictifs ont recours à des représentations exploitant les indices prélevés. Lorsque ces processus trouvent leurs limites dans des situations contraignantes, les processus de régulation perceptivo-motrice prennent le relais et permettent de répondre à ces situations difficiles. Ces processus supposent que le mouvement est régulé continuellement avec un couplage entre l'acteur (le sportif) et son environnement en se basant sur l'exploitation des lois de contrôle. En effet, l'implication de ces lois de contrôle peut être calibrée sur la base des connaissances acquises et des informations présentes dans l'environnement. Ce mécanisme de calibration permet d'ajuster et d'optimiser les lois de contrôle aux contraintes individu / environnement (Bingham et Pagano, 1998). On peut noter que, même si le processus de calibration de l'approche écologique engendre un mécanisme de sélection d'informations similaire au fonctionnement des processus prédictif, la notion de lois de contrôle reste néanmoins importante et remplace celle de programmes moteurs.

En prenant comme support l'anticipation dans les sports de balle, (Van der Kamp *et al.*, 2008) ont étudié les processus de traitements d'information impliqués. Ils ont proposé l'utilisation de deux systèmes : un système ventral et un système dorsal⁴. Ils ont montré que les deux systèmes pourraient interagir pour récupérer des informations et répondre efficacement dans une situation de frappe de balle. Dans un premier temps, le système ventral interviendrait avant la production de l'action jusqu'à l'organisation de la réponse en prélevant les indices informationnels, ensuite, le système dorsal régulerait en continu le déplacement et le geste de la frappe ou de capture.

L'intérêt d'une telle conception intégrative serait d'apporter une explication à l'ensemble des comportements perceptivo-moteurs mis en œuvre dans les sports de balle. En effet,

4. (Van der Kamp *et al.*, 2008) ont choisi de parler de système ventral ou dorsal dans une démarche de comportementaliste, plutôt que de voie ventrale ou dorsale pour une démarche de neurophysiologiste.

l'approche intégrative permettrait d'apporter des éléments supplémentaires à l'utilisation de modes de contrôle prédictif ou prospectif dans les actions d'interception et de répondre à plusieurs interrogations (e.g., (Arzamarski, Harrison, Hajnal, et Michaels, 2007)). Ainsi, une approche qui se baserait sur les deux modes de contrôle est envisageable. L'implication des modes de contrôle serait spécifique aux contraintes de la tâche. C'est-à-dire que la réussite de certaines tâches dépendrait plus de la prédiction lorsque des informations ne sont pas disponibles ou sous pression temporelle (Triolet *et al.*, 2013). De même, pour atteindre la précision requise qui est souvent importante dans les actions d'interception surtout dans le sport de haut niveau, des lois de contrôle prospectif viendraient compléter les prédictions macroscopiques pour réguler l'action en continu (Le Runigo *et al.*, 2005, 2010).

Conclusions et perspectives

L'objectif de ce travail était d'identifier certains déterminants perceptivo-cognitif et/ou perceptivo-moteurs de l'expertise dans les sports de balle dans des environnements virtuels. Les résultats n'ont pas montré de différences liées à l'expertise dans les tâches de jugements perceptifs, mais seulement dans la tâche de poursuite visuo-manuelle. Ce résultat engendre des questions sur le rôle des représentations (ou des modèles internes) dans le développement de l'expertise et met en avant l'importance des régulations perceptivo-motrices pour l'acquisition de l'expertise.

Dans la seconde partie expérimentale, nous avons exploré l'expertise dans le registre perceptivo-moteur à travers des situations simplifiées en 2D et 3D. Les résultats révèlent des capacités d'adaptation et de régulation du mouvement supérieures chez les Experts, et particulièrement dans les situations où les trajectoires sont peu prévisibles. En effet, pour ces trajectoires, l'analyse du délai visuo-moteur et du nombre de réductions d'écart a permis de discriminer l'expertise en sports de balle. Ces résultats suggèrent que l'expertise peut être discriminée au niveau de l'utilisation des processus de régulation perceptivo-motrice. Ils sont en lien avec les travaux de (Savelsbergh et Van der Kamp, 2000) qui montrent que l'entraînement et la pratique sportive permettent d'optimiser le couplage perception-action pour mieux adapter les actions face aux contraintes de la tâche et de les corriger avec plus de précision.

La tâche en 3D n'a pas montré un effet d'expertise pour l'axe de profondeur, ce qui peut révéler un manque d'immersion dans l'environnement virtuel, qui provient de plusieurs facteurs

tels que la qualité des graphismes, la qualité de capture du mouvement ou le délai d'affichage (Bideau *et al.*, 2010; Goldberg, Amburn, Brawner, et Westphal, 2014; Wright, 2014). Même si les tâches mises en œuvre ont été schématiques, elles pourraient justement étayer le sujet sur la notion d'immersion, sur l'importance de la perception de la profondeur et sur les indices nécessaires qui permettent de préserver les processus perceptivo-moteur (e.g., (Slater et Usoh, 1993; Stoffregen, Bardy, Smart, et Pagulayan, 2003; Gray et Regan, 2006)) mais également sur la notion d'interaction en temps réel du sujet avec son environnement (Morice, Siegler, et Bardy, 2008).

Il apparaît ainsi intéressant de réaliser de nouvelles expériences qui pourraient nous éclairer sur l'importance de certains indices et créer des scénarii multiples pour comprendre ce qui serait utile et nécessaire pour une meilleure interaction dans l'environnement virtuel. D'ailleurs dans la continuité de ce travail, une étude de poursuite en 3D a été réalisée dans le cadre d'une collaboration avec la société Open Mind Innovation dans lequel un environnement a été reconstruit dans des conditions expérimentales en 3D / 2D en réalité virtuelle sur un écran 2D ou avec perception de la profondeur 3D.

Dans une récente revue de questions, (Stone, Strafford, North, Toner, et Davids, 2019) posent le constat de la relation entre la perception, l'action et la cognition. Cette relation étroite est nécessaire pour concevoir au mieux les environnements de réalité virtuelle dans la mesure où elle favorise les interactions avec un environnement de performances et pour répliquer les contraintes de tâches réelles dans le but de maintenir le couplage perception-action. Cette relation est renforcée chez les Experts du fait de l'interaction continue entre les contraintes de la tâche et celles de l'environnement, confirmant ainsi les travaux de (Orth, Davids, et Seifert, 2018). Dans la même logique, nos résultats montrent que la prise en compte du couplage perception-action pour optimiser les interactions avec l'environnement en réalité virtuelle est essentielle.

Si l'on se réfère à la célèbre affirmation de (Gibson, 1979) "We must perceive in order to move, but we must also move in order to perceive", on peut considérer que, non seulement la perception de l'information est essentielle à un mouvement efficace, mais aussi que la capacité de mouvement est essentielle pour modifier les informations disponibles. De ce fait, il est important que les concepteurs de réalité virtuelle se concentrent sur les informations présentées dans ces environnements et sur les connaissances utilisées par les athlètes pour définir leurs possibilités d'action.

(Pinder *et al.*, 2011) soulignent dans le cadre de la théorie du "Representative design" proposé par (Brunswik, 1956), que les deux critères importants sont la fidélité fonctionnelle en termes de régulation perceptivo-motrice du mouvement et la fidélité de l'action en termes de production de mouvement dits "naturels". Dans nos tâches de poursuite visuo-manuelle même si le principe de mouvements dits "naturels" n'est pas véritablement respecté, la sollicitation importante des mécanismes de régulation perceptivo-motrices a permis de maintenir une fidélité fonctionnelle discriminante de l'expertise. Selon nos résultats la fidélité de l'action ne semble donc pas indispensable. En effet, bien que les participants n'aient pas eu besoin de coordonner un mouvement "naturel", tel qu'une capture ou une frappe de balle, les Experts ont fait appel dans nos tâches aux processus de régulation perceptivo-motrice impliqués dans leur pratique et qui leur permet de réaliser leurs performances expertes.

Une des perspectives de poursuite de ce travail serait de chercher à formaliser les lois de contrôle qui permettent la réalisation de ces tâches. Pour cela, il serait possible de s'inspirer de modèles existants de type prospectifs tels que par exemple, le modèle de la vitesse requise de (Peper *et al.*, 1994). Ce modèle décrit le contrôle de la vitesse de la main dans les actions d'interception. Dans ce modèle, à chaque instant, la vitesse de la main est régulée selon la vitesse requise pour atteindre la cible. Il a fait l'objet d'améliorations et de discussions dans plusieurs études (Bootsma *et al.*, 1997; Montagne *et al.*, 1999; Jacobs et Michaels, 2006; Michaels, Jacobs, et Bongers, 2006; Dessing et Craig, 2010). En l'occurrence, un modèle de contrôle dans une tâche de poursuite consisterait à spécifier la position et la vitesse courante de la main avec un offset tenant compte du délai visuo-moteur pour éviter que l'effecteur soit toujours derrière la cible mais bien sur la cible. Dans cette logique, peu d'études se sont intéressées à la modélisation dans les tâches de poursuite. On peut néanmoins citer une des premières études de (Viviani *et al.*, 1987) qui ont proposé une modélisation de l'effecteur, qui dépend de l'erreur de la position et de l'erreur de vitesse entre la cible et l'effecteur. Ils ont également suggéré que l'erreur de position dépend à la fois du délai instantané et de la vitesse instantanée de la cible (voir *Équation 11*). Une deuxième étude ayant abordé la modélisation dans les tâches de poursuite (locomotrice) est celle de (Fajen et Warren, 2007). Dans cette étude, les auteurs ont proposé un modèle de contrôle avec un angle de relèvement constant (constant bearing angle) pour résoudre une tâche de poursuite locomotrice où la cible se déplace sur un seul axe horizontal. Il serait nécessaire de tester ces modèles et voir lesquels peuvent s'appliquer à des déplacements 2D voire 3D. Enfin, il serait aussi intéressant de chercher à déterminer s'il existe des lois de contrôle spécifiques à l'expertise ou plus probablement des mises en œuvre de ces lois de contrôle optimisées.

Références bibliographiques

- B. ABERNETHY : Selective attention in fast ball sports. ii : expert novice differences. *Australian journal of science and medicine in sport*, 19(4):7–16, 1987.
- B. ABERNETHY : Expertise, Visual Search, and Information Pick-up in Squash. *Perception*, 19(1):63–77, fév. 1990. ISSN 0301-0066, 1468-4233. URL <http://journals.sagepub.com/doi/10.1068/p190063>.
- B. ABERNETHY : Visual search strategies and decision-making in sport. *International Journal of Sport Psychology*, 22(3-4):189–210, 1991. ISSN 0047-0767.
- B. ABERNETHY, R. J. NEAL et P. KONING : Visual-perceptual and cognitive differences between expert, intermediate, and novice snooker players. *Applied Cognitive Psychology*, 8(3):185–211, juin 1994. ISSN 08884080, 10990720. URL <http://doi.wiley.com/10.1002/acp.2350080302>.
- B. ABERNETHY et D. G. RUSSELL : The relationship between expertise and visual search strategy in a racquet sport. *Human Movement Science*, 6(4):283–319, déc. 1987. ISSN 01679457. URL <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/0167945787900017>.
- B. ABERNETHY, K. T. THOMAS et J. T. THOMAS : Strategies for improving understanding of motor expertise [or mistakes we have made and things we have learned!!]. *In Advances in psychology*, vol. 102, p. 317–356. Elsevier, 1993.
- B. ABERNETHY et K. ZAWI : Pickup of essential kinematics underpins expert perception of movement patterns. *Journal of motor behavior*, 39(5):353–367, 2007.
- W. C. ADAMS : *Foundations of physical education, exercise, and sport sciences*. Lea & Febiger, 1991.
- S. M. AGLIOTI, P. CESARI, M. ROMANI et C. URGESI : Action anticipation and motor resonance in elite basketball players. *Nature neuroscience*, 11(9):1109, 2008.

- C. ALAIN et L. PROTEAU : Perception of objective probabilities in motor performance. *Human Performance and Behaviour, Banff, Alberta*, 1977.
- C. ALAIN et L. PROTEAU : Decision making in sport. *Psychology of motor behavior and sport*, p. 465–477, 1980.
- C. ALAIN et C. SARRAZIN : Study of decision-making in squash competition : a computer simulation approach. *Canadian journal of sport sciences= Journal canadien des sciences du sport*, 15(3):193–200, 1990.
- H. ALVES, M. VOSS, W. R. BOOT, A. DESLANDES, V. COSSICH, J. INACIO SALLES et A. F. KRAMER : Perceptual-cognitive expertise in elite volleyball players. *Frontiers in psychology*, 4:36, 2013.
- L. G. APPELBAUM et G. ERICKSON : Sports vision training : A review of the state-of-the-art in digital training techniques. 2016.
- B. ARNALDI, P. FUCHS et J. TISSEAU : Chapitre 1 du volume 1 du traité de la réalité virtuelle. *Les Presses de l'Ecole des Mines de Paris*, 1:131, 2003.
- R. ARZAMARSKI, S. J. HARRISON, A. HAJNAL et C. F. MICHAELS : Lateral ball interception : hand movements during linear ball trajectories. *Experimental Brain Research*, 177(3):312–323, fév. 2007. ISSN 0014-4819, 1432-1106. URL <http://link.springer.com/10.1007/s00221-006-0671-8>.
- R. C. ATKINSON et R. M. SHIFFRIN : The control of short-term memory. *Scientific American*, 225(2):82–91, 1971.
- T. G. BABLER et J. L. DANNEMILLER : Role of image acceleration in judging landing location of free-falling projectiles. *Journal of Experimental Psychology : Human Perception and Performance*, 19(1):15, 1993.
- J. BAKER et J. CÔTÉ : Shifting training requirements during athlete development : Deliberate practice, deliberate play and other sport involvement in the acquisition of sport expertise. *Essential processes for attaining peak performance*, 1:92–109, 2006.
- F. C. BARTLETT : The measurement of human skill : Part ii. *British Medical Journal*, 1 (4511):877, 1947.

