

Université de Montréal

Expertise sportive et entraînement perceptivo-cognitif de l'athlète

par
Thomas Romeas

École d'optométrie

Thèse présentée à la Faculté des Études Supérieures
en vue de l'obtention du grade de doctorat
en Sciences de la Vision
option Neurosciences de la vision et psychophysique

Août 2015

© Thomas Romeas, 2015

Résumé

Pour être performant au plus haut niveau, les athlètes doivent posséder une capacité perceptivo-cognitive supérieure à la moyenne. Cette faculté, reflétée sur le terrain par la vision et l'intelligence de jeu des sportifs, permet d'extraire l'information clé de la scène visuelle. La science du sport a depuis longtemps observé l'expertise perceptivo-cognitive au sein de l'environnement sportif propre aux athlètes. Récemment, des études ont rapporté que l'expertise pouvait également se refléter hors de ce contexte, lors d'activités du quotidien par exemple. De plus, les récentes théories entourant la capacité plastique du cerveau ont amené les chercheurs à développer des outils pour entraîner les capacités perceptivo-cognitives des athlètes afin de les rendre plus performants sur le terrain. Ces méthodes sont la plupart du temps contextuelles à la discipline visée. Cependant, un nouvel outil d'entraînement perceptivo-cognitif, nommé *3-Dimensional Multiple Object Tracking* (3D-MOT) et dénué de contexte sportif, a récemment vu le jour et a fait l'objet de nos recherches.

Un de nos objectifs visait à mettre en évidence l'expertise perceptivo-cognitive spécifique et non-spécifique chez des athlètes lors d'une même étude. Nous avons évalué la perception du mouvement biologique chez des joueurs de soccer et des non-athlètes dans une salle de réalité virtuelle. Les sportifs étaient systématiquement plus performants en termes d'efficacité et de temps de réaction que les novices pour discriminer la direction du mouvement biologique lors d'un exercice spécifique de soccer (tir) mais également lors d'une action issue du quotidien (marche). Ces résultats signifient que les athlètes possèdent une meilleure capacité à percevoir les mouvements biologiques humains effectués par les autres. La pratique du soccer semble donc conférer un avantage fondamental qui va au-delà des fonctions spécifiques à la pratique d'un sport.

Ces découvertes sont à mettre en parallèle avec la performance exceptionnelle des athlètes dans le traitement de scènes visuelles dynamiques et également dénuées de contexte sportif. Des joueurs de soccer ont surpassé des novices dans le test de 3D-MOT qui consiste à suivre des cibles en mouvement et stimule les capacités perceptivo-cognitives. Leur vitesse de suivi visuel ainsi que leur faculté d'apprentissage étaient supérieures. Ces résultats confirmaient des données obtenues précédemment chez des sportifs.

Le 3D-MOT est un test de poursuite attentionnelle qui stimule le traitement actif de l'information visuelle dynamique. En particulier, l'attention sélective, dynamique et soutenue ainsi que la mémoire de travail. Cet outil peut être utilisé pour entraîner les fonctions perceptivo-cognitives des athlètes. Des joueurs de soccer entraînés au 3D-MOT durant 30 sessions ont montré une amélioration de la prise de décision dans les passes de 15% sur le terrain comparés à des joueurs de groupes contrôles. Ces données démontrent pour la première fois un transfert perceptivo-cognitif du laboratoire au terrain suivant un entraînement perceptivo-cognitif non-contextuel au sport de l'athlète ciblé.

Nos recherches aident à comprendre l'expertise des athlètes par l'approche spécifique et non-spécifique et présentent également les outils d'entraînements perceptivo-cognitifs, en particulier le 3D-MOT, pour améliorer la performance dans le sport de haut-niveau.

Mots-clés : Expertise, capacité perceptivo-cognitive, athlète, 3D-MOT, mouvement biologique, entraînement cérébral, prise de décision, réalité virtuelle

Abstract

To perform at the top, athletes must possess a special perceptual-cognitive ability. This talent is the capacity to extract key information from a visual scene and is reflected by sportsmen's vision and intelligence of play. For a long time, sport science has reported perceptual-cognitive expertise inside the domain-specific sport environment of athletes. But more recently, evidence has shown that expertise could also be reflected outside of this context, in daily activities for instance. Moreover, recent theories surrounding brain plasticity have driven researchers to develop new tools to train perceptual-cognitive skills of athletes in order to increase performance on the field. Those methods are mostly contextual to the athlete's discipline. However, a new perceptual-cognitive training methodology, called 3-Dimensional Multiple Object Tracking (3D-MOT), which is deprived of sport context, has recently been developed and took a center part in our researches.

One of the main objectives was to observe athletes' specific and non-specific expertise during the same study. We evaluated biological motion perception in soccer players and non-athletes in a virtual reality environment. Sportsmen were systematically more efficient and faster compared to novices when discriminating the direction of the biological motion during a soccer specific exercise (shot) but also during a daily action (walk). The results suggest that athletes are better capable in perceiving human biological motions performed by others. Soccer activity seems to confer a fundamental advantage that goes beyond sport specific functions.

Concurrent with those discoveries, we observed the amazing ability of an athlete's performance to process dynamic and neutral visual scenes. Soccer players outperformed novices throughout the 3D-MOT test which consists in tracking moving targets and simulates perceptual-cognitive skills. Their visual tracking speed and their learning ability were superior. The results confirm previous data obtained by sport experts.

The 3D-MOT is an attentional tracking paradigm that stimulates active processing of dynamic visual information. In particular, it targets selective, dynamic and sustained attention, as well as working memory. This tool can be used to train perceptual-cognitive functions of

athletes. Soccer players trained with the 3D-MOT throughout 30 sessions have shown an increase in passing decision making (15%) on the field compared to control groups. For the first time, the results demonstrate a perceptual-cognitive transfer from the laboratory to the field following a non-contextual perceptual-cognitive training program.

Our research helps to understand athletes' expertise by using both specific and non-specific approaches and also present perceptual-cognitive training tools, in particular the 3D-MOT technique, to improve performance in sport.

Keywords: Expertise, perceptual-cognitive skills, athlete, 3D-MOT, biological motion, brain training, decision-making, virtual reality

Table des matières

Résumé.....	i
Abstract.....	iii
Table des matières.....	v
Liste des tableaux.....	vii
Liste des figures	viii
Liste des sigles	x
Liste des abréviations.....	xi
Remerciements.....	xiii
Chapitre 1 : Introduction.....	1
1. Expertise sportive.....	2
1.1 Expertise perceptivo-cognitive	3
1.1.1 Approche spécifique	4
1.1.2 Approche non-spécifique	9
1.2 Expertise innée et/ou acquise.....	13
1.2.1. Performance innée et/ou acquise	15
1.2.2. Expertise perceptivo-cognitive innée et/ou acquise.....	16
2. Entraînement perceptivo-cognitif	18
2.1 Plasticité cérébrale	19
2.2 Entraînement perceptivo-cognitif	23
2.2.1 Entraînement spécifique.....	24
2.2.2 Entraînement non-spécifique	28
2.2.2.1. Entraînement classique	28
2.2.2.2. 3D-MOT	33
2.2.2.3. Entraînement perceptivo-cognitif de 3D-MOT	36
3. Objectifs et hypothèses	40

3.1 Objectifs.....	40
3.2 Hypothèses.....	40
Chapitre 2 : Article 1.....	41
Soccer athletes are superior to non-athletes at perceiving soccer-specific and non-sport specific human biological motion.....	41
Chapitre 3 : Article 2.....	70
3D-Multiple Object Tracking training task improves passing decision-making accuracy in soccer players.....	70
Chapitre 4 : Discussion.....	97
Chapitre 6 : Conclusion.....	117
Bibliographie.....	i
Annexe 1 : Les joueurs de soccer traitent et apprennent plus rapidement des scènes visuelles dynamiques, complexes et neutres.....	i
Annexe 2 : Données préliminaires : évaluation de la capacité perceptivo-cognitive de joueurs de soccer de différents âges et de jeunes adultes non-athlètes à l'aide du 3D-MOT.....	iii

Liste des tableaux

Table 2-1. Participants' information (\pm SEM).....	46
Table 2-2. Mean (\pm SEM) response accuracy (angular threshold [75%], slope and response accuracy for maximal angle) between groups in the two tasks.	52
Table 2-3. Mean (\pm SEM) reaction time between groups in the two tasks.....	55
Table 3-1. Players' information (\pm SEM).....	77
Table 3-2. Decision-making coding instrument.....	79

Liste des figures

Figure 1-1. Montage pour étudier les stratégies de recherche visuelle de joueurs de soccer. Un joueur, équipé d'un oculomètre portatif, fait face à un écran de projection grandeur nature.	8
Figure 1-2. Test d'immersion dans une salle de réalité virtuelle proposant de traverser des rues virtuelles encombrées.....	11
Figure 1-3. Illustration du rôle de l'inné et de l'acquis dans le sport : deux athlètes rivaux de saut en hauteur aux parcours différents	14
Figure 1-4. Régions cérébrales d'épaisseur corticale plus élevée chez les sportifs : le sulcus temporal supérieur gauche (en haut à gauche A et B), le cortex orbitofrontal droit (en haut à droite A et B) et le gyrus parahippocampal droit (en bas à droite A et B).	22
Figure 1-5. Le système Dynavision™ D2 pour entraîner les temps de réaction visuo-moteur	32
Figure 1-6. Mode « CORE » du 3D-MOT	33
Figure 1-7. Illustration d'un gardien de soccer devant gérer plusieurs sources d'informations en mouvement comparables à l'exercice de MOT (avec la permission de Jocelyn Faubert)...	35
Figure 2-1. Front-facing biological motion perception tasks.....	47
Figure 2-2. Athletes and non-athletes' angular threshold (mean) extrapolated from response accuracy to the direction of a: A) point-light walker and B) point-light soccer kick for multiple distance of presentation.....	53
Figure 2-3. Representation of response accuracy and reaction time as a function of each subject.	56
Figure 3-1. 3D-MOT task. Illustration of the 5 critical phases.....	81
Figure 3-2. A. Decision-making accuracy in passing of an experimental (3D-MOT training) and active-passive control groups during pre- and post-sessions of a SSG; B. Subjective decision-making accuracy of an experimental (3D-MOT training) and active-passive control groups during pre- and post-sessions of a SSG. Error bars represent SEM.	84
Figure annexe 1. A. Moyenne géométrique des seuils de vitesse au 3D-MOT chez des joueurs de soccer et des non-athlètes représentée sur une échelle logarithmique en fonction du nombre de sessions d'entraînement. Les barres d'erreurs représentent les erreurs standards. B.	

Moyenne des seuils de vitesse normalisés de 3D-MOT pour les joueurs de soccer et les non-athlètes en fonction du nombre de sessions d'entraînement ii

Figure annexe 2. Moyenne géométrique des seuils de vitesse au 3D-MOT chez des joueurs de soccer d'âges différents et chez des non-athlètes représentée sur une échelle logarithmique en fonction du nombre de sessions d'entraînement iv

Liste des sigles

3D : Trois Dimensions

3D-MOT : Three-Dimensional Multiple Object Tracking

ADN : Acide Désoxyribonucléique

AON : Réseau d'Observation de l'Action

IRMf : Imagerie par Résonance Magnétique fonctionnelle

MOT : Multiple Object Tracking

STS : Sulcus Temporal Supérieur

VO₂max : Consommation maximale d'oxygène

Liste des abréviations

Etc. : Et cætera

Ex. : Exemple

H : Heures

M : Mètres

Min : Minutes

Ms : Millisecondes

S : Secondes

À Marie et André CHAPUS

Remerciements

Je remercie mon Professeur Jocelyn Faubert. Tu m'as fait confiance et m'a donné de nombreuses responsabilités au sein du laboratoire. Tu m'as ensuite offert la possibilité d'exprimer mes connaissances et d'entreprendre mon doctorat dans un domaine qui m'est cher. J'ai sincèrement appris tous les jours à tes côtés : savoir, management, diplomatie, opportunisme, média, et bien plus encore. Le tout dans une ambiance sans pareille, toujours décontractée. J'espère pouvoir exploiter et exprimer toutes ces qualités à l'avenir, grâce à toi.

Je voudrais remercier tout particulièrement l'équipe des Carabins de soccer de l'université de Montréal ainsi qu'Alain Lefebvre pour avoir rendu possible ce projet. Je remercie également l'Académie de l'Impact de Montréal pour leur collaboration, en particulier Antoine Guldner. Merci à tous les membres du laboratoire et en particulier ceux qui ont directement contribué à la réussite de mon travail : Vadim Sutyushev, Rémy Allard et Isabelle Legault.

Maman, Papa, Marie, Mo, Papi, Mamie et toute l'Ardèche, de Sauveyre au Suchet en passant par l'Eysse, merci. Sans votre support, accomplir ce doctorat n'aurait pas été possible.

Je tiens particulièrement à remercier mes amis des cycles supérieurs, de l'AÉCSÉO et du CSC Football Club. Notamment, Rob, Jimmy, Rez, Azi, BruBru, Will, Julie & Jeroen; vous avez largement contribué à ce succès de par votre humeur, aide et soutien quotidien. Merci aussi pour l'amélioration drastique de mon anglais !

Merci à mes amis du Canada pour leur soutien : Guillaume, Noémie, Camille, Olivier, Barbara & Isabelle. Je remercie aussi tous les membres de la Jäger Team ! Enfin, je remercie mon crew : Dav, Géo, Jé, Joub, Ju, Paul et j'embrasse leurs enfants et conjointes.

Chapitre 1 : Introduction

1. Expertise sportive

« [...] He had already scored a penalty when, twelve minutes from time, he created one of his masterpieces. I have watched footage of this miraculous goal dozens of times, but the beauty of its execution still astonishes me. Just inside Sunderland's half, harnessed by Ord and Ball, he set himself free with a stupendous double feint, somehow found McClair, who instantly returned the ball to him, which, still running, he chipped from 18 yards over the head of his former Nîmes teammate Lionel Perez. What is extraordinary is that Eric found a way to stop without stopping, slowing down imperceptibly to compose himself and brush the underside of the ball with his bootlaces, sending it to the only spot where the rushing keeper couldn't reach it. » (Auclair, 2009 p.450)

Cet extrait décrit une somptueuse action de but réalisée par le joueur de soccer (Football Association) Éric Cantona lors d'un match de championnat d'Angleterre en décembre 1996. Qu'il s'agisse de soccer ou de sport en général, les athlètes sont capables d'exploits extraordinaires qui soulèvent les foules et les passionnés de sport. Ces gestes, exécutés à la perfection, sont difficilement imitables pour un simple amateur, les rendant encore plus éblouissants pour le commun des mortels. La précision d'exécution propre aux athlètes se fonde sur une multiple expertise à la fois physique, technique et cognitive. La science du sport examine ces habiletés à travers des domaines tels que la biomécanique, la biochimie, la physiologie et même la psychologie et les neurosciences. Grâce au fruit de nombreuses recherches, les méthodes de développement physique et technique sont aujourd'hui finement élaborées et largement ancrées dans le quotidien des sportifs. Mais si les capacités physiques et techniques des athlètes sont inévitablement un facteur de poids dans la performance, elles ne suffisent pas à expliquer la supériorité des sportifs sur le terrain (Williams, Davids, Burwitz, & Williams, 1992). Ainsi, depuis une vingtaine d'années, la science du sport s'est intéressée de près aux mécanismes perceptuels et cognitifs mis en jeu lors de sports d'action. À travers cette introduction, les découvertes majeures portant sur les habiletés perceptivo-

cognitives des athlètes seront décrites. Puis, les méthodes d’entraînement en laboratoire de ces capacités seront expliquées, en particulier la technique du *3-Dimensional Multiple Object Tracking* (3D-MOT) qui tient un rôle central à travers la présente recherche.

1.1 Expertise perceptivo-cognitive

La performance perceptuelle et cognitive des athlètes est un domaine en plein essor dans le milieu sportif. Les entraîneurs et joueurs la considèrent déterminante dans la performance, la décrivant plus familièrement comme l’« intelligence » et la « vision du jeu » ou encore la capacité de « prise d’information ». Il est reconnu que cette habileté de lecture du jeu permet de distinguer les joueurs les plus habiles (Williams, 2000). Dans un premier temps, des études ont comparé des experts sportifs à des novices sur des mesures d’acuité visuelle, de stéréoscopie, de motilité oculaire, de vision périphérique et de temps de réaction visuelle (pour revue Wood & Abernethy, 1997). De légères différences ont pu être observées, mais de manière générale, les mesures optométriques n’ont que très rarement rapporté une supériorité propre à l’athlète (Abernethy, 1987; Helsen & Starkes, 1999). Par exemple, Ward et ses collaborateurs ont montré que des joueurs de soccer élite et sous-élite âgés entre 8 et 18 ans possédaient une fonction visuelle de même niveau déterminée par des mesures standard d’acuité visuelle, de stéréoscopie ainsi que de vision périphérique (Ward, Williams, & Loran, 2000). Les sportifs d’élite, hommes et femmes, ne sont donc pas caractérisés par une « super vision », du moins lorsque la vision est évaluée en utilisant des tests optométriques standards (Abernethy & Russell, 1987; Starkes & Deakin, 1984; Williams, 2000). D’autres évidences révèlent même que l’entraînement visuel via des batteries de tests optométriques n’apporte ou ne transfère aucun bénéfice dans le cadre du sport (Wood & Abernethy, 1997). De plus, les améliorations occasionnelles engendrées sur la fonction visuelle résulteraient de la familiarité avec le test plutôt que d’un effet réel de l’entraînement (Williams & Grant, 1999). Dans l’ensemble, la fonction visuelle ne semble pas reliée au niveau d’expertise de l’athlète (Williams, Davids, & Williams, 1999) et surtout ne suffit pas à expliquer le haut niveau de performance perceptuel (Mann, Ho, De Souza, Watson, & Taylor, 2007a). L’expertise perceptivo-cognitive ne repose donc pas essentiellement sur la fonction visuelle mais plutôt sur la capacité à extraire et traiter l’information visuelle.

La capacité perceptivo-cognitive illustre le rôle joué par le traitement cognitif et le traitement perceptuel. Elle représente la capacité du cerveau humain à extraire l'information contextuelle clé de la scène visuelle (Marteniuk, 1976) et est essentielle pour accomplir des performances de haut niveau dans le sport (Casanova, Oliveira, Williams, & Garganta, 2009). L'expertise perceptivo-cognitive des athlètes est notamment reflétée par leurs capacités exceptionnelles d'anticipation et de prise de décision. Elle a été largement rapportée dans plusieurs type de sports et dès l'âge de 9 ans chez des joueurs de soccer (Alves, Voss, Boot, Deslandes, Cossich, Salles, & Kramer, 2013; Faubert, 2013; Helsen & Starkes, 1999; Mann, Williams, Ward, & Janelle, 2007b; Voss, Kramer, Basak, Prakash, & Roberts, 2010; Ward & Williams, 2003; Williams, et al., 1999). L'expertise fait référence aux mécanismes sous-tendant l'achèvement supérieur par un individu (Ericsson, 2000). L'expertise sportive se définit quant à elle comme l'habileté à démontrer systématiquement une performance athlétique supérieure (Mann, et al., 2007b). Il a été suggéré qu'un minimum de dix années de pratique et de préparation sont nécessaires pour atteindre le niveau d'expert (Ericsson, Krampe, & Tesch-Römer, 1993; Simon & Chase, 1973). Le novice, quant à lui, se définit comme n'étant que peu ou pas familier avec une discipline en particulier; il est donc considéré comme un amateur ou débutant dans le domaine. À ce jour, deux approches principales ont été proposées pour identifier la supériorité des experts sportifs. De plus, l'expertise fait l'objet d'un débat concernant son origine innée ou acquise avec l'expérience. Ces thèmes seront abordés plus en détail au cours de ce chapitre d'introduction.

1.1.1 Approche spécifique

La plupart des découvertes illustrant la supériorité des experts par rapport aux novices ont examiné les processus d'anticipation et de prise de décision en utilisant une approche basée sur l'expertise dans un contexte spécifique au sport. Ces travaux reposent sur l'approche de la performance experte qui mesure l'interaction directe entre l'athlète et son domaine d'expertise. Cette approche reflète des comparaisons entre des athlètes professionnels, semi-professionnels et/ou novices sur des tâches qui sont spécifiques au domaine d'expertise et dans certains cas, représentatives de l'exigence comportementale de l'environnement compétitif. Les chercheurs ont employé des techniques telles que des paradigmes d'occlusion ou de

mouvement biologique pour déceler les différences entre experts et novices. Ces paradigmes permettent d'observer et de transférer directement les habiletés du terrain au laboratoire, ce que les scientifiques considèrent comme un transfert « rapproché » (Alves, et al., 2013).

Les travaux pionniers réalisés par Chase et Simon ont tout d'abord démontré que des « grands maîtres » du jeu d'échecs étaient supérieurs à des joueurs de moins bon niveau dans la reconstitution de scénarios d'échiquiers présentés pendant quelques brèves secondes (Chase & Simon, 1973). Les auteurs expliquaient que, selon un processus perceptuel inconscient, les « grands maîtres » possédaient la capacité de mieux « voir » le jeu. Leurs travaux ont inspiré Janet Starkes, aujourd'hui professeure émérite à l'université McMaster (Ontario, Canada), qui mis à l'essai un paradigme semblable chez des joueuses de volleyball de haut niveau connu aujourd'hui sous le nom de test d'occlusion (Allard & Starkes, 1980). Le test consistait à présenter de façon très rapide (16,67 ms) des scènes de volleyball aux participantes qui devaient indiquer si une balle était présente ou non dans le scénario. Ces résultats ont permis de révéler la supériorité des athlètes élités par rapport à des novices. Parallèlement, la mesure des temps de réaction moteur (bas niveau de traitement cérébral) ne révélait aucune différence entre le groupe athlète et le groupe contrôle. Cette étude a suggéré pour la première fois que les experts apprenaient à mieux percevoir le jeu plutôt que d'arborer une capacité supérieure à réagir rapidement (habileté physique intrinsèque). Au fil des recherches, les évidences autour de l'expertise des athlètes se sont accumulées. En particulier, des niveaux de performance supérieurs ont été observés chez les sportifs de haut niveau dans l'utilisation d'indices visuels précis (Abernethy, Gill, Parks, & Packer, 2001; Ward, Williams, & Bennett, 2002; Williams, 2000), la reconnaissance et la mémorisation de situation de jeu (Abernethy, Baker, & Côté, 2005; Smeeton, Ward, & Williams, 2004), la stratégie de recherche visuelle (Vaeyens, Lenoir, Williams, & Philippaerts, 2007; Williams, 2000) et la reconnaissance des probabilités de jeu (Dittrich, 1999; North & Williams, 2008; Williams, Hodges, North, & Barton, 2006). Ces habiletés sont directement liées à l'intelligence de jeu et ont fait l'objet de nombreux livres ou revues (ex.: Carling, Reilly, & Williams, 2009; Casanova, et al., 2009; Williams, et al., 1999).

L'utilisation d'indices visuels précis fait référence à l'habileté du joueur à faire des prédictions efficaces basées sur l'information provenant de la posture et de l'orientation corporelle de l'opposant juste avant un événement clé tel que le contact du ballon (Williams, 2000). Cette habileté perceptuelle est essentielle pour la performance dans les sports rapides

mettant en jeu, par exemple, un ballon ou une rondelle, à cause des contraintes de temps imposées au joueur. Le paradigme d'occlusion temporelle permet de stopper l'action d'une vidéoprojection à un moment voulu. Des joueurs de soccer expérimentés accomplissaient de meilleures performances que des novices et ce, uniquement pour des durées de projection courtes (Williams, et al., 1999). Récemment, il a été avancé que les experts ont tendance à extraire globalement l'information reliée au mouvement de l'orientation posturale d'un opposant plutôt qu'un indice informationnel spécifique. Les joueurs de haut niveau utiliseraient le mouvement relatif aux articulations et/ou aux membres pour guider une bonne performance plutôt qu'un indice spécifique (Lavalée, Kremer, Moran, & Williams, 2004). La perception du mouvement biologique est un paradigme adéquat pour évaluer cette capacité particulière. Ce test rend possible la reconnaissance des mouvements humains complexes par le système visuel même lorsque ceux-ci sont présentés par des points lumineux en mouvement placés sur les articulations majeures du corps (Johansson, 1973). Cette tâche est reconnue comme une habileté critique et fondamentale d'intérêt social (Troje, 2002) et est un indice dynamique puissant qui peut être utilisé pour l'évitement des collisions et pour anticiper les mouvements dans le sport (Abernethy & Zawi, 2007; Ouellette, Chagnon, & Faubert, 2009; Ward, et al., 2002). Plusieurs études ont révélé que des experts étaient plus efficaces que des novices pour reconnaître les séquences présentées sous forme de points lumineux (Abernethy, et al., 2001; Bideau, Kulpa, Vignais, Brault, Multon, & Craig, 2010; Ward, et al., 2002; Williams, et al., 2006). Aussi, l'utilisation de modèles de points lumineux à occlusion spatiale, présentant des parties sélectives du corps de façon isolée, a permis de démontrer que des joueurs de badminton de classe mondiale obtenaient des bénéfices de l'information basée sur les positions du bas du corps de l'opposant et de sa raquette avant le contact raquette-volant (Abernethy & Zawi, 2007). Il est également bien connu que la perception du mouvement biologique entraîne une activité sélective du cerveau du participant, particulièrement dans le sulcus temporal supérieur (STS) (Oram & Perrett, 1994; Ptito, Faubert, Gjedde, & Kupers, 2003; Vaina, Solomon, Chowdhury, Sinha, & Belliveau, 2001). Récemment, une étude d'imagerie a révélé une augmentation de l'épaisseur corticale dans certaines régions du cerveau dont le STS. Cette augmentation de volume était corrélée avec le niveau d'activité physique (Wei, Zhang, Jiang, & Luo, 2011). Ces découvertes semblent indiquer que les athlètes sont meilleurs dans la perception des mouvements effectués par les autres, et ce,

même lorsque l'information perceptive fournie est insuffisante, comme c'est le cas dans le mouvement biologique.

Dans les sports de ballon, une composante importante de la performance est l'habileté à détecter les mouvements de jeu tôt dans leur développement. La reconnaissance de ces mouvements de jeu par les experts est supérieure à celle des novices tel que démontré dans des paradigmes de reconnaissance chez des joueurs de soccer (Williams, Hodges, North, & Barton, 2006). Les experts seraient en fait capables de combiner des processus cognitifs de haut et bas niveaux. Initialement, les experts extrairaient l'information du mouvement et les relations temporelles entre les caractéristiques (coéquipiers, opposants, ballon), avant de coupler cette représentation du stimulus avec des modèles internes enregistrés dans leur mémoire (Dittrich, 1999). Par contraste, les novices seraient incapables de prélever l'information pertinente et compteraient moins de modèles en mémoire (North & Williams, 2008).

La définition de la stratégie de recherche visuelle est l'habileté à sélectionner des indices visuels précis ou à identifier les mouvements de jeu (Williams, 2000). La majorité des études suggèrent que les experts concentrent leur regard sur des zones d'information de l'animation plus riches comparés aux novices, leur permettant d'anticiper de façon plus efficace les besoins de l'action (Williams, 2000; Williams, et al., 1999). Des différences systématiques entre experts et novices sont observées en relation avec la durée de fixation, le nombre de fixations et la proportion de temps passé à fixer différentes parties de la scène (Vaeyens, et al., 2007). Il est possible d'enregistrer les stratégies de mouvements oculaires grâce à un oculomètre (Figure 1-1).

La connaissance des probabilités de situation a été définie comme l'habileté des experts à extraire l'information contextuelle significative de la survenue de l'évènement. Les experts développent des prévisions plus efficaces sur ce que leurs adversaires vont faire dans la situation à venir. Il a été suggéré que les experts sont capables d'assigner des prévisions efficaces sur chaque évènement en portant attention aux indices contextuels les plus pertinents (Williams & Ford, 2008).

Dans l'ensemble, l'approche de la performance experte a permis d'identifier avec succès une forme d'expertise contextuelle chez les athlètes. Cependant, elle ne permet pas d'explorer la façon dont l'expertise répond à des mesures cognitives plus fondamentales qui seraient

dénuées du contexte sportif (Voss, et al., 2010). Ainsi, une approche de l'expertise basée sur les habiletés cognitives générales a été développée (Mann, et al., 2007b).

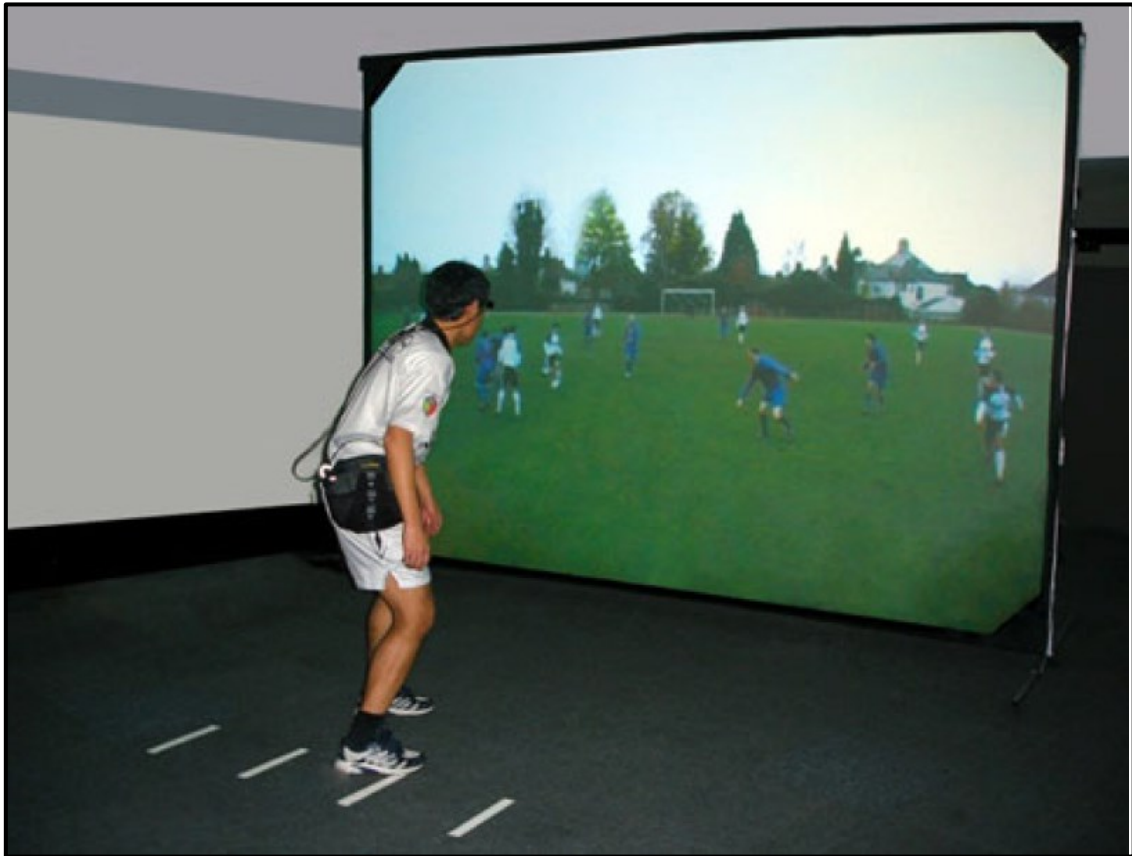


Figure 1-1. Montage pour étudier les stratégies de recherche visuelle de joueurs de soccer. Un joueur, équipé d'un oculomètre portatif, fait face à un écran de projection grandeur nature. (Roca, Ford, McRobert, & Mark Williams, 2011 ; reproduit avec la permission de Mark Williams)

1.1.2 Approche non-spécifique

Les nombreuses recherches effectuées dans le domaine des neurosciences du sport démontrent que l'activité physique induit un remaniement des fonctions cognitives et exécutives (pour revue Erickson, Gildengers, & Butters, 2013; Vivar, Potter, & van Praag, 2013). L'approche basée sur les habiletés de composante cognitive examine la façon dont l'expertise dans le sport influence les fonctions fondamentales perceptuelles et cognitives en dehors du domaine spécifique au sport (Nougier, Stein, & Bonnel, 1991). Cette théorie se fonde sur l'idée que l'expertise des joueurs élités se produit à un niveau central fondamental et ne répond pas uniquement au contexte sportif (Voss, et al., 2010). En effet, il a été récemment avancé qu'il pourrait y avoir des améliorations cognitives spécifiques et générales provenant de l'environnement sportif compétitif. Aussi, l'approche de la performance experte ne peut expliquer la supériorité des athlètes sur des mesures cognitives fondamentales non-contextuelles (Voss, et al., 2010). L'approche vise à mesurer la performance sur des tâches qui font supposément intervenir une partie de la demande cognitive impliquée durant le jeu (Nougier, et al., 1991). Les paradigmes utilisés tentent d'activer et de mesurer les habiletés cognitives de haut niveau de traitement cortical qui pourraient jouer un rôle général plutôt que spécifique dans l'expertise sportive (Voss, et al., 2010). La supériorité perceptivo-cognitive des athlètes a ainsi été révélée en utilisant des paradigmes plus fondamentaux (non-contextuels) qui confèrent une fidélité cognitive plutôt que physique avec l'environnement sportif. Cette méthode est capable de capturer des habiletés qui se transfèrent à des situations non-contextuelles, ce que les scientifiques appellent un transfert « éloigné » (Alves, et al., 2013).

La plupart des méthodes employées ont utilisé des paradigmes d'indices attentionnels, des mesures de traitement de vitesse ou encore des paradigmes d'attention variés. Dans une méta-analyse, Voss et ses collaborateurs ont observé que des mesures de traitement attentionnel et de vitesse de traitement chez des athlètes avaient des effets plutôt modérés (Voss, et al., 2010). Les auteurs ont proposé que des tâches cognitives de plus haut niveau portant sur les fonctions exécutives ou l'attention visuelle devaient être employées pour observer des effets plus soutenus. Dans une étude récente, 154 athlètes de volleyball ont été évalués à l'aide d'une

batterie d'exercices cognitifs incluant des tests de contrôle exécutif, de mémoire et d'attention visuo-spatiale (Alves, et al., 2013). La tâche de contrôle exécutif, par exemple, consistait à alterner entre deux tâches le plus rapidement possible. Les auteurs ont expliqué que cet exercice s'apparentait à une situation de jeu durant laquelle le joueur devait alterner entre une action offensive et une autre défensive. Les résultats ont démontré que les joueurs élites, adultes comme juniors, étaient meilleurs que le groupe contrôle dans leur habileté à alterner entre les tâches, à garder des objets en mémoire et à suivre des objets en mouvement. Les athlètes pouvaient inhiber efficacement et rapidement un comportement, ce qui est très important dans les sports et dans la vie quotidienne. Ils étaient également capables de sélectionner l'information en un coup d'œil et d'alterner entre les exercices plus rapidement que les non-athlètes. D'autres études ont aussi montré une supériorité des athlètes en utilisant des tâches de contrôle inhibiteur (« *go / no go* ») (Wang, Chang, Liang, Shih, Muggleton, & Juan, 2013) ou de suivi d'objets en mouvement (« *Multiple Object Tracking* »; MOT) (Trick, Jaspers-Fayer, & Sethi, 2005a; Zhang, Yan, & Yangang, 2009). De plus, une corrélation significative a été récemment démontrée entre les résultats obtenus aux tests des fonctions exécutives (via une batterie de tests neuropsychologiques) et le nombre de buts et de passes réalisés par les joueurs durant deux saisons (Vestberg, Gustafson, Maurex, Ingvar, & Petrovic, 2012). Les auteurs ont suggéré que les résultats au test des fonctions cognitives prédisaient le succès de joueurs de soccer de haut niveau. Aussi, une autre étude a montré qu'une fonction cognitive de plus haut niveau prédirait un meilleur développement et favoriserait l'identification de talent chez des jeunes joueurs de soccer (Verburgh, Scherder, van Lange, & Oosterlaan, 2014). Les fonctions cognitives étaient évaluées par des tests neuropsychologiques dépistant la créativité ou encore la flexibilité cognitive.

Des découvertes relativement récentes ont révélé un niveau d'expertise élevé chez les athlètes sur des tâches sociales et dénuées de contexte sportif en utilisant la réalité virtuelle. Comme les présentations de stimuli en deux dimensions ne semblent pas capturer adéquatement la nature dynamique du sport, de plus en plus d'études utilisent des représentations en trois dimensions (3D) (Abernethy, Burgess-Limerick, & Parks, 1994). Chaddock et ses collaborateurs ont démontré que des athlètes étaient meilleurs que des non-athlètes pour traverser des rues virtuelles tout en accomplissant certaines tâches telles qu'écouter de la musique ou parler au téléphone (Figure 1-2). Les auteurs ont ainsi découvert

que les aptitudes perceptivo-cognitives des joueurs de haut niveau pouvaient aussi se transférer et être bénéfiques sur des tâches sociales réalisées quotidiennement (Chaddock, Neider, Voss, Gaspar, & Kramer, 2011). Cette aptitude semble être d'ailleurs propre à la pratique du sport (Gaspar, Neider, Crowell, Lutz, Kaczmariski, & Kramer, 2013).



Figure 1-2. Test d'immersion dans une salle de réalité virtuelle proposant de traverser des rues virtuelles encombrées (Chaddock, et al., 2011 ; reproduit avec la permission de Laura Chaddock)

Enfin, une étude récente a mis en évidence la supériorité des athlètes professionnels par rapport à des semi-professionnels et des non-athlètes lors d'une tâche perceptivo-cognitive de MOT en 3D (3D-MOT). Cette tâche impliquait le suivi attentionnel de scènes dynamiques complexes et surtout dénuées de tout contexte sportif (Faubert, 2013). Les résultats ont révélé que le traitement mental et l'apprentissage rapide à travers des scènes visuelles dynamiques

représentaient des éléments critiques de la performance de haut niveau dans le sport. Plus récemment, la performance au 3D-MOT a été reliée à l'habileté des athlètes à voir et répondre à des stimuli variés sur un court de basketball (ex : ratio passe-perte de balle) contrairement aux temps de réaction visuo-moteurs qui n'étaient reliés à aucune mesure de performance spécifique au basketball (Mangine, Hoffman, Wells, Gonzalez, Rogowski, Townsend, Jajtner, Beyer, Bohner, Pruna, Fragala, & Stout, 2014). Cette technique de 3D-MOT peut être utilisée comme entraînement perceptivo-cognitif pour les athlètes et sera décrite en détail au cours du chapitre « 2.2 Entraînement perceptivo-cognitif ».

Toutes ces évidences supportent que l'approche basée sur les habiletés de composantes cognitives capture la capacité fondamentale cognitive associée avec l'entraînement compétitif sportif (Voss, et al., 2010). Alors que ces deux approches mettent en lumière l'expertise perceptivo-cognitive des athlètes de façon contextuelle et non-contextuelle, aucune publication n'a encore exposé et étudié l'expertise en considérant ces deux concepts en même temps. Au contraire, ces deux théories de l'expertise ont plutôt été opposées à travers la littérature. De manière originale, cette thèse a utilisé le mouvement biologique dans un environnement virtuel afin d'observer l'expertise athlétique dans un contexte écologique spécifique et général. La performance au soccer passe par la lecture précise des mouvements du corps des joueurs afin d'anticiper les courses et les trajectoires (Williams, 2000; Williams, et al., 1999). Nous avons donc voulu confirmer que les joueurs de soccer étaient des experts pour détecter les mouvements spécifiques à la pratique de leur sport. Pour ce faire, nous avons comparé la performance d'experts et de novices dans la prédiction d'un tir de soccer sous forme de mouvement biologique. Puis, nous avons suggéré que la faculté à mieux lire les mouvements lors de la pratique du soccer pourrait se généraliser à d'autres cinématiques du corps humain issues du quotidien, tel qu'un mouvement de marche par exemple. La performance d'experts et de non-experts de soccer a donc été évaluée dans la discrimination d'un mouvement locomoteur du quotidien (marche) sous forme de mouvement biologique.

1.2 Expertise innée et/ou acquise

« When Stefan Holm was six, his father built a jump pit and placed it in the backyard. [...] At fourteen, Holm cleared six feet, an aged-group record in his area in the west of Sweden. [...] At fifteen, he won the Swedish youth championships. [...] At sixteen, he lost only a single competition. [...] As Holm himself acknowledges, it would be a fair bet that he has taken more high jumps than any human being who has ever lived. [...] In 2005, a year after he won the Olympic title, Holm earned a qualification of the perfect human projectile: he cleared 7'10.5", equaling the record for the highest high-jump differential between the bar and the jumper's own height. [...] In 2007, Holm entered the World Championship in Osaka, Japan, as the favorite. And despite the fact that there has never been a more assiduous student of high jump, Holm was faced with a competitor who he barely knew: Donald Thomas, a jumper from the Bahamas. Thomas had just begun high jumping. [...] The previous year, Thomas cleared 7'3.25" on the seventh high jump attempt of his life. [...] In his first full season, Thomas cleared 7'7.75 to win the NCAA indoor high jump championship. [...] In August 2007, with a total of eight months of legitimate high-jump training to his name, Thomas traveled to Osaka, Japan, for the World Championships. [...] Thomas advanced easily to the final, as did Stefan Holm. [...] On his final attempt, Holm clipped the bar with the back of his legs and fell to the mat with his head in his palms. Thomas, the guy in pole vault shoes who thinks high jump is 'kind of boring' was crowned the 2007 world champion. » (Epstein, 2013 chapitre 2 ; Figure 3)

Cet extrait relate l'histoire de deux champions de saut en hauteur qui ont connu une trajectoire et une ascension différente. Tous deux ont concouru dans la même discipline, durant la même période et ont atteint des sauts atteignant une hauteur de 2,35 m pour remporter leur titre. Alors que l'athlète suédois Stefan Holm (dossard jaune Figure 1-3) a développé ses talents au cours d'entraînements intensifs, Donald Thomas (dossard bleu Figure 1-3) est arrivé sur le tard dans ce sport, bénéficiant d'un don naturel. Ce dernier ne sautait pas avec technique mais avec puissance. Il possédait de longues jambes et surtout

un tendon d'Achille supérieur à la moyenne, ce qui lui donnait une explosivité sans pareille (Epstein, 2013 chapitre 2).

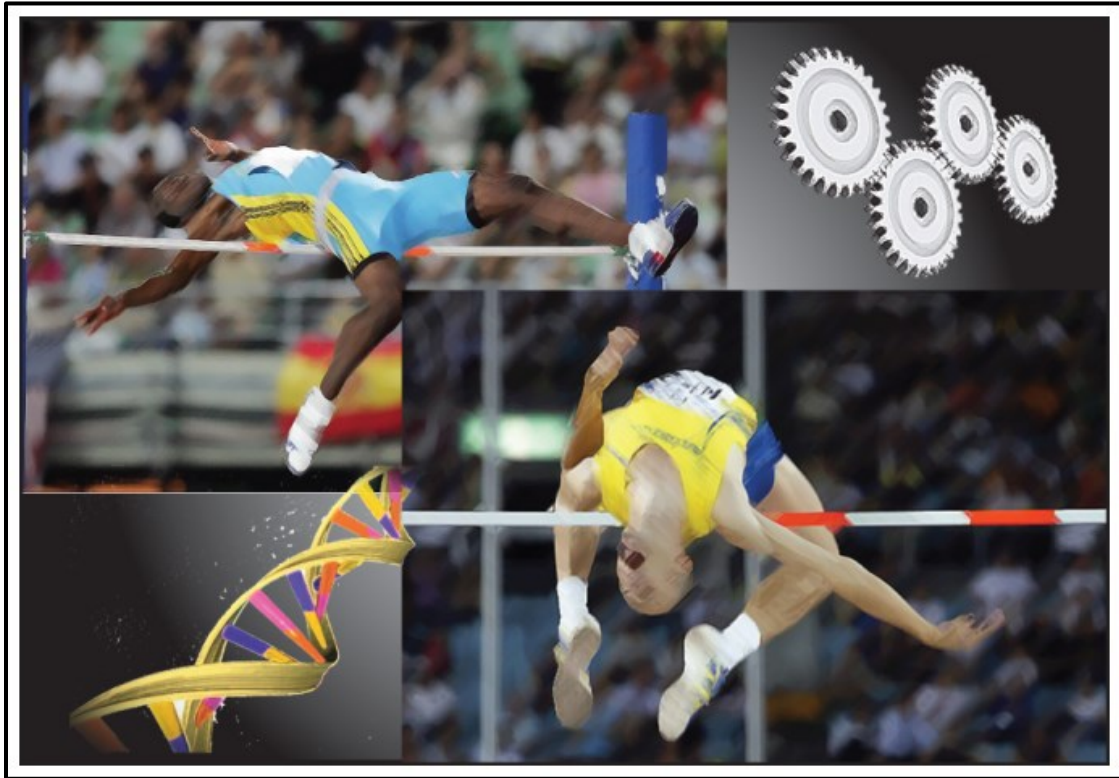


Figure 1-3. Illustration du rôle de l'inné et de l'acquis dans le sport : deux athlètes rivaux de saut en hauteur aux parcours différents

De nombreux autres exemples impliquant l'hérédité peuvent être retrouvés à travers le sport tels que la supériorité des jamaïcains dans le sprint ou encore la lignée familiale des Maldini au soccer. Il est donc légitime de se demander si l'expertise des athlètes de haut niveau est un don naturel ou est plutôt acquise suivant des entraînements soutenus. Cette question existe depuis le XIXème siècle, puisque Sir Francis Galton fut le premier à énoncer que les capacités mentales étaient limitées par des facteurs héréditaires (cité dans Ericsson, Nandagopal, & Roring, 2009). Le modèle « Galtonien » a proposé que la pratique et l'entraînement pouvaient engendrer des améliorations dans la performance, mais qu'un plafond (seuil maximal), influencé par les caractéristiques héréditaires, existait pour chaque personne. Le débat de

l'inné et l'acquis est reconnu comme un des plus complexe et controversé en science (Davids & Baker, 2007). L'inné se réfère aux caractéristiques individuelles naturelles qui contribuent à la performance tandis que l'acquis implique que ces qualités résultent du nombre d'expériences vécues et accumulées. Le rôle de l'inné et l'acquis sera brièvement rapporté à travers la performance sportive et perceptivo-cognitive des athlètes.

1.2.1. Performance innée et/ou acquise

Pour expliquer l'origine d'une performance sportive supérieure, certains généticiens ont d'abord favorisé l'hypothèse d'un simple gène comme seul responsable de l'excellence. Ce gène signifierait que les athlètes élités sont nés pour réussir. Cette approche tente par exemple de caractériser les sprinters et les marathoniens selon différents allèles d'un seul gène connu sous le nom de α -actinin-3 (Coghlan, 2003; Yang, MacArthur, Gulbin, Hahn, Beggs, Eastal, & North, 2003). D'autres scientifiques tels que Rankinen et ses collaborateurs assurent que la performance des experts est un trait polygénique (Rankinen, Roth, Bray, Loos, Perusse, Wolfarth, Hagberg, & Bouchard, 2010). Par exemple, une étude récente a démontré qu'un polymorphisme du gène de l'angiotensine était deux à trois fois plus commun chez les athlètes d'élite puissants comparé aux athlètes endurants et aux non-athlètes (Zarebska, Sawczyn, Kaczmarczyk, Ficek, Maciejewska-Karłowska, Sawczuk, Leonska-Duniec, Eider, Grenda, & Cieszczyk, 2013). Les auteurs ont déclaré que le variant M23T du gène de l'angiotensine devrait être un des marqueurs génétiques à investiguer lors de l'évaluation des prédispositions envers les sports de puissance. De plus, la littérature recense à ce jour quatre traits intrinsèques principaux qui contribuent particulièrement au phénotype lié aux performances des élités. Il s'agit du sexe, de la taille, de la consommation maximale d'oxygène ($VO_2\text{max}$) et des propriétés de la musculature squelettique (pour revue Tucker & Collins, 2012c).

D'un autre côté, des chercheurs suggèrent que la performance est uniquement dépendante de la pratique et l'entraînement durant des périodes optimales du développement (Ericsson, et al., 2009). Ainsi, le modèle de la « pratique intentionnelle » prétend que les caractéristiques distinctives des experts sont le résultat d'adaptation suite à des activités de pratiques intenses et répétées qui activent sélectivement des gènes dormants contenus dans n'importe quel acide

désoxyribonucléique (ADN) d'individus en santé (Ericsson, et al., 2009; Simon & Chase, 1973). Le Professeur Ericsson a avancé que la performance peut être atteinte par n'importe quel individu et que le résultat dépend avant tout de l'engagement dans la pratique intentionnelle d'une part et de la qualité des ressources disponibles pour l'entraînement d'autre part. Ainsi, 10 000 h d'entraînement accumulées sur une période d'approximativement 10 ans seraient nécessaires pour atteindre le niveau d'expert. L'origine de cette théorie émane d'une étude réalisée chez des joueurs d'échec (Simon & Chase, 1973) et d'une publication plus récente montrant que le niveau d'habileté des violonistes était associé au temps d'entraînement cumulé durant les vingt premières années de leur vie (Ericsson, et al., 1993). En effet, les meilleurs musiciens avaient accumulé un peu plus de 10 000 h de pratique à l'âge de 20 ans tandis que les violonistes « moyens » comptabilisaient moins d'heures (7800 et 4600 h). La règle des « 10 000 h » a cependant été l'objet de vives critiques. Plusieurs études impliquant différents sports ont révélé que des experts complétaient rarement 10 000 h pour atteindre le niveau international (Baker, Côté, & Deakin, 2005; Duffy, Baluch, & Ericsson, 2004; Gibbons & Committee, 2002; Gobet & Campitelli, 2007). D'ailleurs, Ericsson, chercheur pionnier de la « règle des 10 000 h », s'est récemment défendu de n'avoir jamais prononcé le mot « règle » (Ericsson, 2013).

D'après l'ensemble de ces travaux, il est aujourd'hui de plus en plus reconnu que la performance sportive est le résultat d'interactions entre une multitude de gènes et de contraintes environnementales. La communauté scientifique s'accorde à dire que l'inné et l'acquis déterminent tous deux la capacité athlétique d'un individu (Davids & Baker, 2007; Tucker & Collins, 2012a; Vaeyens, Lenoir, Williams, & Philippaerts, 2008).

1.2.2. Expertise perceptivo-cognitive innée et/ou acquise

Outre la performance sportive générale, les psychologues du sport ont investigué le rôle de l'inné et l'acquis dans l'expertise perceptivo-cognitive. Aucune preuve empirique ne supporte l'idée qu'un seul gène prédispose l'athlète à un traitement supérieur de l'information se manifestant dans un seul domaine (ex. : un gène pour le traitement du soccer) (Baker, Cote, & Abernethy, 2003a). Par contre, un individu par rapport à un autre pourrait être doté de certaines prédispositions avantageuses facilitant l'expertise perceptivo-cognitive. Par exemple,

la capacité perceptuelle de poursuite d'objets en mouvement est substantiellement différente d'un individu à un autre. Oksama et Hyönä (2004) ont comparé la performance individuelle de plus de 200 jeunes adultes « normaux » à travers des tâches de MOT incluant différents nombres de cibles à suivre (Oksama & Hyönä, 2004). Parmi leur échantillon, 33% des participants n'étaient pas capables de suivre plus de trois objets tandis que 19% pouvaient suivre jusqu'à six objets. Ces résultats vont à l'encontre d'une vision générale et universelle de la capacité de suivi visuel. D'autres évidences suggèrent que les joueurs de soccer talentueux seraient prédisposés à acquérir les structures de connaissances sous-jacentes aux habiletés perceptuelles et de prise de décision (Williams, 2000). Ainsi, le génotype d'un joueur influencerait et potentiellement déterminerait la réponse à la pratique ou à l'entraînement (Williams, 2000).

Cependant, la majorité des évidences obtenues jusqu'à aujourd'hui impliquent que les experts et non-experts se distinguent dans le traitement d'informations spécifiques selon une pratique intensive d'un sport en particulier plutôt qu'à partir de leurs capacités innées (Baker, Horton, Robertson-Wilson, & Wall, 2003b). La théorie de « *chunking* » (fragmentation) énoncée par Simon et Chase en 1973 supporte cette hypothèse (Simon & Chase, 1973). Les « grands maîtres » du jeu d'échecs, tout comme les athlètes élités, pourraient emmagasiner l'information issue du terrain sous forme de fragments indépendants nommés « chunks ». Au lieu de gérer un nombre important d'éléments individuels, le cerveau des experts regrouperait inconsciemment l'information en une multitude de fragments porteurs d'information (« chunks ») basés sur des patrons perceptuels observés auparavant. Ainsi, un « grand maître » du jeu d'échecs posséderait une base mentale de données constituée de millions d'arrangements d'éléments qui seraient répartis en 300 000 fragments porteurs d'information. Ces fragments seraient à leur tour groupés sous forme de modèles ou patrons cérébraux. Selon un phénomène perceptuel inconscient, les experts arriveraient ainsi plus facilement à voir le jeu et à prendre la bonne décision (Epstein, 2013; Simon & Chase, 1973).

Ces explications supportent l'idée que la spécialisation dans un sport durant les premières étapes du développement est nécessaire de façon à atteindre la performance élitée à l'âge adulte dans cette même discipline. Cependant, il a été récemment suggéré qu'une implication plus diversifiée dans l'activité physique durant le développement est aussi bénéfique pour acquérir, plus tard, les habiletés nécessaires dans un sport spécifique. En effet, Baker et ses collègues

(2003) ont recensé des experts en hockey, basketball et netball afin de montrer qu'un nombre important de sports différents étaient pratiqués durant les premiers stades du développement chez ces athlètes (Baker, et al., 2003a). Les auteurs ont d'ailleurs suggéré que la participation à d'autres activités, indirectement pertinentes, pouvait augmenter les habiletés physiques et cognitives nécessaires pour le sport principal des athlètes. D'autres preuves montrent que certaines capacités du domaine perceptivo-cognitif sont transférables à travers le sport. Le Professeur Abernethy et ses collaborateurs (2005) ont examiné le transfert des habiletés de reconnaissance de patron de jeu d'un sport à un autre chez des experts de netball, basketball et hockey sur gazon par rapport à des non-experts expérimentés (Abernethy, et al., 2005). Les experts surpassaient systématiquement les non-experts dans la reconnaissance des positions des joueurs défensifs de sports différents de leur domaine d'expertise. Ces résultats suggéraient le transfert sélectif d'habileté de reconnaissance de patron entre différents sports. De plus, l'exposition à une large variété de sports durant le développement semblerait réduire la durée d'entraînement spécifique nécessaire dans un sport pour devenir expert. Pour illustration, Wayne Gretzky, fameux hockeyeur canadien des années 1980, a participé à de nombreux sports jusqu'à l'âge de 11 ans tels que l'athlétisme, le baseball ou encore lacrosse (Gretzky, Taylor, & Taylor, 1984).

Alors que l'hérédité peut conférer un avantage pour l'expertise au haut niveau, la pratique intentionnelle est un élément crucial et indissociable de la réussite. La proportion entre la capacité perceptuelle déterminée génétiquement et celle acquise suivant l'exercice est cependant difficile à déterminer. L'apport de l'entraînement pour le développement des capacités perceptivo-cognitives est bien reconnu et ses bénéfices sur la plasticité cérébrale le sont également. Ainsi, un certain nombre de techniques sont aujourd'hui développées pour entraîner les capacités perceptivo-cognitives des sportifs en dehors du terrain.

2. Entraînement perceptivo-cognitif

La recherche de haute performance dans le sport est le leitmotiv de tout club sportif professionnel. La préparation physique, la nutrition, l'entraînement technique sont une

succession d'étapes nécessaires aux athlètes pour améliorer leurs performances. Aujourd'hui, la science du sport se tourne vers le développement des habiletés perceptuelles et cognitives pour tenter de repousser toujours un peu plus les limites de la performance athlétique. Les chercheurs de talent et les entraîneurs mettent l'accent sur l'importance de la capacité cognitive pour obtenir un athlète complet. Cet intérêt est soutenu par de récentes études scientifiques dévoilant que les fonctions cognitives sont reliées au succès de joueurs de soccer d'élite (Vestberg, et al., 2012) et que les fonctions cognitives de haut niveau sont cruciales pour l'identification de talents et le développement de jeunes joueurs de soccer (Verburgh, et al., 2014). En neurosciences, les nombreuses découvertes entourant le phénomène de plasticité cérébrale ont conduit à de nouveaux axes de recherche. Les scientifiques et psychologues du sport ont ainsi exploité la capacité « plastique » du cerveau pour développer des entraînements en laboratoire afin de faciliter l'apprentissage perceptivo-cognitif des athlètes. Ces techniques jouissent aujourd'hui d'une certaine reconnaissance de la part des entraîneurs et prennent une place de plus en plus importante dans les programmes de performance sportifs (ex.: Beauchamp, Harvey, & Beauchamp, 2012).

2.1 Plasticité cérébrale

Le terme de plasticité réfère à l'habileté du système nerveux à réorganiser ses connexions fonctionnellement et structurellement en réponse aux expériences vécues dans l'environnement (Baroncelli, Braschi, Spolidoro, Begenisic, Maffei, & Sale, 2011). En d'autres termes, la plasticité cérébrale correspond au développement adaptatif de l'ensemble du circuit neuronal. La plasticité est à la base des processus de mémoire et d'apprentissage et intervient parfois pour compenser les effets engendrés par des facteurs intrinsèques et extrinsèques en aménageant de nouveaux réseaux neuronaux. Elle est très active durant les premières étapes du développement post-natal (0-16 ans), en particulier dans les régions du cerveau desservant les fonctions comportementales majeures (Berardi, Pizzorusso, & Maffei, 2000; Chugani, 1998; Hensch, 2004). Suivant cette période, la plasticité neuronale diminue de façon importante. Malgré tout, le potentiel « plastique » du cerveau demeure présent tout au long de la vie et a même été observé chez des personnes âgées (Mahncke, Connor, Appelman,

Ahsanuddin, Hardy, Wood, Joyce, Boniske, Atkins, & Merzenich, 2006). Il existe une réorganisation neuronale claire des tissus neuraux et des réseaux lors de l'apprentissage de nouvelles capacités (Draganski & May, 2008). Outre son rôle lors de l'acquisition de l'expérience, la plasticité synaptique joue un rôle majeur dans la restauration d'une fonction touchée suite à une lésion cérébrale (Ptito, Kupers, Lomber, & Pietrini, 2012; Sabel, Henrich-Noack, Fedorov, & Gall, 2011; Wiesel & Hubel, 1963). Par exemple, des études d'imagerie cérébrale ont montré une réorganisation complète faisant place à une substitution sensorielle (Kupers, Chebat, Madsen, Paulson, & Ptito, 2010). Dans le système visuel, la plasticité peut être observée à différents niveaux, à la fois dans le cerveau normal et dans le cerveau lésé. Souvent, elle est induite lors d'un apprentissage perceptuel qui se traduit par un changement dans la performance suivant un entraînement. L'apprentissage perceptuel se définit comme une augmentation de l'habileté à extraire l'information de l'environnement résultant de l'expérience et de la pratique (Kellman & Garrigan, 2009).

Un exemple illustrant remarquablement la capacité « plastique » du cerveau est celui du sport. En effet, l'activité physique semble jouer un rôle dans la neurogenèse, l'angiogenèse et la production de facteurs de croissance importants pour la mémoire et la fonction cognitive. De nombreuses études ont révélé les effets bénéfiques de l'exercice physique sur les fonctions cognitives et exécutives, dans un premier temps chez l'animal (pour revue Vivar, et al., 2013). Par exemple, la prolifération cellulaire et la survie neuronale étaient augmentées seulement chez des souris ayant accès à une roue, suggérant que l'exercice est le facteur critique induisant l'augmentation de la neurogenèse, en particulier dans l'hippocampe, une structure du lobe temporal médial critique dans la formation de la mémoire (Kobilo, Liu, Gandhi, Mughal, Shaham, & van Praag, 2011). Ces effets ont ensuite été confirmés chez l'humain, notamment au sein de l'hippocampe, théâtre de nombreux remaniements engendrés par l'activité physique (Erickson, et al., 2013; Erickson, Voss, Prakash, Basak, Szabo, Chaddock, Kim, Heo, Alves, White, Wojcicki, Mailey, Vieira, Martin, Pence, Woods, McAuley, & Kramer, 2011; Kramer & Erickson, 2007). De plus, une étude d'Imagerie par Résonance Magnétique fonctionnelle (IRMf) a révélé dernièrement une augmentation de l'épaisseur corticale dans certaines régions du cerveau d'athlètes telles que le STS et le gyrus parahippocampal (Wei, et al., 2011). Cette augmentation de volume était corrélée avec le niveau d'activité physique des individus testés (Figure 1-4). Les changements dans le gyrus parahippocampal des athlètes résulteraient de

l'apprentissage des habiletés durant l'activité physique. Par ailleurs, le STS est une structure bien connue pour être activée par la perception du mouvement biologique (Oram & Perrett, 1994; Ptito, et al., 2003; Vaina, et al., 2001). Ces découvertes semblent indiquer que les athlètes perçoivent mieux les mouvements effectués par les autres, et ce, même lorsque l'information perceptive fournie est insuffisante, comme c'est le cas dans le mouvement biologique. Aussi, il a récemment été démontré que la pratique du soccer sur une saison pouvait améliorer la capacité de suivi visuel sur une tâche de 3D-MOT (Jajtner, Hoffman, Scanlon, Wells, Townsend, Beyer, Mangine, McCormack, Bohner, Fragala, & Stout, 2013). Les joueurs étaient évalués durant une session de 3D-MOT au début, au milieu et à la fin d'une saison. Les résultats démontraient une amélioration significative de la capacité de suivi visuel entre le début, le milieu et la fin de saison. Cette amélioration n'était pas attribuée à l'effet de l'entraînement répétitif puisque plusieurs mois séparaient chaque session mais plutôt à l'influence de la pratique journalière du soccer. Enfin, le sport confère aussi des bénéfices protecteurs pour divers troubles neurologiques tels que la maladie de Parkinson ou la maladie d'Alzheimer (Cotman & Berchtold, 2002; Smith & Zigmond, 2003). L'activité physique influence la pharmacologie endogène du cerveau et active sa capacité naturelle plastique.

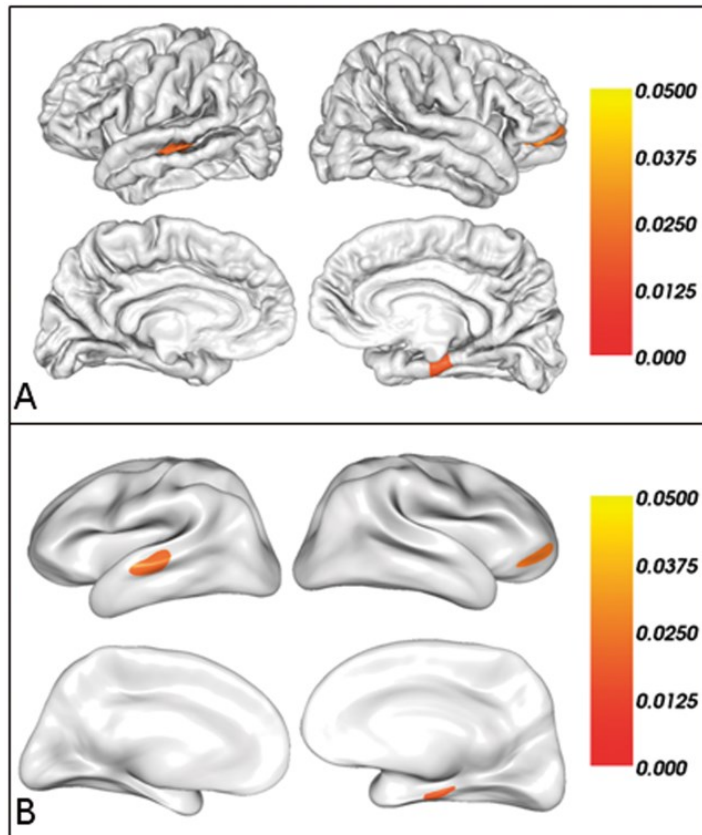


Figure 1-4. Régions cérébrales d'épaisseur corticale plus élevée chez les sportifs : le sulcus temporal supérieur gauche (en haut à gauche A et B), le cortex orbitofrontal droit (en haut à droite A et B) et le gyrus parahippocampal droit (en bas à droite A et B). La barre de couleur indique la valeur-p ($<0,05$) pour chaque cluster après correction pour comparaisons multiples (Wei, et al., 2011 ; reproduit avec la permission de Jing Luo)

2.2 Entraînement perceptivo-cognitif

L'entraînement cérébral est aujourd'hui de plus en plus populaire auprès de différents groupes d'individus tels que les personnes en bonne santé voulant améliorer leurs performances cognitives, les personnes âgées, pour combattre les effets délétères causés par le vieillissement mais aussi les athlètes pour améliorer leurs performances sur le terrain. Alors qu'il existe de nombreuses techniques disponibles sur le marché, leur crédibilité n'est pas toujours avérée. Et pour cause, un certain nombre de critères fondamentaux sont nécessaires pour valider l'outil d'entraînement idéal. En effet, Parsons et ses collaborateurs (2014) expliquent que la technique a besoin de montrer : a) des effets robustes de transfert; b) peu ou pas d'effets secondaires; c) un investissement de temps et d'argent minimal; d) des effets durables; e) aucun problème d'éthique; f) aucune restriction dans l'utilisation d'autres techniques et g) qu'elle peut s'appliquer à tout type d'individu (Parsons, Magill, Boucher, Zhang, Zogbo, Berube, Scheffer, Beauregard, & Faubert, 2014). Dans le cadre des sciences du sport, la mesure du transfert des acquis d'un entraînement est une étape essentielle de la validation d'une technique ou d'un produit. Ces mesures ont longtemps été négligées notamment de par la complexité de leur approche. Pourtant, créer et implémenter des mesures de transfert est primordial afin de déterminer la façon dont une amélioration observée en laboratoire peut se transférer dans la situation réelle de jeu (Williams, Ward, & Chapman, 2003). Le processus de transfert réfère à la performance sur une tâche antérieure qui influence la performance dans une nouvelle situation (Detterman, 1992). Une hypothèse commune suggère que le transfert peut se produire si les tâches entraînées et transférées engagent le chevauchement de processus cognitifs et de réseaux neuronaux spécifiques (Dahlin, Neely, Larsson, Backman, & Nyberg, 2008). À travers la littérature, on retrouve plusieurs tentatives de mesure de transfert qui montrent des résultats plus ou moins convaincants en faveur des programmes d'entraînement perceptivo-cognitif. Les études qui soutiennent l'approche de la performance experte s'intéressent déjà depuis plusieurs années à la question du transfert des acquis d'entraînement perceptivo-cognitif chez les athlètes (Carling, et al., 2009 p. 60-63 table 3.2; Caserta, Young, & Janelle, 2007; Gabbett, Rubinoff, Thorburn, & Farrow, 2007; Gabbett, Carius, & Mulvey, 2008; Hopwood, Mann, Farrow, & Nielsen, 2011; Williams, et al., 2003).

D'un autre côté, aucune étude supportant l'approche de composante cognitive n'a, à ce jour démontré un tel effet de transfert chez les athlètes. Un des objectifs de cette thèse a été de remédier à cette situation en étudiant la transférabilité d'un entraînement non-contextuel de 3D-MOT chez des athlètes. Les principales méthodes d'entraînement perceptivo-cognitives ayant fait l'objet de travaux de recherche seront décrites à travers les sous-chapitres suivants.

2.2.1 Entraînement spécifique

La méthode d'entraînement la plus communément retrouvée et utilisée se fonde sur les principes de l'approche de la performance experte et propose un exercice relatif au sport pratiqué par l'athlète. Par conséquent, les domaines ciblés pour améliorer la performance des athlètes sont souvent l'utilisation d'indices visuels précis, la reconnaissance et la mémorisation de situations de jeu, la stratégie de recherche visuelle et la reconnaissance des probabilités de jeu. Les méthodes employées s'inspirent des premières découvertes du Professeur Starkes (paradigme d'occlusion), et consistent en des simulations de scénarios de jeu présentées la plupart du temps, par l'intermédiaire de vidéoprojections (Gabbett, et al., 2008; Hopwood, et al., 2011; Starkes & Lindley, 1994; Williams, 1993; Williams, et al., 2003). La simulation vidéo est habituellement projetée selon la perspective du participant et diffusée à plusieurs reprises en variant les conditions expérimentales (ex. : instructions ou retour d'information). La simulation vidéo permet de rapporter des phases ou des situations spécifiques de jeu et de les rediffuser aux joueurs instantanément. Ces systèmes de diffusion peuvent être grandeur nature (voir Figure 1-1). De plus, ces entraînements permettent d'exercer spécifiquement un domaine d'intérêt tel que la reconnaissance de probabilité de jeu propre à la position de chaque joueur. Un objectif ultime serait qu'un joueur puisse s'exercer à observer, comprendre et anticiper les mouvements de son adversaire avant un match. Plus un joueur est exposé au mouvement de son opposant, plus il sera efficace pour anticiper les actions de celui-ci (Williams, 2000).