- R. BAURÈS, N. BENGUIGUI, M.-A. AMORIM et I. A. SIEGLER : Intercepting free falling objects : better use occam's razor than internalize newton's law. *Vision research*, 47(23):2982–2991, 2007.
- D. BAVELIER : Video Games as a Tool to Train Cognitive Skills. Rap. tech., DTIC Document, 2006. URL <http://oai.dtic.mil/oai/oai?verb=getRecord&metadataPrefix=html&identifier=ADA444148>.
- P. BEAUCHAMP et J. FAUBERT : Visual perception training : cutting edge psychophysics and 3d technology applied to sport science. *High Performance CIRCUIT e-Journal*, 2011.
- P. BEEK, J. DESSING, C. PEPPER et D. BULLOCK : Modelling the control of interceptive actions. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B : Biological Sciences*, 358(1437):1511–1523, 2003.
- N. BENGUIGUI, R. BAURÈS et C. L. RUNIGO : Visuomotor delay in interceptive actions. *Behavioral and Brain Sciences*, 31(2):200–201, avr. 2008. ISSN 1469-1825, 0140-525X. URL <https://www.cambridge.org/core/journals/behavioral-and-brain-sciences/article/visuomotor-delay-in-interceptive-actions/8C2822BB76C84EBBA663510482EC543A>.
- N. BENGUIGUI et S. J. BENNETT : Ocular pursuit and the estimation of time-to-contact with accelerating objects in prediction motion are controlled independently based on first-order estimates. *Experimental Brain Research*, 202(2):327–339, avr. 2010. ISSN 0014-4819, 1432-1106. URL <http://link.springer.com/10.1007/s00221-009-2139-0>.
- N. BENGUIGUI, H. RIPOLL et M. P. BRODERICK : Time-to-Contact Estimation of Accelerated Stimuli Is Based on First-Order Information. *Journal of Experimental Psychology : Human Perception and Performance*, 29(6):1083–1101, 2003. ISSN 0096-1523. URL <http://doi.apa.org/getdoi.cfm?doi=10.1037/0096-1523.29.6.1083>.
- S. J. BENNETT et N. BENGUIGUI : Is Acceleration Used for Ocular Pursuit and Spatial Estimation during Prediction Motion? *PLOS ONE*, 8(5):e63382, mai 2013. ISSN 1932-6203. URL <http://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0063382>.
- S. J. BENNETT et N. BENGUIGUI : Spatial Estimation of Accelerated Stimuli Is Based on a Linear Extrapolation of First-Order Information. *Experimental Psychology*, 63(2):98–106,

- mars 2016. ISSN 1618-3169. URL <http://econtent.hogrefe.com/doi/abs/10.1027/1618-3169/a000318>.
- A. BERTHOZ et J.-L. PETIT : *Phénoménologie et physiologie de l'action*. Odile Jacob, 2006.
- B. BIDEAU, R. KULPA, N. VIGNAIS, S. BRAULT, F. MULTON et C. CRAIG : Virtual reality, a serious game for understanding performance and training players in sport. *IEEE Computer Graphic Applications*, 30(2):14–21, 2010.
- B. BIDEAU, R. KULPA, S. MÉNARDAIS, L. FRADET, F. MULTON, P. DELAMARCHE et B. ARNALDI : Real handball goalkeeper vs. virtual handball thrower. *Presence : Teleoperators & Virtual Environments*, 12(4):411–421, 2003.
- B. BIDEAU, R. KULPA, N. VIGNAIS, S. BRAULT, F. MULTON et C. CRAIG : Using virtual reality to analyze sports performance. *IEEE Computer Graphics and Applications*, 30(2):14–21, 2009.
- B. BIDEAU, F. MULTON, R. KULPA, L. FRADET, B. ARNALDI et P. DELAMARCHE : Using virtual reality to analyze links between handball thrower kinematics and goalkeeper's reactions. *Neuroscience letters*, 372(1-2):119–122, 2004.
- G. P. BINGHAM et C. C. PAGANO : The necessity of a perception–action approach to definite distance perception : Monocular distance perception to guide reaching. *Journal of Experimental Psychology : Human Perception and Performance*, 24(1):145, 1998.
- M. BISCHOFF, K. ZENTGRAF, B. LOREY, S. PILGRAMM, N. BALSER, E. BAUMGARTNER, T. HOHMANN, R. STARK, D. VAITL et J. MUNZERT : Motor familiarity : Brain activation when watching kinematic displays of one's own movements. *Neuropsychologia*, 50(8):2085–2092, 2012.
- R. J. BOOTSMA et C. M. CRAIG : Global and Local Contributions to the Optical Specification of Time to Contact : Observer Sensitivity to Composite Tau. *Perception*, 31(8):901–924, août 2002. ISSN 0301-0066, 1468-4233. URL <http://journals.sagepub.com/doi/10.1068/p3230>.
- R. J. BOOTSMA, V. FAYT, F. T. ZAAL et M. LAURENT : On the information-based regulation of movement : What Wann (1996) may want to consider. *Journal of Experimental Psychology : Human Perception and Performance*, 23(4):1282, 1997. URL <http://psycnet.apa.org/psycinfo/1997-05321-022>.

- R. J. BOOTSMA, L. FERNANDEZ, A. H. P. MORICE et G. MONTAGNE : Top-level players' visual control of interceptive actions : Bootsma and van Wieringen (1990) 20 years later. *Journal of Experimental Psychology : Human Perception and Performance*, 36(4):1056–1063, 2010. ISSN 1939-1277, 0096-1523. URL <http://doi.apa.org/getdoi.cfm?doi=10.1037/a0019327>.
- R. J. BOOTSMA, M. H. J. HOUBIERS, H. T. A. WHITING et P. C. W. van WIERINGEN : Acquiring an Attacking Forehand Drive : The Effects of Static and Dynamic Environmental Conditions. *Research Quarterly for Exercise and Sport*, 62(3):276–284, sept. 1991. ISSN 0270-1367, 2168-3824. URL <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/02701367.1991.10608724>.
- R. J. BOOTSMA et R. R. OUDEJANS : Visual information about time-to-collision between two objects. *Journal of experimental psychology : human perception and performance*, 19(5):1041, 1993.
- R. J. BOOTSMA et C. L. E. PEPPER : Predictive visual information sources for the regulation of action with special emphasis on catching and hitting. In *Advances in psychology*, vol. 85, p. 285–314. Elsevier, 1992.
- R. J. BOOTSMA et P. C. VAN WIERINGEN : Timing an attacking forehand drive in table tennis. *Journal of experimental psychology : Human perception and performance*, 16(1):21, 1990. URL <http://psycnet.apa.org/journals/xhp/16/1/21/>.
- G. BOSCO, S. DELLE MONACHE et F. LACQUANITI : Catching what we can't see : manual interception of occluded fly-ball trajectories. *PLoS One*, 7(11):e49381, 2012.
- S. BRAULT, B. BIDEAU, R. KULPA et C. M. CRAIG : Detecting deception in movement : the case of the side-step in rugby. *PLoS One*, 7(6):e37494, 2012.
- E. BRENNER, I. A. RODRIGUEZ, V. E. MUNOZ, S. SCHOOTEMEIJER, Y. MAHIEU, K. VEERKAMP, M. ZANDBERGEN, T. van der ZEE et J. B. SMEETS : How can people be so good at intercepting accelerating objects if they are so poor at visually judging acceleration ? *i-Perception*, 7(1):2041669515624317, 2016.
- E. BRENNER et J. B. SMEETS : Fast responses of the human hand to changes in target position. *Journal of motor behavior*, 29(4):297–310, 1997.

- E. BRENNER, J. B. SMEETS et M. H. DE LUSSANET : Hitting moving targets continuous control of the acceleration of the hand on the basis of the target's velocity. *Experimental Brain Research*, 122(4):467–474, 1998.
- B. BRIDGEMAN, S. LEWIS, G. HEIT et M. NAGLE : Relation between cognitive and motor-oriented systems of visual position perception. *Journal of Experimental Psychology : Human Perception and Performance*, 5(4):692, 1979.
- L. BRINGOUX, L. MARIN, V. NOUGIER, P.-A. BARRAUD et C. RAPHEL : Effects of gymnastics expertise on the perception of body orientation in the pitch dimension. *Journal of Vestibular Research*, 10(6):251–258, 2000.
- A.-M. BROUWER, E. BRENNER et J. B. J. SMEETS : Perception of acceleration with short presentation times : Can acceleration be used in interception ? *Perception & Psychophysics*, 64(7):1160–1168, oct. 2002. ISSN 0031-5117, 1532-5962. URL <http://www.springerlink.com/index/10.3758/BF03194764>.
- E. BRUNSWIK : *Perception and the representative design of psychological experiments*. Univ of California Press, 1956.
- M. J. BUEKERS, H. P. BOGAERTS, S. P. SWINNEN et W. F. HELSEN : The synchronization of human arm movements to external events. *Neuroscience Letters*, 290(3):181–184, sept. 2000. ISSN 03043940. URL <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0304394000013501>.
- D. BULLOCK et S. GROSSBERG : Neural dynamics of planned arm movements : emergent invariants and speed-accuracy properties during trajectory formation. *Psychological review*, 95(1):49, 1988.
- G. BURDEA et P. COIFFET : *La réalité virtuelle*. 1993.
- W. D. BYBLOW, R. CHUA et D. GOODMAN : Asymmetries in Coupling Dynamics of Perception and Action. *Journal of Motor Behavior*, 27(2):123–137, juin 1995. ISSN 0022-2895, 1940-1027. URL <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/00222895.1995.9941705>.
- J. B. CALDERONE et M. K. KAISER : Visual acceleration detection : Effect of sign and motion orientation. *Perception & Psychophysics*, 45(5):391–394, sept. 1989. ISSN 0031-5117, 1532-5962. URL <http://www.springerlink.com/index/10.3758/BF03210711>.

- L. G. CARLTON : Chapter 1 Visual Processing Time and the Control of Movement. In L. P. a. D. ELLIOTT, éd. : *Advances in Psychology*, vol. 85 de *Vision and Motor Control*, p. 3–31. North-Holland, 1992. URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0166411508620087>.
- L. G. CARLTON et M. J. CARLTON : Response amendment latencies during discrete arm movements. *Journal of Motor Behavior*, 19(2):227–239, 1987.
- L. CARLTON, M. CARLTON et K. KIM : Visual processing time with changing environmental conditions. *Unpublished raw data*, 1991.
- U. CASTIELLO, Y. PAULIGNAN et M. JEANNEROD : TEMPORAL DISSOCIATION OF MOTOR RESPONSES AND SUBJECTIVE AWARENESS : A STUDY IN NORMAL SUBJECTS. *Brain*, 114(6):2639–2655, 1991. ISSN 0006-8950, 1460-2156. URL <https://academic.oup.com/brain/article-lookup/doi/10.1093/brain/114.6.2639>.
- A. CHARDENON, G. MONTAGNE, M. BUEKERS et M. LAURENT : The visual control of ball interception during human locomotion. *Neuroscience letters*, 334(1):13–16, 2002.
- W. G. CHASE et H. A. SIMON : Perception in chess. *Cognitive Psychology*, 4(1):55–81, jan. 1973. ISSN 00100285. URL <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/0010028573900042>.
- J. E. CONKLIN : Effect of control lag on performance in a tracking task. *Journal of Experimental Psychology*, 53(4):261–268, 1957. ISSN 0022-1015. URL <http://doi.apa.org/getdoi.cfm?doi=10.1037/h0040728>.
- C. M. CRAIG, J. BASTIN et G. MONTAGNE : How information guides movement : Intercepting curved free kicks in soccer. *Human Movement Science*, 30(5):931–941, 2011.
- C. M. CRAIG, E. BERTON, G. RAO, L. FERNANDEZ et R. J. BOOTSMA : Judging where a ball will go : the case of curved free kicks in football. *Naturwissenschaften*, 93(2):97–101, 2006.
- C. M. CRAIG, C. GOULON, E. BERTON, G. RAO, L. FERNANDEZ et R. J. BOOTSMA : Optic variables used to judge future ball arrival position in expert and novice soccer players. *Attention, Perception, & Psychophysics*, 71(3):515–522, 2009.
- K. J. W. CRAIK : *The Nature of Explanation*. Cambridge University Press, 1943. ISBN 9780521047555.