Tout d'abord, Starkes et Lindley (1994) ont utilisé des tests vidéo et des exercices sur le terrain pour évaluer les différences avant et après entraînement perceptivo-cognitif chez des joueurs de basketball (Starkes & Lindley, 1994). Le groupe entraîné montrait une amélioration significative avant et après entraînement sur l'anticipation des tests vidéo par rapport à un groupe contrôle mais aucun avantage n'était observé sur le terrain entre les deux groupes. Les améliorations obtenues étaient donc spécifiques au laboratoire et indiquaient une familiarité envers le test plutôt qu'un effet significatif de transfert. Dans leur article, les auteurs soulignaient le besoin de développer des mesures de transfert réalistes et sensibles qui répliqueraient la situation de jeu réel et permettraient de mesurer la même variable dépendante durant l'entraînement et le transfert. De plus la présence d'un groupe placebo est conseillée pour contrôler les effets attendus. Deux études en particulier ont montré un transfert des acquis d'un entraînement perceptivo-cognitif sur le terrain (Gabbett, et al., 2008; Williams, et al., 2003). Des améliorations significatives de l'anticipation ont été observées après des périodes d'entraînement de 60 à 90 min et ont été confirmées à la fois en laboratoire mais également sur le terrain. Par exemple, Williams et ses collaborateurs ont examiné la capacité de transfert d'un entraînement perceptivo-cognitif spécifique chez des gardiennes de but de hockey sur gazon (Williams, et al., 2003). Parmi les 24 gardiennes de but, huit (groupe expérimental) ont été exposées à 45 min d'entraînement de simulation vidéo de tir de pénalité; huit (groupe placebo) ont été informées sur les habiletés techniques nécessaires pour le métier de gardien de but à travers 45 min de vidéo instructive; et huit (groupe contrôle) n'ont reçu aucune instruction ou entraînement particulier entre les tests pré- et post-entraînement. Une mesure d'anticipation a été conduite en laboratoire en utilisant des images de hockey grandeur nature. Une autre mesure d'anticipation a été obtenue sur le terrain en demandant aux gardiennes de but de répondre à des tirs de pénalité réels. Seules les participantes ayant reçu l'entraînement perceptivo-cognitif avaient amélioré significativement leur temps de réponse sur les tests d'anticipation en laboratoire et sur le terrain. Cependant, aucune différence dans l'efficacité de réponse n'avait été observée entre les groupes. Par conséquent, les auteurs ont conclu que seules les habiletés d'anticipation des gardiennes de but de hockey sur gazon pouvaient être améliorées suivant un entraînement de simulation vidéo de 45 min. Il est important de noter que ces joueuses ont été testées sur leur capacité à arrêter des tirs de pénalité, exercice qu'elles ne pratiquaient pas de façon habituelle puisqu'elles étaient toutes des joueuses de champ. Des

améliorations dans les capacités d'anticipation suivant un entraînement vidéo ont également été rapportés chez des joueurs de softball (Gabbett, et al., 2007). Une autre étude impliquant des joueuses de soccer a réussi à montrer un effet en laboratoire et sur le terrain suivant un entraînement perceptivo-cognitif basé sur des vidéoprojections à occlusion (Gabbett, et al., 2008). Les joueuses étaient cette fois évaluées dans leur domaine spécifique de compétences, selon des critères objectifs (passes, tirs ou dribbles). Bien que les auteurs se concentrassent sur la demande physiologique dans le sport, ils ont parallèlement recherché les effets d'un entraînement perceptivo-cognitif sur les capacités de prise de décision durant des jeux sur terrain réduit. Seize joueuses de soccer élites étaient également et aléatoirement distribuées dans un groupe expérimental et un groupe contrôle. Le groupe expérimental a été entraîné à regarder des séquences vidéo avec occlusion de matches de soccer internationaux durant douze séances d'entraînement (15 min chacune) distribuées sur 4 semaines. Les évaluations terrain étaient standardisées en utilisant des jeux réduits de 45 min durant lesquels les prises de décision dans les passes, dribbles et tirs étaient mesurées. L'outil d'évaluation pour les prises de décision a été adapté d'une étude précédente réalisée chez des joueurs de basketball (French & Thomas, 1987). L'entraînement vidéo a produit des améliorations dans la prise de décision des passes, des dribbles et des tirs sur le terrain. Alors que l'évaluation d'un groupe placebo aurait bénéficié à l'étude, il est intéressant de constater que le terrain réduit utilisé comme mesure de transfert semble approprié pour capturer les composantes dynamiques et stratégiques du soccer. En effet, un défi majeur pour étudier les effets d'un entraînement est de développer des mesures objectives et sensibles de transfert. Le soccer représente un environnement complexe et dynamique dans lequel les décisions doivent être prises sous des contraintes de temps et de pressions. En ce sens, le jeu réduit permet aux joueurs d'expérimenter des situations similaires à celles rencontrées dans les matches compétitifs tout en optimisant la durée de l'entraînement. Plus important, concernant l'évaluation de la prise de décision, le jeu réduit diminue l'espace et par conséquent la durée de temps pour répondre. Ce processus augmente le nombre d'opportunités pour la prise de décision et donc augmente le ratio de prises de décisions par joueur (Aguiar, Botelho, Lago, Maças, & Sampaio, 2012).

Dans un avenir proche, l'entraînement spécifique pourrait se spécialiser encore plus. En effet, des études ont montré que les capacités perceptivo-cognitives seraient spécifiques à la position de l'athlète dans son sport (Williams, Ward, Ward, & Smeeton, 2008). Il est bien

connu que dans certains sports comme par exemple le soccer, la demande physiologique imposée aux athlètes durant un match varie sensiblement en fonction de la position du joueur, amenant au développement de programmes d'entraînement physiques spécifiques à la position (Reilly, 2005). Il pourrait en être de même pour les capacités perceptivo-cognitives. Ainsi, Williams et ses collaborateurs ont montré que des défenseurs de soccer expérimentés avaient une meilleure capacité d'anticipation que des joueurs offensifs de même niveau indépendamment de la situation (défensive ou offensive) dans un paradigme de vidéoprojection d'action de soccer (Williams, et al., 2008). Cela pourrait s'expliquer par le fait que les joueurs défensifs sont continuellement engagés dans des jugements anticipatoires durant un match pour lire les intentions des adversaires et parer à n'importe quelles éventualités. À l'inverse, anticiper les intentions des partenaires et des adversaires pourrait être une faculté moins développée chez les joueurs offensifs. Ces derniers ont souvent la balle, et leur rôle consiste majoritairement à prendre des décisions. Pour répondre aux exigences de l'hyperspécialisation, l'utilisation du paradigme de mouvement biologique sous forme de projection virtuelle semble adéquate (Abernethy & Zawi, 2007; Bideau, et al., 2010; Ward, et al., 2002). De plus en plus d'études incorporent l'usage de la réalité virtuelle comme méthode pour créer un environnement immersif qui reproduit les situations spécifiques de match (Beier, 2001; Bideau, et al., 2010; Craig, Bastin, & Montagne, 2011). Cette technologie semble être utile pour améliorer la performance dans le sport (Carling, et al., 2009 chapitres 3 et 8). Pouvoir recréer des mouvements spécifiques critiques produits durant un sport (ex : direction d'une passe ou d'un tir au soccer) permettrait aux jeunes joueurs novices d'expérimenter ces situations à répétition. Cet entraînement favoriserait l'automatisation, l'anticipation et l'efficacité de réponse du joueur lors de son exposition à la situation dans l'environnement réel.

Les entraînements perceptivo-cognitifs existent depuis plusieurs années et ont montré leur efficacité dans différents types de sport. Bien que l'entraînement hyperspécialisé puisse être important dans le développement des joueurs, il semble atteindre ses limites chez les experts. En effet, l'entraînement spécifique vise à exercer une expertise déjà bien perfectionnée et donc moins susceptible de se développer. De plus, la plupart des outils utilisent des stimulations vidéo en deux dimensions qui ne capturent pas adéquatement la nature dynamique du sport (Mann, et al., 2007b). De ce fait, des entraînements perceptivo-cognitifs non-spécifiques

pourraient potentiellement faire intervenir des processus cognitifs plus vastes offrant ainsi des bénéfices plus importants, à condition qu'ils démontrent leur transférabilité.

2.2.2 Entraînement non-spécifique

2.2.2.1. Entraînement classique

L'approche utilisant des techniques contextuelles au sport de l'athlète présente certaines limites et a fait l'objet de critiques (Voss, et al., 2010). Certains psychologues du sport suggèrent que les programmes d'entraînement devraient aussi arborer une « fidélité cognitive » plutôt qu'une « fidélité physique » afin d'être efficaces. À ce jour, la plupart des paradigmes créés pour entraîner les capacités perceptivo-cognitives de façon non-contextuelle ont utilisé des tâches de contrôle inhibiteur « *go / no go* » ou multi-sensorielles et des temps de réaction de bas niveau de traitement cognitif (intelligym.com, dynavisioninternational.com/d2). Ces tests n'ont pas toujours été scientifiquement validés et répondent souvent mal à la demande cognitive hautement dynamique du sport. Par exemple, le programme IntelliGym™, développé par la compagnie Applied Cognitive Engineering Ltd., a été originellement créé pour entraîner les pilotes d'aviation (Gopher, Well, & Bareket, 1994). Le logiciel, nommé *Space Fortress*, est une simulation de basse fidélité, sous forme de jeu vidéo, destinée à simuler les mêmes habiletés cognitives que celles requises durant le pilotage d'avion. Le joueur doit faire des choix pour contrôler le mouvement d'un vaisseau spatial tout en visant et en tirant des missiles dans le but de détruire une forteresse. Le sujet doit également protéger le vaisseau d'éléments hostiles et gérer ses ressources. Le jeu trace un parallèle avec la demande requise lors de l'aviation. Par exemple, il implique le contrôle manuel, l'orientation visuo-spatiale, le traitement de l'information à court et à long-terme ainsi qu'une haute demande attentionnelle sous des contraintes de temps. Dans leur étude, Gopher et ses collaborateurs (1994) ont démontré qu'un entraînement de 10 h avec le jeu *Space Fortress* permettait d'améliorer la performance de pilotage de cadets de l'Air contrairement à des cadets non-entraînés (Gopher 1994). Cependant, l'étude ne présentait pas d'évaluation avant entraînement, ni de groupe placebo pour comparer les données. Depuis les travaux de Gopher

en 1994, aucune autre étude de transfert n'a été reproduite et ce, malgré l'adaptation du jeu au basketball et au hockey sur glace. Ces adaptations se déroulent à nouveau dans l'espace et impliquent toujours des vaisseaux. Toutefois, l'environnement est plus proche du sport (ex. : court de basketball ou patinoire spatiale). Alors qu'il existe de nombreux témoignages élogieux à propos du programme IntelliGym™ (<https://www.intelligym.com/>), aucune étude scientifique réalisée dans le cadre de la performance sportive n'a été publiée à ce jour. Toutefois, une étude d'IRMf a démontré qu'un entraînement de 30 h au jeu *Space Fortress* induisait une diminution de l'activité cérébrale (expliquée par une augmentation de l'efficacité des réseaux) dans les régions du cerveau liées à l'attention visuo-spatiale et aux actions motrices dirigées ainsi que dans le cortex préfrontal dorso-latéral (Lee, Voss, Prakash, Boot, Vo, Basak, Vanpatter, Gratton, Fabiani, & Kramer, 2012).

Récemment, Nike Inc. a développé une gamme de produit d'entraînement perceptuel et cognitif nommé *Nike SPARQ Sensory Performance*. Parmi les outils proposés, on retrouve notamment une paire de lunettes stroboscopiques répondant au nom de *Vapor Strobe*. Le port de ces lunettes permet de produire une vision intermittente, ou stroboscopique, qui interrompt le flux d'information visuelle et réduit l'information à disposition pour guider les mouvements (Appelbaum, Cain, Schroeder, Darling, & Mitroff, 2012). Par exemple, attraper une balle sous des conditions de vision stroboscopique force à extrapoler la scène seulement à partir de clichés visuels pour juger correctement de la trajectoire de la balle. Les individus doivent faire meilleur usage de l'information visuelle à leur disposition et pourraient ainsi devenir plus sensibles à d'autres sources d'information sensorielle. Certains scientifiques avancent que ce processus pourraient entraîner les habiletés perceptuelles et attentionnelles des athlètes, notamment celles supportant le contrôle visuo-moteur (Appelbaum, et al., 2012; Mitroff, Friesen, Bennett, Yoo, & Reichow, 2013). Plusieurs études ont évalué les effets de la vision stroboscopique sur la performance d'athlètes et montrent des résultats plutôt contradictoires. Tout d'abord, Appelbaum et ses collaborateurs (2011, 2012) ont entraîné des individus à lancer et attraper une balle en portant soit une paire de lunette stroboscopique (groupe expérimental), soit une paire de lunette transparente (groupe contrôle) (Appelbaum, et al., 2012; Appelbaum, Schroeder, Cain, & Mitroff, 2011). Dans l'étude de 2012, le port de lunettes stroboscopiques, par rapport aux lunettes transparentes, a favorisé la rétention de l'information dans la mémoire visuelle à court terme durant une tâche de mémorisation

(exécutée avant et après l'entraînement). En 2011, les mesures perceptivo-cognitives évaluées avant et après l'entraînement étaient l'attention spatiale, l'attention soutenue et la sensibilité visuelle. Le port des lunettes stroboscopiques a seulement révélé quelques améliorations dans la sensibilité au mouvement en vision centrale et dans les habiletés attentionnelles transitoires (Appelbaum, et al., 2012). Une autre étude a montré que l'entraînement stroboscopique permettait d'améliorer le temps anticipatoire, c'est-à-dire l'habileté à prédire l'endroit où un stimulus en mouvement se trouverait à un moment spécifique dans le temps (Smith & Mitroff, 2012). Enfin une étude pilote a évalué les effets de transfert sur le terrain chez des joueurs professionnels de hockey sur glace (Mitroff, et al., 2013). Les résultats montraient que le port de lunettes stroboscopiques durant 16 pratiques de hockey (10 min par pratique) permettait aux joueurs d'améliorer leur performance de 18% par comparaison à des joueurs s'entraînant sans lunettes. Cependant, l'étude présentait plusieurs points faibles tels que le nombre de joueurs utilisés (11 joueurs divisés en deux groupes) ou encore l'absence d'un groupe placebo et d'analyse à l'aveugle. Plus récemment, un groupe de chercheur indépendant a testé les effets du port de lunettes stroboscopiques durant un entraînement et n'a pas pu confirmer les effets bénéfiques sur la performance sportive telle qu'exposé précédemment (Wilkins & Gray, 2015). Outre ses lunettes stroboscopiques, le programme *Nike SPARQ Sensory Performance* propose également une station sensorielle dédiée à entraîner la prise de décision (tâche de « *go / no go* »), l'attention divisée, la perception de la profondeur ou encore la coordination œil-main (Poltavski & Biberdorf, 2015 ; <http://cdn.bernell.com/downloads/NikeSSS.pdf>). Les résultats d'une étude ont montré que certaines mesures du programme (perception dynamique et contrôle visuo-moteur) effectuées en début de saison pouvaient être corrélées avec la performance de joueurs de hockey sur glace (Poltavski & Biberdorf, 2015). La performance des joueurs était évaluée par les statistiques individuelles au cours de deux saisons. Cependant, aucune autre étude scientifique n'a évalué cet outil ou sa capacité de transfert sur le terrain. De plus, le produit est aujourd'hui retiré de la vente par la compagnie, après seulement deux années de mise sur le marché.

D'autre part, le système Dynavision™ D2 (Dynavision International LLC) est un produit qui permet d'évaluer la réactivité neuromusculaire. Il s'agit d'un outil d'entraînement des temps de réaction à la lumière, développé pour entraîner l'intégration sensorielle motrice à travers le système visuel. Il offre la possibilité d'évaluer les temps de réaction visuo-moteur

face à des stimuli (lumière) à la fois centraux et périphériques. La difficulté de traitement est graduellement ajustable. Ce système consiste en un tableau vertical ajustable (1,2 m x 1,2 m) qui possède 64 boutons cibles arrangés en 5 cercles concentriques qui peuvent s'illuminer pour servir de stimulus pour le participant (Figure 1-5). Une étude réalisée chez des jeunes adultes actifs (amateurs) entraînés au Dynavision™ D2 a montré une amélioration significative de leurs temps de réaction sur le système (Wells, Hoffman, Beyer, Jajtner, Gonzalez, Townsend, Mangine, Robinson, McCormack, Fragala, & Stout, 2014). Tel qu'évoqué précédemment, un entraînement cognitif doit montrer des effets bénéfiques en laboratoire et sur le terrain pour être efficace. À ce jour, aucune étude n'a tenté d'évaluer le transfert des acquis de l'entraînement au Dynavision™ D2 sur le terrain chez des athlètes. Cependant, Mangine et ses collaborateurs (2014) ont évalué le rôle de la vitesse de réaction visuo-motrice, mesurée avec ce système, dans la performance de joueurs de basketball (Mangine, et al., 2014). La vitesse de réaction visuo-motrice correspond au temps entre l'apparition du stimulus, la reconnaissance du stimulus par l'individu et la durée de temps nécessaire pour répondre au stimulus. Certains psychologues estiment que cette mesure serait en lien avec la performance athlétique. L'idée avancée est que les athlètes qui sont capables de reconnaître et répondre à un stimulus dans une période de temps plus courte seraient meilleurs. Or, les recherches montrant un tel lien avec la performance athlétique sont à ce jour plutôt équivoques (Kioumourtzoglou, Kourtessis, Michalopoulou, & Derri, 1998; pour revue Mangine, et al., 2014). Pour évaluer la performance athlétique, les chercheurs ont comptabilisé le nombre de passes, de pertes de balle et d'interceptions réalisées par les joueurs de basketball au cours de la saison. Ces caractéristiques sont prédictives de la survenue de la victoire et sont reliées à l'habileté des joueurs à simultanément porter leur attention sur les joueurs en mouvement, le ballon et le panier. Les individus qui excellent dans ce domaine possèdent plus de temps pour créer un jeu décisif et éviter les erreurs coûteuses. Le nombre de passes, de pertes de balle et d'interceptions réalisées au cours de la saison ont été corrélées à une mesure de temps de réaction visuo-motrice réalisée en début de saison. Les résultats ne montraient pas de corrélation entre les mesures de performance athlétique et le temps de réaction visuo-moteur des joueurs de basketball professionnels. Ce résultat était corroboré par une autre étude montrant que des joueurs de basketball grecs possédaient des habiletés d'attention sélective et prédictive supérieures à des non-athlètes, mais possédaient une capacité de temps de réaction

visuo-motrice comparable (Kioumourtzoglou, et al., 1998). Le système Dynavision™ D2 ne semble pas avoir le potentiel d'entraîner les capacités perceptivo-cognitives des athlètes puisque sa mesure n'est pas reliée à la performance athlétique mais plutôt à une caractéristique physique intrinsèque. En revanche, si les temps de réaction visuo-moteur ne semblent pas reliés à la performance athlétique, la capacité de traitement de scènes visuelles dynamiques (ou vitesse de suivi visuel) le serait. En effet, au cours de la même étude, cette capacité a été corrélée à la performance athlétique des joueurs de basketball (Mangine, et al., 2014). La mesure du traitement de scènes visuelles dynamiques était effectuée avec le 3D-MOT.

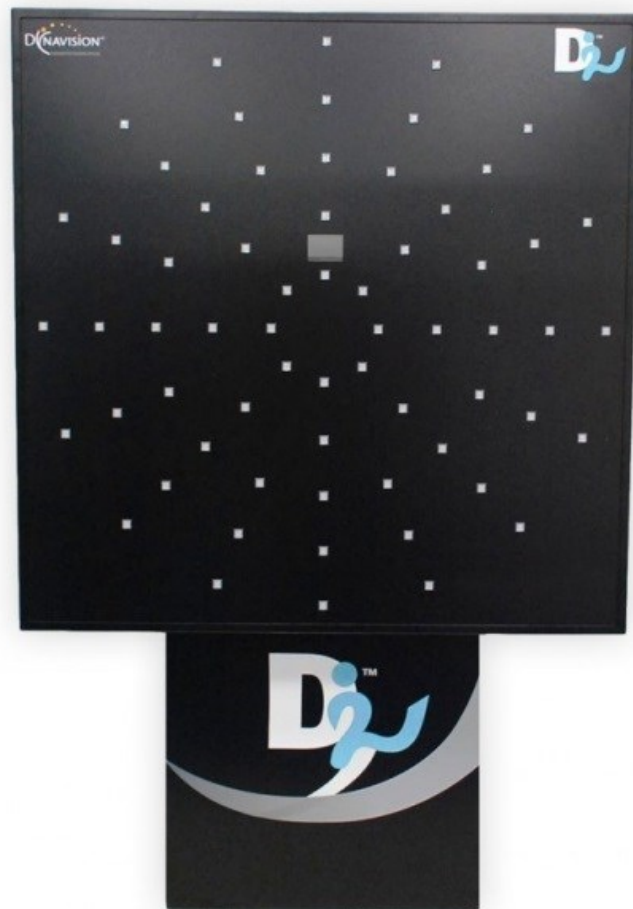


Figure 1-5. Le système Dynavision™ D2 pour entraîner les temps de réaction visuo-moteur (<http://dynavisioninternational.com/d2.html> ; reproduit avec la permission de Kirstie Swick)

2.2.2.2. 3D-MOT

Le paradigme de 3D-MOT, licencié sous le nom de NeuroTracker™ par Cognisens Athletics Inc., a été développé à l'université de Montréal et permet l'entraînement des capacités perceptivo-cognitives à travers des scènes visuelles dynamiques complexes dénuées de tout contexte sportif et de demande motrice (Faubert & Sidebottom, 2012). Brièvement, la technique standard du 3D-MOT, dite « *CORE* », consiste à suivre quatre cibles (des balles) en mouvement aléatoire dans un cube virtuel parmi un total de huit, les autres jouant un rôle distracteur. Les balles peuvent rebondir sur les parois de l'espace virtuel et se heurter entre elles. La stéréoscopie de l'espace virtuel est générée à l'aide de lunettes 3D à réseau alternant. Durant un essai de 3D-MOT, le sujet doit fixer un point rouge situé au centre du cube virtuel. Au début, 8 cibles sont immobiles et uniformes (Figure 1-6a). Quatre cibles d'intérêt deviennent rouges pendant 3 s afin que le sujet puisse les identifier adéquatement (Figure 1-6b). Ensuite, les 8 balles bougent aléatoirement pendant 8 s (Figure 1-6c) après quoi elles s'immobilisent. C'est à ce moment que les 4 cibles d'intérêt doivent être identifiées par le participant (Figure 1-6d). Finalement, le système révèle les bonnes réponses (Figure 1-6e). Après 20 essais, le seuil est estimé en calculant la vitesse moyenne des 4 dernières inversions. Chaque mesure de seuil (20 essais) dure environ 8 min. La vitesse de déplacement des cibles est augmentée après une bonne réponse et diminuée après une mauvaise réponse selon la méthode psychophysique de l'escalier (Levitt, 1971).

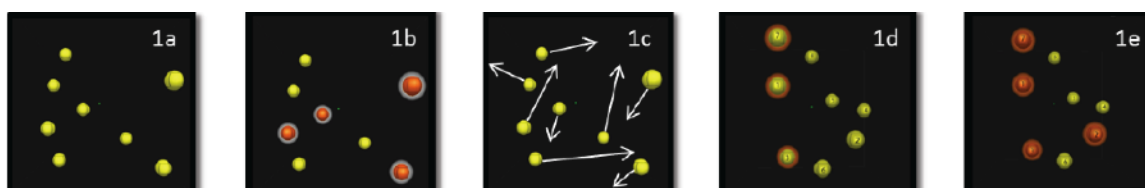


Figure 1-6. Mode « *CORE* » du 3D-MOT

La technique de 3D-MOT est une tâche de haut niveau cognitif stimulant un nombre important de réseaux neuronaux qui travaillent simultanément durant l'exercice. Elle sollicite notamment les réseaux impliqués dans l'intégration du mouvement complexe, l'attention distribuée,

soutenue et dynamique ainsi que la mémoire de travail (Faubert & Sidebottom, 2012). Pour des conditions optimales d'entraînement et pour maximiser les effets de transférabilité, la technique repose sur quatre caractéristiques critiques. Premièrement, le 3D-MOT implique la distribution de l'attention sur des cibles d'intérêt parmi des distracteurs (Figure 1-6). Le paradigme de MOT est une tâche de poursuite attentionnelle divisée qui évalue l'habileté du système visuel à suivre la position d'objets cibles en mouvement parmi d'autres objets. Durant une tâche de MOT, la performance est généralement mesurée en fonction du nombre d'objets suivis avec succès (Pylyshyn & Storm, 1988a). Alvarez et Cavanagh (2005) ont confirmé qu'il est possible de suivre un maximum de quatre objets en même temps mais que l'indexation spatiale permettant de suivre ces objets se limitait à deux index par hémichamp visuel (Alvarez & Cavanagh, 2005). Le modèle de ressource limitée nommé FINST développé par Pylyshyn et Storm tente d'expliquer la façon dont un individu suit les objets (Pylyshyn, 1989). Basé sur des mécanismes primitifs de la vision, le système visuel assignerait des indices pré-attentionnels à chaque élément à suivre. De plus, chacun de ces éléments fonctionnerait indépendamment (Pylyshyn, 1994). Un autre modèle suggère que les cibles sont groupées en un seul élément représenté par un polygone virtuel qui requiert un seul mécanisme attentionnel. Ce regroupement perdurerait durant le mouvement et faciliterait la poursuite (Yantis, 1992). Par la suite, un modèle plus récent proposé par Cavanagh et Alvarez suggère que le système visuel déploie un mécanisme attentionnel multifocal qui permet la poursuite de plusieurs objets en mouvement (Alvarez & Cavanagh, 2005). Les sports collectifs ou les sports d'action font appel à un suivi attentionnel de plusieurs éléments en mouvement tels que les autres joueurs ou le ballon. C'est pourquoi ils peuvent être apparentés à une tâche de MOT (Figure 1-7). D'ailleurs, une étude a révélé que la performance au MOT était supérieure chez des athlètes de volleyball comparés à des novices (Zhang, et al., 2009).



Figure 1-7. Illustration d'un gardien de soccer devant gérer plusieurs sources d'informations en mouvement comparables à l'exercice de MOT (avec la permission de Jocelyn Faubert)

Deuxièmement, l'ajout de la stéréoscopie au paradigme de MOT est crucial. La plupart des études retrouvées dans la littérature ont été réalisées avec des tâches de MOT en 2D projetées sur des écrans d'ordinateur de taille standard (Pylyshyn & Storm, 1988b; Trick, et al., 2005a; Trick, Perl, & Sethi, 2005b; Zhang, et al., 2009). Ces deux caractéristiques sont critiques dans la performance au 3D-MOT. En effet, l'utilisation de la 3D (vision stéréoscopique) permet de capturer la composante dynamique du sport. Cet ajout permet d'améliorer la performance par comparaison à une stimulation présentée sans disparité binoculaire (Tinjust, Allard, & Faubert, 2008; Viswanathan & Mingolla, 2002). Il semblerait que la perception stéréoscopique permette d'améliorer le suivi attentionnel en désambiguïsant les occlusions qui peuvent se produire dans des scènes visuelles dynamiques comme le 3D-MOT (Faubert & Allard, 2013).

De même, l'utilisation d'un large champ visuel est un aspect critique pour l'utilisation du 3D-MOT chez les athlètes. L'exercice se rapproche ainsi d'une situation de jeu réel où la plupart de l'action se produit dans le champ visuel périphérique de l'athlète (Knudson & Kluka, 1997). Enfin, le 3D-MOT mesure des seuils de vitesse sur une échelle continue comme variable dépendante traduisant la rapidité de poursuite visuelle individuelle. La vitesse a été définie comme une caractéristique critique de la performance au MOT (Feria, 2012) et une composante de performance athlétique (Mangine, et al., 2014).

2.2.2.3. Entraînement perceptivo-cognitif de 3D-MOT

Des études récentes ont révélé l'efficacité de ce nouveau type d'entraînement perceptivo-cognitif basé sur l'approche cognitive générale (Faubert, 2013; Faubert & Sidebottom, 2012; Legault & Faubert, 2012; Parsons, et al., 2014; Zaichkowsky, Faubert, & Beauchamp, 2012). Des jeunes adultes, des personnes âgées mais surtout des athlètes entraînés avec le 3D-MOT ont montré une amélioration de leur seuil de vitesse à la poursuite de cibles en mouvement (Faubert, Giroud, Tinjust, & Allard, 2009; Faubert & Sidebottom, 2012; Legault & Faubert, 2012). En entraînant 308 participants à cette tâche durant 15 sessions (environ 90 min), Jocelyn Faubert a démontré que le traitement de scènes visuelles dynamiques complexes et dénuées de contexte sportif était sensible au niveau de performance athlétique. En effet, la vitesse de suivi visuel et la capacité d'apprentissage des professionnels étaient supérieures à celle d'élites amateurs (niveau universitaire) dont la performance était également supérieure à celle de novices (Faubert, 2013). Le traitement mental et l'apprentissage rapide à travers des scènes visuelles dynamiques sont des éléments clés de la performance de haut niveau dans le sport. Une autre étude a évalué la vitesse de suivi visuel et l'apprentissage d'athlètes issus de différents sports d'invasion tels que le hockey, le rugby ou encore le soccer (Faubert & Sidebottom, 2012). Les résultats montraient que les athlètes, peu importe le sport pratiqué, répondaient de façon similaire à la tâche et que leur capacité d'apprentissage suivant l'entraînement était très semblable. Alors que les différents groupes d'athlètes effectuaient la tâche en posture assise, un groupe avait effectué la tâche en se tenant debout et montrait une performance inférieure possiblement due à une diminution des ressources disponibles pour effectuer l'exercice de suivi attentionnel.

Alors que les études d'entraînement au 3D-MOT ont révélé une capacité critique chez l'athlète, un projet récent a tenté d'évaluer la capacité de transfert de cet exercice sur une tâche d'intérêt social en utilisant le mouvement biologique (Legault & Faubert, 2012). Un groupe (expérimental) de personnes âgées a été entraîné durant 5 séances de 3D-MOT alors qu'un autre groupe (placebo) a été entraîné sur une tâche de contraste. Un dernier groupe (contrôle) n'a pas été entraîné. Les participants ont été évalués après l'entraînement sur une tâche de mouvement biologique qui consistait en une tâche de perception de la direction d'un mouvement locomoteur de marche. Les participants devaient indiquer la direction (droite, gauche) d'un patron de marche submergé par une quantité variable de bruit afin de modifier la difficulté de la tâche. Le groupe entraîné au 3D-MOT a montré une tolérance au bruit supérieure aux autres groupes à une distance de présentation du mouvement biologique de 4 m qui est reconnue comme critique dans l'évitement des collisions. Cette étude illustre pour la première fois une évidence d'un transfert du 3D-MOT en laboratoire sur une tâche d'intérêt sociale. Cette étude suggère fortement que l'entraînement au 3D-MOT stimule l'attention qui est reconnue comme un facteur limitant dans la perception du mouvement biologique (Parasuraman & Galster, 2013). Dernièrement, des évidences neurologiques ont permis d'explorer les effets du 3D-MOT sur les fonctions cognitives et l'attention (Parsons, et al., 2014). Parsons et ses collaborateurs ont entraîné des jeunes adultes (n=10) durant 10 séances de 3D-MOT alors qu'un autre groupe (n=10) n'était pas entraîné. Avant et après la période d'entraînement, tous les participants avaient complété des tests neuropsychologiques et d'électroencéphalographie quantitative. Les résultats ont révélé que l'entraînement au 3D-MOT améliorait l'attention, la vitesse de traitement de l'information visuelle et la mémoire de travail. De plus, les séances de 3D-MOT ont conduit à des changements d'activité de la fonction cérébrale correspondante à des fréquences impliquées dans l'attention (Theta/Beta), le traitement visuel et la plasticité (Gamma). Les auteurs suggèrent que le transfert des bénéfices du 3D-MOT devrait être observé dans des activités de la vie quotidienne suivant l'obtention de tels résultats.

Cependant, le transfert des acquis de l'entraînement perceptivo-cognitif de 3D-MOT n'a pas encore été évalué sur une tâche relevant du quotidien. Un des objectifs de la présente étude est de quantifier l'impact de cette approche cognitive sur l'anticipation et la prise de décision des athlètes. Dans le sport, un athlète doit être capable de lire et d'extraire l'information clé de la

scène visuelle pour prendre des décisions efficaces. La capacité de prise de décision se réfère à l'aptitude des individus à faire un choix et d'achever un but spécifique à partir d'une gamme de possibilités (Tucker & Collins, 2012b). Chez l'athlète, la prise de décision repose sur trois composantes majeures telles que la perception, la reconnaissance et les stratégies de décision. La composante perceptuelle représente les stratégies visuelles utilisées. Elle a souvent été étudiée à l'aide d'un oculomètre ou encore de patrons de points lumineux (voir chapitre « 1.1.1 Expertise contextuelle »). De manière générale, lorsque les experts sont confrontés à des scénarios requérant une prise de décision, ils ont besoin de moins de fixations de longues durées pour extraire l'information pertinente et donner une réponse plus efficace par rapport à des novices (Helsen & Starkes, 1999; Raab & Johnson, 2007). Les experts se reposent généralement sur des stratégies de recherche visuelle plus fines ainsi que sur une capacité d'attention divisée, sélective et soutenue supérieure (Bar-Eli, Plessner, & Raab, 2011; Vaeyens, et al., 2007). La composante de reconnaissance fait référence aux modèles internes des experts et peut être mise en évidence par des tests de mémorisation. Par exemple, les experts reconnaissent des patrons de situations plus rapidement et plus efficacement que des novices, sauf lorsque le patron représente une situation désorganisée (Gobet & Simon, 1996; Williams, et al., 2006). La composante décisionnelle reflète les stratégies de prise de décision et peut être mise en évidence en utilisant un paradigme de génération d'option durant lequel les athlètes doivent faire un choix intuitif et approprié selon la situation (Johnson & Raab, 2003; Raab & Johnson, 2007). Ces composantes de prise de décision pourraient être la cible de l'entraînement perceptivo-cognitif, en particulier la composante perceptuelle. Les programmes d'entraînement visuel classiques visant les fonctions optométriques n'ont pas montré leur effet sur la performance sportive et l'amélioration de la lecture du jeu (Abernethy & Wood, 2001; Starkes & Ericsson, 2003; Wood & Abernethy, 1997) sauf éventuellement dans le cas du baseball (Clark, Ellis, Bench, Khoury, & Graman, 2012; Deveau, Ozer, & Seitz, 2014; Laby, Rosenbaum, Kirschen, Davidson, Rosenbaum, Strasser, & Mellman, 1996). Une explication possible est que ces programmes n'incluent pas le traitement actif de l'information visuelle dynamique (Faubert & Sidebottom, 2012). En effet, les études réalisées dans le domaine du sport montrent que la détection et la réaction à un flash lumineux immobile ne différencient pas les experts des novices au contraire du traitement du mouvement complexe dans des scènes visuelles dynamiques (Kioumourtzoglou, et al., 1998; Mori, Ohtani, &

Imanaka, 2002). La technique de 3D-MOT qui sollicite notamment les réseaux impliqués dans l'intégration de mouvements complexes, l'attention distribuée, soutenue et dynamique et la vitesse de traitement de cibles en mouvement pourrait être cruciale pour aider à exécuter la prise de décision.

Les tâches perceptivo-cognitives spécifiques et générales se sont montrées sensibles à l'expertise des athlètes. Des mesures cruciales de transférabilité seront nécessaires pour comparer l'efficacité de ces exercices lorsqu'ils sont administrés sous forme d'entraînement. Des évaluations à plus long terme seront également utiles pour quantifier la capacité de rétention offerte par ces techniques. Enfin, il semble que les joueurs de soccer élites développent des capacités perceptivo-cognitives particulières dès l'âge de 9 ans (Ward & Williams, 2003). Récemment, l'âge auquel les joueurs devraient se spécialiser dans une position ou un sport en particulier a fait l'objet de nombreux débats (Berry, Abernethy, & Cote, 2008; Roca, Williams, & Ford, 2012). De même, l'âge auquel l'entraînement perceptivo-cognitif apporterait des bénéfices n'est pas connu, ou encore, le type d'entraînement, contextuel ou non, qui devrait être proposé en premier lieu demeure à explorer. Les réponses à ces interrogations apporteront les connaissances nécessaires en vue du développement et de l'identification de futurs talents.

3. Objectifs et hypothèses

3.1 Objectifs

- a. Mettre en évidence la supériorité des athlètes à travers une tâche spécifique à leur sport et une tâche du quotidien en utilisant le paradigme de mouvement biologique.
- b. Mettre en évidence et répliquer la supériorité des athlètes dans le paradigme de 3D-MOT.
- c. Évaluer la capacité de transfert de l'entraînement perceptivo-cognitif de 3D-MOT sur la prise de décision chez des joueurs de soccer.

3.2 Hypothèses

- a. Les athlètes devraient être plus performants que les non-athlètes sur la tâche spécifique à leur sport puisqu'ils sont meilleurs pour sélectionner les indices clés du mouvement (supériorité perceptivo-cognitive contextuelle). De plus, ils devraient montrer une aptitude supérieure pour discriminer la cinématique du corps humain lors d'une tâche plus générale puisqu'ils semblent meilleurs pour percevoir les mouvements effectués par les autres (supériorité non-contextuelle).
- b. Les athlètes devraient démontrer une capacité de traitement de scènes visuelles dynamiques complexes, dans le paradigme de 3D-MOT, supérieure à celle des non-athlètes puisque cette habileté semble reliée au niveau de performance athlétique.
- c. L'entraînement de haut niveau perceptivo-cognitif au 3D-MOT devrait améliorer la prise de décision dans les passes, les tirs et les dribbles chez les joueurs, comparés aux groupes non-entraînés.

Chapitre 2 : Article 1

Soccer athletes are superior to non-athletes at perceiving soccer-specific and non-sport specific human biological motion

Thomas Romeas & Jocelyn Faubert (2015), *Frontiers in Psychology, Movement Science and Sport psychology*, 6:1343, DOI: 10.3389/fpsyg.2015.01343

Abstract

Recent studies have shown that athletes' domain specific perceptual-cognitive expertise can transfer to everyday tasks. Here we assessed the perceptual-cognitive expertise of athletes and non-athletes using sport specific and non-sport specific biological motion perception tasks. Using a virtual environment, university-level soccer players and university students' non-athletes were asked to perceive the direction of a point-light walker and to predict the trajectory of a masked-ball during a point-light soccer kick. Angles of presentation were varied for orientation (upright, inverted) and distance (2m, 4m, 16m). Accuracy and reaction time were measured to assess observers' performance. The results highlighted athletes' superior ability compared to non-athletes to accurately predict the trajectory of a masked soccer ball presented at 2m (reaction time), 4m (accuracy and reaction time) and 16m (accuracy) of distance. More interestingly, experts also displayed greater performance compared to non-athletes throughout the more fundamental and general point-light walker direction task presented at 2m (reaction time), 4m (accuracy and reaction time) and 16m (reaction time) of distance. In addition, athletes showed a better performance throughout inverted conditions in the walker (reaction time) and soccer kick (accuracy and reaction time) tasks. This implies that during human biological motion perception, athletes demonstrate an advantage for recognizing body kinematics that goes beyond sport specific actions.

Keywords: perceptual-cognitive expertise, sport performance, point-light walker, point-light soccer, discrimination task, skill transfer

Introduction

In sport, expertise is defined as consistent superior athletic performance over an extended period (Wells et al., 2014). Sport science has demonstrated that some individuals can develop special expertise due to extensive experience to highly specific action patterns (Sparrow & Sherman, 2001). In this regard, elite athletes can be considered as a striking example of higher expertise in specific action recognition.

One of the most remarkable capacities of experts in sports is their ability to quickly and accurately determine the key characteristics of motion which is a fundamental property of the visual system (Dittrich, 1993; Sparrow & Sherman, 2001). A number of studies has reported that elite athletes possess superior perceptual-cognitive skills compared to sub-elite and/or novices in sports-specific tasks including advance visual cue utilization (Abernethy et al., 2001; Ward et al., 2002; Williams, 2000), pattern recall and recognition (Abernethy et al., 2005; Smeeton et al., 2004), visual search strategies (Vaeyens et al., 2007; Williams, 2000) and the knowledge of situational probabilities (North & Williams, 2008; Williams et al., 2006). Moreover, this perceptual-cognitive expertise has also been evoked and transferred in a sport-free context since athletes outperformed non-athletes in socially realistic multitasking crowd scenes involving pedestrians crossing streets (Chaddock et al., 2011) or in learning complex and neutral dynamic visual scenes (Faubert, 2013). Overall, perceptual-cognitive expertise has been widely reported using specific or context-free paradigms in different kinds of sports (e.g. Alves et al., 2013; Helsen & Starkes, 1999; Mann et al., 2007; Romeas et al., 2015; Starkes, 1987; Voss et al., 2010; Ward & Williams, 2003; Williams et al., 1999).

A number of studies have highlighted the perceptual-cognitive expertise of athletes in sport-specific context by using biological motion perception (BMP) tasks (e.g. Abernethy et al., 2001; Abernethy & Zawi, 2007; Calvo-Merino et al., 2010; Hohmann et al., 2011; Ward et al., 2002). The term BMP was first introduced by Johansson (1973) in an attempt to characterise the movement patterns obtained from humans or more generally from animate beings (Johansson, 1973). BMP involves the visual systems' capacity to recognize the kinematic presentation of the human or animal movements reduced to a few moving dots placed on the major joints of the body (Bellefeuille & Faubert, 1998; Ptito et al., 2003). When in motion, isolated points of light on the joint centers give a compelling impression of the action. This representation allows human observers to recognize complex actions spontaneously from

various animations such as a walking human. BMP enables us to determine what the observer perceives solely on kinematics, while other motion cues are eliminated (Sparrow & Sherman, 2001) and it was shown to be equally effective as when the full body contours are present during action (Bellefeuille & Faubert, 1998) or as when the information is displayed through a video presentation (Munzert et al., 2010). This task is recognized as a critical and fundamental ability of social relevance (Troje, 2002), and is a very strong dynamic cue that has been used, among others (for a review see Troje, 2013), for collision avoidance (Ouellette et al., 2009) or to highlight athlete expertise in sport science. Furthermore, biological motion studies have shown potential for the study of spatial characteristics of perception related to sport action (Abernethy & Parker, 1989; Ward et al., 2002; Wright et al., 2011) and has allowed researchers to assess perception of sport action within a life-sized virtual environment using stereoscopic displays (Bideau et al., 2010; Ida, 2012). The use of virtual stimuli gives the participant vital depth information and corresponds more closely to the players' perspective and behavior in real-life environments. For instance, it has been shown that walker dimensions corresponding to a different person at different distances from the observer varying from 1 to 16 meters can generate dramatic performance differences in some populations (Legault & Faubert, 2012; Legault et al., 2012). In sports, Bideau and colleagues showed that an interactive, immersive virtual handball court with a realistically animated handball player (from motion capture) throwing the ball toward the goal elicited expert handball goalkeeper responses similar to real-world responses (Bideau et al., 2003). Virtual reality involves stereoscopy (binocular disparity) which is required in situations where fast, complex and dynamic elements overlap (e.g. body joints in motion). For instance, stereoscopy has been shown to help disambiguate object occlusions when processing abstract dynamic visual scenes (Faubert & Allard, 2013). It is also suggested that stereoscopic information critically affects human perceptual motor performance. For instance, it has been shown that good stereo vision allows for significant learning enhancement during a tennis ball catching task when comparing to individuals with poor stereo acuity (Mazyn et al., 2007). Stereoscopy gives explicit depth cues that can help to disambiguate the perception of biological motion and avoid ambiguity (facing toward the viewer bias) in facing experiments (de Lussanet & Lappe, 2012; Jackson & Blake, 2010; Vanrie et al., 2004). To our knowledge, no study has yet to explore athlete's expertise in both sport-specific and non-sport specific BMP contexts using virtual reality.

In the present study, we aimed to assess the degree of expertise between soccer players and non-athletic young adults in a virtual environment with two biological motion facing tasks slightly different in nature: a point-light walker and a point-light soccer kick. Whereas one stimulus represents an everyday task, e.g. perception of a walking human, the other one belongs to a specific action pattern category that is thought to require some expertise for efficient processing. Evidence suggests that BMP should be influenced by the observers' familiarity with the recognized action (Calvo-Merino et al., 2010). Moreover, it is known that the human perceptual system can learn a very subtle BMP task, based solely on the previous visual experience, but also even more strongly on motor experience (Calvo-Merino et al., 2010). Here, we are interested to see if athletes' perceptual-cognitive expertise can also benefit to non-sport specific context as it was recently suggested that they are better at perceiving human body movements (Wei et al., 2011). Based on previous evidence, we hypothesized that athletes would perform better than non-athletes in predicting the trajectory of a masked soccer ball based solely on the body kinematics of the kicker (sport-specific expertise). In addition, we think that athletes' perceptual-cognitive expertise could expand to a greater general context such as the perception of a normal human walker's kinematics which is void of sport related action. Young soccer players and non-athlete adults were tested using the aforementioned biological motion facing tasks in which the angle and distance of presentation were varied in order to modify task difficulty (see Legault et al., 2012; Saunders et al., 2010).

Material and Methods

Participants

Fifty-nine adults participated in the study, including forty university soccer players and nineteen non-athletes. All subjects reported normal or corrected-to-normal vision (6/6 or better) with normal stereoacuity (50 sec of arc or better). Participant levels of physical activity are reported in Table 1. None of the subjects had previous experience with biological motion displays. The experimental protocol and related ethics issues were evaluated and approved by the Comité d'Éthique de la Recherche en Santé of Université de Montréal and were carried out in accordance with the World Medical Association Helsinki Declaration. All subjects were given verbal and written information on the study and gave their verbal and written informed consent to participate.

Table 2-1. Participants' information (\pm SEM)

Participant	n	Mean Age (years)	Hours of weekly physical training
Athletes	40	21.51 \pm 0.32	9.03 \pm 0.69
Non-athletes	19	24.21 \pm 0.50	1.42 \pm 0.41

Stimuli

The biological motion front-facing task (Figure 1) consisted of the discrimination of the direction (right or left) of a point-light walker and a point-light soccer kick. The point-light walker (Legault et al., 2013; Troje, 2008) and soccer kick (adapted from <https://www.mixamo.com/> motion capture studio) were dynamic representations of human forms and were made up of 15 black dots, which represented the head, shoulders, hips, elbows, wrists, knees, and ankles on a white background. Each dot had a diameter of 0.1 m. The height of the point-light walker and soccer kick was 1.80 m disposed at a virtual distance from the observer of 2, 4 and 16 m subtending 42, 24, and 6.4 degrees of visual angle, respectively. The duration of the presentation lasted for 1 s and contained 30 (walker) or 46 (soccer) frames. In the soccer task, the foot-to-ball contact moment was provided at 0.6 s. The inter-stimulus interval was 500 ms. Point-light walkers and soccer kicks were respectively presented walking or kicking leftward or rightward (forced choice paradigm). A constant stimuli procedure with random angles of presentation across trials was used for the point-light walkers (-6, -4, -2, 0, 2, 4, and 6 degrees from front-facing) and the point-light soccer kicks (-15, -8, -4, -2, 0, 2, 4, 8, and 15 degrees from front-facing). All of the angles were randomly presented forty times in each experimental block and their order of presentation varied according to the constant stimuli procedure. In each block, the distance and orientation was held constant. For each one of the two BMP tasks, there were six blocks in total that were classified according to distance (2, 4 and 16 m) and orientation (upright and inverted) such as 2 m upright, 4 m upright, 16 m upright, 2 m inverted, 4 m inverted, 16 m inverted.

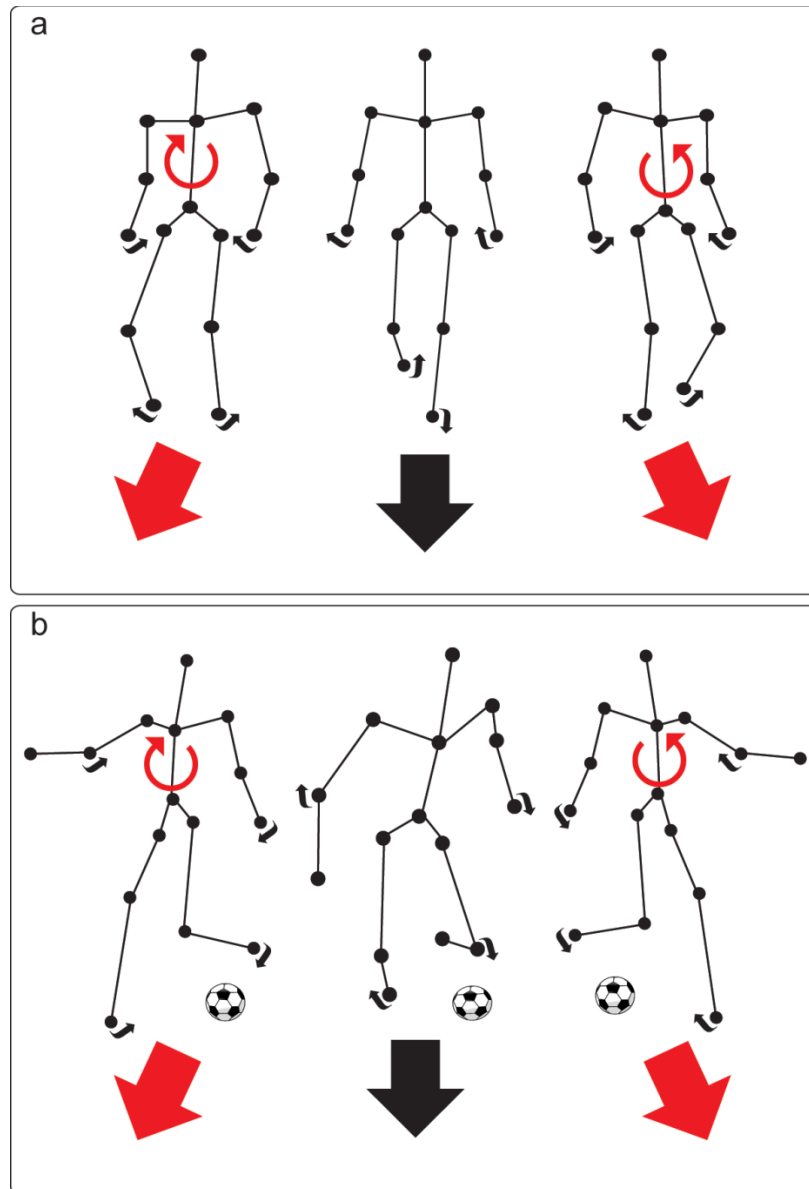


Figure 2-1. Front-facing biological motion perception tasks.

The connecting black lines and the balls are used here as a visual aid and were not presented during the experiment. a) The task consists of choosing whether an animated point-light walker is walking rightward or leftward from the subjects own vertical reference. In short, the task is to determine whether the walker's predicted path will end up to the left or the right of the subject's own vertical center of reference; b) The task consists of choosing whether an animated point-light soccer player is kicking a ball to the right or to the left of the subject's own vertical center of reference.

Procedure

Two sessions were used to separately evaluate the point-light walker and the point-light soccer kick tasks. One to seven days were allowed between each session. The order of session was randomized between subjects. During one session, each observer randomly started with either the blocks for the three upright distance conditions followed by the three inverted distance conditions or the opposite. The presentation of the blocks for the three distances was also randomized for each participant. A session lasted from about 45 min (walker) to 1 h (soccer) including small breaks (1min) between each one of the six blocks of presentation. Each participant sat at 1.2 m from the EON IcubTM's central wall with eye height at 1.45 m from the ground. They were asked to wear stereoscopic goggles and to fixate straight ahead. One practice block including 10 trials was then presented before each session, in which the participants had to efficiently and quickly identify between the direction of the point-light walker or the direction of the point-light soccer kick. As in the practice trial, each observer's task consisted of a forced choice paradigm by discriminating the point-light walker (walking leftward or rightward relative to the observer) and soccer kick's (kicking leftward or rightward relative to the observer) direction as efficiently and as quickly as possible, using an Xbox 360 controller including a left hand-button (left bumper for left answers) and a right hand-button (right bumper for right answers).

Analysis

Response accuracy

Procedure. Percentages of response accuracy for point-light walker and soccer kick were averaged across negative and positive corresponding angles because they were proportionally distributed (no bias was observed). For each participant and each condition, we plotted a fit using a non-linear regression (logistic function) with the software CurveExpert Professional 2.2.0. We then extrapolated the value corresponding to the just-noticeable difference (75% of response accuracy) in addition to the corresponding slope and used them as dependant variables (angular threshold and slope) to compare the two groups. We also extrapolated the value of response accuracy corresponding to the maximal angle of presentation (6 degrees for walker, 15 degrees for soccer kick) to compare upright and inverted condition because, in some inverted conditions, the just-noticeable difference was not reached. We performed the

analysis using IBM SPSS statistics v19. We used parametric tests when the homogeneity of variances (Levene's test) was non-significant. Otherwise, we used non-parametric tests.

Walker. A mixed-design analysis of variance (ANOVA) with repeated measures with the between-subject factor group (Athletes and Non-athletes) and the within-subject factor distances (2, 4 and 16 m) was applied on the angular threshold (for 75% of response accuracy). This was to compare the accuracy of performance between groups in the upright condition. Differences between groups were determined using independent t-tests for each distance of presentation. We used non-parametric Mann-Whitney U tests on the slope values to compare differences between groups.

Soccer kick. We used non-parametric Mann-Whitney U tests on the angular threshold values (for 75% of response accuracy) to compare differences between groups for each distance of presentation in the upright condition. A mixed-design ANOVA with repeated measures with the between-subject factor group (Athletes and Non-athletes) and the within-subject factor distances (2, 4 and 16 m) was applied on the slopes. We used independent t-tests to determine differences between groups. Moreover, three non-athletes participants were not taken into account throughout this analysis because their score did not reach the just-noticeable difference due to the difficulty of the task.

Walker vs Soccer kick. A repeated measures ANOVA with the within-subject factors tasks (walker, soccer kick) and distances (2, 4 and 16 m) was applied on the angular threshold (for 75% of response accuracy) and slope.

Inversion effect. A mixed-design analysis of variance (ANOVA) with repeated measures with the between-subject factor group (Athletes and Non-athletes) and the within-subject factor distances (2, 4 and 16 m) and orientations (upright, inverted) was applied on response accuracy (for maximal angle) for the walker task to mainly confirm the inversion effect. Differences between groups were determined using independent t-tests for each distance of presentation in the inverted condition. To assess the inversion effect in the soccer kick task, a non-parametric Wilcoxon test was used to compare the response accuracy (for maximal angle) between upright and inverted conditions for each distance of presentation. Differences in the inverted condition between groups were determined using a Mann-Whitney U test for each distance of presentation.

Reaction time

Procedure. Reaction time of each participant was averaged for distance (2, 4, 16m) and orientation (upright, inverted) conditions. To perform the analysis, we used parametric tests when the homogeneity of variances was non-significant (Levene's test). Otherwise, we used non-parametric tests.

Walker. We used a non-parametric Mann-Whitney U test to compare differences in reaction time between groups for each distance of presentation in the upright condition.

Soccer kick. A mixed-design ANOVA with repeated measures with the between-subject factor group (Athletes and Non-athletes) and the within-subject factor distances (2, 4 and 16 m) was applied on the reaction time. Differences between the two groups were determined using independent t-tests for each distance of presentation in the upright condition.

Walker vs Soccer kick. A repeated measures ANOVA with the within-subject factors tasks (walker, soccer kick) and distances (2, 4 and 16 m) was applied on the reaction time.

Inversion effect. To assess the inversion effect in the walker task, a non-parametric Wilcoxon test was used. Differences in the inverted condition between groups were determined using a Mann-Whitney U test for each distance of presentation. For the soccer kick task, a mixed-design analysis of variance (ANOVA) with repeated measures with the between-subject factor group (Athletes and Non-athletes) and the within-subject factor distances (2, 4 and 16 m) and orientations (upright, inverted) was applied, mainly to confirm the inversion effect. Differences between groups in the inverted condition were determined using independent t-tests for each distance of presentation.

Results

Response accuracy (Table 2)

Walker. The analysis of angular thresholds revealed a significant interaction between distances x groups which reflected a difference in BMP between the groups for the different distances of presentation ($F[2,114]=4.586$, $p=0.012$, $\eta^2=0.074$; Figure 2A). Independent t-tests showed a significant difference in BMP between groups at 4m of distance ($t[57] = -2.051$, $p=0.045$), a nearly-significant difference at 2m of distance ($t[57] = -1.934$, $p=0.058$), and no significant difference at 16m ($t[57] = 0.276$, $p=0.783$). The slope analysis demonstrated a significant

difference in BMP between groups at 4m of distance ($U=257.0$, $p=0.046$) but no significant difference at 2m ($U=300.0$, $p=0.194$) and 16m ($U=307.0$, $p=0.236$).

Soccer. The analysis of angular thresholds demonstrated a significant difference in BMP between groups at 4m ($U=211.0$, $p=0.048$) and 16m of distance ($U=176.0$, $p=0.009$) but not at 2m ($U=231.5$, $p=0.108$; Figure 2B). Whereas there was no significant interaction between distances x groups ($F[2,108]=1.772$, $p=0.175$, $\eta^2=0.032$), there was a significant difference in the slopes between groups at 4m ($t[54] = 2.085$, $p=0.042$) and 16m of distance ($t[54] = 2.847$, $p=0.006$) but not at 2m ($t[54] = 1.709$, $p=0.093$).

Walker vs Soccer kick. The analysis of angular thresholds revealed a strong significant effect of the task ($F[1,55]=50.414$, $p<0.001$, $\eta^2=0.478$) which highlighted the complexity of the soccer kick task compared to the walker task. There was also a general significant effect of distances ($F[2,110]=4.980$, $p=0.009$, $\eta^2=0.083$). The analysis of slopes demonstrated the same effects for task ($F[1,55]=162.613$, $p<0.001$, $\eta^2=0.747$) and distances ($F[2,110]=9.209$, $p<0.001$, $\eta^2=0.143$). Participants' individual performance for the two tasks has been plotted (Figure 3A).

Inversion effect. A strong significant effect of orientation (upright, inverted) was revealed throughout the walker task ($F[1,57]=187.428$, $p<0.001$, $\eta^2=0.767$). However, there was no significant difference between groups in the inverted condition at 2m ($t[57] = 1.457$, $p=0.151$), 4m ($t[57] = 1.582$, $p=0.119$) and 16m ($t[57] = 0.900$, $p=0.372$). The same inversion effect was demonstrated in the soccer kick task at 2m ($Z=-6.028$, $p<0.001$), 4m ($Z=-5.646$, $p<0.001$) and 16m ($Z=-5.878$, $p<0.001$) of distances. Contrary to the walker task, there was a difference between groups in the response accuracy at 2m ($U=233.0$, $p=0.017$), 4m ($U=225.0$, $p=0.012$) and 16m ($U=247.5$, $p=0.031$) in inverted condition.

Table 2-2. Mean (\pm SEM) response accuracy (angular threshold [75%], slope and response accuracy for maximal angle) between groups in the two tasks.

Response accuracy								
Point-light		Walker			<i>p value</i>	Soccer kick		<i>p value</i>
Group		Athletes	Non-Athletes	Athletes		Non-Athletes		
Distance and orientation	– Angular threshold (just-noticeable difference in °) for 75% of response accuracy							
	– Slope							
	2m Upright		2.25 \pm 0.16	2.86 \pm 0.32	~*0.058	10.08 \pm 0.87	21.30 \pm 4.80	0.108
			10.47 \pm 0.84	8.61 \pm 1.18	0.194	3.43 \pm 0.36	2.35 \pm 0.43	0.093
	4m Upright		1.69 \pm 0.14	2.24 \pm 0.25	*0.045	9.64 \pm 0.94	20.21 \pm 4.76	*0.048
			14.44 \pm 1.20	10.10 \pm 1.24	*0.046	3.30 \pm 0.27	2.31 \pm 0.30	*0.042
	16m Upright		1.76 \pm 0.13	1.69 \pm 0.16	0.783	8.01 \pm 0.62	18.08 \pm 3.46	*0.009
			12.75 \pm 1.03	10.94 \pm 1.63	0.236	4.23 \pm 0.41	2.28 \pm 0.39	*0.006
	– Response accuracy (%) at			6°		15°		
	2m Inverted		77.62 \pm 2.51	70.83 \pm 4.45	0.151	71.85 \pm 2.66	60.21 \pm 2.49	*0.017
4m Inverted		76.36 \pm 2.65	68.57 \pm 4.69	0.119	71.74 \pm 2.55	60.70 \pm 3.18	*0.012	
16m Inverted		63.89 \pm 2.51	60.18 \pm 2.98	0.372	72.14 \pm 2.72	61.95 \pm 2.85	*0.031	

*: $p < 0.05$

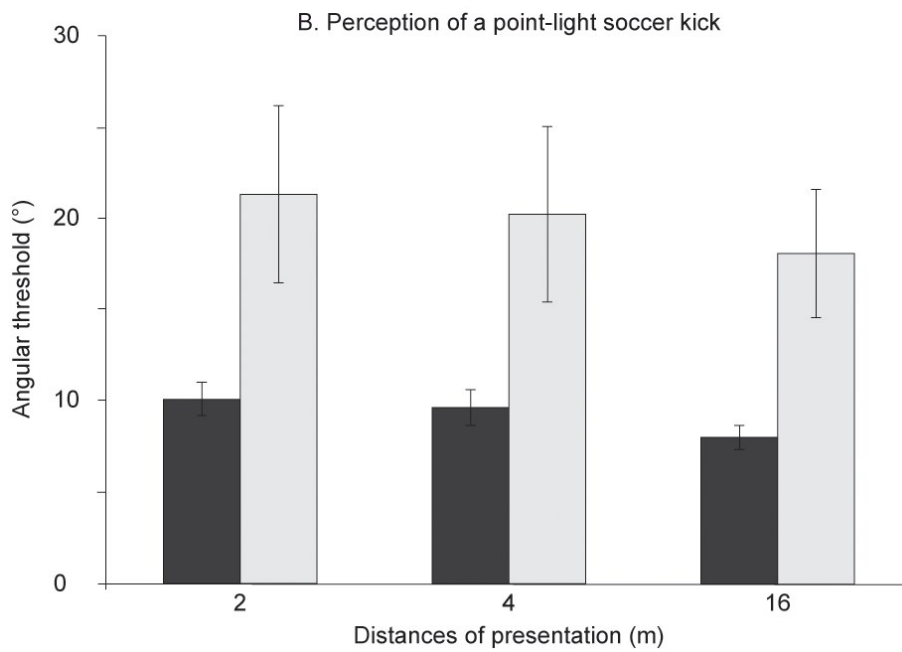
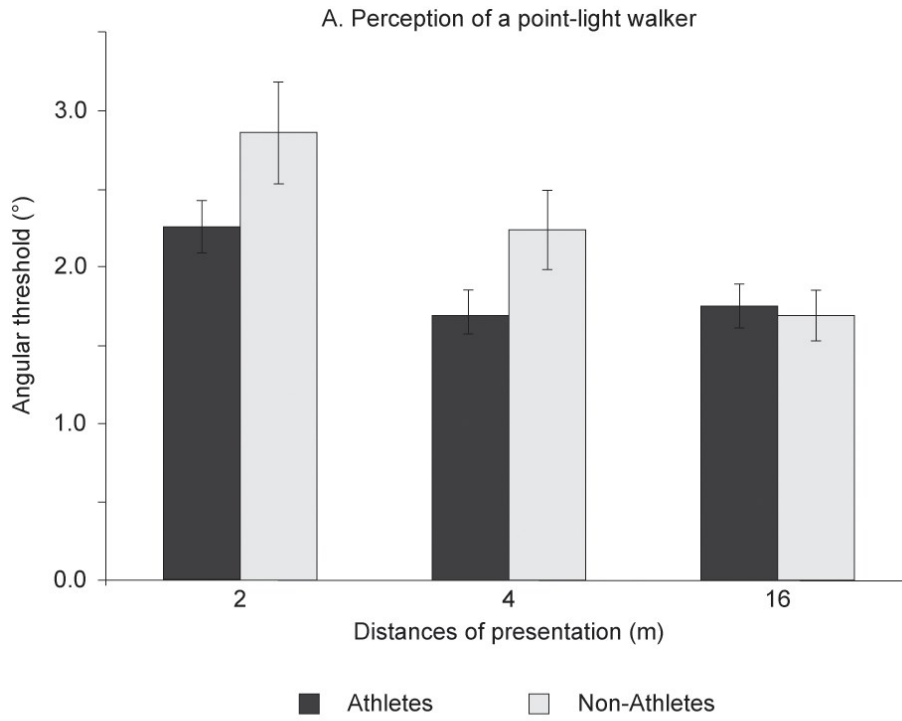


Figure 2-2. Athletes and non-athletes' angular threshold (mean) extrapolated from response accuracy to the direction of a: A) point-light walker and B) point-light soccer kick for multiple distance of presentation.

Reaction time (Table 3)

Walker. The analysis demonstrated a significant difference between groups at 2m ($U=141.0$, $p<0.001$), 4m ($U=200.0$, $p=0.004$) and 16m ($U=243.0$, $p=0.026$) of distance.

Soccer. Whereas there was no significant interaction between distances x groups ($F[2,114]=0.686$, $p=0.506$, $\eta^2=0.012$), there was a significant difference between groups at 2m ($t[57] = -2.416$, $p=0.019$) and 4m ($t[57] = -2.304$, $p=0.025$) but not at 16m ($t[57] = -1.505$, $p=0.138$) of distance.

Walker vs Soccer kick. There was a strong significant effect of the task ($F[1,58]=230.431$, $p<0.001$, $\eta^2=0.799$) which highlighted the complexity of the soccer kick task compared to the walker task. There was also a general significant effect of distances ($F[2,116]=3.309$, $p=0.040$, $\eta^2=0.054$). Participants' individual performance for the two tasks has been plotted (Figure 3B).

Inversion effect. A significant inversion effect was demonstrated in the walker task at 2m ($Z=-2.914$, $p=0.004$), 4m ($Z=-2.657$, $p=0.008$) and 16m ($Z=-4.499$, $p<0.001$) of distances. Moreover, there was a significant difference between groups in the inverted condition at 2m ($U=246.0$, $p=0.030$), 4m ($U=232.0$, $p=0.016$) and 16m ($U=230.0$, $p=0.015$). A significant effect of orientation was also revealed throughout the soccer task ($F[1,57]=4.736$, $p=0.034$, $\eta^2=0.770$). In addition, there was a significant difference between groups in the inverted condition at 2m ($t[57] = -2.680$, $p=0.010$) and 16m ($t[57] = -2.179$, $p=0.033$) but not at 4m ($t[57] = -1.654$, $p=0.104$).

Table 2-3. Mean (\pm SEM) reaction time between groups in the two tasks.