- J. E. CUTTING et P. M. VISHTON : Perceiving layout and knowing distances : The integration, relative potency, and contextual use of different information about depth. *In Perception of space and motion*, p. 69–117. Elsevier, 1995.
- K. DAVIDS et J. BAKER : Genes, environment and sport performance. *Sports medicine*, 37 (11):961–980, 2007.
- S. H. DAVOL, M. L. HASTINGS et D. A. KLEIN : Effect of Age, Sex, and Speed of Rotation on Rotary Pursuit Performance by Young Children. *Perceptual and Motor Skills*, 21(2):351–357, oct. 1965. ISSN 0031-5125, 1558-688X. URL <http://journals.sagepub.com/doi/10.2466/pms.1965.21.2.351>.
- B. DAY et I. LYON : Voluntary modification of automatic arm movements evoked by motion of a visual target. *Experimental Brain Research*, 130(2):159–168, 2000.
- B. DE BRUYN et G. A. ORBAN : Human velocity and direction discrimination measured with random dot patterns. *Vision research*, 28(12):1323–1335, 1988.
- A. de GROOT : Thought and choice in chess. *The Hague : Mouton & Co*, 1965.
- A. D. de GROOT : *Het denken van den schaker : een experimenteel-psychologische studie*. Noord-Hollandsche Uitgevers Maatschappij Amsterdam, The Netherlands, 1946.
- M. H. de LUSSANET et M. LAPPE : Depth perception from point-light biological motion displays. *Journal of Vision*, 12(11):14–14, 2012.
- N. A. DE SÁ TEIXEIRA, H. HECHT et A. M. OLIVEIRA : The representational dynamics of remembered projectile locations. *Journal of Experimental Psychology : Human Perception and Performance*, 39(6):1690, 2013.
- J. C. DESSING, D. BULLOCK, C. E. PEPPER et P. J. BEEK : Prospective control of manual interceptive actions : comparative simulations of extant and new model constructs. *Neural Networks*, 15(2):163–179, mars 2002. ISSN 08936080. URL <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0893608001001368>.
- J. C. DESSING et C. M. CRAIG : Bending it like beckham : how to visually fool the goalkeeper. *PLoS One*, 5(10):e13161, 2010.

- G. DIAZ, J. COOPER, C. ROTHKOPF et M. HAYHOE : Saccades to future ball location reveal memory-based prediction in a virtual-reality interception task. *Journal of Vision*, 13(1):20–20, jan. 2013. ISSN 1534-7362. URL <http://jov.arvojournals.org/Article.aspx?doi=10.1167/13.1.20>.
- M. DICKS, K. DAVIDS et C. BUTTON : Individual differences in the visual control of intercepting a penalty kick in association football. *Human movement science*, 29(3):401–411, 2010.
- P. DUNHAM, R. ALLAN et R. WINTER : Tracking Ability of Elementary School-Age Children. *Perceptual and Motor Skills*, 60(3):771–774, juin 1985. ISSN 0031-5125, 1558-688X. URL <http://journals.sagepub.com/doi/10.2466/pms.1985.60.3.771>.
- A. DUREY et G. DE KERMADEC : Tous les coups du tennis et leurs effets. *Science et vie*, 147, 1984.
- J. ELKIND : Tracking response characteristics of the human operator. *USAF Human Factors Operations Research Laboratories Memorandum*, 40:407–425, 1953.
- K. A. ERICSSON et A. C. LEHMANN : EXPERT AND EXCEPTIONAL PERFORMANCE : Evidence of Maximal Adaptation to Task Constraints. *Annual Review of Psychology*, 47(1):273–305, fév. 1996. ISSN 0066-4308, 1545-2085. URL <http://www.annualreviews.org/doi/10.1146/annurev.psych.47.1.273>.
- K. A. ERICSSON et W. KINTSCH : Long-term working memory. *Psychological review*, 102(2):211, 1995.
- K. A. ERICSSON, R. T. KRAMPE et C. TESCH-RÖMER : The role of deliberate practice in the acquisition of expert performance. *Psychological review*, 100(3):363, 1993.
- K. A. ERICSSON et J. SMITH : *Toward a General Theory of Expertise : Prospects and Limits*. Cambridge University Press, août 1991. ISBN 978-0-521-40612-3.
- K. A. ERICSSON et J. STARKES : Development of elite performance and deliberate practice. *Expert performance in sports : Advances in research on sport expertise*, p. 49–83, 2003.
- B. R. FAJEN et W. H. WARREN : Behavioral dynamics of intercepting a moving target. *Experimental Brain Research*, 180(2):303–319, 2007.

- D. FARROW et M. REID : The contribution of situational probability information to anticipatory skill. *Journal of Science and Medicine in Sport*, 15(4):368–373, juil. 2012. ISSN 14402440. URL <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1440244011004816>.
- J. FAUBERT : Professional athletes have extraordinary skills for rapidly learning complex and neutral dynamic visual scenes. *Scientific Reports*, 3(1), déc. 2013. ISSN 2045-2322. URL <http://www.nature.com/articles/srep01154>.
- J. FAUBERT et L. SIDEBOTTOM : Perceptual-cognitive training of athletes. *Journal of Clinical Sport Psychology*, 6(1):85–102, 2012.
- P. W. FINK, P. S. FOO et W. H. WARREN : Catching fly balls in virtual reality : A critical test of the outfielder problem. *Journal of vision*, 9(13):14–14, 2009.
- P. M. FITTS et M. I. POSNER : Human performance. 1967.
- J. R. FLANAGAN, E. NAKANO, H. IMAMIZU, R. OSU, T. YOSHIOKA et M. KAWATO : Composition and decomposition of internal models in motor learning under altered kinematic and dynamic environments. *Journal of Neuroscience*, 19(20):RC34–RC34, 1999.
- P. FUCHS : *Les interfaces de la réalité virtuelle*. 1996.
- W. D. GARVEY et L. L. MITNICK : An analysis of tracking behavior in terms of lead-lag errors. *Journal of Experimental Psychology*, 53(6):372–378, 1957. ISSN 0022-1015. URL <http://doi.apa.org/getdoi.cfm?doi=10.1037/h0046119>.
- B. GENOVA, S. MATEEFF, C. BONNET et J. HOHNSBEIN : Mechanisms of simple and choice reaction to changes in direction of visual motion. *Vision research*, 40(22):3049–3058, 2000.
- A. GEORGOPOULOS : Voluntary movement : Computational principles and neural mechanisms. *Cognitive neuroscience*, p. 131–168, 1997.
- J. J. GIBSON : *The ecological approach to visual perception*. MA : Houghton Mifflin, 1979.
- B. GOLDBERG, C. AMBURN, K. BRAWNER et M. WESTPHAL : Developing models of expert performance for support in an adaptive marksmanship trainer. *In Proceedings of the Interservice/Industry Training, Simulation, and Education Conference (I/ITSEC)*, 2014.
- R. GRAY : Behavior of college baseball players in a virtual batting task. *Journal of Experimental Psychology : Human Perception and Performance*, 28(5):1131–1148, 2002. ISSN 0096-1523. URL <http://doi.apa.org/getdoi.cfm?doi=10.1037/0096-1523.28.5.1131>.

- R. GRAY et D. M. REGAN : Unconfounding the direction of motion in depth, time to passage and rotation rate of an approaching object. *Vision Research*, 46(15):2388–2402, 2006.
- R. GRAY et R. SIEFFERT : Different Strategies for Using Motion-in-Depth Information in Catching. *Journal of Experimental Psychology : Human Perception and Performance*, 31(5):1004–1022, 2005. ISSN 1939-1277, 0096-1523. URL <http://doi.apa.org/getdoi.cfm?doi=10.1037/0096-1523.31.5.1004>.
- N. HAGEMANN, J. SCHORER, R. CAÑAL-BRULAND, S. LOTZ et B. STRAUSS : Visual perception in fencing : Do the eye movements of fencers represent their information pickup? *Attention, Perception, & Psychophysics*, 72(8):2204–2214, 2010.
- B. O. HARTMAN et P. M. FITTS : Relation of stimulus and response amplitude to tracking performance. *Journal of experimental psychology*, 49(2):82, 1955.
- C.-A. HAUERT, P.-G. ZANONE et P. MOUNOUD : Development of motor control in the child : theoretical and experimental approaches. In *Relationships between perception and action*, p. 325–343. Springer, 1990.
- M. HAYHOE, N. MENNIE, B. SULLIVAN et K. GORGOS : The role of internal models and prediction in catching balls. In *Proceedings of the american association for artificial intelligence*, p. 1–5, 2005.
- M. M. HAYHOE, T. MCKINNEY, K. CHAJKA et J. B. PELZ : Predictive eye movements in natural vision. *Experimental brain research*, 217(1):125–136, 2012.
- H. HECHT : Regularities of the physical world and the absence of their internalization. *Behavioral and Brain Sciences*, 24(4):608–617, août 2001. ISSN 0140-525X, 1469-1825. URL https://www.cambridge.org/core/product/identifier/S0140525X01000036/type/journal_article.
- H. HECHT et M. BERTAMINI : Understanding projectile acceleration. *Journal of Experimental Psychology : Human Perception and Performance*, 26(2):730–746, 2000. ISSN 0096-1523. URL <http://doi.apa.org/getdoi.cfm?doi=10.1037/0096-1523.26.2.730>.
- H. HECHT, M. K. KAISER et M. S. BANKS : Gravitational acceleration as a cue for absolute size and distance? *Perception & Psychophysics*, 58(7):1066–1075, jan. 1996. ISSN 0031-5117, 1532-5962. URL <http://www.springerlink.com/index/10.3758/BF03206833>.

- W. F. HELSEN et J. L. STARKES : A Multidimensional Approach to Skilled Perception and Performance in Sport. p. 28, 1999.
- T. HOHMANN, N. F. TROJE, A. OLMOS et J. MUNZERT : The influence of motor expertise and motor experience on action and actor recognition. *Journal of Cognitive Psychology*, 23(4):403–415, 2011.
- J. HOHNSBEIN et S. MATEEFF : The time it takes to detect changes in speed and direction of visual motion. *Vision Research*, 38(17):2569–2573, sept. 1998. ISSN 00426989. URL <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0042698998000145>.
- D. HOLDING : Guidance in pursuit tracking. *Journal of Experimental Psychology*, 57(6):362, 1959.
- R. HUYS, R. CAÑAL-BRULAND, N. HAGEMANN, P. J. BEEK, N. J. SMEETON et A. M. WILLIAMS : Global information pickup underpins anticipation of tennis shot direction. *Journal of Motor Behavior*, 41(2):158–171, 2009.
- R. C. JACKSON et P. MOGAN : Advance Visual Information, Awareness, and Anticipation Skill. *Journal of Motor Behavior*, 39(5):341–351, sept. 2007. ISSN 0022-2895, 1940-1027. URL <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.3200/JMBR.39.5.341-352>.
- S. JACKSON et R. BLAKE : Neural integration of information specifying human structure from form, motion, and depth. *Journal of Neuroscience*, 30(3):838–848, 2010.
- D. M. JACOBS et C. F. MICHAELS : Lateral interception I : Operative optical variables, attunement, and calibration. *Journal of Experimental Psychology : Human Perception and Performance*, 32(2):443–458, 2006. ISSN 1939-1277, 0096-1523. URL <http://doi.apa.org/getdoi.cfm?doi=10.1037/0096-1523.32.2.443>.
- B. JOERGES, L. HAGENFELD et J. LOPEZ-MOLINER : The use of visual cues in gravity judgements on parabolic motion. *Vision research*, 149:47–58, 2018.
- M. J. JOYNER et E. F. COYLE : Endurance exercise performance : the physiology of champions. *The Journal of physiology*, 586(1):35–44, 2008.
- A. KARNIEL et F. A. MUSSA-IVALDI : Does the motor control system use multiple models and context switching to cope with a variable environment? *Experimental Brain Research*, 143(4):520–524, 2002.

- W. KOERTH : A pursuit apparatus : Eye-hand coordination. *Psychological Monographs*, 31 (1):288, 1922.
- P. A. KOLERS : Memorial consequences of automatized encoding. *Journal of Experimental Psychology : Human Learning and Memory*, 1(6):689, 1975.
- F. LACQUANITI et C. MAIOLI : Adaptation to suppression of visual information during catching. *Journal of Neuroscience*, 9(1):149–159, 1989a.
- F. LACQUANITI et C. MAIOLI : The role of preparation in tuning anticipatory and reflex responses during catching. *Journal of Neuroscience*, 9(1):134–148, 1989b.
- M. F. LAND et S. FURNEAUX : The knowledge base of the oculomotor system. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B : Biological Sciences*, 352(1358):1231–1239, 1997.
- M. F. LAND et P. MCLEOD : From eye movements to actions : how batsmen hit the ball. *Nature neuroscience*, 3(12):1340–1345, 2000. URL http://www.nature.com/neuro/journal/v3/n12/full/nn1200_1340.html.
- F. LARRUE : *Influence des interfaces dans le transfert du virtuel au réel*. Thèse de doctorat, Bordeaux 2, 2011.
- C. LE RUNIGO, N. BENGUIGUI et B. G. BARDY : Perception–action coupling and expertise in interceptive actions. *Human Movement Science*, 24(3):429–445, juin 2005. ISSN 01679457. URL <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0167945705000436>.
- C. LE RUNIGO, N. BENGUIGUI et B. G. BARDY : Visuo-motor delay, information–movement coupling, and expertise in ball sports. *Journal of Sports Sciences*, 28(3):327–337, fév. 2010. ISSN 0264-0414, 1466-447X. URL <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/02640410903502782>.
- D. N. LEE, D. S. YOUNG, P. E. REDDISH, S. LOUGH et T. M. H. CLAYTON : Visual Timing in Hitting An Accelerating Ball. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology Section A*, 35(2):333–346, mai 1983. ISSN 0272-4987, 1464-0740. URL <http://journals.sagepub.com/doi/10.1080/14640748308402138>.
- D. LEE, N. L. PORT et A. P. GEORGOPOULOS : Manual interception of moving targets ii. on-line control of overlapping submovements. *Experimental Brain Research*, 116(3):421–433, 1997.

- D. N. LEE : A theory of visual control of braking based on information about time-to-collision. *Perception*, 5(4):437–459, 1976.
- D. N. LEE : 16 visuo-motor coordination in space-time. In *Advances in psychology*, vol. 1, p. 281–295. Elsevier, 1980.
- D. N. LEE et D. S. YOUNG : Visual timing of interceptive action. In *Brain mechanisms and spatial vision*, p. 1–30. Springer, 1985.
- M. LENOIR, J. VANSTEENKISTE, J. VERMEULEN et D. de CLERCQ : Effects of contrasting colour patterns of the ball in the volleyball reception. *Journal of Sports Sciences*, 23(8):871–879, août 2005. ISSN 0264-0414, 1466-447X. URL <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/02640410400022722>.
- M.-J. LIAO et R. J. JAGACINSKI : A Dynamical Systems Approach to Manual Tracking Performance. *Journal of Motor Behavior*, 32(4):361–378, déc. 2000. ISSN 0022-2895, 1940-1027. URL <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/00222890009601386>.
- F. LOFFING et N. HAGEMANN : On-Court Position Influences Skilled Tennis Players' Anticipation of Shot Outcome. *Journal of Sport and Exercise Psychology*, 36(1):14–26, fév. 2014. ISSN 0895-2779, 1543-2904. URL <https://journals.humankinetics.com/view/journals/jsep/36/1/article-p14.xml>.
- F. LOFFING, R. STERN et N. HAGEMANN : Pattern-induced expectation bias in visual anticipation of action outcomes. *Acta Psychologica*, 161:45–53, oct. 2015. ISSN 00016918. URL <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0001691815300433>.
- J. LÓPEZ-MOLINER, J. B. SMEETS et E. BRENNER : Similar effects of a motion-in-depth illusion on manual tracking and perceptual judgements. *Experimental brain research*, 151(4):553–556, 2003.
- J. LÓPEZ-MOLINER, E. BRENNER, S. LOUW et J. B. J. SMEETS : Catching a gently thrown ball. *Experimental Brain Research*, 206(4):409–417, oct. 2010. ISSN 0014-4819, 1432-1106. URL <http://link.springer.com/10.1007/s00221-010-2421-1>.
- M. MALLEK, N. BENGUIGUI, M. DICKS et R. THOUVARECQ : Sport expertise in perception–action coupling revealed in a visuomotor tracking task. *European journal of sport science*, 17(10):1270–1278, 2017.

- D. L. MANN, T. SCHAEFERS et R. CAÑAL-BRULAND : Action preferences and the anticipation of action outcomes. *Acta Psychologica*, 152:1–9, oct. 2014. ISSN 00016918. URL <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0001691814001632>.
- D. T. MANN, A. M. WILLIAMS, P. WARD et C. M. JANELLE : Perceptual-Cognitive Expertise in Sport : A Meta-Analysis. *Journal of Sport and Exercise Psychology*, 29(4):457–478, août 2007. ISSN 0895-2779, 1543-2904. URL <https://journals.humankinetics.com/view/journals/jsep/29/4/article-p457.xml>.
- L. MARIN, B. I. T. G. BARDY et R. J. BOOTSMA : Level of gymnastic skill as an intrinsic constraint on postural coordination. *Journal of sports sciences*, 17(8):615–626, 1999.
- W. MARINOVIC, A. M. PLOOY et J. R. TRESILIAN : Preparation and inhibition of interceptive actions. *Experimental Brain Research*, 197(4):311–319, août 2009. ISSN 0014-4819, 1432-1106. URL <http://link.springer.com/10.1007/s00221-009-1916-0>.
- D. MARR : Vision : A computational investigation into the human representation and processing of visual information, henry holt and co. *Inc., New York, NY*, 2(4.2), 1982.
- R. G. MARTENIUK : Cognitive information processes in motor short-term memory and movement production. *In Motor control*, p. 175–186. Elsevier, 1976.
- S. MATEEFF, B. GENOVA et J. HOHNSBEIN : The simple reaction time to changes in direction of visual motion. *Experimental Brain Research*, 124(3):391–394, 1999.
- J. A. MATHER et C. PUTCHAT : Parallel Ocular and Manual Tracking Responses to a Continuously Moving Visual Target. *Journal of Motor Behavior*, 15(1):29–38, mars 1983. ISSN 0022-2895, 1940-1027. URL <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/00222895.1983.10735287>.
- J. MCINTYRE, M. ZAGO, A. BERTHOZ et F. LACQUANITI : Does the brain model newton's laws? *Nature neuroscience*, 4(7):693, 2001.
- P. MCLEOD : Visual reaction time and high-speed ball games. *Perception*, 16(1):49–59, 1987. ISSN 0301-0066. URL [http://www.safetylit.org/citations/index.php?fuseaction=citations.viewdetails&citationIds\[\]=citjournalarticle_453824_38](http://www.safetylit.org/citations/index.php?fuseaction=citations.viewdetails&citationIds[]=citjournalarticle_453824_38).
- K. MCMENEMY et R. S. FERGUSON : *A hitchhiker's guide to virtual reality*. AK Peters/CRC Press, 2007.

- MCRROBERT, A. et TAYLER, M. : Perceptual abilities of experienced and inexperienced cricket batsmen in differentiating between left hand and right hand bowling deliveries. *Journal of Sports Sciences*, 23(2), 190-191, 2005. URL https://scholar.google.fr/scholar?q=Perceptual+abilities+of+experienced+and+inexperienced+cricket+batsmen+in+differentiating+between+left+hand+and+right+hand+bowling+deliveries&btnG=&hl=fr&as_sdt=0%2C5.
- D. MCRUER et E. KRENDEL : The human as a component in a servo system. *Jour. Franklin Institute*, 276(5), 1959a.
- D. T. MCRUER et E. S. KRENDEL : The human operator as a servo system element. *Journal of the Franklin Institute*, 267(5):381–403, 1959b.
- S. MECHERI, E. GILLET, R. THOUVARECQ et D. LEROY : Are visual cue masking and removal techniques equivalent for studying perceptual skills in sport? *Perception*, 40(4):474–489, 2011.
- C. F. MICHAELS, D. M. JACOBS et R. M. BONGERS : Lateral interception II : Predicting hand movements. *Journal of Experimental Psychology : Human Perception and Performance*, 32(2):459–472, 2006. ISSN 1939-1277, 0096-1523. URL <http://doi.apa.org/getdoi.cfm?doi=10.1037/0096-1523.32.2.459>.
- C. F. MICHAELS, E. B. ZEINSTRAS et R. R. D. OUDEJANS : Information and action in punching a falling ball. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology Section A*, 54(1):69–93, fév. 2001. ISSN 0272-4987, 1464-0740. URL <http://journals.sagepub.com/doi/10.1080/02724980042000039>.
- N. MILAZZO, D. FARROW, A. RUFFAULT et J. F. FOURNIER : Do karate fighters use situational probability information to improve decision-making performance during on-mat tasks? *Journal of Sports Sciences*, 34(16):1547–1556, août 2016. ISSN 0264-0414, 1466-447X. URL <http://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/02640414.2015.1122824>.
- H. C. MILES, S. R. POP, S. J. WATT, G. P. LAWRENCE et N. W. JOHN : A review of virtual environments for training in ball sports. *Computers & Graphics*, 36(6):714–726, 2012.
- A. MILNER et M. GOODALE : Oxford psychology series, no. 27, 1995.

- T. MOLET, A. AUBEL, T. ÇAPIN, S. CARION, E. LEE, N. MAGNENAT-THALMANN, H. NOSER, I. PANDZIC, G. SANNIER et D. THALMANN : Anyone for tennis? *Presence : Teleoperators & Virtual Environments*, 8(2):140–156, 1999.
- G. MONTAGNE, M. BUEKERS, C. CAMACHON, A. de RUGY et M. LAURENT : The learning of goal-directed locomotion : A perception-action perspective. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology : Section A*, 56(3):551–567, mars 2003. ISSN 0272-4987, 1464-0740. URL <http://www.informaworld.com/openurl?genre=article&doi=10.1080/02724980244000620&magic=crossref|D404A21C5BB053405B1A640AFFD44AE3>.
- G. MONTAGNE, M. LAURENT, A. DUREY et R. BOOTSMA : Movement reversals in ball catching. *Experimental Brain Research*, 129(1):87–92, 1999. URL <http://link.springer.com/article/10.1007/s002210050939>.
- A. H. MORICE, I. A. SIEGLER et B. G. BARDY : Action-perception patterns in virtual ball bouncing : Combating system latency and tracking functional validity. *Journal of neuroscience methods*, 169(1):255–266, 2008.
- P. MOUNOUD, P. VIVIANI, C. A. HAUERT et J. GUYON : Development of visuomanual tracking in 5- to 9-year-old boys. *Journal of Experimental Child Psychology*, 40(1):115–132, août 1985. ISSN 00220965. URL <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/0022096585900682>.
- S. MÜLLER et B. ABERNETHY : Expert anticipatory skill in striking sports : A review and a model. *Research Quarterly for Exercise and Sport*, 83(2):175–187, 2012.
- F. MULTON, R. KULPA et B. BIDEAU : Virtual reality and sports guest editors' introduction. *Presence : Teleoperators and Virtual Environments*, 20(1):iii–iv, 2011.
- U. NEISSER : Cognitive psychology appleton-century-crofts. *New York*, p. 351, 1967.
- A. NEWELL : Physical symbol systems. *Cognitive science*, 4(2):135–183, 1980.
- M. NOBLE, P. M. FITTS et C. E. WARREN : The frequency response of skilled subjects in a pursuit tracking task. *Journal of Experimental Psychology*, 49(4):249, 1955.
- H. NOSER, I. S. PANDZIC, T. K. CAPIN, N. M. THALMANN et D. THALMANN : 2 mtralab-cui. *Artificial Life : The Proceedings...*, p. 135, 1996.

- J. M. NOTTERMAN et D. R. TUFANO : Variables influencing outflow–inflow interpretations of tracking performance : Predictability of target motion, transfer function, and practice. *Journal of Experimental Psychology : Human Perception and Performance*, 6(1):85, 1980.
- D. ORTH, K. DAVIDS et L. SEIFERT : Constraints representing a meta-stable régime facilitate exploration during practice and transfer of learning in a complex multi-articular task. *Human movement science*, 57:291–302, 2018.
- T. PAILLARD, R. BIZID et P. DUPUI : Do sensorial manipulations affect subjects differently depending on their postural abilities? *British journal of sports medicine*, 41(7):435–438, 2007.
- Y. PAULIGNAN, C. MACKENZIE, R. MARTENIUK et M. JEANNEROD : Selective perturbation of visual input during prehension movements. *Experimental brain research*, 83(3):502–512, 1991.
- G. PAULL et D. GLENCROSS : Expert perception and decision making in baseball. *International Journal of Sport Psychology*, 1997.
- C. L. E. PEPPER et P. J. BEEK : Are frequency-induced transitions in rhythmic coordination mediated by a drop in amplitude? *Biological Cybernetics*, 79(4):291–300, oct. 1998. ISSN 0340-1200, 1432-0770. URL <http://link.springer.com/10.1007/s004220050479>.
- L. PEPPER, R. J. BOOTSMA, D. R. MESTRE et F. C. BAKKER : Catching balls : How to get the hand to the right place at the right time. *Journal of Experimental Psychology : Human Perception and Performance*, 20(3):591–612, 1994. ISSN 1939-1277 0096-1523.
- R. A. PINDER, K. DAVIDS, I. RENSHAW et D. ARAÚJO : Representative learning design and functionality of research and practice in sport. *Journal of Sport and Exercise Psychology*, 33(1):146–155, 2011.
- F. E. POLLICK : Virtual surfaces and the influence of cues to surface shape on grasp. *Virtual Reality*, 3(2):85–101, 1998.
- E. POULTON : The basis of perceptual anticipation in tracking. *British Journal of Psychology*, 43(4):295, 1952a.
- E. POULTON : Perceptual anticipation in tracking with two-pointer and one-pointer displays. *British Journal of Psychology*, 43(3):222, 1952b.

- E. POULTON : On prediction in skilled movements. *Psychological bulletin*, 54(6):467, 1957.
- A. M. PUERTA : The power of shadows : shadow stereopsis. *JOSA A*, 6(2):309–311, 1989.
- D. REGAN : Visual factors in hitting and catching. *Journal of Sports Sciences*, 15(6):533–558, jan. 1997. ISSN 0264-0414. URL <http://dx.doi.org/10.1080/026404197366985>.
- D. REGAN et R. GRAY : Visually guided collision avoidance and collision achievement. *Trends in cognitive sciences*, 4(3):99–107, 2000.
- D. REGAN, L. KAUFMAN et J. LINCOLN : Motion in depth and visual acceleration((pilot performance in simulator and real aircraft)). *Handbook of perception and human performance.*, 1:19–1, 1986.
- D. REISBERG, J. BARON et D. G. KEMLER : Overcoming stroop interference : The effects of practice on distractor potency. *Journal of Experimental Psychology : Human Perception and Performance*, 6(1):140, 1980.
- I. RENSHAW et M. M. FAIRWEATHER : Cricket bowling deliveries and the discrimination ability of professional and amateur batters. *Journal of Sports Sciences*, 18(12):951–957, jan. 2000. ISSN 0264-0414, 1466-447X. URL <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/026404100446757>.
- H. RIPOLL et P. FLEURANCE : What does keeping one’s eye on the ball mean? *Ergonomics*, 31(11):1647–1654, 1988.
- T. ROMEAS et J. FAUBERT : Soccer athletes are superior to non-athletes at perceiving soccer-specific and non-sport specific human biological motion. *Frontiers in psychology*, 6:1343, 2015.
- T. ROMEAS, A. GULDNER et J. FAUBERT : 3d-multiple object tracking training task improves passing decision-making accuracy in soccer players. *Psychology of Sport and Exercise*, 22:1–9, 2016.
- M. RUSSO, B. CESQUI, B. LA SCALEIA, F. CECCARELLI, A. MASELLI, A. MOSCATELLI, M. ZAGO, F. LACQUANITI et A. D’AVELLA : Intercepting virtual balls approaching under different gravity conditions : evidence for spatial prediction. *Journal of neurophysiology*, 118(4):2421–2434, 2017.