Reaction time (s)							
Point-light		Walker		<i>p value</i>	Soccer kick		<i>p value</i>
Group		Athletes	Non-Athletes		Athletes	Non-Athletes	
Distance and orientation	2m Upright	0.63 \pm 0.02	0.83 \pm 0.05	*0.000	1.02 \pm 0.03	1.14 \pm 0.05	*0.019
	2m Inverted	0.73 \pm 0.03	0.91 \pm 0.07	*0.030	1.12 \pm 0.06	1.31 \pm 0.07	*0.010
	4m Upright	0.65 \pm 0.02	0.81 \pm 0.04	*0.004	1.04 \pm 0.03	1.18 \pm 0.07	*0.025
	4m Inverted	0.72 \pm 0.03	0.91 \pm 0.08	*0.016	1.05 \pm 0.03	1.14 \pm 0.04	0.104
	16m Upright	0.63 \pm 0.02	0.72 \pm 0.04	*0.026	1.03 \pm 0.03	1.11 \pm 0.06	0.138
	16m Inverted	0.74 \pm 0.03	0.90 \pm 0.08	*0.015	1.09 \pm 0.03	1.19 \pm 0.04	*0.033

*: $p < 0.05$

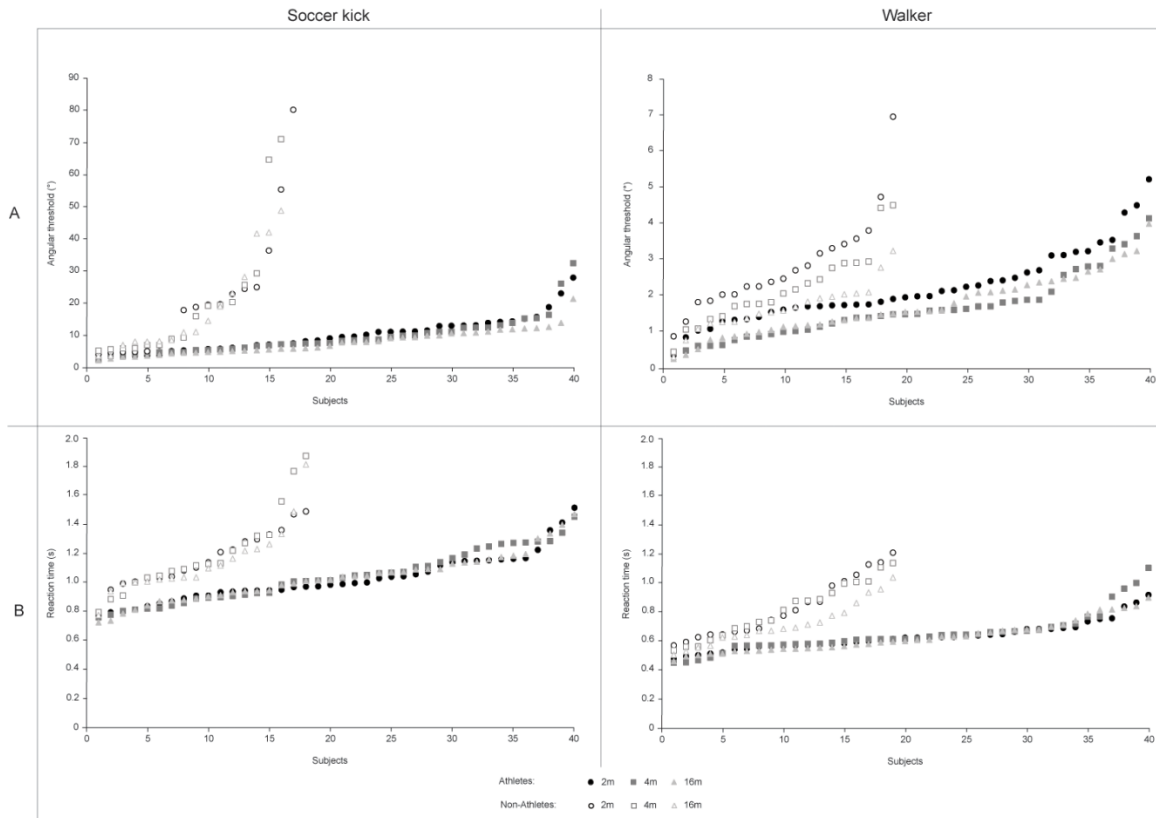


Figure 2-3. Representation of response accuracy and reaction time as a function of each subject.

A. Athletes and non-athletes' individual angular threshold as a function of subject for the soccer kick (left) and the walker (right) tasks; B. Athletes and non-athletes' individual reaction time as a function of subject for the soccer kick (left) and the walker (right) tasks.

Discussion

For the first time, the present study explored the level of expertise of young adult soccer players and non-athlete adults in both sport-specific and non-sport specific BMP contexts by using a 3D point-light walker and soccer kick. As expected, athletes performed better than non-athletes throughout the domain-specific task (soccer kick); but more interestingly, they also showed a greater performance than non-athletes towards a more fundamental and common task such as the facing discrimination of the direction of a human walker. This was particularly obvious when the participant was tested at the critical distance for collision

avoidance (4m). Athletes also demonstrated higher performance than non-athletes in inverted conditions. We did not find a speed-accuracy tradeoff between the two groups, however, soccer players produced more correct answers within shorter reaction times which highlighted their superior performance. According to these results, athletes appear to demonstrate a general, non-sport specific, perceptual-cognitive advantage that benefits to the recognition of human body kinematics in everyday life.

Sport specific expertise

The results obtained from the point-light soccer kick task demonstrated that experts were more accurate (4m, 16m) and faster (2m, 4m) than non-athletes in predicting the direction of the soccer kick. This result confirms previous literature, which showed evidence of athlete's perceptual-cognitive expertise in sport-specific environment. Examples using BMP have shown that racquet sport experts showed better prediction accuracy on stroke direction than non-experts (Abernethy et al., 2001; Abernethy & Zawi, 2007; Ward et al., 2002) and that professional basketball players were faster and more accurate than novices in recognizing basketball dribbles (Hohmann et al., 2011). Results from those studies suggested that the perceptual-cognitive advantage is directly related to the athletes' superior pick-up of essential kinematic information. In our soccer kick experiment, the main difficulty was to be able to predict the direction of the kick from the kinematic of the body motion alone because the ball was masked. In a similar experiment using the French bowling game of 'pétanque', Munzert and colleagues (2010) tested participant's prediction of the length of ones throw (Munzert et al., 2010). The movement was displayed explicitly; however the outcome was masked and left for the participant to anticipate. The authors argued that the prediction of the outcome had to be extrapolated, because no direct information was available on the ball trajectory. Participants clearly rely on body movement features when predicting object properties that occur subsequent to the movement. In soccer, but also in racquet ball games, there is insufficient time to fully analyse the trajectory of the ball before making a preparatory response for a return shot. Consequently, perceptual expertise is reliant on the anticipation based on an opponents' bodily movements and thus experts are able to identify these important cues prematurely (Wright et al., 2011). One potential mechanism given for the process of anticipation is that the observer simulates the observed actions by using a predictive forward simulation which estimates the sensory effects of a movement. The prediction is suggested to

be based on one's movement experience and/or the observer's own motor representations (see Bischoff et al., 2015). In a recent fMRI study, Bischoff and colleagues identified the core components of the anticipation network throughout an anticipatory task of boules' throw (Bischoff et al., 2015).

Moreover, when taking a closer look at the observer's reaction times in discriminating the kick direction, the results indicate that about 1 s is sufficient for the athlete to make a decision whereas a non-athlete needs about 1.15 s. Knowing that the foot-to-ball contact point of the task was settled at 0.6 s and that 0.15 s is usually necessary for the visual system to give a visuo-motor response, the result indicated that athletes were able to answer shortly afterwards foot-to-ball contact while non-athletes had to wait until the end of the movement when no other visual information was given about the ball trajectory. This is confirmed by the individual data which showed that the fastest soccer players were able to answer within 0.8 s indicating that the foot-to-ball contact was the key moment for the decision to be elicited. It has already been demonstrated that goalkeepers who are shown films of penalty kicks can anticipate the location of where the ball will arrive at levels above chance before foot-to-ball contact (Savelsbergh et al., 2002; Savelsbergh et al., 2005).

In addition, the result of the soccer experiment also supports that BMP is learned through experience. From BMP studies, innate predisposition of the visual system for BMP (with orientation specificity) have been found in naïve newborn babies (Simion et al., 2008). But it is rather suggested that BM sensitivity depends on prior exposure or familiarity with a stimulus. In fact, a number of studies have shown that visual and motor expertise enhanced BMP (Calvo-Merino et al., 2010; Casile & Giese, 2006). Furthermore, it was also demonstrated that an individual's own motor representations are activated more effectively by more familiar movements (Bischoff et al., 2012). Our study supports that an individuals' involvement in soccer increased BMP for soccer-specific kinematic scenes.

General perceptual-cognitive expertise

In addition, a more striking result revealed that soccer players were also superior to non-athletes in accurately (~2m, 4m) and rapidly (2m, 4m, 16m) discriminating motion direction in the front-facing BMP point-light walker task, in particular for distances which are critical for collision avoidance (Legault et al., 2012). Compared to non-athletes, their accuracy was also more consistent across the different distances of presentation which manifests a better

capability to perceive body kinematics whether it is presented at close or far distances. The human walker is a general and common kinematics that both athletes and non-athletes are exposed to in their daily lives. They can be both considered as expert perceivers of human walkers. However, the result of our experiment reveals that athlete's perceptual-cognitive expertise advantage generalizes to the perception of 'non-sport specific' body kinematics.

A number of studies have observed that sport expertise is linked with fundamental cognitive and perceptual functions outside the sport-specific domain (Nougier et al., 1991). It is well accepted that physical activity enhances brain plasticity and improves cognitive and executive functions (for recent reviews see Erickson et al., 2013; Vivar et al., 2013). For example, a significant correlation has been demonstrated between the results from the executive functions tests (neuropsychological assessment tool) versus the number of goals and assists the players had scored two seasons later (Vestberg et al., 2012). The authors suggested that results in cognitive function tests predict the success of top-soccer players. Furthermore, higher order cognitive function have been suggested to be relevant in identifying new talent and development in youth soccer players (Verburgh et al., 2014). Other studies have revealed that athletes outperformed non-athletes in socially realistic multitasking crowd scenes involving pedestrians crossing streets (Chaddock et al., 2011). It was suggested that cognitive skills trained in sport may have transferred positively on to everyday multitasking abilities. Another example showed athletes' superiority in learning complex and neutral dynamic visual scenes using the 3D-MOT task (Faubert, 2013). The results showed a clear distinction between the level of athletic performance and corresponding fundamental mental capacities for learning an abstract and demanding dynamic scene task void of sports context. The two last-cited paradigms intended to activate and measure the higher-level cognitive abilities subserved by the central nervous system which may play a more general, rather than specific role in sport expertise (Voss et al., 2010). According to our results on BMP with the point-light walker scenario, we can hypothesise that the involvement in a sport activity, e.g. soccer, would transfer advantages to other tasks such as BMP, thus improving BMP sensitivity.

This result is supported by imagery studies showing that BMP induced a selective activation of the brain, especially in the superior temporal sulcus (STS) (Oram & Perrett, 1994; Ptito et al., 2003; Vaina et al., 2001). This region is part of the action observation network (AON), a system that is involved in action perception. The AON is comprised of the inferior frontal

gyrus, the dorsal premotor cortex, the inferior parietal cortex, the superior parietal cortex, the inferior parietal sulcus, the primary somatosensory cortex, the posterior medial temporal gyrus, the fusiform face/body area, the visual area V5 and more recently the cerebellum (Balser et al., 2014a; Balser et al., 2014b; Caspers et al., 2010). Studies on expertise investigated how the acquisition of a skilled action (e.g. sport moves) affects AON activity while observing the same movement. Those studies revealed a stronger activation for experts in comparison to novices not limited to the AON but recruiting also other brain regions (Balser et al., 2014a; Balser et al., 2014b; Turella et al., 2013). For instance, Balser and colleagues demonstrated an increased activation in areas that subserve the AON following anticipation of tennis strokes in experts and novices (Balser et al., 2014b). Interestingly, they showed a stronger activation in experts compared to novices demonstrating that neural processing of anticipation depends on the expertise level. At the same time, the expert group outperformed novices on the behavioral level (anticipation task). Moreover, in another study, Balser and colleagues identified the superior parietal cortex as a structure for the processing of domain-specific contextual information (e.g. a domain-specific motor repertoire built up with experience) and the cerebellum as a structure for the storage of internal forward models that allow a rapid prediction of the action outcomes (Balser et al., 2014a). Recently, an imagery study in athletes and non-athletes revealed an increase in thickness of the STS, which was shown to be correlated to the level of sports training (Wei et al., 2011). All of the evidence suggests that the athletes are much better at perceiving movements performed by others, even when insufficient perceptive information is provided.

Inversion effect

Regarding the inversion effect, our results are consistent with previous studies, showing a better performance (accuracy and reaction time) for the upright condition than for the inverted condition (Dittrich, 1993; Legault et al., 2012; Pavlova & Sokolov, 2000). This inversion effect is generally attributed to global representations learned in a particular orientation. To exemplify this phenomenon called ‘face inversion effect’, upright faces are more accurately and rapidly recognized when presented in their canonical orientation rather than presented upside-down (Yin, 1969).

Furthermore, the performance during inverted conditions was slightly better in athletes than non-athletes for point-light walker (reaction time) and soccer kick (accuracy and reaction

time) tasks. It has recently been revealed that soccer players exhibit enhanced visual-spatial abilities such as faster reaction time to process rotated embodied stimuli compared to non-athletes (Jansen et al., 2012). Those previous results are further supported by our own data.

Exploring expertise using BMP

In the present study, we also demonstrated that the levels of performance (accuracy and reaction time) to discriminate a point-light walker compared to a point-light soccer kick task were strongly different. Mainly to avoid ceiling effect caused by expertise, we decided to use point-light motions requiring different types of expertise ranging from a complex sport-specific environment to a motion we perceive in our every-day life. Earlier, Dittrich (1993) had shown that locomotory actions such as walking were recognised more accurately and faster than social and instrumental actions such as dribbling a basketball or boxing (Dittrich, 1993). The results of the present study support Dittrich's findings. It is known that observers rely mostly on the feet to discriminate left from right-facing point-light walkers (Chang & Troje, 2009; Saunders et al., 2010; Troje & Westhoff, 2006). Other evidence have shown that experienced and naive observers can also use information about the body structure (global analysis of the entire human body) to judge the walking direction during a facing task from time-scrambled sequences (Lange & Lappe, 2007) or even from static ('snapshots') stimuli (Reid et al., 2009). An interesting question to address in the future would be to assess whether athletes are superior to non-athletes in the total absence of kinematics while using the same static stimuli as in the Reid and colleagues study. On the other hand, discriminating the direction of a soccer kick may require different sources of information. Evidence from film analysis and eye tracker studies suggested that experts relied on local information to anticipate the penalty kick from a striker. Generally, the local motion was defined by the orientation of the non-kicking foot (Franks & Hanvey, 1997; Savelsbergh et al., 2002; Savelsbergh et al., 2005). However, within the same studies, fixation on local information represented only a small portion of total fixation duration and motion information was picked up by the periphery in areas off of the foot and ball region (Savelsbergh et al., 2002; Savelsbergh et al., 2005). This evidence suggests that, the anticipation of a kick does not simply rely on local information illustrated by the angle of the non-kicking foot. In fact, the action of kicking a ball while maintaining stability is a complex kinematic that involves the participation of the arms, legs, torso and head; therefore, motion components may be distributed across the body rather

than localized to a particular limb segment as reflected while walking. Diaz and colleagues (2012) identified a list of sources of information used by subjects to judge the direction of a kick: the yaw angle of the hips, contact yaw, and two sources of distributed information (Diaz et al., 2012). They suggested that kick direction was perceived on the basis of distributed information, possibly in conjunction with a reliable source of local information (e.g. contact yaw). Distributed (soccer) versus local (walker) information could help explain the differences observed between our two BMP tasks.

Furthermore, we used varying angles of presentation throughout BMP paradigms to avoid ceiling effect. As shown earlier by Saunders and colleagues (2010), varying viewing angles produces a change in accuracy; such that near frontal views (e.g. close to 0 degrees) induced a lower level of response accuracy than more side views (e.g. 15 degrees) (Saunders et al., 2010). Taken together, the results confirmed that varying the viewing angle during a facing task and the nature of the task increases BMP difficulty and therefore is an appropriate technique to explore levels of expertise in human.

Conclusion

Throughout this study, we were able to highlight the sport specific perceptual-cognitive expertise of soccer players using BMP. Furthermore, an interesting finding revealed a general perceptual-cognitive advantage in athletes, or enhancement of BMP sensitivity, for perceiving a fundamental kinematic of action (walker) compared to non-athletes. This result is in keeping with recent evidence of athletes' perceptual skill transfer to everyday activities involving perceptual-cognitive abilities. It also supports previous findings from imagery studies showing enhanced cognitive activity in specific brain regions underlying action-perception processes. As expected, we observed an inversion effect but we also demonstrated that athletes were slightly better than non-athletes for the inverted condition. On the whole, the BMP paradigm is an appropriate measure for demonstrating expertise. It lends itself to manipulation of multiple parameters in order to assess specific properties of expert perceptual-cognitive skills.

Funding

This work was supported by an NSERC discovery grant.

Acknowledgments

The authors would like to thank Marjolaine Baril-Nadeau, Marie-Pier Lavoie and Marie-Pier Samson for their work with the non-athlete participants. We thank Robyn Lahiji for her help in editing the manuscript. We also would like to thank the Carabins team of Université de Montréal for their participation in the study. More precisely: Alain Lefebvre, France brunet, Pat Raimondo, Kevin McConnell and the players.

References

- Abernethy, B., Gill, D. P., Parks, S. L., & Packer, S. T. (2001). Expertise and the perception of kinematic and situational probability information. *Perception, 30*(2), 233-252.
- Abernethy, B., & Parker, S. (1989). Perceiving joint kinematics and segment interactions as a basis for skilled anticipation in squash. In C. K. Giam, K. K. Chook & K. C. The (Eds.), *Proceedings of the 7th World Congress in Sport Psychology* (pp. 56-58). Singapore: International Society of Sport Psychology.
- Abernethy, B., & Zawi, K. (2007). Pickup of essential kinematics underpins expert perception of movement patterns. *Journal of Motor Behavior, 39*(5), 353-367.
- Abernethy, Bruce, Baker, Joseph, & Côté, Jean. (2005). Transfer of pattern recall skills may contribute to the development of sport expertise. *Applied Cognitive Psychology, 19*(6), 705-718.
- Alves, H., Voss, M. W., Boot, W. R., Deslandes, A., Cossich, V., Salles, J. I., & Kramer, A. F. (2013). Perceptual-cognitive expertise in elite volleyball players. *Frontiers in Psychology, 4*, 36.
- Balser, N., Lorey, B., Pilgramm, S., Naumann, T., Kindermann, S., Stark, R., . . . Munzert, J. (2014a). The influence of expertise on brain activation of the action observation network during anticipation of tennis and volleyball serves. *Frontiers in Human Neuroscience, 8*, 568.
- Balser, N., Lorey, B., Pilgramm, S., Stark, R., Bischoff, M., Zentgraf, K., . . . Munzert, J. (2014b). Prediction of human actions: Expertise and task-related effects on neural activation of the action observation network. *Human Brain Mapping*.
- Bellefeuille, A., & Faubert, J. (1998). Independence of contour and biological-motion cues for motion-defined animal shapes. *Perception, 27*(2), 225-235.

- Bideau, B., Kulpa, R., Menardais, S., Fradet, L., Multon, F., Delamarche, P., & Arnaldi, B. (2003). Real handball goalkeeper vs. virtual handball thrower. *Presence-Teleoperators and Virtual Environments*, *12*(4), 411-421.
- Bideau, B., Kulpa, R., Vignais, N., Brault, S., Multon, F., & Craig, C. (2010). Using virtual reality to analyze sports performance. *IEEE Computer Graphics and Applications*, *30*(2), 14-21.
- Bischoff, M., Zentgraf, K., Lorey, B., Pilgramm, S., Balsler, N., Baumgartner, E., . . . Munzert, J. (2012). Motor familiarity: brain activation when watching kinematic displays of one's own movements. *Neuropsychologia*, *50*(8), 2085-2092.
- Bischoff, M., Zentgraf, K., Pilgramm, S., Krueger, B., Balsler, N., Sauerbier, I., . . . Munzert, J. (2015). Anticipating action effects with different attention foci is reflected in brain activation. *Perceptual and Motor Skills*, *120*(1), 36-56.
- Calvo-Merino, B., Ehrenberg, S., Leung, D., & Haggard, P. (2010). Experts see it all: configural effects in action observation. *Psychological Research*, *74*(4), 400-406.
- Casile, A., & Giese, M. A. (2006). Nonvisual motor training influences biological motion perception. *Current Biology*, *16*(1), 69-74.
- Caspers, S., Zilles, K., Laird, A. R., & Eickhoff, S. B. (2010). ALE meta-analysis of action observation and imitation in the human brain. *Neuroimage*, *50*(3), 1148-1167.
- Chaddock, L., Neider, M. B., Voss, M. W., Gaspar, J. G., & Kramer, A. F. (2011). Do athletes excel at everyday tasks? *Medicine and Science in Sports and Exercise*, *43*(10), 1920-1926.
- Chang, D. H., & Troje, N. F. (2009). Acceleration carries the local inversion effect in biological motion perception. *Journal of Vision*, *9*(1), 11-17.
- de Lussanet, M. H., & Lappe, M. (2012). Depth perception from point-light biological motion displays. *Journal of Vision*, *12*(11).
- Diaz, G. J., Fajen, B. R., & Phillips, F. (2012). Anticipation from biological motion: the goalkeeper problem. *Journal of experimental psychology. Human perception and performance*, *38*(4), 848-864.
- Dittrich, W. H. (1993). Action categories and the perception of biological motion. *Perception*, *22*(1), 15-22.
- Erickson, K. I., Gildengers, A. G., & Butters, M. A. (2013). Physical activity and brain plasticity in late adulthood. *Dialogues in Clinical Neuroscience*, *15*(1), 99-108.

- Faubert, J. (2013). Professional athletes have extraordinary skills for rapidly learning complex and neutral dynamic visual scenes. *Scientific Reports*, 3, 1154.
- Faubert, Jocelyn, & Allard, Rémy. (2013). Stereoscopy benefits processing of dynamic visual scenes by disambiguating object occlusions. *Journal of Vision*, 13(9), 1292.
- Franks, I.M., & Hanvey, T. . (1997). Cues for goalkeepers: high-tech methods used to measure penalty shot response. *Soccer Journal*, 42, 30-33.
- Helsen, Werner F., & Starkes, Janet L. (1999). A multidimensional approach to skilled perception and performance in sport. *Applied Cognitive Psychology*, 13(1), 1-27.
- Hohmann, T., Troje, N. F., Olmos, A., & Munzert, J. (2011). The influence of motor expertise and motor experience on action and actor recognition. *Journal of Cognitive Psychology*, 23(4), 403-415.
- Ida, Hirofumi. (2012). Computer-Simulated Display to Advance the Understanding of Perceptual Motor Skills. *Journal of Computer Science & Systems Biology*, 5(2), 001.
- Jackson, S., & Blake, R. (2010). Neural integration of information specifying human structure from form, motion, and depth. *Journal of Neuroscience*, 30(3), 838-848.
- Jansen, P., Lehmann, J., & Van Doren, J. (2012). Mental rotation performance in male soccer players. *PLoS One*, 7(10), e48620.
- Johansson, Gunnar. (1973). Visual perception of biological motion and a model for its analysis. *Attention, Perception, & Psychophysics*, 14(2), 201-211.
- Lange, J., & Lappe, M. (2007). The role of spatial and temporal information in biological motion perception. *Advances in cognitive psychology*, 3(4), 419-428.
- Legault, I., & Faubert, J. (2012). Perceptual-cognitive training improves biological motion perception: evidence for transferability of training in healthy aging. *Neuroreport*, 23, 469–473.
- Legault, I., Troje, N. F., & Faubert, J. (2012). Healthy older observers cannot use biological-motion point-light information efficiently within 4 m of themselves. *iPerception*, 3(2), 104-111.
- Legault, Isabelle, Allard, Rémy, & Faubert, Jocelyn. (2013). Healthy older observers show equivalent perceptual-cognitive training benefits to young adults for multiple object tracking. *Frontiers in Psychology*, 4.
- Mann, D. T., Williams, A. M., Ward, P., & Janelle, C. M. (2007). Perceptual-cognitive expertise in sport: a meta-analysis. *Journal of Sport & Exercise Psychology*, 29(4), 457-478.

- Mazyn, L. I., Lenoir, M., Montagne, G., Delaey, C., & Savelsbergh, G. J. (2007). Stereo vision enhances the learning of a catching skill. *Experimental Brain Research*, *179*(4), 723-726.
- Munzert, J., Hohmann, T., & Hossner, E. J. (2010). Discriminating throwing distances from point-light displays with masked ball flight. *European Journal of Cognitive Psychology*, *22*(2), 247-264.
- North, J. S., & Williams, A. M. (2008). Identifying the critical time period for information extraction when recognizing sequences of play. *Research Quarterly for Exercise and Sport*, *79*(2), 268-273.
- Nougier, Vincent, Stein, Jean-François, & Bonnel, Anne-Marie. (1991). Information processing in sport and "orienting of attention.". *International Journal of Sport Psychology*, *22*(3-4), 307-327.
- Oram, M. W., & Perrett, D. I. (1994). Responses of Anterior Superior Temporal Polysensory (STPa) Neurons to "Biological Motion" Stimuli. *Journal of Cognitive Neuroscience*, *6*(2), 99-116.
- Ouellette, M., Chagnon, M., & Faubert, J. (2009). Evaluation of human behavior in collision avoidance: a study inside immersive virtual reality. *Cyberpsychology & Behavior*, *12*(2), 215-218.
- Pavlova, M., & Sokolov, A. (2000). Orientation specificity in biological motion perception. *Perception & psychophysics*, *62*(5), 889-899.
- Ptito, M., Faubert, J., Gjedde, A., & Kupers, R. (2003). Separate neural pathways for contour and biological-motion cues in motion-defined animal shapes. *Neuroimage*, *19*(2 Pt 1), 246-252.
- Reid, R., Brooks, A., Blair, D., & van der Zwan, R. (2009). Snap! Recognising implicit actions in static point-light displays. *Perception*, *38*(4), 613-616.
- Romeas, T., Guldner, A., & Faubert, J. (2015). 3D-Multiple Object Tracking task training improves passing decision-making accuracy in soccer players. *Psychology of Sport and Exercise*, In press.
- Saunders, D. R., Williamson, D. K., & Troje, N. F. (2010). Gaze patterns during perception of direction and gender from biological motion. *Journal of Vision*, *10*(11), 9.
- Savelsbergh, G. J. P., Williams, A. M., Van der Kamp, J., & Ward, P. (2002). Visual search, anticipation and expertise in soccer goalkeepers. *Journal of Sports Sciences*, *20*(3), 279-287.

- Savelsbergh, G. J., Van der Kamp, J., Williams, A. M., & Ward, P. (2005). Anticipation and visual search behaviour in expert soccer goalkeepers. *Ergonomics*, *48*(11-14), 1686-1697.
- Simion, F., Regolin, L., & Bulf, H. (2008). A predisposition for biological motion in the newborn baby. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, *105*(2), 809-813.
- Smeeton, N. J., Ward, P., & Williams, A. M. (2004). Do pattern recognition skills transfer across sports? A preliminary analysis. *Journal of Sports Sciences*, *22*(2), 205-213.
- Sparrow, W. A., & Sherman, C. (2001). Visual expertise in the perception of action. *Exercise and Sport Sciences Reviews*, *29*(3), 124-128.
- Starkes, J.L. (1987). Skill in field hockey: The nature of the cognitive advantage. *Journal of Sport & Exercise Psychology*(9), 146-160.
- Troje, N. F. (2002). Decomposing biological motion: a framework for analysis and synthesis of human gait patterns. *Journal of Vision*, *2*(5), 371-387.
- Troje, N. F. (2013). What is biological motion?: Definition, stimuli and paradigms *Social Perception: Detection and Interpretation of Animacy, Agency, and Intention* (Rutherford, M. D. and Kuhlmeier, V. A. (eds.) ed., pp. 13 - 36): MIT Press.
- Troje, N. F., & Westhoff, C. (2006). The inversion effect in biological motion perception: evidence for a "life detector"? *Current Biology*, *16*(8), 821-824.
- Troje, Nikolaus F. (2008). Retrieving Information from Human Movement Patterns. In T. F. Shipley & J. M. Zacks (Eds.), *Understanding Events: How Humans See, Represent, and Act on Events* (pp. 308-334). New York: Oxford University Press.
- Turella, L., Wurm, M. F., Tucciarelli, R., & Lingnau, A. (2013). Expertise in action observation: recent neuroimaging findings and future perspectives. *Frontiers in Human Neuroscience*, *7*, 637.
- Vaeyens, R., Lenoir, M., Williams, A. M., & Philippaerts, R. M. (2007). Mechanisms underpinning successful decision making in skilled youth soccer players: An analysis of visual search Behaviors. *Journal of Motor Behavior*, *39*(5), 395-408.
- Vaina, L. M., Solomon, J., Chowdhury, S., Sinha, P., & Belliveau, J. W. (2001). Functional neuroanatomy of biological motion perception in humans. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, *98*(20), 11656-11661.

- Vanrie, J., Dekeyser, M., & Verfaillie, K. (2004). Bistability and biasing effects in the perception of ambiguous point-light walkers. *Perception*, 33(5), 547-560.
- Verburgh, L., Scherder, E. J., van Lange, P. A., & Oosterlaan, J. (2014). Executive functioning in highly talented soccer players. *PLoS One*, 9(3), e91254.
- Vestberg, T., Gustafson, R., Maurex, L., Ingvar, M., & Petrovic, P. (2012). Executive functions predict the success of top-soccer players. *PLoS One*, 7(4), e34731.
- Vivar, C., Potter, M. C., & van Praag, H. (2013). All about running: synaptic plasticity, growth factors and adult hippocampal neurogenesis. *Current Topics in Behavioral Neurosciences*, 15, 189-210.
- Voss, Michelle W., Kramer, Arthur F., Basak, Chandramallika, Prakash, Ruchika Shaurya, & Roberts, Brent. (2010). Are expert athletes 'expert' in the cognitive laboratory? A meta-analytic review of cognition and sport expertise. *Applied Cognitive Psychology*, 24(6), 812-826.
- Ward, P., & Williams, A. M. (2003). Perceptual and cognitive skill development in soccer: The multidimensional nature of expert performance. *Journal of Sport & Exercise Psychology*, 25(1), 93-111.
- Ward, P., Williams, A. M., & Bennett, S. J. (2002). Visual search and biological motion perception in tennis. *Research Quarterly for Exercise and Sport*, 73(1), 107-112.
- Wei, G., Zhang, Y., Jiang, T., & Luo, J. (2011). Increased cortical thickness in sports experts: a comparison of diving players with the controls. *PLoS One*, 6(2), e17112.
- Wells, A. J., Hoffman, J. R., Beyer, K. S., Jajtner, A. R., Gonzalez, A. M., Townsend, J. R., . . . Stout, J. R. (2014). Reliability of the dynavision d2 for assessing reaction time performance. *Journal of Sports Science and Medicine*, 13(1), 145-150.
- Williams, A. M., Hodges, N. J., North, J. S., & Barton, G. (2006). Perceiving patterns of play in dynamic sport tasks: Investigating the essential information underlying skilled performance. *Perception*, 35(3), 317-332.
- Williams, M.A. (2000). Perceptual skill in soccer: implications for talent identification and development. *Journal of Sports Sciences*, 18(9), 737-750. Williams, M.A., Davids, K., & Williams, J. (1999). *Visual perception and action in sport*. London: E & FN Spon.

Wright, M. J., Bishop, D. T., Jackson, R. C., & Abernethy, B. (2011). Cortical fMRI activation to opponents' body kinematics in sport-related anticipation: expert-novice differences with normal and point-light video. *Neuroscience Letters*, *500*(3), 216-221.

Yin, R. K. (1969). Looking at Upside-down Faces. *Journal of Experimental Psychology*, *81*(1), 141-&.

Chapitre 3 : Article 2

3D-Multiple Object Tracking training task improves passing decision-making accuracy in soccer players

Romeas Thomas, Antoine Guldner, Jocelyn Faubert (2015), *Psychology of Sport & Exercise*, Vol. 22, 1-9, DOI: 10.1016/j.psychsport.2015.06.002

Abstract

Objectives. The ability to perform a context-free 3-dimensional multiple object tracking (3D-MOT) task has been highly related to athletic performance. In the present study, we assessed the transferability of a perceptual-cognitive 3D-MOT training from a laboratory setting to a soccer field, a sport in which the capacity to correctly read the dynamic visual scene is a prerequisite to performance. **Design.** Throughout pre- and post-training sessions, we looked at three essential skills (passing, dribbling, shooting) that are used to gain the upper hand over the opponent. **Method.** We recorded decision-making accuracy during small-sided games in university-level soccer players (n=23) before and after a training protocol. Experimental (n=9) and active control (n=7) groups were respectively trained during 10 sessions of 3D-MOT or 3D soccer videos. A passive control group (n=7) did not received any particular training or instructions. **Results.** Decision-making accuracy in passing, but not in dribbling and shooting, between pre- and post-sessions was superior for the 3D-MOT trained group compared to control groups. This result was correlated with the players' subjective decision-making accuracy, rated after pre- and post-sessions through a visual analogue scale questionnaire. **Conclusions.** To our knowledge, this study represents the first evidence in which a non-contextual, perceptual-cognitive training exercise has a transfer effect onto the field in athletes.

Keywords: perceptual-cognitive training; transfer; small-sided games; athletes

Introduction

In dynamic sports such as soccer (Association Football), the ability to ‘read the game’ distinguishes skilled from less skilled players (Williams, 2000). However, athletes are not characterized by superior vision (Abernethy, 1987; Helsen & Starkes, 1999) and visual training programs have not shown any evidence of transfer to the field (Wood & Abernethy, 1997). Rather, sport scientists identified a number of abilities that are tightly related to superior anticipation and decision-making to better explain the ability to ‘read the game’. Anticipation and decision-making represents the human brain’s ability to extract meaningful contextual information from the visual scene and are essential for high-level performance in sports (Casanova, Oliveira, Williams, & Garganta, 2009). They are typically referred to as perceptual-cognitive skills, illustrating the role played by both perceptual and cognitive processes.