- M. V. SANCHEZ-VIVES et M. SLATER : From presence to consciousness through virtual reality. *Nature Reviews Neuroscience*, 6(4):332, 2005.
- A. SANDERS : Issues and trends in the debate on discrete vs. continuous processing of information. *Acta psychologica*, 74(2-3):123–167, 1990.
- V. SARPESHKAR, D. L. MANN, W. SPRATFORD et B. ABERNETHY : The influence of ball-swing on the timing and coordination of a natural interceptive task. *Human Movement Science*, 54:82–100, août 2017. ISSN 01679457. URL <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0167945717302439>.
- G. J. P. SAVELSBERGH et J. Van der KAMP : "Information in learning to go-ordinate and control movements : Is there a need for specificity of practice", 2000.
- G. SAVELSBERGH, H. WHITING et R. J. BOOTSMA : Grasping tau. *Journal of experimental psychology : human perception and performance*, 17(2):315, 1991.
- R. A. SCHMIDT : Anticipation and timing in human motor performance. *Psychological Bulletin*, 70(6p1):631, 1968.
- R. A. SCHMIDT : A schema theory of discrete motor skill learning. *Psychological Review*, 82(4): 225–260, 1975. ISSN 0033-295X. URL <http://content.apa.org/journals/rev/82/4/225>.
- R. A. SCHMIDT : More on motor programs. *Human motor behavior : An introduction*, p. 189–217, 1982.
- M. A. SCOTT, F.-X. LI et K. DAVIDS : Expertise and the regulation of gait in the approach phase of the long jump. *Journal of Sports Sciences*, 15(6):597–605, jan. 1997. ISSN 0264-0414, 1466-447X. URL <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/026404197367038>.
- P. SENOT, M. ZAGO, F. LACQUANITI et J. MCINTYRE : Anticipating the Effects of Gravity When Intercepting Moving Objects : Differentiating Up and Down Based on Nonvisual Cues. *Journal of Neurophysiology*, 94(6):4471–4480, déc. 2005. ISSN 0022-3077, 1522-1598. URL <http://www.physiology.org/doi/10.1152/jn.00527.2005>.
- C. E. SHANNON et W. WEAVER : The mathematical theory of communication (urbana, il), 1949.
- J. SHIM, L. G. CARLTON, J. W. CHOW et W.-S. CHAE : The Use of Anticipatory Visual Cues by Highly Skilled Tennis Players. *Journal of Motor Behavior*, 37(2):164–175, mars 2005.

- ISSN 0022-2895, 1940-1027. URL <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.3200/JMBR.37.2.164-175>.
- M. SLATER, P. KHANNA, J. MORTENSEN et I. YU : Visual realism enhances realistic response in an immersive virtual environment. *IEEE computer graphics and applications*, 29(3):76–84, 2009.
- M. SLATER et M. USOH : Representations systems, perceptual position, and presence in immersive virtual environments. *Presence : Teleoperators & Virtual Environments*, 2(3):221–233, 1993.
- E. S. SPELKE, G. KATZ, S. E. PURCELL, S. M. EHRLICH et K. BREINLINGER : Early knowledge of object motion : continuity and inertia. *Cognition*, 51(2):131–176, fév. 1994. ISSN 00100277. URL <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/0010027794900132>.
- J. STARKES et J. DEAKIN : Perception in sport : A cognitive approach to skilled performance. *Cognitive sport psychology*, p. 115–128, 1984.
- T. A. STOFFREGEN, B. G. BARDY, L. SMART et R. PAGULAYAN : On the nature and evaluation of fidelity in virtual environments. *Virtual and adaptive environments : Applications, implications, and human performance issues*, p. 111–128, 2003.
- J. A. STONE, B. W. STRAFFORD, J. S. NORTH, C. TONER et K. DAVIDS : Effectiveness and efficiency of virtual reality designs to enhance athlete development : an ecological dynamics perspective. *Movement & Sport Sciences-Science & Motricité*, 2019.
- L. A. TEIXEIRA, D. L. de OLIVEIRA, R. G. ROMANO et S. C. CORREA : Leg preference and interlateral asymmetry of balance stability in soccer players. *Research quarterly for exercise and sport*, 82(1):21–27, 2011.
- L. A. TEIXEIRA, E. DOS SANTOS LIMA et M. M. FRANZONI : The continuous nature of timing reprogramming in an interceptive task. *Journal of Sports Sciences*, 23(9):943–950, sept. 2005. ISSN 0264-0414, 1466-447X. URL <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/02640410400023365>.
- R. C. THELWELL, N. J. WESTON et I. A. GREENLEES : Batting on a sticky wicket : Identifying sources of stress and associated coping strategies for professional cricket batsmen. *Psychology of Sport and Exercise*, 8(2):219–232, 2007.

- D. TINJUST, R. ALLARD et J. FAUBERT : Impact of stereoscopic vision and 3d representation of visual space on multiple object tracking performance. *Journal of Vision*, 8(6):509–509, 2008.
- J. R. TRESILIAN : Four questions of time to contact : A critical examination of research on interceptive timing. *Perception*, 22(6):653–680, 1993.
- J. R. TRESILIAN : The accuracy of interceptive action in time and space. *Exercise and sport sciences reviews*, 32(4):167–173, 2004. URL http://journals.lww.com/acsm-essr/Abstract/2004/10000/The_Accuracy_of_Interceptive_Action_in_Time_and.8.aspx.
- J. R. TRESILIAN : Hitting a moving target : Perception and action in the timing of rapid interceptions. *Perception & Psychophysics*, 67(1):129–149, jan. 2005. ISSN 0031-5117, 1532-5962. URL <http://www.springerlink.com/index/10.3758/BF03195017>.
- J. TRESILIAN : Perceptual and cognitive processes in time-to-contact estimation : Analysis of prediction-motion and relative judgment tasks. *Perception & Psychophysics*, 57(2):231–245, 1995.
- B. TREUTWEIN et H. STRASBURGER : Fitting the psychometric function. *Perception & psychophysics*, 61(1):87–106, 1999.
- C. TRIOLET, N. BENGUIGUI, C. LE RUNIGO et A. M. WILLIAMS : Quantifying the nature of anticipation in professional tennis. *Journal of Sports Sciences*, 31(8):820–830, 2013.
- D. TYLDESLEY et H. WHITING : Operational timing. *Journal of Human Movement Studies*, 1975.
- J. Van der KAMP, F. RIVAS, H. VAN DOORN et G. SAVELSBERGH : Ventral and dorsal system contributions to visual anticipation in fast ball sports. *International Journal of Sport Psychology*, 39(2):100, 2008.
- J. H. P. van der MEULEN, R. H. J. M. GOOSKENS, J. J. Denier van der GON, C. C. A. M. GIELEN et K. WILHELM : Mechanisms Underlying Accuracy in Fast Goal-Directed Arm Movements in Man. *Journal of Motor Behavior*, 22(1):67–84, mars 1990. ISSN 0022-2895, 1940-1027. URL <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/00222895.1990.10735502>.

- A. J. K. van SOEST et P. J. BEEK : Similar findings, different interpretations : A response to the commentary by Bootsma et al. (2010). *Journal of Experimental Psychology : Human Perception and Performance*, 36(4):1064–1066, 2010. ISSN 1939-1277, 0096-1523. URL <http://doi.apa.org/getdoi.cfm?doi=10.1037/a0020059>.
- P. VETTER et D. M. WOLPERT : Context estimation for sensorimotor control. *Journal of Neurophysiology*, 84(2):1026–1034, 2000.
- N. VIGNAIS, B. BIDEAU, C. CRAIG, S. BRAULT, F. MULTON et R. KULPA : Virtual environments for sport analysis : perception-action coupling in handball goalkeeping. *International Journal of Virtual Reality*, 8(4), 2009.
- N. VIGNAIS, R. KULPA, S. BRAULT, D. PRESSE et B. BIDEAU : Which technology to investigate visual perception in sport : Video vs. virtual reality. *Human movement science*, 39:12–26, 2015.
- N. VIGNAIS, R. KULPA, C. CRAIG et B. BIDEAU : Virtual thrower versus real goalkeeper : the influence of different visual conditions on performance. *Presence : Teleoperators and Virtual Environments*, 19(4):281–290, 2010.
- P. VIVIANI, P. CAMPADELLI et P. MOUNOUD : Visuo-manual pursuit tracking of human two-dimensional movements. *Journal of Experimental Psychology : Human Perception and Performance*, 13(1):62, 1987.
- M. W. VOSS, A. F. KRAMER, C. BASAK, R. S. PRAKASH et B. ROBERTS : Are expert athletes ‘expert’ in the cognitive laboratory? A meta-analytic review of cognition and sport expertise. *Applied Cognitive Psychology*, 24(6):812–826, sept. 2010. ISSN 08884080. URL <http://doi.wiley.com/10.1002/acp.1588>.
- C. J. WALTERS et C. S. HOLLING : Large-scale management experiments and learning by doing. *Ecology*, 71(6):2060–2068, 1990.
- P. WARD, A. WILLIAMS et D. LORAN : The development of visual function in elite and sub-elite soccer players. *International Journal of Sports Vision*, 6:1–11, 2000.
- P. WARD et A. M. WILLIAMS : Perceptual and Cognitive Skill Development in Soccer : The Multidimensional Nature of Expert Performance. *Journal of Sport and Exercise Psychology*, 25(1):93–111, mars 2003. ISSN 0895-2779, 1543-2904. URL <http://journals.humankinetics.com/doi/10.1123/jsep.25.1.93>.

- P. WARD, A. M. WILLIAMS et S. J. BENNETT : Visual search and biological motion perception in tennis. *Research Quarterly for Exercise and Sport*, 73(1):107–112, 2002.
- W. H. WARREN : Chapter 14 Action Modes and Laws of Control for the Visual Guidance Of Action. In O. G. M. a. K. ROTH, éd. : *Advances in Psychology*, vol. 50 de *Complex Movement Behaviour 'The' Motor-action controversy*, p. 339–379. North-Holland, 1988. URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0166411508625649>.
- W. H. WARREN : The dynamics of perception and action. *Psychological review*, 113(2):358, 2006.
- S. N. J. WATAMANIUK et S. J. HEINEN : Perceptual and oculomotor evidence of limitations on processing accelerating motion. *Journal of Vision*, 3(11):5, nov. 2003. ISSN 1534-7362. URL <http://jov.arvojournals.org/article.aspx?doi=10.1167/3.11.5>.
- A. T. WELFORD : Fundamentals of skill. 1968.
- P. WERKHOVEN, H. P. SNIPPE et T. ALEXANDER : Visual processing of optic acceleration. *Vision Research*, 32(12):2313–2329, déc. 1992. ISSN 0042-6989. URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/004269899290095Z>.
- H. T. A. WHITING, E. B. GILL et J. M. STEPHENSON : Critical Time Intervals for Taking in Flight Information in a Ball-Catching Task. *Ergonomics*, 13(2):265–272, mars 1970. ISSN 0014-0139, 1366-5847. URL <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/00140137008931141>.
- H. WHITING et R. SHARP : Visual Occlusion Factors in a Discrete Ball-Catching Task. *Journal of Motor Behavior*, 6(1):11–16, mars 1974. ISSN 0022-2895, 1940-1027. URL <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/00222895.1974.10734974>.
- K. WILHELMINE : Curtain rod, juin 13 1922. US Patent 1,419,389.
- A. WILLIAMS, K. DAVIDS et J. WILLIAMS : Perception visuelle et l'action en sport sports science. *Sports Studies psychology*, 1999.
- A. M. WILLIAMS : Perceptual skill in soccer : Implications for talent identification and development. *Journal of sports sciences*, 18(9):737–750, 2000.
- A. M. WILLIAMS, K. DAVIDS, L. BURWITZ et J. G. WILLIAMS : Visual Search Strategies in Experienced and Inexperienced Soccer Players. *Research Quarterly for Exercise and Sport*,

- 65(2):127–135, juin 1994. ISSN 0270-1367, 2168-3824. URL <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/02701367.1994.10607607>.
- A. M. WILLIAMS et K. A. ERICSSON : Perceptual-cognitive expertise in sport : Some considerations when applying the expert performance approach. *Human movement science*, 24(3):283–307, 2005.
- A. M. WILLIAMS et P. R. FORD : Expertise and expert performance in sport. *International Review of Sport and Exercise Psychology*, 1(1):4–18, mars 2008. ISSN 1750-984X, 1750-9858. URL <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/17509840701836867>.
- A. M. WILLIAMS, P. R. FORD, D. W. ECCLES et P. WARD : Perceptual-cognitive expertise in sport and its acquisition : Implications for applied cognitive psychology. *Applied Cognitive Psychology*, 25(3):432–442, mai 2011. ISSN 08884080. URL <http://doi.wiley.com/10.1002/acp.1710>.
- A. M. WILLIAMS, R. HUYS, R. CAÑAL-BRULAND et N. HAGEMANN : The dynamical information underpinning anticipation skill. *Human Movement Science*, 28(3):362–370, 2009.
- A. M. WILLIAMS et P. WARD : Anticipation and decision making : Exploring new horizons. 2007.
- A. M. WILLIAMS, P. WARD, J. M. KNOWLES et N. J. SMEETON : Anticipation skill in a real-world task : Measurement, training, and transfer in tennis. *Journal of Experimental Psychology : Applied*, 8(4):259–270, 2002. ISSN 1076-898X. URL <http://doi.apa.org/getdoi.cfm?doi=10.1037/1076-898X.8.4.259>.
- A. M. WILLIAMS et A. GRANT : Training perceptual skill in sport. *International Journal of Sport Psychology*, 1999.
- M. WILLIAMS, K. DAVIDS, L. BURWITZ et J. WILLIAMS : Cognitive knowledge and soccer performance. *Perceptual and Motor skills*, 76(2):579–593, 1993. URL <http://pms.sagepub.com/content/76/2/579.short>.
- A. D. WILSON, D. R. COLLINS et G. P. BINGHAM : Perceptual coupling in rhythmic movement coordination : stable perception leads to stable action. *Experimental Brain Research*, 164(4):517–528, août 2005. ISSN 0014-4819, 1432-1106. URL <http://link.springer.com/10.1007/s00221-005-2272-3>.