Two main approaches have been proposed to identify athletes’ perceptual-cognitive superiority. The first and most common theory that supports athletic expertise relies on the expert performance approach. It reflects comparisons between elite, sub-elite and/or novice performers in tasks that are domain specific and, in some cases representative of the behavioral requirements of the competitive setting. In essence, experts have been shown to be superior to sub-elite and/or novices in sports-specific tasks including advance visual cue utilization (Abernethy, Gill, Parks, & Packer, 2001; Ward, Williams, & Bennett, 2002), pattern recall and recognition (Abernethy, Baker, & Côté, 2005; Smeeton, Ward, & Williams, 2004), visual search strategies (Vaeyens, Lenoir, Williams, & Philippaerts, 2007; Williams, 2000) and the knowledge of situational probabilities (North & Williams, 2008; Williams, Hodges, North, & Barton, 2006). Those abilities have been linked to game intelligence. On the other hand, the cognitive component skill approach examines whether sport expertise influences fundamental cognitive and perceptual functions outside the sport-specific domain (Nougier, Stein, & Bonnel, 1991). It relies on more fundamental, sport context-free, paradigms that confer a cognitive fidelity rather than a physical fidelity with the sport environment. In fact, it is well accepted that physical activity enhances brain plasticity and improves cognitive and executive functions (for recent reviews see Erickson, Gildengers, & Butters, 2013; Vivar, Potter, & van Praag, 2013). For example, a significant correlation has been demonstrated between the results from the executive functions tests (neuropsychological assessment tool)

versus the number of goals and assists the players had scored two seasons later (Vestberg, Gustafson, Maurex, Ingvar, & Petrovic, 2012). The authors suggested that results in cognitive function tests predict the success of top-soccer players. Furthermore, higher order cognitive function has been suggested to be relevant for talent identification and development in youth soccer players (Verburgh, Scherder, van Lange, & Oosterlaan, 2014). In a recent meta-analysis, Voss and colleagues showed that expertise in sport was related to high levels of performance on measures of processing speed and visual attention (Voss, Kramer, Basak, Prakash, & Roberts, 2010). Moreover, Alves and colleagues found that volleyball players differed from non-athlete controls on two executive control tasks and one visuo-spatial attentional processing task (Alves, Voss, Boot, Deslandes, Cossich, Salles, & Kramer, 2013). Furthermore, interesting significant differences have recently been found between athletes that outperformed non-athletes in socially realistic multitasking crowd scenes involving pedestrians crossing streets (Chaddock, Neider, Voss, Gaspar, & Kramer, 2011) or in learning complex and neutral dynamic visual scenes through a three dimensional multiple object tracking (3D-MOT) task (Faubert, 2013). These studies support the claim that the cognitive component approach captures a fundamental cognitive skills associated with competitive sport training (Voss, et al., 2010).

Given the emerging evidence of brain plasticity following learning or injury (Draganski & May, 2008; Ptito, Kupers, Lomber, & Pietrini, 2012), Faubert and Sidebottom (2012) introduced a perceptual-cognitive training methodology for athletes (Faubert & Sidebottom, 2012). The technique used is a “highly levelled” 3D-MOT perceptual-cognitive task because it stimulates a high number of brain networks that have to work together during the exercise including complex motion integration, dynamic, sustained and distributed attention processing and working memory. In an earlier publication by Faubert (2013), the 3D-MOT training technique revealed striking superior skills in professional athletes compared to sub-elites and novices when rapidly learning complex and neutral dynamic visual scenes (Faubert, 2013). The results showed a clear distinction between the level of athletic performance and corresponding fundamental mental capacities for learning an abstract and demanding dynamic scene task. The author suggested that rapid learning in complex and unpredictable dynamic contexts is one of the critical components required for elite performance. Lately, a study revealed that 3D-MOT performance was most likely related to the athletes’ ability to see and

respond to various stimuli on the basketball court, however the simple visuo-motor reaction time that was not related to any of the basketball specific performance measures (Mangine, Hoffman, Wells, Gonzalez, Rogowski, Townsend, Jajtner, Beyer, Bohner, Pruna, Fragala, & Stout, 2014). Furthermore, recent neurological evidence has demonstrated the role of 3D-MOT in enhancing cognitive function in healthy young adults (Parsons, Magill, Boucher, Zhang, Zogbo, Berube, Scheffer, Beauregard, & Faubert, 2014). In fact, 10 sessions of 3D-MOT training improved attention, visual information processing speed and working memory recorded through neuropsychological tests and quantitative electroencephalography. In addition, other evidence has demonstrated that 3D-MOT training can show transfer to socially relevant tasks such as biological motion perception in the elderly (Legault & Faubert, 2012).

In sport science and especially in perceptual-cognitive training studies, focus on transfer measures is essential to determine whether any improvements observed in the laboratory may transfer back to a live game situation. A common hypothesis suggests that transfer can occur if the trained and transfer tasks engage specific overlapping cognitive processes and brain networks (Dahlin, Neely, Larsson, Backman, & Nyberg, 2008). Studies supporting the expert performance approach have raised the question of perceptual-cognitive transfer in athletes (Caserta, Young, & Janelle, 2007; Gabbett, Carius, & Mulvey, 2008; Hopwood, Mann, Farrow, & Nielsen, 2011; Williams, Ward, & Chapman, 2003), however; to our knowledge, studies from the cognitive component approach have yet to demonstrate this transfer. For instance, Gabbett and colleagues (2008) investigated the effects of video-based perceptual training on decision-making skills during small-sided games (SSG) in elite women soccer players (Gabbett, et al., 2008). Video-based training yielded on-field improvements in passing, dribbling and shooting decision-making skills. In addition, the use of SSG as a measure of transfer seemed to be an efficient strategy in capturing the dynamic and strategic components of soccer. In fact, a major challenge with transfer settings is to develop objective and sensitive measures of transfer. Soccer is an invasion game where the main goal is to invade an opponent's territory (offensive scenario) to score and/or to contain space and regain ball possession (defensive scenario) to avoid conceding goals (Mitchell, Oslin, & Griffin, 2013). Players have to make different decisions whether they have to defend or to attack. During the attack, the offensive aspect is to score a goal (e.g. shooting) while conservation of the ball (e.g. passing, dribbling) is the defensive aspect (Gréhaigne, Richard, & Griffin, 2012). Passing

and shooting the ball have been recognized as important factors that contribute to the success or improvement of performance in invasion games (Hughes & Bartlett, 2002). On the other hand, recovering the ball or putting pressure (e.g. pressing) on the opposing team to regain possession of the ball is the offensive aspect of the defense. Defending one's goal (e.g. tackling) consists in the defensive aspect of the defense. Therefore, soccer presents a complex and rapidly changing environment where different decisions have to be made under pressure and time constraints. The quality of response to those decision-making situations is crucial in the success of the team and to improve performance. SSG allows players to experience similar situations that they encounter in competitive matches while optimizing training duration. It also reduces space and therefore the amount of time to respond. This process increases the number of opportunities for decision-making and thus increases the ratio of players' participation in decision-making (Aguilar, Botelho, Lago, Maças, & Sampaio, 2012).

In the present study, we assessed the transfer capability of perceptual-cognitive 3D-MOT training void of sports context on offensive decision-making with soccer players. In a dynamic sport environment such as soccer, players must be able to correctly read the key information from a visual scene to make accurate decisions. They are usually confronted with multiple choices. To score goals, players have to select the best options especially during an offensive scenario. For example, within a split second, players need to decide whether they protect the ball, when and where to pass or whether they should take a shot on net. The decision-making skill refers to the capability of individuals to make a choice and achieve a specific task goal from a set of possibilities (Bar-Eli, Plessner, & Raab, 2011). Becoming an expert in decision-making is thought to be acquired following sport-specific deliberate practice (10 000 hour rule) (Ericsson, Krampe, & Tesch-Römer, 1993) even if there is some speculation about the benefits of the involvement in non-sport-specific activities during the first years of practice (Baker, Cote, & Abernethy, 2003). This refers to the general benefits of involvement in any physical activities explained earlier (cognitive component approach). Decision-making in sport relies on three major cognitive components such as perception, knowledge and decision strategies (Bar-Eli, et al., 2011). Expert decision-makers depend on advanced perceptual and memory processes to better execute short term decisions. In particular, they rely on advanced visual search strategies in their central and peripheral vision (Vaeyens, et al., 2007) as well as selective, focused and divided attention (Bar-Eli, et al., 2011). While general visual training

programs hardly improve decision-making in sports, 3D-MOT includes dynamic visual information that has to be processed actively, which is a crucial part of the perceptual component involved in decision-making. The 3D-MOT selective attention and processing speed of multiple moving targets task may be a crucial skill to help execute decision-making. This is supported by studies showing that performance on multiple target tracking tasks is superior in different kinds of experts such as professional radar operators, video-gamers and athletes (Allen, McGeorge, Pearson, & Milne, 2004; Green & Bavelier, 2003; Zhang, Yan, & Yangang, 2009). To train perceptual and attentional processes involved in decision-making, we used a highly levelled perceptual-cognitive training task that includes complex motion integration, dynamic, sustained and distributed attention processing and working memory. Three-dimensional MOT training has already shown evidence in enhancing cognitive function by improving attention, visual information processing speed and working memory. Additionally, this is a task in which has previously highlighted athletes' impressive learning capabilities in complex and dynamic visual scenes. Recently, the technique has shown training transfer onto a perceptual-cognitive task, such as biological motion perception, within a laboratory setting. To assess the role of 3D-MOT in decision-making accuracy on the field, we looked at three essential skills that are used to gain the upper hand over the opponent throughout soccer offensive scenarios. We suggested that passing, dribbling and shooting could be improved in the 3D-MOT trained group compared to control groups between pre- and post-training sessions.

Method

Ethics Statement

The experimental protocol and related ethical issues were evaluated and approved by the Comité d'Éthique de la Recherche en Santé of Université de Montréal. All subjects were given verbal and written information about the study and gave their verbal and written informed consent to participate.

Participants

Twenty-three young males from the Carabins soccer team of Université de Montréal participated (Table 1). All subjects reported normal or corrected-to-normal vision (6/6 or

better) with normal stereoacuity (50 sec of arc or better). None of the subjects had ever taken part in any previous 3D-MOT or perceptual-cognitive experiment.

Table 3-1. Players' information (\pm SEM)

Group	n	Mean Age (years)	Started to play soccer (age in years)	Playing soccer in a club (duration in years)	Hours of training by week (game-free)
3D-MOT	9	21.27 \pm 0.81	6.56 \pm 0.59	12.78 \pm 1.63	8.67 \pm 1.32
Active control	7	21.39 \pm 1.03	6.00 \pm 1.31	12.86 \pm 1.79	11.14 \pm 2.97
Passive control	7	22.48 \pm 0.71	8.17 \pm 2.12	11 \pm 2.38	8.33 \pm 1.09
All of the participants	23	21.67 \pm 0.46	6.82 \pm 0.71	12.32 \pm 1.01	9.36 \pm 1.04

Apparatus

Laboratory Tests. The 3D-MOT experiment and 3D soccer videos (active control) were conducted using a fully immersive virtual environment thanks to a head-mounted display (Sony HMZ-T2) in a room with controlled lighting. The head-mounted display is a 3D-ready system that allows image projection on two OLED panels with a resolution of 1280x720 pixels and covering a maximal visual field of 45°. Inter-pupillary distance was adjusted for each subject. The 3D-MOT experiment was supported by a Hewlett-Packard ProBook 4530s with a Core i5 processor and an Intel HD Graphics 3000 graphic card. The 3D soccer videos, from the official 2010 FIFA world cup™ blu-ray, were played on a Sony PlayStation 3™ system. Both the computer (for 3D-MOT) and the Sony PlayStation 3™ (for 3D soccer videos) were connected to the head-mounted display to offer an immersive experience.

Field Test. Decision-making assessment was conducted during standardized SSG before and after the training period. SSG consisted of standard 5x5 soccer matches on a 30m x 40m interior turf soccer field to avoid weather influence. Coaches were positioned on the side of the pitch to give their instructions as in a real game situation. Players were randomly distributed in five different teams composed of five players each including a keeper. The five teams were randomly facing each other two times during ten games of 5min each. Every player was then taking part in eight games of 5min for a total of 40min during both pre- and

post-sessions. Players who were waiting for the start of the next game were stretching or exercising with the ball. SSG were recorded using two video cameras (Sony, HDR-CX260VW). Cameras were positioned in the bleachers of the stadium, approximately 10m above the field of play to cover the entire playing area. Players were identified by jerseys and numbers. The video recordings were analyzed using Dartfish Connect v6.0.

Decision-making coding. On-field decision making ability during SSG were coded using standardized coding criteria adapted from previous studies (French & Thomas, 1987; Gabbett, et al., 2008). Passing, dribbling and shooting were the skills assessed (see Table 2). The coding instrument made it possible to separate the cognitive decision-making component of performance from the motor skill execution component of performance. When initially used by French and Thomas (1987) in basketball players, the coding instrument was built to evaluate three aspects of performance: control (e.g. a player catches the ball), decision (e.g. a player decides which action is appropriate), and execution (e.g. a player then executes the skill). In a recent study, Gabbett and colleagues (2008) adapted the instrument for coding decision-making in soccer. They assessed one aspect of performance, the decision, which is central in the context of our study. The decision component involves selection of the skill (e.g. pass, dribble, shoot), as well as which teammate to pass to, what direction to dribble, when to shoot, when to stop dribbling, and so on. The quality of each decision was coded as 1 for an appropriate decision and 0 for an inappropriate decision according to the criteria (Table 2). Decisions that were neither appropriate nor inappropriate were not coded. For instance, when the player made a pass that did not: a) directly or indirectly created a shot attempt; b) went to a teammate who was in a better position than the passer; c) went to a player who was closely guarded; d) being intercepted or cause a turn over; e) reached an area of the field where no teammates was positioned or out of the field of play. Moreover, where the player did not have time to assess the options (e.g. player was tackled as soon as he received the ball) the disposal was not considered for assessment. Decision-making coding was assessed by an experienced soccer coach blinded to the experimental protocol and trained to use the instrument for coding. Then, the total score of each player by session was converted to percentage for analysis. Percentage accuracy values were established for each participant by dividing the number of points awarded by the total number available and then multiplying by 100.

Table 3-2. Decision-making coding instrument

Decision criterion	1 point decision	0 point decision
Passing	<p>The player made a good decision when the pass went to a teammate who was open and it:</p> <ul style="list-style-type: none"> - directly or indirectly created a shot attempt, or - went to a teammate who was in a better position than the passer. 	<p>The player made a poor decision when the pass was:</p> <ul style="list-style-type: none"> - made to a player who was closely guarded or when there was a defensive player positioned in the passing line, or - intercepted or turned over, or - made to an area of the field where no teammate was positioned, or - kicked out of the field of play.
Dribbling	<p>The player made a good decision to dribble when dribbling if it created:</p> <ul style="list-style-type: none"> - space for teammates, or - a scoring opportunity, or - space for the dribbler. 	<p>The player made a poor decision to dribble when he dribbled:</p> <ul style="list-style-type: none"> - when the defenders were in good defensive position, or - into a supporting defender that was in good position, and this did not create space for the dribbler or teammates, or - out of the field of play, or - and the immediate defender was in a good position to defend the dribble, or - without a purpose (e.g. not going anywhere).
Shooting	<p>The player made a good decision to shoot when he was open for the shot and it was uncontested.</p>	<p>The player made a poor decision to shoot when the shot:</p> <ul style="list-style-type: none"> - was blocked, or - was taken off balance, or - was taken when one or more defensive players were in good position, or - was taken when it was contested.
Adapted from: French & Thomas (1987), Gabbett, et al. (2008)		

Assessment of subjective judgements. To assess whether perceptual-cognitive learning was directly perceived or related to unconscious processes, we used participants' judgments in on-field decision-making. Players' confidence levels in decision-making accuracy were assessed promptly after pre- and post-sessions using the Sport Performance Scale application developed in our laboratory (http://vision.opto.umontreal.ca/english/technologies/apps_en.html). In the present study, we used a simple visual analog scale (rated from min [0%] to max [100%]) to assess players' confidence levels in decision-making. Measurements were performed on a 10''

Samsung Galaxy Tab IITM[®] tablet. The following instructions were individually given to the players: 1) to rate their ‘decision-making accuracy during the last play’ and to do so by 2) scrolling their finger on the visual analog scale of the touchscreen tablet until they had reached the appropriate score. Decision-making accuracy was described and contextualized on the scale as follows: ‘Your level of accuracy in anticipating teammate or opponent movements and to deliver a correct response (e.g. assist, shot)’. No time constraint was imposed and each player took approximately 15s to both receive the instructions and give an answer.

Stimuli

3D-MOT. The 3D-MOT task (Figure 1) was working under the NeuroTrackerTM system licenced by the Université de Montréal to CogniSens Athletics, Inc. (Montreal, Canada). The CORE mode of the NeuroTrackerTM system was used. During the exercise, four of eight projected spheres had to be tracked within a 3D virtual volumetric cube space with virtual light grey walls, subtending a visual angle of 42°. The spheres followed a linear trajectory in the 3D virtual space. Deviation occurred only when the balls collided against each other or the walls. In order to support an effective distribution of attention, a fixation spot was presented in the center of the cube throughout the experimentation. An instructed part of the training task was to focus on this green fixation square throughout the tracking phase which serves as an anchor point from which to extract information from the visual periphery (Ripoll, 1991). In other words, the anchor point is localized in a central position where the fovea could be directed while the relative movement of the spheres could be monitored using the peripheral visual field which is also able to detect movement (McKee & Nakayama, 1984). The effective use of such a strategy has already been demonstrated in experts through a variety of sports (e.g. Ripoll, Kerlirzin, Stein, & Reine, 1995; Savelsbergh, Williams, Van der Kamp, & Ward, 2002). Each session, based on a staircase procedure, lasted about 8min. The staircase procedure consists of increasing speed if the subject got all the indexed targets or decreasing speed if at least one target was missed. Speed thresholds were then evaluated using a 1-up 1-down staircase procedure (Levitt, 1971). After each correct response, the dependent variable (speed ball displacement) was increased by 0.05 log and decreased by the same proportion after each incorrect response, resulting in a threshold criterion of 50%. The staircase was interrupted after eight inversions and the threshold was estimated by the mean of the speeds at the last four inversions.

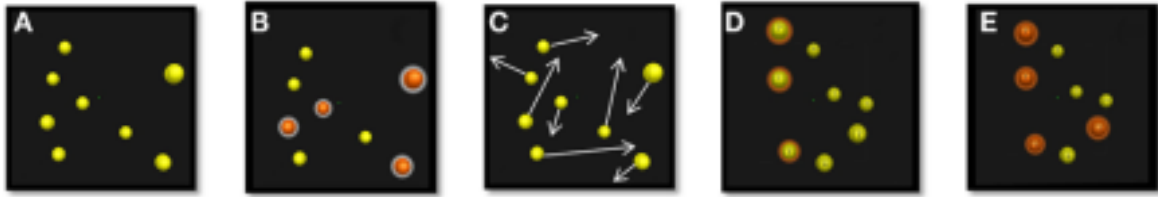


Figure 3-1. 3D-MOT task. Illustration of the 5 critical phases

A) Presentation of randomly positioned spheres in a virtual volumetric space, B) Identification of the spheres to be tracked during the trial, C) Removal of identification and movement of all spheres with dynamic interactions, D) Observer's response by identifying the spheres, E) Feedback is given to the observer. If the observer correctly identifies all four spheres, the task is repeated at a faster speed. If, on the other hand, the observer makes a mistake, the task is repeated at a slower speed.

3D soccer videos. The 3D soccer videos consisted of game replay from group and knock-out stages of the FIFA world cup 2010. Participants went through the whole blu-ray video once during the first four sessions of training. They were asked to watch soccer actions during approximately 25min/session. During the last six sessions of training, participants would watch the 3D soccer videos for a second time (20min/session) and were challenged by 5min interviews during which questions about decision-making accuracy occurring throughout the soccer videos were raised (e.g. Did the scorer make the right decision on the first goal of Brazil against North Korea according to the situation? What would you have done in his place: pass, dribble, shoot?). The questions only ensured that the players were focusing on the videos and reinforced their belief that the training was effective. Importantly, no feedback was given to the players after they answered.

Procedure

We used a computer randomization script to allocate players into three separate groups including an experimental (n=9), active (n=7) and passive (n=7) control group. All of them completed a pre- and post-on-field session during standardized SSG. Participants were constrained to not take part in any other training research activities throughout the duration of the testing period. In addition, the university athletes maintained a similar weekly routine, which was limited to their academic class schedule, training and soccer practice.

Experimental group. Players were actively trained ten times; twice a week for five consecutive weeks. During each evaluation, they participated in three CORE sessions of 3D-MOT. All of the observers reached a total of thirty sessions at the end of the training. Each participant followed the same standard procedure and completed each task while seated.

Active control. Participants focused on 3D soccer videos from the official 2010 FIFA world cup™ blu-ray twice a week for a five week period and a total of 10 sessions. Players were informed that this training was expected to have a positive effect on their decision-making performance during soccer games. This procedure was undertaken to provide an expectancy set for training benefits comparable to that of the perceptual-cognitive training group (cf Williams, et al., 2003).

Passive control. No instruction or training was provided for this group.

Analysis

Due to injuries, two players from the experimental and the passive control groups were removed from the decision-making analysis. As the two (active-passive) control groups showed no statistical differences and small sample size, they were analysed as a single control group. On-field decision-making accuracy in passing, dribbling and shooting was compared between the experimental and the active-passive control group. To find out whether the players' performance was different between pre- and post-sessions in the 3D-MOT group compared to the other group, we used a mixed-design analysis of variance (ANOVA; group x sessions). A Levene test yielded no significant differences in homogeneity between groups ($p>0.05$). We conducted paired Student t-tests to compare pre- and post-evaluation of players' subjective decision-making accuracy, rated by the Sport Performance Scale, in the 3D-MOT and the active-passive control group. Athletes' 3D-MOT speed threshold means analysis between pre and post-training showed a comparable improvement as previously demonstrated in athletes (Faubert, 2013; Faubert & Sidebottom, 2012).

Results

Field assessment

Objective decision-making assessment. On-field decision-making analysis revealed a significant improvement in passing accuracy only for the 3D-MOT trained group between pre- and post-sessions compared to the other groups ($F(1, 17)=4.708$, $p=0.044$, $\eta^2=0.162$) (Figure

2A). No significant difference was observed in decision-making accuracy for dribbling ($F(1, 14)=3.628$, $p=0.078$, $\eta^2=0.200$) and shooting ($F(1, 13)=0.210$, $p=0.654$, $\eta^2=0.015$) between pre- and post-sessions for the experimental compared to the other groups. However, there is a clear tendency for improvement in dribbling that did not reach the significance threshold ($p=0.078$). We suggest that a high variance could explain those results. In fact, mean number of dribbles (5.1 ± 0.63 SEM) and shots (4.0 ± 0.52 SEM) during games were far too small compared to mean number of passes (15.5 ± 0.93 SEM) to reach a decisive conclusion on the impact of 3D-MOT training on the on-field performance for these abilities.

Subjective decision-making assessment. A general improvement in subjective confidence levels of decision-making accuracy between pre- and post-sessions was observed in the 3D-MOT group following a paired student t-test analysis ($t[6] = -3.547$, $p=0.012$) while no difference was observed in the active-passive control group ($t[11] = -1.515$, $p=0.158$) (Figure 2B).

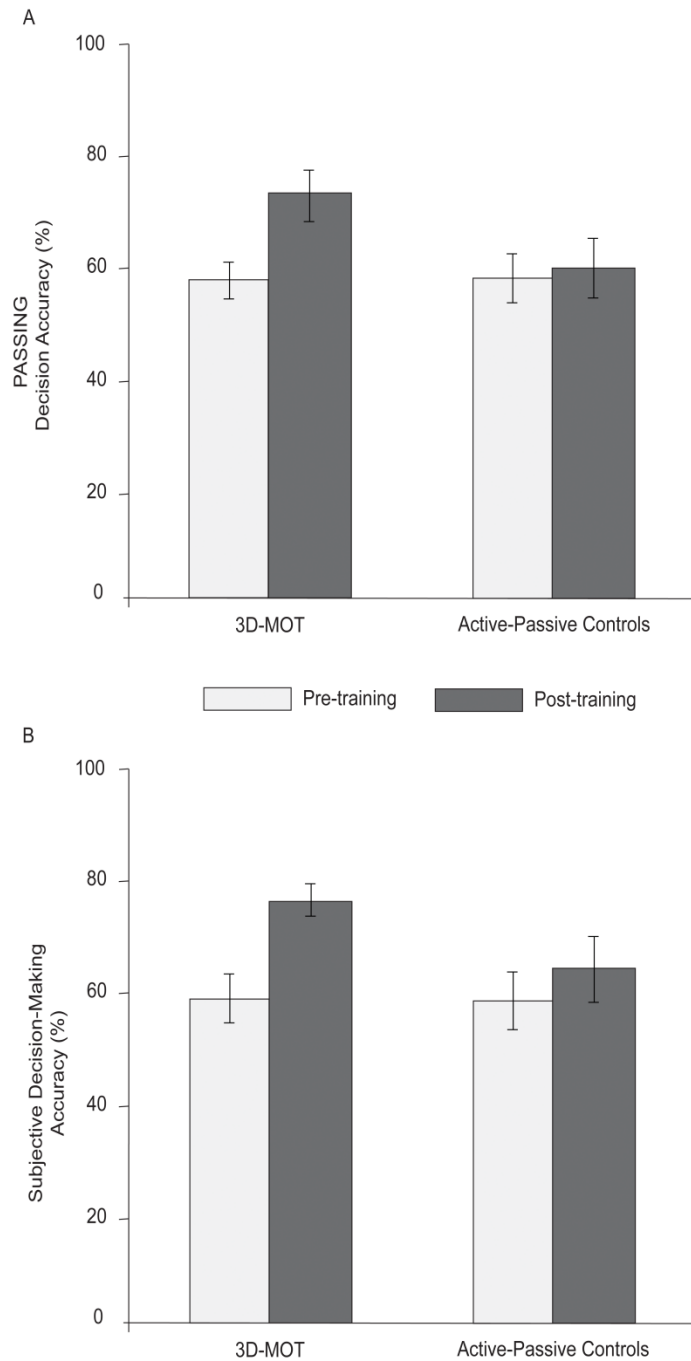


Figure 3-2. A. Decision-making accuracy in passing of an experimental (3D-MOT training) and active-passive control groups during pre- and post-sessions of a SSG; B. Subjective decision-making accuracy of an experimental (3D-MOT training) and active-passive control groups during pre- and post-sessions of a SSG. Error bars represent SEM.

Discussion

This study was designed to assess the transferability of perceptual-cognitive training void of sports context on decision-making accuracy in soccer players. The main result demonstrates a significant 15% improvement in passing decision-making accuracy in soccer players trained with the 3D-MOT technique compared to active and passive controls. Furthermore, this result was corroborated with a proportional quantitative increase in subjective decision-making accuracy for the experimental group. Finally, players' 3D-MOT speed thresholds confirmed their superior capacity for processing a complex and dynamic visual scene task. It should be noted that even if we observed a trend ($p=0.078$) in favor of an improvement in dribbling decision-making for the 3D-MOT group, no significant differences were found in dribbling and shooting abilities between groups. However, the low number of dribbles and shots attempted by the players restrict our ability to firmly conclude that the 3D-MOT training does not affect these decision-making abilities. For this reason, we will center the discussion on passing decision-making.

Decision-making improvement in passing

In the present study, we trained soccer players to track multiple elements through virtual, dynamic, complex and neutral (sport environment free) visual scenes using a perceptual-cognitive 3D-MOT technique. Ten training sessions in laboratory were sufficient to improve players' passing decision-making accuracy by 15% between pre- and post-sessions of SSG. Meanwhile, the active (10 sessions of 3D soccer matches) and passive control groups did not show any improvement. Considering 3D-MOT transferability has already been shown in a biological motion perception laboratory task (Legault & Faubert, 2012), this study represents the first evidence of 3D-MOT transfer from the laboratory to the field. Moreover, we argued in the introduction that expertise in athletes has been contextualized according to both the (sport specific) expert performance skills approach and the (sport environment free) cognitive component skills approach. While few studies have reported transfer following perceptual-cognitive training in specific sport contexts, the present study is, to our knowledge, the first evidence in favour of a non-contextual perceptual-cognitive training transfer on the sport-field. According to the most accepted theory, it is suggested that specific overlapping cognitive processes and brain networks were engaged for the laboratory 3D-MOT task and on-field

decision-making process during SSG (Dahlin, et al., 2008). Potential implications of 3D-MOT in decision-making improvement are discussed below.

Attentional tracking of multiple elements. One of the critical requirements to allow decision-making is to accurately extract meaningful information from the visual scene which is possible by using both perceptual and attentional processes. Attention and concentration are crucial abilities that affect the decision-making of athletes (Bar-Eli, et al., 2011). During a soccer action, an athlete has to divide attention on the field (e.g. teammates, opponents, ball), to use selective attention (e.g. which player to give the ball to) and to focus attention (e.g. staring at the net to score). To this purpose, many benefits may arise from the highly levelled 3D-MOT technique. A core feature of the 3D-MOT technique relies on distributed attention on a number of separated dynamic elements (Cavanagh & Alvarez, 2005). The ability to track multiple elements has been reported to be superior with the involvement in sport activities in adults and youngsters during laboratory MOT tasks (Barker, Allen, & McGeorge, 2010; Trick, Jaspers-Fayer, & Sethi, 2005; Zhang, et al., 2009). This result is not surprising knowing that the ability to maintain attention on multiple stimuli or locations for quite a prolonged period of time is important for sport (Memmert, 2009). Importantly the 3D-MOT technique includes speed thresholds as a dependent variable which is considered as a crucial part of MOT performance by requiring more attentional resources to track at higher speeds (Feria, 2012). Recently, neurological evidence has demonstrated the role of 3D-MOT in improving attention, visual information processing speed and working memory (Parsons, et al., 2014). From other imagery studies, the MOT technique has reported activation of higher-level brain areas involved in attentional processes (Culham, Brandt, Cavanagh, Kanwisher, Dale, & Tootell, 1998; Howe, Horowitz, Morocz, Wolfe, & Livingstone, 2009). These areas include parietal and frontal regions of the cortex and are believed to be responsible for attention shifts and eye movement. As well, the middle temporal complex has, not surprisingly, been implicated during MOT processing for motion perception (Culham, et al., 1998). These brain pathways could potentially be involved during the action of reading the play in soccer players; a perception-in-action process which is known to activate both dorsal and ventral streams (Goodale & Milner, 1992). Training the brain to simultaneously activate those networks may possibly help to enhance perceptual-cognitive execution in athletes. In this sense, the attentional tracking of multiple elements during 3D-MOT could overlap brain networks

required during decision-making. Training on 3D-MOT could serve as a tool to help automatize those networks and could lead to superior decision-making abilities. Future imagery or electroencephalography study will help us to explain the neural process behind 3D-MOT improvements.

Engagement of visual search strategies in peripheral vision. Beyond the attentional tracking of multiple elements, the 3D-MOT technique engages wide visual field stimulation especially because peripheral vision has been suggested to play an important role in the performance of sports teams (Knudson & Kluka, 1997). With players spread all along a field of about 60m in width, soccer utilizes a large amount of peripheral vision. Peripheral vision refers to the ability to detect and react to stimuli outside of foveal vision. In soccer referees, peripheral vision has been showed to be useful in decision-making accuracy (De Oliveira, Orbetelli, & De Barros Neto, 2011). To extract meaningful information from the visual scene, including the periphery, expert athletes rely on advanced visual search strategies (Vaeyens, et al., 2007; Williams, 2000). There is evidence to support that relative motion information is picked up effectively via peripheral vision (Williams, Davids, & Williams, 1999). A common occurrence during a game is to use foveal and peripheral vision simultaneously. For instance, in ‘time-constrained’ situations (e.g. 5 vs 5 situation), skilled soccer players fixate the ball in foveal vision while using peripheral vision to monitor the positions of teammates and opponents in the periphery (Williams & Davids, 1997). A study by Vaeyens and colleagues (2007) showed that successful soccer decision-makers use the player in possession of the ball as the central point on which to fixate gaze to explore and pick up the key information underpinning decision making in offensive situations (Vaeyens, et al., 2007). Researchers have reported the use of those ‘visual pivots’ in other sports (Ripoll, et al., 1995; Savelsbergh, et al., 2002) and is a reason why 3D-MOT includes such an anchor point. On the other hand, it has been proposed that athletes from visual demanding sports (e.g. netball) can generate more frequent (and shorter) eye movements therefore enabling information to be extracted for the visual field more rapidly (Morgan & Patterson, 2009). Research on eye movement during MOT experiments have identified viewing strategies exercised by observers. When multiple targets (e.g. 3 spheres) were presented, participants usually adopted a ‘center-looking’ strategy as if they were grouping the targets into a single object (e.g. triangle) and were looking closer to the center of the object formed by the targets (Fehd & Seiffert, 2008). This strategy is in contrast

to a ‘target-looking’ strategy where participants would saccade from target to target. However, another study by Fehd and Seiffert (2010) demonstrated that participants often engaged in both ‘target-looking’ and ‘center-looking’ strategies by switching their gaze from the center to the targets and so on (Fehd & Seiffert, 2010). Visual search strategies involved during MOT could be closely linked to those engaged by sport experts during the process of extracting visual information from the action. By training those strategies, which are part of the perceptual component involved in decision-making, could help to improve in game decision-making.

Virtual reality (3D vision). Another major asset of the 3D-MOT methodology is the involvement of virtual reality, a technology that is recognized as an important tool to potentially improve sport performance (Bideau, Kulpa, Vignais, Brault, Multon, & Craig, 2010; Carling, Reilly, & Williams, 2009). Immersive environments, such as those afforded by virtual reality, engender automaticity and therefore implicit learning - which yields decision-making that is robust under pressure (Patterson, Pierce, Bell, Andrews, & Winterbottom, 2009). Moreover, virtual reality involves stereoscopy (binocular disparity) which is required in situations where fast, complex and dynamic elements collide or overlap. For instance, stereoscopy has been shown to help in disambiguating object occlusions when processing dynamic visual scenes (Faubert & Allard, 2013). This is typically the kind of critical situation that can usually be found in soccer when players are close to each other (e.g. an attacker wants to make a deep run from behind the defender but needs to stay close until the last moment to avoid being called offside).

Whether it is fast attentional multiple element tracking, wide visual field stimulation or stereoscopy, all those components are involved during sport actions. Therefore, previous results revealing athletes’ extraordinary skills for rapidly learning complex and neutral dynamic visual scenes using the 3D-MOT technique appear logical (Faubert, 2013). This non-contextual perceptual-cognitive training seems to involve higher-level cognitive abilities subserved by the central nervous system. Presumably, 3D-MOT may capture the dynamic components of soccer actions where players have to maintain focus and attention on teammates, opponents or the ball to make the best decisions. In summary, this paradigm, even if void of sports context, is in keeping with the complex and dynamic nature of strategic sport such as soccer. From a sport performance point of view, the result is of particular interest in

regards to the implication of decision-making and passing in modern soccer. Today's elite soccer players require faster decision-making than ever mainly because as a competitive sport, the game of soccer is increasing in ball speed (15%) as well as the intensity of play and passing rate (35%) according to an analysis on world cup soccer final games from the last 40 years (Wallace & Norton, 2014). Whereas accurately passing the ball to a teammate is an essential and fundamental ability required by soccer players (Ali, 2011), it also represents the essence of keeping the ball and the source of scoring opportunities (Chassy, 2013). The 3D-MOT technique could play a crucial role in improving passing accuracy in elite soccer players and could be implemented in training centers.

Subjective decision-making assessment

Results of subjective decision-making assessment, collected from the Sport Performance Scale, support the on-field improvement observed in the 3D-MOT training group. One possible explanation is that it confirms that players who received the perceptual-cognitive training were conscious of their on-field improvement in decision-making after the training. Furthermore, confidence level improvement in decision-making accuracy of trained players was quantitatively proportional to the improvement in decision-making accuracy rated during video analysis. These results seem to demonstrate that passing decision-making accuracy improvement in the 3D-MOT group represents a meaningful training effect rather than the result of increased familiarity with the test environment or expectancy set for the training benefits.

Athlete' skills for learning complex and neutral dynamic visual scenes

The 3D-MOT speed thresholds of soccer players were qualitatively similar to those previously obtained in professional and elite-amateurs athletes showing superior capacity for processing a complex and dynamic visual scene task (Faubert, 2013; Faubert & Sidebottom, 2012). This ability has been argued to be one of the critical components for elite performance and 3D-MOT performance has been shown to be highly associated with athletes' performance level (Faubert, 2013; Mangine, et al., 2014).

Future requirements and limitations

To resolve the issue of whether this training can also transfer to better decision making in regards to dribbles and shooting decisions, we may have to use a different standardized SSG situation. For instance, we could reduce pitch size to favour 'one-on-one' situations (increase

dribbling ratio) and direct ‘goal-to-goal’ actions (increase shooting ratio). To underline the potential of non-contextual 3D-MOT training, it will also be interesting to address the degree of transfer of the technique in other invasion (e.g. hockey) or net (e.g. tennis) games. Another important aspect is to evaluate perceptual-cognitive skills in youngsters with the 3D-MOT technique. Using memory recall and structured pattern of play, Ward and Williams (2003) have previously demonstrated superior perceptual-cognitive skills in elite compared to sub-elites soccer players as early as 9 years old (Ward & Williams, 2003). However, little or no studies have compared perceptual-cognitive skills of elite and novice youngsters using a perceptual-cognitive method void of sports context. One study has revealed better MOT performance in children involved in physical activity compared to more sedentary children (Trick, et al., 2005). Knowing that rapid learning in complex and dynamic visual scenes is a critical component for sport performance (Faubert, 2013) and that 3D-MOT performance has been linked to sport specific performance measures (Mangine, et al., 2014), 3D-MOT speed thresholds could serve as a tool to determine a player’s ability. Non-contextual perceptual-cognitive techniques may also have implications in the screening or detection of new talent.

Conclusion

Expertise in athletes has been well characterized using specific as well as non-contextual perceptual-cognitive paradigms. However, the present study represents the first evidence of an on-field improvement (transfer) following a laboratory perceptual-cognitive training void of sports context. In fact, training to process complex and dynamic visual scenes has not only revealed superior learning ability in soccer players but has led to improvements in passing decision-making accuracy in the field as well. Future laboratory and in-field studies will be needed to evaluate the degree of transferability of such training on other dynamic sports.

Acknowledgments

The authors would like to thank François Bellavance for statistical assistance, Robyn Lahiji for editing and the Carabins team for their participation in the study. More precisely: Alain Lefebvre, Pat Raimondo, Kevin McConnell, France Brunet and the players. This work was supported by the Natural Sciences and Engineering Research Council of Canada.

Conflict of Interest

One of the authors is director of Visual Psychophysics and Perception Laboratory at the University of Montreal and he is the Chief Science Officer of Cognisens Athletics Inc. who produces the commercial version of the NeuroTracker used in this study. In this capacity, he holds shares in the company. This does not alter our adherence to your journal policies on sharing data and materials.

References

- Abernethy, B. (1987). Selective attention in fast ball sports. II: Expert novice differences. *Australian Journal of Science and Medicine in Sport, 19*, 7-16.
- Abernethy, B., Baker, J., & Côté, J. (2005). Transfer of pattern recall skills may contribute to the development of sport expertise. *Applied Cognitive Psychology, 19*, 705-718.
- Abernethy, B., Gill, D. P., Parks, S. L., & Packer, S. T. (2001). Expertise and the perception of kinematic and situational probability information. *Perception, 30*, 233-252.
- Aguiar, M., Botelho, G., Lago, C., Maças, V., & Sampaio, J. (2012). A Review on the Effects of Soccer Small-Sided Games. *Journal of Human Kinetics, 33*, 103-113.
- Ali, A. (2011). Measuring soccer skill performance: a review. *Scandinavian Journal of Medicine and Science in Sports, 21*, 170-183.
- Allen, R., McGeorge, P., Pearson, D., & Milne, A. B. (2004). Attention and expertise in multiple target tracking. *Applied Cognitive Psychology, 18*, 337-347.
- Alves, H., Voss, M. W., Boot, W. R., Deslandes, A., Cossich, V., Salles, J. I., & Kramer, A. F. (2013). Perceptual-cognitive expertise in elite volleyball players. *Frontiers in Psychology, 4*, 36.
- Baker, J., Cote, J., & Abernethy, B. (2003). Sport-Specific Practice and the Development of Expert Decision-Making in Team Ball Sports. *Journal of Applied Sport Psychology, 15*, 12-25.
- Bar-Eli, M., Plessner, H., & Raab, M. (2011). *Judgment, Decision-making and Success in Sport*. New Jersey: Wiley-Blackwell.
- Barker, K., Allen, R., & McGeorge, P. (2010). Multiple-object tracking: enhanced visuospatial representations as a result of experience. *Experimental psychology, 57*, 208-214.

- Bideau, B., Kulpa, R., Vignais, N., Brault, S., Multon, F., & Craig, C. (2010). Using virtual reality to analyze sports performance. *IEEE computer graphics and applications*, 30, 14-21.
- Carling, C., Reilly, T., & Williams, A. M. (2009). *Performance assessment for field sports* (Oxford ed.). Routledge.
- Casanova, F., Oliveira, J., Williams, M., & Garganta, J. (2009). Expertise and perceptual-cognitive performance in soccer: a review. *Revista Portuguesa de Ciências do Desporto*, 9, 115-122.
- Caserta, R. J., Young, J., & Janelle, C. M. (2007). Old dogs, new tricks: training the perceptual skills of senior tennis players. *Journal of Sport & Exercise Psychology*, 29, 479-497.
- Cavanagh, P., & Alvarez, G. A. (2005). Tracking multiple targets with multifocal attention. *Trends in Cognitive Sciences*, 9, 349-354.
- Chaddock, L., Neider, M. B., Voss, M. W., Gaspar, J. G., & Kramer, A. F. (2011). Do athletes excel at everyday tasks? *Medicine and Science in Sports & Exercise*, 43, 1920-1926.
- Chassy, P. (2013). Team Play in Football: How Science Supports F. C. Barcelona's Training Strategy. *Psychology*, 4, 7-12.
- Culham, J. C., Brandt, S. A., Cavanagh, P., Kanwisher, N. G., Dale, A. M., & Tootell, R. B. (1998). Cortical fMRI activation produced by attentive tracking of moving targets. *Journal Neurophysiology*, 80, 2657-2670.
- Dahlin, E., Neely, A. S., Larsson, A., Backman, L., & Nyberg, L. (2008). Transfer of learning after updating training mediated by the striatum. *Science*, 320, 1510-1512.
- De Oliveira, M. C., Orbetelli, R., & De Barros Neto, T. L. (2011). Call Accuracy and Distance from the Play: A Study with Brazilian Soccer Referees. *International Journal of Exercise Science*, 4, 287-295.
- Draganski, B., & May, A. (2008). Training-induced structural changes in the adult human brain. *Behavioural brain research*, 192, 137-142.
- Erickson, K. I., Gildengers, A. G., & Butters, M. A. (2013). Physical activity and brain plasticity in late adulthood. *Dialogues in Clinical Neuroscience*, 15, 99-108.
- Ericsson, K. A., Krampe, R. T., & Tesch-Römer, C. (1993). The role of deliberate practice in the acquisition of expert performance. *Psychological Review*, 100, 363-406.
- Faubert, J. (2013). Professional athletes have extraordinary skills for rapidly learning complex and neutral dynamic visual scenes. *Scientific Reports*, 3, 1154.

- Faubert, J., & Allard, R. (2013). Stereoscopy benefits processing of dynamic visual scenes by disambiguating object occlusions. *Journal-of-Vision, 13*, 1292.
- Faubert, J., & Sidebottom, L. (2012). Perceptual-Cognitive Training of Athletes. *Journal of Clinical Sports Psychology, 6*, 85-102.
- Fehd, H. M., & Seiffert, A. E. (2008). Eye movements during multiple object tracking: where do participants look? *Cognition, 108*, 201-209.
- Fehd, H. M., & Seiffert, A. E. (2010). Looking at the center of the targets helps multiple object tracking. *Journal-of-Vision, 10*.
- Feria, C. S. (2012). Speed has an effect on multiple-object tracking independently of the number of close encounters between targets and distractors. *Attention, Perception & Psychophysics, 13*, 13.
- French, K. E., & Thomas, J. R. (1987). The relation of knowledge development to children's basketball performance. *Journal of Sport Psychology, 9*, 15-32.
- Gabbett, T. J., Carius, J., & Mulvey, M. (2008). Does improved decision-making ability reduce the physiological demands of game-based activities in field sport athletes? *Journal of strength and conditioning research, 22*, 2027-2035.
- Goodale, M. A., & Milner, A. D. (1992). Separate visual pathways for perception and action. *Trends in neurosciences, 15*, 20-25.
- Green, C. S., & Bavelier, D. (2003). Action video game modifies visual selective attention. *Nature, 423*, 534-537.
- Gréhaigne, J. F., Richard, J. F., & Griffin, L. L. (2012). *Teaching and Learning Team Sports and Games*: Taylor & Francis.
- Helsen, W. F., & Starkes, J. L. (1999). A multidimensional approach to skilled perception and performance in sport. *Applied Cognitive Psychology, 13*, 1-27.
- Hopwood, M., Mann, D., Farrow, D., & Nielsen, T. (2011). Does Visual-Perceptual Training Augment the Fielding Performance of Skilled Cricketers? *International Journal of Sports Science and Coaching, 6*, 523-536.
- Howe, P. D., Horowitz, T. S., Morocz, I. A., Wolfe, J., & Livingstone, M. S. (2009). Using fMRI to distinguish components of the multiple object tracking task. *Journal-of-Vision, 9*, 1-11.

- Hughes, M. D., & Bartlett, R. M. (2002). The use of performance indicators in performance analysis. *Journal Sports Sciences, 20*, 739-754.
- Knudson, D., & Kluka, D. (1997). The impact of vision and vision training on sport performance. *Journal of physical education, recreation & dance, 68*, 17-27.
- Legault, I., & Faubert, J. (2012). Perceptual-cognitive training improves biological motion perception: evidence for transferability of training in healthy aging. *Neuroreport, 23*, 469–473.
- Levitt, H. (1971). Transformed up-down methods in psychoacoustics. *The Journal of the Acoustical Society of America, 49*, Suppl 2:467+.
- Mangine, G. T., Hoffman, J. R., Wells, A. J., Gonzalez, A. M., Rogowski, J. P., Townsend, J. R., Jajtner, A. R., Beyer, K. S., Bohner, J. D., Pruna, G. J., Fragala, M. S., & Stout, J. R. (2014). Visual Tracking Speed Is Related to Basketball-Specific Measures of Performance in NBA Players. *Journal of strength and conditioning research, 28*, 2406-2414.
- McKee, S. P., & Nakayama, K. (1984). The detection of motion in the peripheral visual field. *Vision Research, 24*, 25-32.
- Memmert, D. (2009). Pay attention! A review of visual attentional expertise in sport. *International Review of Sport and Exercise Psychology, 2*, 119-138.
- Mitchell, S. A., Oslin, J. L., & Griffin, L. L. (2013). *Teaching Sport Concepts and Skills: A Tactical Games Approach for Ages 7 to 18*: Human Kinetics.
- Morgan, S., & Patterson, J. (2009). Differences in oculomotor behaviour between elite athletes from visually and non-visually oriented sports. *International Journal of Sport Psychology, 40*, 489-505.
- North, J. S., & Williams, A. M. (2008). Identifying the critical time period for information extraction when recognizing sequences of play. *Research Quarterly for Exercise and Sport, 79*, 268-273.
- Nougier, V., Stein, J.-F., & Bonnel, A.-M. (1991). Information processing in sport and "orienting of attention.". *International Journal of Sport Psychology, 22*, 307-327.
- Parsons, B., Magill, T., Boucher, A., Zhang, M., Zogbo, K., Berube, S., Scheffer, O., Beauregard, M., & Faubert, J. (2014). Enhancing Cognitive Function Using Perceptual-Cognitive Training. *Clinical EEG & Neuroscience*.

- Patterson, R., Pierce, B., Bell, H. H., Andrews, D., & Winterbottom, M. (2009). Training Robust Decision Making in Immersive Environments. *Journal of Cognitive Engineering and Decision Making*, 3, 331-361.
- Ptito, M., Kupers, R., Lomber, S., & Pietrini, P. (2012). Sensory deprivation and brain plasticity. *Neural-Plasticity*, 2012, 810370.
- Ripoll, H. (1991). The understanding-acting process in sport: The relationship between the semantic and the sensorimotor visual function. *International Journal of Sport Psychology*, 22, 221-243.
- Ripoll, H., Kerlirzin, Y., Stein, J. F., & Reine, B. (1995). Analysis of Information-Processing, Decision-Making, and Visual Strategies in Complex Problem-Solving Sport Situations. *Human Movement Science*, 14, 325-349.
- Savelsbergh, G. J. P., Williams, A. M., Van der Kamp, J., & Ward, P. (2002). Visual search, anticipation and expertise in soccer goalkeepers. *Journal Sports Sciences*, 20, 279-287.
- Smeeton, N. J., Ward, P., & Williams, A. M. (2004). Do pattern recognition skills transfer across sports? A preliminary analysis. *Journal Sports Sciences*, 22, 205-213.
- Trick, L. M., Jaspers-Fayer, F., & Sethi, N. (2005). Multiple-object tracking in children: The "Catch the Spies" task. *Cognitive Development*, 20, 373-387.
- Vaeyens, R., Lenoir, M., Williams, A. M., & Philippaerts, R. M. (2007). Mechanisms underpinning successful decision making in skilled youth soccer players: An analysis of visual search Behaviors. *Journal of Motor Behavior*, 39, 395-408.
- Verburgh, L., Scherder, E. J., van Lange, P. A., & Oosterlaan, J. (2014). Executive functioning in highly talented soccer players. *PLoS One*, 9, e91254.
- Vestberg, T., Gustafson, R., Maurex, L., Ingvar, M., & Petrovic, P. (2012). Executive functions predict the success of top-soccer players. *PLoS One*, 7, e34731.
- Vivar, C., Potter, M. C., & van Praag, H. (2013). All about running: synaptic plasticity, growth factors and adult hippocampal neurogenesis. *Current Topics in Behavioral Neurosciences*, 15, 189-210.
- Voss, M. W., Kramer, A. F., Basak, C., Prakash, R. S., & Roberts, B. (2010). Are expert athletes 'expert' in the cognitive laboratory? A meta-analytic review of cognition and sport expertise. *Applied Cognitive Psychology*, 24, 812-826.

- Wallace, J. L., & Norton, K. I. (2014). Evolution of World Cup soccer final games 1966-2010: Game structure, speed and play patterns. *Journal of Science and Medicine in Sport, 17*, 223-228.
- Ward, P., & Williams, A. M. (2003). Perceptual and cognitive skill development in soccer: The multidimensional nature of expert performance. *Journal of Sport & Exercise Psychology, 25*, 93-111.
- Ward, P., Williams, A. M., & Bennett, S. J. (2002). Visual search and biological motion perception in tennis. *Research Quarterly for Exercise and Sport, 73*, 107-112.
- Williams, A. M., & Davids, K. (1997). Assessing cue usage in performance contexts: A comparison between eye-movement and concurrent verbal report methods. *Behavior Research Methods Instruments & Computers, 29*, 364-375.
- Williams, A. M., Hodges, N. J., North, J. S., & Barton, G. (2006). Perceiving patterns of play in dynamic sport tasks: Investigating the essential information underlying skilled performance. *Perception, 35*, 317-332.
- Williams, A. M., Ward, P., & Chapman, C. (2003). Training perceptual skill in field hockey: is there transfer from the laboratory to the field? *Research Quarterly for Exercise and Sport, 74*, 98-103.
- Williams, M. A. (2000). Perceptual skill in soccer: implications for talent identification and development. *Journal Sports Sciences, 18*, 737-750.
- Williams, M. A., Davids, K., & Williams, J. (1999). *Visual perception and action in sport*. London: E & FN Spon.
- Wood, J. M., & Abernethy, B. (1997). An assessment of the efficacy of sports vision training programs. *Optometry and Vision Science: official publication of the American Academy of Optometry, 74*, 646-659.
- Zhang, X., Yan, M., & Yangang, L. (2009). Differential performance of Chinese volleyball athletes and nonathletes on a multiple-object tracking task. *Perceptual & Motor Skills, 109*, 747-756.

Chapitre 4 : Discussion

Le premier objectif de ce projet visait à étudier la supériorité perceptivo-cognitive des athlètes dans des contextes spécifiques et non-spécifiques au sport. L'exercice de mouvement biologique en 3D projeté dans une salle de réalité virtuelle a permis d'étudier l'efficacité et la rapidité avec laquelle des joueurs de soccer et des non-athlètes discriminaient la cinématique du corps humain. Les joueurs de soccer ont été plus efficaces et de manière générale, plus rapides, pour prédire la direction (droite ou gauche) d'un tir de soccer en lisant la cinématique du corps du tireur. Cette tâche relève du domaine sportif et a permis de mettre en évidence l'expertise perceptivo-cognitive spécifique des athlètes. De plus, les joueurs de soccer se sont également montrés plus efficaces et plus rapides pour discriminer la direction d'un marcheur représenté en points lumineux, en particulier à des distances critiques pour éviter les collisions. Dans l'ensemble, les résultats de l'étude ont montré que les athlètes étaient plus performants que les non-athlètes pour discriminer la direction des mouvements du corps humain. Les évidences expliquant la supériorité des athlètes pour lire la cinématique du corps seront discutées dans la section suivante.

Comme l'expertise perceptivo-cognitive semble se transférer à des situations non-contextuelles, un deuxième objectif a été d'évaluer et de confirmer la performance des athlètes dans le traitement de scènes visuelles dynamiques, complexes et neutres (Annexe 1). Un groupe de joueurs de soccer et un autre groupe de jeunes adultes non-athlètes ont été comparés durant 15 sessions d'entraînement sur une tâche de 3D-MOT. Les résultats ont montré une vitesse de suivi visuel supérieure chez les joueurs de soccer ainsi qu'un apprentissage plus important. Les seuils obtenus sont en adéquation avec des données récoltées précédemment chez des sportifs de haut-niveau et confirment ainsi que les athlètes sont meilleurs dans le traitement et l'apprentissage de scènes visuelles dynamiques.

Enfin, nous avons décidé d'évaluer l'efficacité de transfert d'un entraînement perceptivo-cognitif de 3D-MOT sur la prise de décision de joueurs de soccer. Les prises de décision dans les passes, les dribbles et les tirs ont été mesurées et enregistrées durant des matches sur terrain réduit avant et après un protocole d'entraînement rigoureux. Un groupe a été entraîné au 3D-MOT, un autre a regardé des matches de soccer en 3D (contrôle actif) et le dernier n'a suivi aucun entraînement spécifique (contrôle passif). L'analyse des matches a montré que l'efficacité de prise de décision dans les passes des joueurs entraînés au 3D-MOT était supérieure après l'entraînement par rapport aux autres groupes. De plus, l'efficacité de prise

de décision mesurée subjectivement corrélait avec les résultats obtenus dans le groupe entraîné au 3D-MOT. Cette étude démontre pour la première fois qu'un entraînement perceptivo-cognitif non-contextuel peut apporter des bénéfices à l'athlète directement sur le terrain.

Les joueurs de soccer sont meilleurs que les non-athlètes pour percevoir les mouvements biologiques humains qu'ils soient spécifiques ou non-spécifiques à leur sport

Le premier thème abordé à travers cette thèse illustre la capacité supérieure des athlètes de soccer à percevoir les mouvements du corps humain. L'étude de l'expertise, présentée en détail dans l'introduction, explique, entre autre, que les athlètes sont meilleurs pour déterminer les caractéristiques clés du mouvement sportif grâce à une supériorité perceptivo-cognitive spécifique. Plusieurs preuves illustrent cette faculté à travers divers sports tels que le squash (Abernethy, et al., 2001), le badminton (Abernethy & Zawi, 2007), le tennis (Ward, et al., 2002), la danse (Calvo-Merino, Ehrenberg, Leung, & Haggard, 2010) ou encore le basketball (Hohmann, Troje, Olmos, & Munzert, 2011). L'objectif de cette étude a été d'explorer l'expertise dans un contexte spécifique, mais également non-spécifique au sport. En effet, de récentes publications tendent à montrer que l'expertise perceptivo-cognitive peut aussi se transférer dans des contextes plus généraux issus de la vie de tous les jours, comme par exemple la traversée de rues virtuelles encombrées (Chaddock, et al., 2011). Dans cette optique, l'exercice de mouvement biologique a été utilisé dans une salle de réalité virtuelle pour étudier l'efficacité et la rapidité avec laquelle des joueurs de soccer universitaires et des non-athlètes répondaient à des scènes reproduisant la cinématique du corps humain. Dans un cas, le mouvement biologique représentait un joueur de soccer effectuant un tir (mouvement spécifique au sport des participants athlétiques) tandis que dans l'autre cas, le mouvement biologique simulait le mouvement locomoteur d'un marcheur (mouvement non-contextuel issu du quotidien d'un individu lambda). La direction prise par ces deux mouvements variait selon des angles de présentation aléatoires entre chaque essai. Les deux populations devaient répondre le plus efficacement et le plus rapidement possible en effectuant un choix forcé, soit discriminer la direction du tir, soit discriminer la direction du marcheur. En psychologie, cette tâche est plus communément appelée « *facing-task* ». Dans l'ensemble, les résultats de l'étude

ont montré que les athlètes étaient plus performants que les non-athlètes pour percevoir efficacement et rapidement la cinématique du corps humain.

Premièrement, les joueurs de soccer étaient plus efficaces et plus rapides pour prédire et anticiper la direction du tir de soccer. Cette observation concorde avec les données issues de la littérature démontrant que les athlètes font preuve d'une expertise sportive spécifique. Par exemple, des preuves ont montré que les experts de sports de raquette prédisaient la direction d'une frappe de balle plus efficacement que des débutants (Abernethy, et al., 2001; Abernethy & Zawi, 2007; Ward, et al., 2002) ou encore que des joueurs de basketball étaient plus rapides et plus efficaces que des novices dans la reconnaissance de dribbles de basketball (Hohmann, et al., 2011). Les auteurs de ces études s'accordent à dire que l'avantage perceptivo-cognitif des experts provient de leur capacité à sélectionner l'information pertinente à travers la cinématique du corps.

Outre la fluctuation de la valeur de l'angle de présentation qui augmentait la complexité de discrimination, la présente tâche comportait une difficulté additionnelle. En effet, le ballon était masqué de sorte que la trajectoire de la balle devait être prédite uniquement à partir des mouvements du corps du patron de points lumineux. Il existe un exemple similaire d'expérience dans la littérature bien que la recherche en question ne s'intéresse pas aux différences entre experts et novices. Ainsi, Munzert et ses collaborateurs ont étudié la prédiction de lancer de boules de pétanque chez des individus novices envers ce jeu (Munzert, Hohmann, & Hossner, 2010). Le mouvement du patron de points lumineux simulant le corps du lanceur était représenté explicitement contrairement à la boule de pétanque qui elle, était masquée. Cette situation impliquait que l'issue du lancer devait être anticipée et prédite à partir du mouvement du lanceur uniquement, car aucune autre source d'information correspondante à la trajectoire de la balle n'était présentée. Effectivement, les participants se servent des caractéristiques du corps en mouvement lorsqu'ils doivent prédire ce genre de tâche. Ce phénomène se produit généralement à travers de nombreux sports. Par exemple, dans le contexte rapide et dynamique d'un tir de soccer, le temps est insuffisant pour à la fois analyser complètement la trajectoire du ballon et effectuer une réponse adéquate; le ballon mettra en moyenne 600 ms pour atteindre la cage suivant le contact avec le pied lors d'un tir de pénalité (Franks & Hanvey, 1997). Par conséquent, la réponse repose sur l'anticipation des

mouvements du corps de l'opposant, exercice dans lequel les experts excellent puisqu'ils sont capables d'identifier prématurément les indices les plus pertinents (Wright, Bishop, Jackson, & Abernethy, 2011). Le processus d'anticipation dans ce genre de contexte a été étudié. Il semblerait que l'individu qui observe l'action simule les événements observés en utilisant un mécanisme de simulation prédictif interne qui estime les effets sensoriels du mouvement (Bischoff, Zentgraf, Pilgramm, Krueger, Balsler, Sauerbier, Stark, & Munzert, 2015). La prédiction se baserait sur la propre expérience de l'observateur et/ou sur ses propres représentations motrices internes.

Aussi, les différences observées entre athlètes et non-athlètes sur la tâche spécifique favorisent l'hypothèse supportant que le mouvement biologique est appris avec l'expérience. Dans la littérature, peu d'exemples soutiennent que la perception du mouvement biologique est une faculté innée. Il semble toutefois que le système visuel humain bénéficie d'une prédisposition pour la perception du mouvement biologique tel que le montre une étude réalisée chez des nouveaux nés (Simion, Regolin, & Bulf, 2008). De façon générale, il semblerait que la sensibilité envers le mouvement biologique dépende plutôt de l'exposition antérieure ou de la familiarité avec un stimulus. En effet, plusieurs études ont montré que l'expertise visuelle et surtout motrice améliorait la perception du mouvement biologique (Calvo-Merino, et al., 2010; Casile & Giese, 2006; Hohmann, et al., 2011). Par exemple, une étude a montré que des basketteurs étaient supérieurs à d'autres experts non-pratiquants (entraîneurs et journalistes sportifs), dans la prédiction du succès de tirs de lancer-francs (Aglioti, Cesari, Romani, & Urgesi, 2008). Aussi, Casile et Giese ont évalué la perception de nouvelles démarches motrices avant et après un entraînement moteur non visuel chez des participants ayant les yeux bandés (Casile & Giese, 2006). L'entraînement moteur non visuel consistait à apprendre une nouvelle démarche. Cette dernière faisait partie des patrons présentés lors des tests visuels effectués avant et après l'entraînement. Les résultats des tests visuels (entre les séances avant et après entraînement) montraient une amélioration sélective envers le mouvement appris pendant l'entraînement moteur non visuel. De plus, la performance au test visuel après l'entraînement était étroitement liée à l'efficacité d'exécution de la démarche apprise. Par ailleurs, une étude a révélé que les représentations motrices d'un individu s'activaient plus efficacement lors de la perception de mouvements plus familiers tels que ses propres mouvements (Bischoff, Zentgraf, Lorey, Pilgramm, Balsler, Baumgartner,

Hohmann, Stark, Vaitl, & Munzert, 2012). Nos résultats corroborent l'idée que l'expertise visuelle et motrice, chez des joueurs de soccer, améliore la perception du mouvement biologique spécifiquement pour les scènes de cinématique de soccer. Mais de façon encore plus intéressante, les données issues des deux tâches indiquent que la pratique (visuelle et motrice) du soccer améliore, de manière générale, la perception des mouvements humains.

Alors que les joueurs de soccer ont surpassé les non-athlètes dans la perception du mouvement biologique de soccer, ils se sont également montrés plus efficaces et plus rapides pour discriminer la direction de marche d'un patron de points lumineux, en particulier à des distances critiques pour l'évitement des collisions (Legault, Troje, & Faubert, 2012). Ces données suggèrent que les athlètes de soccer ont une meilleure capacité de perception des mouvements du corps humain, indépendamment du domaine d'expertise.

Tout d'abord, le patron de marche a été choisi en tant que cinématique commune à l'expertise des athlètes et des non-athlètes. En effet, percevoir la direction de marche d'un passant est une tâche que l'être humain lambda accomplit tous les jours depuis son plus jeune âge. Dans ce contexte, les deux populations étaient donc considérées comme des expertes de la perception du patron de marche. Les seuils d'efficacité de perception obtenus montrent d'ailleurs que les deux groupes sont très sensibles à la direction du marcheur, même pour des variations d'angles très infimes (de l'ordre de 2-3 degrés). Toutefois, le résultat a révélé que l'expertise perceptivo-cognitive des athlètes était supérieure. Celle-ci confère un avantage qui se généralise à la perception globale de la cinématique du corps humain qu'elle soit spécifique ou non-spécifique au sport. Cette interprétation suggère que l'expertise sportive est liée à des fonctions cognitive et perceptuelle fondamentales qui ne se limitent pas uniquement et spécifiquement au domaine sportif (Nougier, et al., 1991). Telle que présentée dans l'introduction, l'activité physique augmente la plasticité cérébrale et améliore les fonctions cognitive et exécutive. Ces fonctions apparaissent primordiales dans la performance individuelle et la détection de talent au soccer notamment (Verburgh, et al., 2014; Vestberg, et al., 2012). Les facultés cognitives, développées via l'implication dans l'activité physique, sembleraient également apporter des bénéfices lors de l'exécution de tâches multiples du quotidien telles que traverser des rues virtuelles tout en parlant au téléphone (Chaddock, et al., 2011). Les habiletés de haut-niveau cognitif joueraient ainsi un rôle général dans l'expertise

sportive (Voss, et al., 2010). Les résultats obtenus sur la tâche d'intérêt social (discrimination de marche) favorisent l'idée que l'implication dans une activité sportive telle que le soccer apporte des bénéfices sur des fonctions perceptuelles fondamentales telle que la sensibilité de perception du mouvement.

Des études d'imagerie cérébrale soutiennent que la perception du mouvement biologique induit une activité sélective du cerveau, en particulier dans le STS (Oram & Perrett, 1994; Ptito, et al., 2003; Vaina, et al., 2001). Récemment, une étude d'imagerie chez les athlètes et non-athlètes a révélé une augmentation de l'épaisseur corticale du STS qui était corrélée au niveau d'entraînement sportif (Wei, et al., 2011). Le STS fait partie du réseau d'observation de l'action (AON), un regroupement de régions cérébrales impliquées dans la perception des actions. L'AON comprend le gyrus frontal inférieur, le cortex pré-moteur dorsal, le cortex pariétal inférieur, le cortex pariétal supérieur, le sulcus pariétal inférieur, le cortex somato-sensoriel inférieur primaire, le gyrus postérieur médial temporal, l'aire fusiforme du visage et du corps, l'aire visuelle V5 et également le cervelet qui a été identifié plus récemment (Balser, Lorey, Pilgram, Naumann, Kindermann, Stark, Zentgraf, Williams, & Munzert, 2014a; Balser, Lorey, Pilgram, Stark, Bischoff, Zentgraf, Williams, & Munzert, 2014b; Caspers, Zilles, Laird, & Eickhoff, 2010). La recherche sur l'expertise dans le sport a évalué la façon dont l'acquisition de l'habileté d'exécution d'une action (ex. : mouvement de sport) pouvait affecter l'activité de l'AON. Les études ont révélé une plus forte activation de ce réseau chez les experts en comparaison à des novices lorsqu'un mouvement spécifique était présenté sous forme de vidéoprojection (Balser, et al., 2014a; Balser, et al., 2014b; Turella, Wurm, Tucciarelli, & Lingnau, 2013). Balser et ses collaborateurs ont par exemple démontré une augmentation de l'activation neuronale dans des aires de l'AON conséquemment à l'anticipation de frappe de balle au tennis chez des experts et des novices (Balser, et al., 2014b). L'activation était corrélée au niveau d'expertise de telle sorte que les athlètes démontraient des niveaux d'activation plus importants par rapport aux contrôles. Dans le même temps, le groupe d'experts surpassait également les novices sur une mesure comportementale (tâche d'anticipation). Au cours d'une seconde étude, les auteurs ont pu identifier le cortex pariétal supérieur comme structure impliquée dans le traitement de l'information contextuelle spécifique au domaine et le cervelet comme région utilisant des modèles internes qui permettent la prédiction rapide de la survenue d'une action (Balser, et al.,

2014a). Il serait intéressant d'évaluer le degré d'activation des régions de l'AON suivant la présentation de mouvements biologiques spécifiques et non-spécifiques au domaine d'expertise d'athlètes par rapport à des non-athlètes. D'après les évidences précédentes, il est fort probable que l'AON s'active de façon plus importante chez les athlètes lors des deux tâches. Les résultats obtenus dans cette étude suggèrent que les athlètes sont meilleurs pour percevoir les mouvements effectués par les autres, même lorsque l'information perceptuelle est insuffisante comme c'est le cas dans la projection du mouvement biologique.