- R. H. WIMMERS, P. J. BEEK et P. C. van WIERINGEN : Phase transitions in rhythmic tracking movements : A case of unilateral coupling. *Human Movement Science*, 11(1-2):217–226, fév. 1992. ISSN 01679457. URL <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/016794579290062G>.
- R. WITHAGEN et A. CHEMERO : Naturalizing perception : Developing the gibsonian approach to perception along evolutionary lines. *Theory & Psychology*, 19(3):363–389, 2009.
- D. M. WOLPERT et J. FLANAGAN : Motor prediction. *Current Biology*, 11(18):R729–R732, sept. 2001. ISSN 09609822. URL <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0960982201004328>.
- D. M. WOLPERT et Z. GHAMRANI : Computational principles of movement neuroscience. *Nature Neuroscience*, 3(S11):1212–1217, nov. 2000. ISSN 1097-6256, 1546-1726. URL http://www.nature.com/articles/nn1100_1212.
- D. M. WOLPERT et M. KAWATO : Multiple paired forward and inverse models for motor control. *Neural networks*, 11(7-8):1317–1329, 1998.
- W. G. WRIGHT : Using virtual reality to augment perception, enhance sensorimotor adaptation, and change our minds. *Frontiers in systems neuroscience*, 8:56, 2014.
- N. YAKIMOFF, S. MATEEFF, W. H. EHRENSTEIN et J. HOHNSBEIN : Motion Extrapolation Performance : A Linear Model Approach. *Human Factors : The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, 35(3):501–510, sept. 1993. ISSN 0018-7208, 1547-8181. URL <http://journals.sagepub.com/doi/10.1177/001872089303500307>.
- K. YARROW, P. BROWN et J. W. KRAKAUER : Inside the brain of an elite athlete : the neural processes that support high achievement in sports. *Nature Reviews Neuroscience*, 10(8):585, 2009.
- F. T. ZAAL et R. J. BOOTSMA : Virtual reality as a tool for the study of perception-action : The case of running to catch fly balls. *Presence : Teleoperators and Virtual Environments*, 20(1):93–103, 2011.
- M. ZAGO, G. BOSCO, V. MAFFEI, M. IOSA, Y. P. IVANENKO et F. LACQUANITI : Internal Models of Target Motion : Expected Dynamics Overrides Measured Kinematics in Timing Manual Interceptions. *Journal of Neurophysiology*, 91(4):1620–1634, avr. 2004. ISSN 0022-3077, 1522-1598. URL <http://www.physiology.org/doi/10.1152/jn.00862.2003>.

- M. ZAGO et F. LACQUANITI : Cognitive, perceptual and action-oriented representations of falling objects. *Neuropsychologia*, 43(2):178–188, 2005a.
- M. ZAGO et F. LACQUANITI : Visual perception and interception of falling objects : a review of evidence for an internal model of gravity. *Journal of Neural Engineering*, 2(3):S198–S208, sept. 2005b. ISSN 1741-2560, 1741-2552. URL <http://stacks.iop.org/1741-2552/2/i=3/a=S04?key=crossref.ce986aef845c77f56226fa4053399cce>.
- M. ZAGO, J. MCINTYRE, P. SENOT et F. LACQUANITI : Internal models and prediction of visual gravitational motion. *Vision Research*, 48(14):1532–1538, juin 2008. ISSN 00426989. URL <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0042698908001946>.
- M. ZAGO, J. MCINTYRE, P. SENOT et F. LACQUANITI : Visuo-motor coordination and internal models for object interception. *Experimental Brain Research*, 192(4):571–604, jan. 2009. ISSN 0014-4819, 1432-1106. URL <http://link.springer.com/article/10.1007/s00221-008-1691-3>.
- P. G. ZANONE : Tracking With and Without Target in 6- to 15-Year-Old Boys. *Journal of Motor Behavior*, 22(2):225–249, juin 1990. ISSN 0022-2895, 1940-1027. URL <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/00222895.1990.10735512>.
- H. ZHAO et W. H. WARREN : On-line and model-based approaches to the visual control of action. *Vision Research*, 110:190–202, mai 2015. ISSN 00426989. URL <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0042698914002417>.

Annexes

Annexe A

Fiche de présentation, renseignement, questionnaire pour les expériences de jugement

Fiche de renseignement

Université de Caen Basse-Normandie UFR STAPS Centre de Recherche Sport et Actions et Motrices Projet de recherche Coordination visuo-motrice dans un environnement virtuel

Fiche de renseignement

Nom:

Prénom:

Adresse électronique :

Date de naissance :

Taille :

Sexe : M / F

Latéralité : Gaucher / Droitier

Quelles sont les pratiques sportives significatives que vous avez ou que avez-vous eues (indiquez la durée de cette pratique, la fréquence et le niveau atteint) :

.....

Pratiquez-vous des jeux vidéo (types de jeu, nombre d'années de pratique et fréquence) :

.....

.....

Je, soussigné, atteste participer volontairement à ces expérimentations après avoir entendu les principes et objectifs et les avoir acceptés.

Fait à

Le

Signature

Fiche des présentations des tests

Université de Caen Basse-Normandie - UFR STAPS

Centre d'Etudes Sport et Actions et Motrices

Jugement perceptif

Coordination visuo-motrice

dans un environnement 3D

Maroua MALLEK, Régis THOUVARECQ et Nicolas BENGUIGUI

Présentation des tests

Vous allez participer à deux expérimentations dans un environnement virtuel qui ont pour but de mieux comprendre les mécanismes perceptifs et de contrôle de l'action. Nous vous remercions pour votre participation et comptons sur votre plus grande concentration dans la réalisation de ces tests.

Dans la première expérimentation, vous allez voir des ballons de basket lancés vers le haut et qui rebondissent au sol. Vous devrez indiquer en pressant l'un des deux boutons du clavier si selon vous le ballon de basket a rebondi "Trop haut" ou "Trop bas" après le premier rebond par rapport à la hauteur que vous attendiez.

Nous vous demandons également de bien vouloir remplir le questionnaire et de le signer pour témoigner de votre accord pour participer à ces tests.

Questionnaires

AVANT LE TEST

Quelle est votre motivation pour réaliser ces tests ?

Très faible Faible Modérée Importante Très Importante

Quelle est votre capacité de concentration à cet instant ?

Très faible Faible Modérée Importante Très Importante

Avez-vous l'habitude de regarder des matchs de basket ? (Si oui à quelle fréquence) : _____

APRES LE TEST

Quelle a été votre motivation pour réaliser ces tests ?

Très faible Faible Modérée Importante Très Importante

Quelle a été votre capacité de concentration pendant le test ?

Très faible Faible Modérée ou
fluctuante Importante Très Importante

Comment avez-vous trouvé l'environnement de la simulation ?

Pas réaliste Peu réaliste Moyennement
réaliste réaliste Très réaliste

Est-ce que selon vous la hauteur du panier est correcte ?

Pas correcte Peu correcte Moyennement
correcte correcte Toute à fait
correcte

Est-ce que selon vous la grandeur du terrain est correcte

Pas correcte Peu correcte Moyennement
correcte correcte Toute à fait
correcte

Quelle taille donnez-vous à la joueuse dans le terrain ?

1.65m

1.70m

1.75m

1.80m

1.85m

Est-ce que vous êtes arrivé à vous repérer facilement dans l'environnement ?

Pas du tout

Un peu

Moyennement

souvent

Tout à fait

Comment le monde virtuel vous a-t-il semblé ?

Pas du tout
crédible

Peu crédible

Moyennement
crédible

crédible


Toute à fait
crédible

Quel éléments dans l'environnement virtuel vous a aidé le plus pour juger la hauteur de la balle ?

Annexe B

Fiche de présentation, renseignement, questionnaire pour les expériences de poursuite 3D



	<p align="center">Projet de recherche Perception et action au tennis : Expérimentation de Coordination visuo-motrice dans un environnement 3D <small>(Etude réalisée par : M,Mallek, R,Thouwarecq, N. Benguigui)</small></p>
---	--

Présentation des tests

L'expérimentation consiste à suivre à l'aide d'un effecteur (Polhemus) une balle qui se déplace et rebondit sur les parois dans une boîte de volume ($4 \times 4 \times 2.86 \text{ m} = 45.76 \text{ m}^3$).

Durant l'essai, un feed-back couleur vous informe sur la proximité entre l'effecteur et la balle : la couleur de l'effecteur sera rouge si vous êtes proche de la balle et bleu si vous êtes loin). Un deuxième feedback s'affiche à la fin de l'essai et vous indique la distance moyenne entre l'effecteur et la balle .

Nous vous demandons également de bien vouloir remplir la fiche de renseignement et le questionnaire ci-dessous .

Fiche de renseignement

Nom: _____ Prénom: _____

Pratiquez-vous des jeux vidéo (types de jeu, nombre d'années de pratique et fréquence) : _____

Je, soussigné, atteste participer volontairement à ces expérimentations après avoir entendu les principes et objectifs et les avoir acceptés.

Fait à Paris

Le 27/11/2014

Signature

AVANT LE TEST

Quelle est votre motivation pour réaliser ces tests ?

Très faible Faible Modérée Importante Très Importante

Quelle est votre capacité de concentration à cet instant ?

Très faible Faible Modérée Importante Très Importante

APRES LE TEST

Quelle a été votre motivation pour réaliser ces tests ?

Très faible Faible Modérée Importante Très Importante

Quelle a été votre capacité de concentration pendant le test ?

Très faible Faible Modérée ou
fluctuante Importante Très Importante

Est-ce que vous êtes arrivé à vous repérer facilement dans l'environnement ?

Pas du tout Un peu Moyennement souvent Tout à fait

Avez-vous bien perçu la profondeur ?

Je ne l'ai Pas du Je l'ai un peu Je l'ai Je l'ai perçu Je l'ai très bien
tout perçu perçu moyennement perçu perçu
Perçu

La profondeur vous a-t-elle gêné ?

Pas du tout Un peu Moyennement souvent Tout à fait

Table des figures

1	Schéma représentatif du paradigme expérimental de (Whiting et Sharp, 1974). La trajectoire de la balle a été découpée en plusieurs périodes : tout d’abord la balle est projetée dans une salle non éclairée (Dark Period : DP), puis la balle devient visible (Visible Period : VP), puis la balle est occultée (Occluded Period : OP, Latency Period : LP) et enfin la balle est interceptée.	19
2	Évolution de la direction du regard et de la balle à travers le temps. L’écart entre la direction du regard et la direction de la balle est minimal au moment du lancer et du rebond de la balle. Une saccade est observée juste avant le rebond, suivie d’une fixation du regard. (Land et McLeod, 2000)	20
3	Présentation de la variable de précision de poursuite à travers les essais avec une balle de tennis (courbe du haut), ou avec une balle élastique (courbe du bas). Durant les trois premiers essais, la précision s’améliore rapidement (Hayhoe <i>et al.</i> , 2005).	22
4	Présentation du dispositif expérimental utilisé dans l’étude de (Diaz <i>et al.</i> , 2013). À l’aide d’un casque de réalité virtuelle, les participants visualisent un terrain virtuel de squash. Dans la scène virtuelle, les balles lancées doivent être frappées avec une raquette équipée d’un système de capture de mouvement et représentées visuellement dans le monde virtuel. (b) illustration des différentes trajectoires possibles de la balle pour une seule session. Trois trajectoires principales sont possibles dans la période pré-rebond, mais différentes dans la composante verticale de la vitesse de la balle. Pour chacune de ces trajectoires de pré-rebond, il peut y avoir deux trajectoires post-rebond possibles en fonction du niveau d’élasticité, représentées par des lignes pleines et en pointillés.	23

5	Évolution de la trajectoire de la balle (ligne verte), ainsi que de la trajectoire du regard (ligne bleue en pointillés) à travers le temps. Les participants ajustent avec précision leur regard pour prédire la trajectoire de la balle post-rebond. Une saccade est faite juste avant le rebond, suivie d'une fixation du regard à travers le rebond. (Diaz <i>et al.</i> , 2013)	23
6	A droite : une représentation du dispositif expérimental de la mission spatiale de l'étude de (McIntyre <i>et al.</i> , 2001). A gauche : résultats des réponses motrices anticipées du biceps. Le trait noir correspond à la réponse motrice dans la condition Terre ; Le trait rouge correspond à la réponse motrice dans l'espace ; La réponse motrice dans la condition espace se produit 30 ms plus tôt que celle produite sur Terre, d'après (McIntyre <i>et al.</i> , 2001).	25
7	Présentation du protocole utilisé de l'étude de (Zago <i>et al.</i> , 2004; Zago et Lacquaniti, 2005a,b). a) Le participant réussit l'interception de la balle réelle masquée par la balle virtuelle en chute libre. b) Dans le cas de l'accélération nulle (0g), l'interception de la balle par le participant se fait trop tôt (c) la balle virtuelle part d'une boîte noire, l'utilisateur doit l'intercepter lorsqu'elle arrive sur la boîte bleue, l'interception se fait à l'aide d'un presse bouton. Le participant intercepte tardivement la balle virtuelle dans la condition 1g du fait de l'effet de l'accélération.	25
8	Présentation des résultats du TTC des participants pour les deux conditions (0g en bleu ; 1g en rouge) avec les différentes vitesses initiales. La synchronisation des réponses est meilleure en condition 1g, d'après (Zago <i>et al.</i> , 2004).	26
9	Présentation des résultats du TTC des participants pour les deux conditions (0g en bleu ; 1g en rouge) avec les différentes vitesses initiales dans la condition sans balle réelle. Un meilleur timing des réponses est observé dans la condition 0g, d'après (Zago <i>et al.</i> , 2004).	26
10	Illustration de l'expérience de (Senot <i>et al.</i> , 2005). La balle est soumise aux conditions de gravité 1g, 0g ou -1g, le participant regarde la balle qui doit chuter du plafond ou qui doit monter du sol en regardant vers le haut ou vers le bas.	28

- 11 Scène expérimentale utilisée par (Bosco *et al.*, 2012). La scène simule une situation de jeu de baseball. La balle suit une trajectoire parabolique (ligne blanche en pointillée). Les trajectoires de balle pouvaient soit être visibles soit être occultées pendant un intervalle de temps variable. Dans différents essais, la trajectoire de balle pouvait être perturbée durant la phase descendante avec trois différentes gravités possibles (0g, 1g ou 2g). Les participants devaient intercepter la balle en déplaçant le joueur à l'aide de la souris d'un ordinateur (les flèches de couleur jaune font référence aux directions possibles du mouvement) et devaient indiquer le moment d'interception avec un presse-bouton. Le cercle semi-transparent autour de la main du joueur externe délimite la surface valide d'interception de la cible. 30
- 12 Moyenne de la vitesse de l'effecteur lors de l'appui sur le presse-bouton en fonction des différentes conditions de gravités. Les rectangles noir, blanc et gris représentent respectivement les conditions 0g, 1g et 2g. D'après (Bosco *et al.*, 2012). 30
- 13 Évolution type de la vitesse de l'effecteur pour un participant dans un essai en condition visible en fonction du temps. Les vitesses positives et négatives correspondent respectivement à des déplacements vers la droite ou vers la gauche. La ligne verticale en pointillé indique le moment de l'appui sur bouton. Le premier point en gris "onset" correspond au premier moment où le déplacement de la souris dépasse 0.4 cm/s. Le point "offset" correspond au dernier moment où la vitesse de la souris est inférieure à 0.4 cm/s. Tiré de (Bosco *et al.*, 2012). 31
- 14 La cible peut se déplacer sur l'axe horizontal ou vertical, le participant doit indiquer la position de la balle occultée après un certain délai. Le cercle en pointillés représente l'emplacement indiqué par le participant. Le cercle en noir représente la position de la cible. (B) Évolution de l'erreur de déplacement du participant selon différents délais d'occultation (0 ms; 150 ms; 300 ms; 450 ms; 600 ms). L'axe M représente l'erreur dans la direction horizontale de la cible, une valeur positive indique un déplacement en avant dans la direction du mouvement de la cible et une valeur négative pour un déplacement en arrière. L'axe O représente l'erreur sur l'axe vertical, une valeur positive indique un déplacement vers le haut, et une valeur négative indique un déplacement vers le bas. Tiré de (De Sá Teixeira *et al.*, 2013). 32

15	Présentation de la configuration expérimentale de (Russo <i>et al.</i> , 2017). A : les participants se tenaient à une distance de 1 m de l'écran frontal en regardant un environnement virtuel stéréoscopique à l'aide des lunettes de réalité virtuelle. Ils tenaient une "raquette" dans leur main droite équipée de marqueurs rétro-réfléchissants attachés à la raquette pour capturer le mouvement de la main. B : représentation de l'environnement virtuel qui se compose d'une pièce avec un écran situé à 6 m en face du participant et de quelques objets de tailles familières, tels qu'un bureau et une chaise. Les balles étaient projetées à partir d'une position fixe sur l'écran.	34
16	Représentation graphique des différentes trajectoires de la cible, modifiées par la gravité. Les trajectoires de la cible peuvent avoir sept valeurs de gravité différentes variant de [0.7g, - 1.3g], ainsi que deux vitesses initiales verticales (3.7 ou 5.2 m/s) et deux vitesses horizontales (6 ou 8.33 m/s). Selon (Joerges <i>et al.</i> , 2018).	37
17	Profils de déplacement des mouvements à travers le temps pour les joueurs de tennis de table de niveau intermédiaire (courbes du haut) et experts (courbes du bas) effectuant un coup droit afin d'intercepter les balles provenant d'une machine de projection. Les données indiquent un niveau élevé de reproductibilité dans les patterns de mouvement des deux groupes. Les intermédiaires montrent un décalage temporel et spatial du point d'initiation (IP : initiation point) jusqu'au point de contact de la balle (BB) - contrairement aux experts qui ont un décalage de leur trajectoire uniquement sur le plan temporel. Les données des novices, qui ne sont pas reproduites ici, ont montré une faible cohérence de nature spatiale ou temporelle (Tyldesley et Whiting, 1975).	46
18	Le cycle du couplage perception-action.	48
19	Représentation schématique de la configuration expérimentale : à partir d'un rail fixé au plafond (6,0 m au-dessus du sol) d'une grande salle d'expérience, 10 balles ont été suspendues en utilisant une ligne de pêche (4,95 m de long) (Peper <i>et al.</i> , 1994).	51
20	Représentation des conditions expérimentales (Montagne <i>et al.</i> , 1999).	52

21	Trajectoires normalisées de la main au cours du temps lors d'une tache d'interception dans les trois conditions de point de départ de la balle. (b) L'évolution de la différence entre le comportement requis et le comportement courant pour un essai selon les différentes conditions. Les courbes représentent la différence entre la distance horizontale et la distance établie dans le cas où la balle maintient sa vitesse constante jusqu'à l'axe d'interception. L'écart entre les deux distances s'annule avant 300 ms du temps de contact (Montagne <i>et al.</i> , 1999).	53
22	Évolution de $\tau(\varphi)$ (TTC estimé) en fonction du TTC réel. Les trois courbes paraboliques représentent les $\tau(\varphi)$ selon les différentes hauteurs de balles (0.78 s, 1.01 s, 1.21 s respectivement pour 3 m, 5 m, 7.2 m de hauteur). La ligne droite représente la fonction linéaire telle que $\tau(\varphi)$ correspond au <i>TTC</i> réel. Plus <i>TTC</i> réel tend vers 0, plus le $\tau(\varphi)$ est proche de <i>TTC</i> , ainsi $\tau(\varphi)$ est quasiment équivalent dès que <i>TTC</i> réel < 300 ms (Lee <i>et al.</i> , 1983).	56
23	Schéma de l'expérience réalisée par (Sarpeshkar <i>et al.</i> , 2017). Le batteur devait intercepter la balle projetée par une machine. Une caméra à haute vitesse d'acquisition enregistrerait les mouvements du batteur. Au moment où la balle était projetée, une LED était allumée. La balle pouvait rebondir à différents endroits (full, good, short).	59
24	Le dispositif expérimental consiste à intercepter un objet en mouvement qui est simulé par l'allumage successif de LED. Le participant déplace horizontalement un chariot sur rails. Tiré de (Le Runigo <i>et al.</i> , 2005).	61
25	Évolution de l'accélération du chariot et des valeurs p de l'ANOVA dans les différentes conditions de vitesse (vitesse constante vs. accélération vs. décélération) en fonction de la position, pour les non-experts (en haut) et pour les experts (en bas). Les résultats montrent un délai visuo-moteur plus court chez les experts (177 ms) que les non-experts (208 ms) (Le Runigo <i>et al.</i> , 2005).	62
26	Le dispositif expérimental consiste à simuler un environnement d'interception dans un environnement virtuel (Le Runigo <i>et al.</i> , 2010). Le participant déplace horizontalement un chariot sur rails. À gauche vue 3D, à droite vue latérale 2D du dispositif.	63

27	En haut, évolution de l'accélération avant interception dans les cinq trajectoires (Gg, Gp, M, Dp, Dg; avec : G = Gauche, D = Droite, g = grande amplitude, p = petite amplitude). En bas, évolution de la valeur P de l'ANOVA. Lorsque T=0s, la balle est arrivée sur l'axe horizontal. À T=0.4s, la balle dévie. Le début de la première adaptation est détecté lorsque $P < 0.05$. Les résultats montrent un délai visuo-moteur plus court chez les experts (216 ms) que les non-experts (240 ms) (Le Runigo <i>et al.</i> , 2010).	64
28	Dispositif expérimental proposé par (Koerth, 1922), repris par (Davol <i>et al.</i> , 1965) ainsi que (Dunham <i>et al.</i> , 1985). Le participant devait poursuivre la cible (b) et l'intercepter à l'aide d'un stylet (i). La cible peut avoir plusieurs vitesses. Le commutateur (c) incrémente à l'aide d'un compteur (f) si le contact entre le stylet du participant et la cible est maintenu au bout de 100 ms.	68
29	Présentation du dispositif expérimental de (Mounoud <i>et al.</i> , 1985). Le participant contrôlait la position (x) du marqueur lumineux sur l'écran (S) en appliquant des rotations de son avant-bras. Un potentiomètre (P) mesurait les angles de la rotation de l'axe de l'avant-bras. Une source lumineuse (L) est réfléchiée par un miroir d'un galvanomètre (G) et projetait un second marqueur (T) sur l'écran. Les angles de l'avant-bras et du miroir étaient enregistrés pour mesurer la précision de la tâche.	69
30	Exemples typiques de trajectoires de poursuite entre deux sujets (un sujet par ligne). Le sujet présenté sur la 1ère ligne est le moins précis et le plus variable, tandis que celui de la 2ème ligne est le plus cohérent et précis. Dans la 1ère colonne, la ligne épaisse représente la trajectoire moyenne de l'effecteur, les deux lignes fines autour de la ligne épaisse représentent l'enveloppe de la variabilité de la trajectoire de l'effecteur. Dans la 2ème colonne, la ligne épaisse représente la trajectoire moyenne de l'effecteur, la ligne fine représente la trajectoire moyenne de la cible (Viviani <i>et al.</i> , 1987).	72
31	Présentation du dispositif expérimental de synchronisation du mouvement du bras (Buekers <i>et al.</i> , 2000). Le participant devait suivre à l'aide d'un levier la lumière qui peut se déplacer sur un rail de 640 LED. Les mouvements du bras doivent être exécutés de façon synchrone avec le mouvement de lumière qui traverse de gauche à droite et inversement le rail.	72

32	Présentation de l'environnement virtuel conçu pour la tâche de jugement de la trajectoire post-rebond. Les panneaux de basket et le bonhomme ont été conçus dans la scène pour donner aux participants un référentiel de taille dans l'environnement.	88
33	Représentation des trajectoires du ballon avec 20 trajectoires dans la condition de Gamme haute, avec la modification de la gravité (10 valeurs de gravité possibles : de G1 à G10) et la modification du coefficient de rebond (10 valeurs possibles : de CR1 à CR10) après le premier rebond pour une vitesse horizontale (1 m/s). Ces trajectoires sont dupliquées également avec une vitesse de 2 m/s pour construire le bloc de 40 essais.	89
34	Moyenne des réponses "trop haut" des experts (en bleu) / non-experts (en rouge) en fonction de la hauteur de ballon post-rebond pour les deux conditions (2.76 : Gamme basse, 3.24 : Gamme haute) dans le cas où les trajectoires sont modifiées en CR. Les courbes sont ajustées sur une sigmoïde, le biais (PSE : point of subjective equality) correspondant à la hauteur à laquelle le participant obtenait un score de 50% dans la reconnaissance de l'amplitude de la trajectoire) et JND (just noticeable difference) correspondant à la valeur de hauteur pour laquelle le participant obtenait un score de 75% dans la reconnaissance de l'amplitude de la trajectoire.	96
35	Moyennes des temps de réponses pour les deux groupes dans les deux conditions de Gamme (basse et haute) en fonction des différentes hauteurs de la trajectoire post-rebond du ballon (de 1 à 10 : peut correspondre de 2.16 à 4).	97
36	Deux sujets représentatifs des groupes experts et non-experts. En rouge les moyennes des temps de réponse (s) en fonction de la hauteur du ballon (m). Les courbes sont affichées pour chaque condition de Gamme (basse ou haute) et pour chaque condition de modification de cinématique (CR ou G). Une courbe polynomiale (en bleu) a été ajustée, avec a le coefficient de courbure et R^2 le coefficient d'ajustement. Le sommet de la courbe polynomiale est représenté par un cercle vert et correspond à la hauteur du ballon pour lequel le temps de réponse est maximal.	98
37	Triples interactions des scores Z de Fisher ² entre les facteurs expertise, condition (1, 2) et prédicteur (CR-G).	99
38	Représentation théorique des trajectoires du ballon de basket suite aux modifications du coefficient de rebond.	104

39	Dispositif mécanique de lancement du ballon de basket.	104
40	Présentation de la scène avec un exemple de trajectoire du ballon de basket. . .	105
41	Interactions entre les facteurs expertise et condition de Gamme (basse et haute). 109	
42	Illustration du dispositif expérimental avec l'écran semi circulaire et le vidéo-projecteur. Le participant était assis derrière la table, sur laquelle reposait la tablette graphique. Il avait pour consigne de suivre le ballon affiché avec un stylet qu'il déplaçait sur la tablette. Le ballon était lancé au milieu de la scène alors qu'il était tenu par un joueur virtuel fixe. La taille du ballon, celle du terrain, du joueur virtuel et la hauteur des paniers étaient cohérentes entre elles et permettaient de mieux se repérer dans la scène afin de renforcer l'immersion avec les nouvelles dimensions.	113
43	Représentation graphique des différentes trajectoires de ballon en faisant varier le CR et la Gravité, avec TN : Trajectoire Normale; GH : trajectoire avec Gravité Haute; CRH : trajectoire avec Coefficient de Rebond Haut; GB : trajectoire avec Gravité Basse; CRB : trajectoire avec Coefficient de Rebond Basse.	114
44	Affichage de l'ensemble des essais réalisés par tous les participants sur l'intervalle [-1840, 900] ms, où t=0 ms correspond au moment du rebond, selon les différentes conditions de la cinématique (GB, CRB, TN, GH, CRH). La ligne rouge, bleue foncée et verte foncée représentent respectivement, la trajectoire de la balle, la trajectoire médiane des non-sportifs, la trajectoire médiane des experts. Le zéro indique le moment du rebond.	118
45	Affichage de l'ensemble des essais réalisés de tous les participants dans la période avant rebond par portions de 200 ms (sauf pour la première portion était de 240 ms). La ligne rouge, bleue foncée et verte foncée représentent respectivement, la trajectoire de la balle, la trajectoire médiane des non-sportifs, la trajectoire médiane des experts.	120
46	EC avant rebond en m des experts et des non-experts en fonction des neuf Portions Temporelles (de 1840 ms à 0 où t=0 ms correspond au moment du rebond et avec 1 : portion de -1840 à -1600 ms, 2 : portion de -1600 à -1400 ms, 3 : portion de -1400 à -1200 ms, 4 : portion de -1200 à -1000 ms, 5 : portion de -1001 à -800 ms, 6 : portion de -800 à -600 ms, 7 : portion de -600 à -400 ms, 8 : portion de -400 à -200 ms, 9 : portion de -200 ms à 0).	121

47 EC post-rebond en m en fonction des Cinématiques (GB (1); CRB (2); TN (3); GH (4); CRH (5)). 122

48 EC post-rebond en m des experts et des non-experts en fonction des six Portions Temporelles (de 0 à 900 ms avec 1 : portion de 0 à 150 ms, 2 : portion de 150 à 300 ms, 3 : portion de 300 à 450 ms, 4 : portion de 450 à 600 ms, 5 : portion de 600 à 750 ms, 6 : portion de 750 à 900 ms). 123

49 Affichage de l'ensemble des essais réalisés de tous les participants par portions de 150 ms. De haut en bas, changement de la cinématique (GB, CRB, TN, GH, CRH). De gauche à droite, changement de l'intervalle des portions. Les lignes rouge, bleue foncée et verte foncée représentent respectivement, la trajectoire de la balle, la trajectoire médiane des non-sportifs, la trajectoire médiane des experts. Le zéro indique le moment du rebond. A noter que les deux portions avant le rebond sont ajoutées avant pour donner une représentation de ce qui se passe juste avant le rebond. 124

50 EC post-rebond en m de tous les participants des cinq essais en fonction des six Portions Temporelles (de 0 à 900 ms avec 1 : portion de 0 à 150 ms, 2 : portion de 150 à 300 ms, 3 : portion de 300 à 450 ms, 4 : portion de 450 à 600 ms, 5 : portion de 600 à 750 ms, 6 : portion de 750 à 900 ms) et des cinq Cinématiques (GB, CRB, TN, GH, CRH). 125

51 Illustration of various indicators to identify rebound perturbation period and free tracking period. $\alpha = \arccos\left(\frac{V_{mt}}{\|V_{mt}\|} \cdot \frac{V_e}{\|V_e\|}\right)$ with V_{mt} and V_e corresponding respectively to the Vector moving Target and to the Vector Effector. The Time of divergence (Tdivergence) was determined when $\alpha \geq 25^\circ$. Whereas the time of convergence (Tconvergence) was determined when $\alpha < 25^\circ$. rebound perturbation = [Tdivergence - Tconvergence]. 137

52 Distance to target according to tracking period and acceleration. 140

53 Number of gap reductions according to expertise and tracking period. 141

54 Distance to target as a function of predicted distance to target on the basis of multiple regression analysis with duration of number of gap reductions, rebound perturbation period, initiation time, and time-to-peak-velocity as predictors. The equation of this prediction can be written as follows : Predicted distance to target = [-0.19 × number of gap reductions] + [0.002 × rebound perturbation period] + [1.39 × initiation time] + [-0.57 × time-to-peak-velocity] + [0.74]. . . 142

55 Démonstration de la tâche de poursuite visuo-manuelle 2D. 148

56	Exemple de la trajectoire cible-effecteur dans un essai. Trajectoire de la cible en mouvement (en gris), trajectoire de l'effecteur dans la période sans perturbation (en vert), trajectoire de l'effecteur dans la période post-déviaton (en rose) et trajectoire effecteur dans la période aux alentours du rebond rouge et période ignorée (en bleu).	152
57	Illustration des différents indicateurs pour identifier la période post-déviaton. Cette dernière est délimitée par un temps de divergence et un temps de convergence. Le temps de divergence correspondait au temps de déviaton. Le temps de convergence a été déterminé lorsque α était inférieur au seuil α et que la distance était inférieure à la distance seuil (d).	153
58	Exemple de la trajectoire cible-effecteur dans un essai avec des indicateurs de la qualité de poursuite. La coloration de l'effecteur indique la distance balle-effecteur. Les ronds indiquent l'angle formé entre le vecteur vitesse de la balle et le vecteur vitesse de l'effecteur.	154
59	Distance à la cible selon l'interaction Expertise \times Période de poursuite.	156
60	Nombre de Réduction d'écart selon l'interaction Expertise \times la période de poursuite. L'interaction montre une différence significative entre le groupe des non-experts vs. experts et super-experts dans la période de poursuite aux alentours du rebond.	157
61	Temps de réaction et temps de première interception en fonction de l'Expertise.	158
62	Distance à la cible en fonction de la Distance à la cible prédite basée sur une analyse de régression multiple. L'équation permettant de prédire la distance à la cible s'écrit sous la forme suivante : Distance à la cible prédite = $(3.89 \times \text{délai visuo-moteur}) + (-0.134 \times \text{Nombre de Réduction d'écart}) + [1.45]$	160
63	Démonstration de la tâche de poursuite visuo-manuelle 3D sur l'écran incurvé. Le participant était debout et avait reçu comme consigne de suivre une cible dans le cube à l'aide du capteur électromagnétique.	166
64	Exemple de la trajectoire cible-effecteur dans un essai dans la boîte de poursuite. Trajectoire de la cible en mouvement en gris, trajectoire de l'effecteur dans la période sans perturbation en vert, trajectoire de l'effecteur dans la période aux alentours du rebond rouge. Le mini-cube représente la zone qui n'a pas été affectée par le rebond. Il a été utilisé pour estimer le seuil de distance et de l' α	168

65	Exemple de la trajectoire cible-effecteur dans un essai 3D avec des indicateurs de la qualité de poursuite. La coloration de l'effecteur indique la distance balle-effecteur. Les ronds indiquent l'angle formé entre le vecteur vitesse de la balle et le vecteur vitesse de l'effecteur.	169
66	Distance à la cible selon l'interaction Période de poursuite × Vitesse.	171
67	Distance à la cible sur l'axe Y selon l'interaction Période de poursuite × Expertise.172	172
68	Distance à la cible sur l'axe Z selon l'interaction Période de poursuite × Vitesse.173	173
69	Nombre de réduction d'écart sur l'axe X selon l'interaction Période de poursuite × Vitesse.	174
70	Nombre de réduction d'écart sur l'axe Y selon l'interaction Période de poursuite × Vitesse.	175
71	Nombre de réduction d'écart sur l'axe Z selon la triple interaction Expertise × Période de poursuite × Vitesse.	176

Liste des tableaux

1	Caractéristiques des 24 trajectoires modifiées. Chaque bloc est constitué de 20 trajectoires (soit de 1 à 20 ou de 5 à 24) dupliquées avec deux vitesses horizontales (1 m/s et 2 m/s).	90
2	Moyennes et Ecart-type des R^2 , Biais et JND en fonction des Gammes et des prédicteurs CR-G pour les deux groupes de participants.	95
3	Moyennes et Ecart-type des R^2 des temps de réponses, sommet de la courbe ajusté et "a" en fonction des Gammes et des prédicteurs CR-G pour les deux groupes de participants.	97
4	Caractéristiques des 12 trajectoires du ballon de basket utilisées lors de l'expérience 2.	106
5	Moyennes et Ecart-type des Biais et JND en fonction des Gammes pour les deux groupes de participants.	108
6	Caractéristiques des trajectoires post premier rebond proposées dans l'expérience 3.	113
7	Characteristics of temporal and kinematic variables for the different groups of expertise in the initiation of movement.	139

Liste des équations

<i>Équation 1</i>	Estimation du TTC d'un objet à vitesse constante suivant une trajectoire rectiligne	16
<i>Équation 2</i>	Estimation du TTC avec le modèle interne de la gravité	24
<i>Équation 3</i>	Accélération gravitaire	35
<i>Équation 4</i>	Changement de force produit par l'acteur	49
<i>Équation 5</i>	Flux optique à partir d'une force	49
<i>Équation 6</i>	Estimation de la vitesse requise	50
<i>Équation 7</i>	Vitesse requise avec une fonction d'activation	50
<i>Équation 8</i>	Fonction d'activation sigmoïdale	50
<i>Équation 9</i>	Accélération de la main	51
<i>Équation 10</i>	Temps de pré-contact	53
<i>Équation 11</i>	Délai instantané entre la cible et l'effecteur	71
<i>Équation 12</i>	Résistance de l'air	89
<i>Équation 13</i>	Fonction performance dans les tâches sensorielles.	93

Résumé

L'objectif de ce travail était d'identifier certains des déterminants perceptivo-cognitifs et/ou perceptivo-moteurs de l'expertise dans les sports de balle dans des environnements virtuels. Des joueurs de tennis et de basket avec différents niveaux d'expertise ont été testés au cours d'une première partie expérimentale comportant deux études de jugements perceptivo-cognitifs et une étude de poursuite visuo-manuelle. Les résultats n'ont pas montré de différence liée à l'expertise dans les tâches de jugements perceptivo-cognitifs, mais seulement dans la tâche de poursuite visuo-manuelle. Ce résultat questionne sur le rôle des représentations (ou des modèles internes) dans le développement de l'expertise et met en avant l'importance des régulations perceptivo-motrices pour discriminer l'expertise. Sur la base de ces résultats et afin d'explorer davantage l'expertise dans le registre perceptivo-moteur, une seconde partie expérimentale comportant trois expérimentations a été réalisée en utilisant des tâches de poursuite visuo-manuelle. Les résultats révèlent des capacités d'adaptation et de régulation du mouvement supérieures des experts particulièrement dans les situations où les trajectoires sont peu prévisibles. Les résultats obtenus au cours de cette thèse permettent en définitive de mettre en évidence que les tâches de poursuite visuo-manuelle aussi schématiques soient-elles, sont discriminantes de l'expertise en sport de balle. Ils soulignent des perspectives de développement des environnements virtuels pour tester et entraîner les experts dans le registre perceptivo-moteur.

Mots-clés : Perception et action, expertise en sports de balle, approche écologique, approche cognitive.

Abstract

The aim of this thesis is to identify the perceptual-cognitive and perceptual-motor determinants of expertise in ball sports in virtual environments. Tennis and basketball players with different levels of expertise were tested. To this purpose, the first experimental part contained two perceptual judgment studies and a visuomotor tracking study. Results did not show any difference between experts and non-experts in perceptual judgment tasks, but only in the visuomotor tracking task. Results raise some questions about the role of representations (or internal models) in the development of expertise. Results highlight the importance of perceptual-motor regulations to discriminate expertise. In order to explore more deeply the perceptual-motor process of expertise, a second experimental part involving three experiments was performed using visuomotor tracking tasks. Results reveal higher adaptation and regulation abilities of experts, particularly in the most constraint periods of tracking. This finding highlights that the visuomotor tracking tasks can discriminate expertise in ball sports. The present thesis reveals the potential of virtual environments to test and train perceptual-motor processes of experts.

Keywords: Perception, action, expertise in ball sports, visuo motor processes, ecological approach, cognitive approach.