Durant cette étude, un des objectifs fut de contrôler et d'investiguer l'effet d'inversion en comparant la performance des participants entre les patrons de mouvement présentés debout et à l'envers. Cette méthode permet principalement de vérifier que le patron de mouvement est de nature biologique. En effet, la logique veut que lorsque le mouvement est de nature biologique, l'efficacité de perception est largement affectée lorsque le mouvement est présenté à l'envers puisqu'il s'agit d'une configuration peu habituelle (Dittrich, 1993; Legault, et al., 2012; Pavlova & Sokolov, 2000). Cet effet est attribué aux représentations globales que le système visuel apprend dans une orientation particulière. Ce phénomène a notamment été mis en évidence dans des études de reconnaissance de visage où les visages présentés à l'endroit étaient reconnus plus efficacement et plus rapidement que lorsqu'ils étaient présentés de façon inversée (Yin, 1969). Les résultats obtenus durant notre étude vont dans ce sens puisque les participants ont fait preuve d'une performance significativement supérieure (efficacité et temps de réaction) dans la condition à l'endroit plutôt qu'à l'envers. De plus, les données montraient également que la performance des joueurs de soccer dans la condition inversée était supérieure à celle des non-athlètes pour la tâche du marcheur (temps de réaction) et celle du tir de soccer (efficacité et temps de réaction). Ces effets sont à mettre en parallèle avec ceux d'une étude récente révélant que les joueurs de soccer possèdent une capacité visuo-spatiale supérieure traduite par une rapidité accrue dans le traitement de stimuli inversés par rapport à des novices (Jansen, Lehmann, & Van Doren, 2012).

À travers cette étude, nous avons pu observer que les niveaux de performance (efficacité et temps de réaction) pour discriminer la direction d'un marcheur, comparé à la direction d'un tir de soccer, étaient fortement différents. Ces deux patrons de points lumineux, de natures

différentes, ont été utilisés afin d'éviter un effet plafond causé par l'expertise (voir notamment Legault, et al., 2012). En effet, ils requièrent chacun un type différent d'expertise allant d'un environnement spécifique au soccer à un mouvement perçu dans la vie de tous les jours. Auparavant, Dittrich (1993) avait démontré que les actions locomotrices telles que la marche étaient reconnues plus efficacement et plus rapidement que les actions sociales ou instrumentales telles que des dribbles de basketball ou la boxe (Dittrich, 1993). Les résultats de notre étude appuient les découvertes de Dittrich. Pour expliquer ce phénomène, il est important de s'intéresser à la façon dont l'information visuelle est traitée pour percevoir chaque mouvement. Ainsi, il a été démontré que les participants se focalisent principalement sur les pieds du patron pour discriminer la direction d'un marcheur en points lumineux (Chang & Troje, 2009; Saunders, Williamson, & Troje, 2010; Troje & Westhoff, 2006). D'autres preuves ont montré que des participants expérimentés et naïfs pouvaient aussi utiliser l'information de la structure du corps (analyse globale du mouvement du corps) pour estimer la direction du marcheur mais ces études utilisaient des stimuli statiques (Lange & Lappe, 2007; Reid, Brooks, Blair, & van der Zwan, 2009). D'un autre côté, la discrimination de la direction d'un tir de soccer pourrait nécessiter différentes sources d'information par rapport au mouvement du marcheur. Les premières études utilisant des analyses de film ou des oculomètres ont suggéré que les experts utilisaient l'information locale pour anticiper les tirs de pénalités. En général, le mouvement local était principalement défini par l'orientation du pied opposé à la frappe (Franks & Hanvey, 1997; Savelsbergh, Van der Kamp, Williams, & Ward, 2005; Savelsbergh, Williams, Van der Kamp, & Ward, 2002). Cependant, l'utilisation de l'information locale représentait seulement une petite portion du temps de fixation totale du stimulus. De plus, l'information provenant du mouvement était sélectionnée via la périphérie dans des parties extérieures à la région de contact avec le ballon (Savelsbergh, et al., 2005; Savelsbergh, et al., 2002). Ces indices suggèrent que l'anticipation d'un tir ne repose pas simplement sur la perception de l'information locale illustrée par l'angle du pied opposé à la frappe. En effet, l'action de tirer conjuguée au maintien de la stabilité posturale représente une cinématique complexe qui implique la participation des bras, des jambes, du torse et de la tête; par conséquent, les composantes du mouvement semblent être distribuées à travers tout le corps plutôt que localisées sur un segment du corps en particulier comme dans le cas du marcheur (ex. : les pieds). Diaz et ses collaborateurs (2012) ont identifié une liste de sources

d'informations utilisées pour juger de la direction d'un tir : l'angle de rotation du bassin, l'angle de contact du pied avec le ballon, et deux sources d'information distribuées à travers le corps du tireur (Diaz, Fajen, & Phillips, 2012). Les auteurs suggéraient que la direction du tir était perçue sur la base de l'information distribuée, potentiellement en conjonction avec une source viable d'information locale (ex. : angle de contact pied-ballon). L'information distribuée (soccer) par rapport à l'information locale (marcheur) pourrait expliquer les différences observées entre les deux tâches de mouvement biologique.

De plus, toujours dans l'objectif d'éviter un effet plafond, nous avons utilisé des angles de présentation variables selon la technique des stimuli constants. Par le passé, Saunders et ses collaborateurs (2010) ont démontré que la fluctuation des angles de présentation produisait un changement dans l'efficacité. Ainsi, les présentations plus frontales (ex. : proches de 0 degré) induisaient un plus bas niveau d'efficacité de réponse par rapport aux présentations plus latérales (ex. : 15 degrés) (Saunders, et al., 2010). Nous avons pu observer le même phénomène à travers cette étude. Dans l'ensemble, les résultats ont confirmé que changer d'angle de vue ainsi que la nature de la tâche de mouvement biologique augmentait la difficulté de perception du mouvement biologique. Ces techniques sont donc appropriées pour explorer les niveaux d'expertise chez l'homme.

À l'aide du paradigme de mouvement biologique, nous avons réussi à identifier la supériorité contextuelle et non-contextuelle des athlètes pour la première fois au sein d'une seule et même étude. Nos résultats suggèrent que la répétition des efforts durant une activité physique particulière engendre non seulement une spécialisation spécifique au domaine mais également un remaniement des fonctions de plus haut-niveau qui sont utiles dans la vie de tous les jours. Il est ainsi très probable que la pratique du sport confère une forme d'intelligence qui peut se matérialiser dans l'exécution d'activités quotidiennes. Le second objectif visait à observer cette capacité supérieure générale dans un contexte abstrait c'est à dire le traitement de scènes visuelles dynamiques.

Les joueurs de soccer sont supérieurs aux non-athlètes dans le traitement et l'apprentissage de scènes visuelles dynamiques complexes et neutres (Annexe 1)

Dans une étude récente, le Professeur Jocelyn Faubert (2013) a mis en évidence la supériorité des athlètes professionnels (n=102) par rapport à des semi-professionnels (n=173) et des non-athlètes (n=33) lors d'une tâche perceptivo-cognitive de 3D-MOT (Faubert, 2013). L'exercice évaluait la capacité de vitesse de suivi visuel à travers des scènes dynamiques complexes et dénuées de contexte sportif. Les résultats ont révélé pour la première fois que la capacité de traitement mental et d'apprentissage des athlètes représentait un élément crucial de la performance de haut niveau dans le sport. La présente étude a tenté de corroborer ces résultats en évaluant cette faculté chez un groupe d'athlètes de soccer universitaires comparé à un groupe de non-athlètes.

Les résultats du 3D-MOT obtenus après 15 sessions d'entraînement chez les joueurs de soccer ont confirmé les résultats obtenus précédemment avec des athlètes professionnels et semi-professionnels (Faubert, 2013). En d'autres termes, les athlètes étaient meilleurs au départ (premier contact avec l'expérience) et tout au long de l'entraînement, en plus d'afficher une capacité d'apprentissage supérieure dans le traitement de scènes visuelles dynamiques et complexes. En effet, les seuils au 3D-MOT, traduisant la capacité de vitesse de suivi visuel, étaient qualitativement similaires à ceux obtenus précédemment chez des athlètes (Faubert, 2013; Faubert & Sidebottom, 2012). La vitesse de suivi visuel semble être une composante capitale pour atteindre la performance parmi le sport d'élite. D'ailleurs, une étude récente a montré que le niveau de réussite au 3D-MOT était étroitement lié au niveau de performance des athlètes sur le terrain (Mangine, et al., 2014). Dans le sport, la qualité d'un athlète repose entre autre, sur sa faculté à intégrer et à traiter rapidement et efficacement les multiples sources d'information au sein d'un environnement tridimensionnel et dynamique. Un joueur capable d'assimiler rapidement la position et le déplacement de ses coéquipiers, de ses adversaires et du ballon, sera plus à même de créer des chances de marquer ou d'éviter de commettre des erreurs préjudiciables pour son équipe. Il semblerait que le 3D-MOT reflète ces capacités chez l'athlète. Le 3D-MOT stimule la poursuite attentionnelle d'objets en mouvement dans un cadre écologique. Le principe fondamental de la technique consiste à

distribuer son attention sur un certain nombre d'éléments dynamiques (Cavanagh & Alvarez, 2005). D'ailleurs, la distribution de l'attention sur plusieurs stimuli ou emplacements durant une période de temps prolongée est reconnue comme une qualité importante pour la pratique du sport (Memmert, 2009). D'autres constatations ont montré que des sportifs, jeunes et adultes, étaient supérieurs à des non-athlètes dans le suivi d'éléments durant des tâches de MOT (Barker, Allen, & McGeorge, 2010; Trick, et al., 2005b; Zhang, et al., 2009). Aussi, des individus ont montré une capacité supérieure dans le paradigme de MOT tels que des joueurs experts en jeux vidéo (Green & Bavelier, 2006) ou encore des opérateurs radars dont le travail quotidien consiste à déterminer la position et la vitesse d'objets en mouvement (Allen, McGeorge, Pearson, & Milne, 2004). Qu'il s'agisse d'athlètes, de joueurs experts en jeux vidéo, ou d'opérateurs radars, ces individus pratiquent régulièrement leur habileté de suivi attentionnel ce qui explique cette capacité supérieure.

De plus, les données obtenues révèlent une capacité d'apprentissage impressionnante chez les joueurs de soccer par rapport aux non-athlètes suivant l'entraînement perceptivo-cognitif. L'activité physique augmente la plasticité cérébrale (voir chapitre « 2.1 Plasticité cérébrale »), notamment dans l'hippocampe, une structure impliquée dans les processus de mémorisation et d'apprentissage (Jarrard, 1995; Ruediger, Vittori, Bednarek, Genoud, Strata, Sacchetti, & Caroni, 2011). Il serait donc légitime de penser qu'une personne physiquement active possède une capacité d'apprentissage supérieure. Ainsi, on peut se demander si les athlètes ont une capacité d'apprentissage supérieure qui se généralise à différents contextes, autres que le suivi attentionnel (Faubert, 2013). Alors que plusieurs études montrent les bienfaits de l'activité physique sur les performances académiques (ex. : Rauner, Walters, Avery, & Wanser, 2013), à notre connaissance, une seule étude dans la littérature s'est précisément concentrée sur la capacité d'apprentissage (Raine, Lee, Saliba, Chaddock-Heyman, Hillman, & Kramer, 2013). Le groupe de recherche du Professeur Kramer de l'université de l'Illinois a évalué des jeunes enfants âgés de 9 à 10 ans sur un test de mémorisation incluant des noms de régions et des emplacements à apprendre sur des cartes fictives (Raine, et al., 2013). Les participants étaient séparés en deux groupes selon leur niveau de forme physique (mesurée sur la base de leur capacité aérobie). Les résultats montraient que le groupe de participants en meilleure forme physique mémorisait mieux les régions que le groupe plus sédentaire, en particulier dans les

conditions présentant le plus de défi. Cependant, aucune différence n'était observée dans l'efficacité d'apprentissage des régions entre les deux groupes. Ces données chez les jeunes enfants actifs ainsi que les performances d'athlètes adultes sur la tâche de 3D-MOT (Faubert, 2013; Romeas, Guldner, & Faubert, 2015) invitent à explorer davantage la faculté d'apprentissage après exercice. Les évidences actuelles suggèrent que l'hippocampe est une structure affectée par l'activité physique et impliquée dans les processus d'apprentissage et de mémorisation (Erickson, et al., 2013; Erickson, et al., 2011; Ruediger, et al., 2011).

Encore, la façon dont les facultés de poursuite attentionnelle et d'apprentissage apparaissent chez les athlètes, ainsi que leur développement demeure inconnue. Ward et Williams (2003) ont évalué la capacité perceptivo-cognitive de joueurs de soccer élites et sous-élites âgés de 9 à 17 ans en utilisant des tests de probabilité de situation, d'anticipation et de reconnaissance de patrons de jeu (Ward & Williams, 2003). Les tests d'anticipation et de probabilité de situation étaient les meilleurs pour différencier les deux groupes de joueurs. Quant au test de reconnaissance de patrons de jeu, il était le plus prédictif de l'âge des joueurs. Ainsi, dès l'âge de 9 ans, les joueurs de soccer élites démontrent une capacité perceptivo-cognitive supérieure par rapport au groupe sous-élite. Par ailleurs, les tests visuels (ex. : acuité visuelle statique et dynamique) effectués n'ont pas permis de différencier les deux groupes de joueurs. Ces découvertes ont été soutenues par d'autres études montrant que le développement des habiletés de prise de décision dans le sport différenciaient des joueurs de haut et de plus bas niveau dès l'âge de 8 ± 4 ans (French & Thomas, 1987; McPherson & Thomas, 1989). Il semblerait que les prises de décision puissent être développées dès 8-10 ans chez de jeunes joueurs de tennis (McPherson & Thomas, 1989). Ces publications sur le développement des capacités perceptivo-cognitives chez les jeunes joueurs ont toutes été menées suivant une approche de la performance experte. Des données préliminaires très récentes obtenues à l'aide du 3D-MOT tentent d'explorer la question selon l'approche basée sur les habiletés de composante cognitive. Des joueurs de soccer d'âges variés issus d'une académie de soccer ont été évalués durant plusieurs séances de 3D-MOT (Annexe 2). D'après ces données préliminaires, il semblerait que les joueurs de soccer, dès l'âge de 11 ans, aient une capacité de suivi visuel supérieure à celle de non-athlètes âgés de 18 à 35 ans. De plus, bien que subtile, une légère différence dans la vitesse de suivi visuel semblerait distinguer les joueurs âgés de

11 à 12 ans de ceux âgés de plus de 13 ans. Ces résultats sont en faveur de l'idée que les facultés perceptivo-cognitives se développent avec l'âge. La différence observée avec les non-athlètes pourrait également suggérer l'implication de facteurs innés dans cette performance. Des études supplémentaires réalisées sur de plus larges effectifs seront nécessaires afin de répondre à ces nombreuses questions. Après avoir mis en évidence l'importante amélioration des joueurs de soccer sur l'exercice de 3D-MOT en laboratoire, nous avons décidé d'évaluer si cette fulgurante amélioration pouvait apporter des bénéfices à l'athlète sur le terrain.

L'entraînement au 3D-MOT améliore l'efficacité de prise de décision des passes chez des joueurs de soccer

Le 3D-MOT est un exercice perceptivo-cognitif de haut niveau en lien direct avec l'expertise et la performance sportive (Faubert, 2013; Mangine, et al., 2014). Cet outil d'entraînement a même démontré ses effets sur les fonctions cognitives et l'attention (Parsons, et al., 2014). La problématique de ce projet a consisté à évaluer la transférabilité du 3D-MOT sur le terrain. La mesure de transfert est reconnue comme le moyen le plus adapté pour juger de l'efficacité d'une technique d'entraînement. Précédemment, le 3D-MOT a démontré un transfert de bénéfices dans l'amélioration de la perception du mouvement biologique, en laboratoire, chez des personnes âgées (Legault & Faubert, 2012). L'hypothèse émise à travers cette étude était que cet entraînement perceptivo-cognitif stimulant l'attention sélective, dynamique, soutenue et le traitement rapide de cibles en mouvement dans le champ visuel de l'athlète, pourrait aider à l'exécution des prises de décision (passes, dribbles, tirs) sur le terrain.

L'hypothèse d'un transfert des bénéfices de l'entraînement au 3D-MOT sur les prises de décision des athlètes a été confirmée lors de cette étude. Le résultat majeur a démontré une amélioration significative de 15% de l'efficacité de la prise de décision dans les passes des joueurs de soccer entraînés au 3D-MOT, contrairement aux autres joueurs des groupes contrôles (actif et passif). Concernant les prises de décision des dribbles et des tirs, aucun impact significatif n'a été observé malgré une tendance à l'amélioration pour le dribble ($F[1,14]=3,828$; $p=0,078$). Cependant, le faible nombre de dribbles et de tirs tentés par les

joueurs durant les tests sur le terrain ne nous permettent pas réellement de tirer des conclusions au niveau de ces aptitudes. En effet, le nombre de dribbles (5.1 ± 0.63) et de tirs (4.0 ± 0.52) comparé au nombre de passes (15.5 ± 0.93) durant les séances avant et après entraînement a engendré une importante variance dans les résultats. Pour cette raison, nous avons décidé de centrer la discussion sur l'amélioration des prises de décision dans les passes. Plusieurs raisons permettent d'expliquer l'implication d'un entraînement de 3D-MOT dans l'amélioration de la prise de décision dans un sport tel que le soccer.

Tout d'abord, l'attention et la concentration sont des habiletés cruciales qui affectent la prise de décision des athlètes (Bar-Eli, et al., 2011). Ces derniers utilisent constamment leur attention sélective, divisée et soutenue lorsqu'ils sont sur le terrain. Prenons l'exemple du soccer, un sport d'invasion où le but principal est d'envahir le territoire de l'opposant pour occuper l'espace et marquer durant la phase offensive (Mitchell, Oslin, & Griffin, 2013). L'action se déroule dans un environnement complexe et en constante évolution où différentes décisions doivent être prises sous des contraintes de pression et de temps. Pour marquer, les joueurs doivent sélectionner les meilleures options le plus rapidement possible (attention sélective et divisée), et être capable de maintenir leur attention sur une cible en particulier (attention soutenue). Bien souvent, en une fraction de seconde, les joueurs doivent décider du bon moment pour protéger la balle, dribbler, passer le ballon ou encore tirer au but. La qualité de la décision est cruciale dans le succès de l'équipe. Le 3D-MOT stimule le suivi attentionnel d'objets en mouvement. La technique exerce notamment le traitement actif de l'information visuelle dynamique qui est considéré comme une partie cruciale de la composante perceptuelle impliquée dans le processus de prise de décision. De plus, la méthode utilise des seuils de vitesse comme variable dépendante. La mesure de seuil de vitesse entraîne l'implication de plus de ressources attentionnelles pour suivre les cibles à des vitesses élevées (Feria, 2012). La vitesse de suivi visuel a été récemment mise en lien direct avec l'habileté des athlètes à voir et à répondre à des stimuli variés sur un court de basketball (Mangine, et al., 2014). L'étude montrait, en particulier, qu'une meilleure vitesse de suivi visuel conduisait à un nombre plus important de jeux positifs sur le court (ex. : meilleur ratio de passe). Les théories sur la capacité de transfert suggèrent le chevauchement de réseaux neuronaux et de processus cognitifs qui seraient communs au 3D-MOT et au mécanisme de prise de décision sur le terrain (Dahlin, et al., 2008). D'ailleurs, des preuves neurologiques récentes ont mis en

lumière le rôle du 3D-MOT dans l'amélioration de l'attention, du traitement de l'information visuelle et de la mémoire de travail (Parsons, et al., 2014). D'autres techniques d'imagerie ont révélé que le MOT activait des aires cérébrales de haut niveau impliquées dans les processus attentionnels (Culham, Brandt, Cavanagh, Kanwisher, Dale, & Tootell, 1998; Howe, Horowitz, Morocz, Wolfe, & Livingstone, 2009), telles que certaines aires des régions pariétales et frontales du cortex qui sont impliquées dans les déplacements de l'attention et le mouvement des yeux. Aussi, le complexe médian-temporal a été impliqué durant des tâches de MOT dans la perception du mouvement (Culham, et al., 1998). Ces voies cérébrales pourraient être recrutées lors de la « lecture » du jeu au soccer, un processus connu pour activer les voies dorsales et ventrales (Goodale & Milner, 1992). Entraîner le cerveau à activer simultanément ces réseaux pourrait aider à améliorer l'exécution perceptivo-cognitive des athlètes. Les résultats de l'étude suggèrent donc que la poursuite attentionnelle de plusieurs éléments durant le 3D-MOT entraîne le chevauchement de réseaux neuronaux requis durant les processus perceptuels de la prise de décision. De cette façon, l'entraînement au 3D-MOT pourrait favoriser l'automatisation de ces réseaux et améliorer la prise de décision. Des études d'imagerie et d'électroencéphalographie seront toutefois nécessaires pour confirmer ces hypothèses et identifier les processus neuronaux à l'origine des améliorations entraînées par le 3D-MOT.

Il est important d'ajouter que d'autres caractéristiques particulières au 3D-MOT contribuent à l'efficacité de la technique. Ainsi, l'exercice fait appel à la réalité virtuelle qui implique la stéréoscopie (disparité binoculaire), requise dans les situations où des éléments rapides, complexes et dynamiques entrent en collision ou se chevauchent. La 3D permet notamment d'améliorer la performance dans la poursuite d'objets en mouvement par comparaison à une stimulation présentée sans disparité binoculaire (Tinjust, et al., 2008). Ce phénomène s'explique notamment par le fait que la stéréoscopie permet de désambiguïser les occlusions d'objets lors du traitement de ces scènes visuelles dynamiques (Faubert & Allard, 2013). La vision 3D donne également des indices précis de profondeur dans des tâches de mouvement biologique par exemple (de Lussanet & Lappe, 2012; Jackson & Blake, 2010). Ces exemples représentent typiquement le genre de situations critiques qui sont retrouvées au soccer lorsque les joueurs sont proches les uns des autres. Enfin, le 3D-MOT est une technique qui utilise une large capacité du champ visuel de l'athlète car la vision périphérique est

reconnue comme fondamentale dans la performance dans les sports d'équipe (Knudson & Kluka, 1997). La vision périphérique est l'habileté à détecter et réagir à des stimuli en dehors de la vision fovéale. Les athlètes utilisent à la fois leur vision centrale et périphérique pour extraire l'information clé de la scène visuelle (Vaeyens, et al., 2007; Williams, 2000). L'information en mouvement est elle-même extraite efficacement via la vision périphérique (Williams, et al., 1999). Souvent, au travers du jeu, le joueur utilisera à la fois sa vision centrale et sa vision périphérique. En général, les joueurs de soccer fixent le ballon dans leur vision fovéale et utilisent en même temps leur vision périphérique pour évaluer la position des autres joueurs sur le terrain (Williams & Davids, 1997). Une étude a par exemple montré que des joueurs de soccer experts en prise de décision utilisaient le possesseur du ballon comme point d'ancrage visuel pour ensuite explorer l'environnement et en extraire l'information critique pour la prise de décision (Vaeyens, et al., 2007). Le 3D-MOT inclut un tel point d'ancrage pour permettre à ces stratégies d'opérer. À ce sujet, des études sur les mouvements des yeux durant l'exercice de MOT ont identifié les stratégies de recherche visuelle des participants. Quand plusieurs cibles étaient présentées (ex. : 3), les participants utilisaient généralement une stratégie de regard centralisée comme s'ils regroupaient les cibles en un seul élément (ex. : triangle) et regardaient au centre de cet objet formé par les cibles (Fehd & Seiffert, 2008). Cette stratégie contraste avec une stratégie de regard plus ciblée où le participant réalise des saccades de cible en cible. Une autre étude par Fehd et Seiffert (2010) a démontré que les participants engageaient souvent ces deux types de stratégie, soit de regard ciblé soit de regard centralisé (Fehd & Seiffert, 2010). Ainsi, les stratégies visuelles engagées durant l'exercice de MOT pourraient se rapprocher de celles utilisées par les experts sur le terrain pour extraire l'information de la scène visuelle. L'entraînement perceptivo-cognitif, non-contextuel, de 3D-MOT semble donc impliquer à la fois des habiletés cognitives de haut-niveau du système nerveux central mais également des stratégies de recherche visuelle utilisées dans la perception de l'action. Cet outil, bien que non-spécifique au soccer, semble bien capturer la nature dynamique et complexe de ce sport stratégique.

D'un point de vue de la performance sportive, le résultat obtenu dans cette étude est d'un intérêt marqué au regard de l'importance de la prise de décision et des passes dans le soccer moderne. Les athlètes de soccer de haut-niveau ont aujourd'hui besoin de prendre des

décisions plus rapidement que jamais, principalement parce qu'en tant que sport compétitif, le soccer augmente en rapidité (15%), en intensité et en taux de passe (35%), d'après une analyse réalisée sur des matches de soccer de la coupe du monde durant les quarante dernières années (Wallace & Norton, 2014). Les passes sont d'ailleurs considérées comme un facteur crucial de succès et de performance dans les sports d'invasion (Hughes & Bartlett, 2002). Passer le ballon à un coéquipier est une habileté essentielle et fondamentale pour les joueurs de soccer (Ali, 2011) et qui représente la capacité à garder la possession de balle et est la source d'opportunités de marquer (Chassy, 2013). Une étude intéressante de Chassy (2013) a révélé que la densité et la précision des passes sont de très bons indicateurs de l'habileté d'une équipe à garder la possession de balle (99,85%) et à se créer des opportunités de tir (94,92%). Or, la possession de balle est un facteur significatif pour générer la performance au soccer (Jones, James, & Mellalieu, 2004; Lago-Ballesteros & Lago-Penas, 2010). Dans le soccer moderne, l'accent est mis sur l'efficacité de passe et la possession de balle. Cette philosophie de jeu, très à la mode, est illustrée par le succès exceptionnel d'équipes telles que le Football Club de Barcelone et est aujourd'hui une méthode adoptée par de nombreuses académies de soccer à travers le monde.

Tandis que les effets objectifs du transfert étaient évalués, des données subjectives ont été parallèlement récoltées auprès de chaque joueur directement après les matches effectués sur terrain réduit. Chaque joueur devait juger sa propre efficacité de décision durant les matches qu'il venait de réaliser. Les résultats du groupe expérimental montraient une amélioration de l'efficacité de prise de décision subjective entre les séances avant et après entraînement qui était quantitativement similaire à l'augmentation de 15% observée lors de l'analyse des prises de décision dans les passes. D'autre part, les joueurs des groupes contrôles ne montraient aucune différence. Cette mesure suggère que les joueurs ayant reçu l'entraînement perceptivo-cognitif étaient conscients de leur amélioration dans leurs prises de décisions sur le terrain. Le résultat soutient que l'effet observé dans les prises de décisions provient bel et bien de l'entraînement plutôt que de la familiarité avec l'environnement de test ou l'espoir d'obtenir des bénéfices de l'entraînement.

Alors que les résultats de l'étude semblent très prometteurs, il reste encore de nombreux points à éclaircir. Il sera par exemple primordial de confirmer ces résultats à plus large échelle et de pouvoir quantifier les prises de décision dans les tirs et les dribbles. Pour ce faire, réduire la taille du terrain pourrait favoriser les situations de un contre un et augmenter le nombre d'actions dirigées vers le but. Cela aurait pour incidence d'augmenter respectivement le ratio de dribbles et de tirs. Il reste encore à connaître l'implication du 3D-MOT sur la performance d'autres sports d'invasion (ex. : hockey, basketball etc...) et de raquette (ex. : tennis) par exemple. Dans l'ensemble, nous avons pour la première fois réussi à montrer qu'un entraînement perceptivo-cognitif non-contextuel pouvait améliorer la performance des athlètes sur le terrain. Ce transfert du laboratoire au terrain ouvre des perspectives sur l'incidence des entraînements perceptivo-cognitifs dans le sport de haut-niveau. La littérature rapporte que les approches de composante experte et cognitive sont légitimes et efficaces pour mesurer l'expertise sportive chez les athlètes. Cependant, les méthodes d'entraînement spécifiques au domaine d'expertise pourraient présenter une certaine limite notamment lorsqu'elles sont utilisées pour améliorer les habiletés perceptivo-cognitives chez des athlètes de haut niveau qui sont déjà experts dans leur domaine. Alors que le mouvement biologique peut être une tâche cruciale pour observer les niveaux d'expertise, cette technique perceptivo-cognitive pourrait être moins flexible et plus restrictive pour produire une amélioration perceptuelle suivant un entraînement chez des individus experts dans l'anticipation des mouvements opposants. Par contre, la technique pourrait avoir un rôle beaucoup plus prometteur et influent chez les jeunes joueurs qui sont encore en plein développement ou après une blessure affectant les habiletés perceptivo-cognitives (ex. : évaluation des seuils de perception avant le retour au jeu suivant une commotion cérébrale). D'un autre côté, l'approche fondée sur la composante cognitive se base sur des exercices impliquant des processus de plus haut-niveau cognitif et touchant un plus large spectre de la performance sportive. Les deux approches pourraient chacune posséder leur propre type d'application dans le cadre de l'entraînement perceptivo-cognitif sportif. Potentiellement, la combinaison de ces deux techniques au sein d'un seul et même paradigme (double-tâche) de haut-niveau pourrait apporter des bénéfices encore plus importants. Par exemple, discriminer le mouvement biologique spécifique au domaine d'expertise tout en exécutant la poursuite d'éléments en mouvement à travers des scènes visuelles dynamiques pourrait être envisagé pour pousser le cerveau au-delà de ses limites. Un

des objectifs fondamentaux de l'entraînement est de réduire les ressources attentionnelles requises pour produire un résultat particulier. La réduction, par l'entraînement, de la demande attentionnelle requise pour une tâche de performance en optimisant les mécanismes cérébraux, pourrait permettre une relocalisation des ressources de l'athlète envers d'autres aspects du jeu, tels que les tactiques et stratégies.

Chapitre 6 : Conclusion

L'étude des capacités perceptivo-cognitives dans le sport nous a permis de mettre en évidence l'expertise exceptionnelle des athlètes pour percevoir le mouvement biologique humain. Les joueurs de soccer ont été capables d'identifier les indices clés du mouvement d'un tireur de soccer représenté dans sa plus simple forme (points lumineux) avec efficacité et rapidité par rapport à des non-athlètes. Mais ils ont aussi réussi à mieux discriminer la cinématique d'un marcheur en points lumineux, mettant ainsi en lumière une capacité perceptivo-cognitive fondamentale pour reconnaître la cinématique du corps humain. L'expertise sportive est donc liée à des fonctions cognitives et perceptuelles fondamentales qui ne se limitent pas uniquement et spécifiquement au domaine sportif. Il est probable que l'AON, un réseau impliqué dans la perception de l'action et incluant notamment le STS, soit impliqué et activé plus efficacement chez les athlètes grâce à leur engagement visuel et moteur lors de la pratique du soccer. Le cerveau des joueurs de soccer semble donc spécialisé dans la reconnaissance des mouvements du corps humain, qu'ils soient aussi complexes qu'une cinématique de sport ou aussi simples qu'une démarche du quotidien.

Par la suite, cette capacité fondamentale a été mise en évidence lors d'un exercice de poursuite attentionnelle de cibles en mouvement. Les résultats des athlètes au 3D-MOT par rapport à des novices ont confirmé leur capacité extraordinaire dans le traitement et l'apprentissage de scènes visuelles dynamiques, complexes mais également dénuées de contexte sportif. Ces données soutiennent l'influence positive de l'activité physique sur les fonctions cognitives de haut-niveau. Aussi, les différents travaux mettant en lumière les modifications subites par l'hippocampe suivant l'activité physique et nos découvertes ouvrent la porte à un thème peu abordé en sciences du sport, soit l'étude des capacités d'apprentissage des athlètes.

Enfin, le 3D-MOT a été évalué pour sa capacité à entraîner les facultés perceptivo-cognitives des athlètes. Contrairement aux entraînements visuels classiques, cet outil exerce le traitement actif de l'information visuelle dynamique qui est critique dans des sports comme le soccer. Il stimule également plusieurs types d'attentions qui sont essentiels dans la prise de décision des sportifs. L'entraînement a montré un effet de transfert de bénéfices sur la prise de

décision lors des passes (amélioration de 15%) chez des joueurs de soccer entraînés durant 10 séances. Cette amélioration a été corroborée par une augmentation qualitativement similaire de l'efficacité de prise de décision subjective évaluée par les joueurs eux-mêmes. Cette étude met en lumière la capacité plastique du cerveau et encourage l'implication des entraînements perceptivo-cognitifs non-contextuels dans la performance sportive tout en suggérant leur influence directe sur les fonctions cognitives de haut-niveau. L'ensemble de ces résultats appuie le développement d'outils d'entraînement perceptivo-cognitif pour la recherche de performance dans le sport. Les exercices contextuels et non-contextuels sont légitimes pour améliorer les capacités mentales des athlètes. Ces deux approches semblent cependant agir de façon distinctive sur l'expertise sportive. Le choix de l'utilisation de l'une ou l'autre des techniques pourrait dépendre de facteurs tels que l'âge du joueur, sa condition physique (blessure), son niveau d'expertise ou encore ses forces et faiblesses. Il reste encore du chemin à parcourir pour savoir à quel âge ces techniques se rendront le plus efficace et montreront des effets. Ces recherches relanceront et exploreront certainement le débat de la spécialisation précoce dans le sport. Quoiqu'il en soit, il est important de bien comprendre l'outil pour en faire une bonne utilisation. Dans le futur, un programme basé sur la combinaison de ces deux approches donnera peut-être les meilleurs résultats et permettra de repousser encore un peu plus les limites de la performance chez l'athlète.

Bibliographie

- Abernethy, B. (1987). Selective attention in fast ball sports. II: Expert novice differences. *Australian Journal of Science and Medicine in Sport*, *19*, 7-16.
- Abernethy, B., Baker, J., & Côté, J. (2005). Transfer of pattern recall skills may contribute to the development of sport expertise. *Applied Cognitive Psychology*, *19*, 705-718.
- Abernethy, B., Burgess-Limerick, R., & Parks, S. (1994). Contrasting Approaches to the Study of Motor Expertise. *Quest*, *46*, 186-198.
- Abernethy, B., Gill, D. P., Parks, S. L., & Packer, S. T. (2001). Expertise and the perception of kinematic and situational probability information. *Perception*, *30*, 233-252.
- Abernethy, B., & Russell, D. G. (1987). Expert Novice Differences in an Applied Selective Attention Task. *Journal of Sport Psychology*, *9*, 326-345.
- Abernethy, B., & Wood, J. M. (2001). Do generalized visual training programmes for sport really work? An experimental investigation. *Journal of Sports Sciences*, *19*, 203-222.
- Abernethy, B., & Zawi, K. (2007). Pickup of essential kinematics underpins expert perception of movement patterns. *Journal of Motor Behavior*, *39*, 353-367.
- Aglioti, S. M., Cesari, P., Romani, M., & Urgesi, C. (2008). Action anticipation and motor resonance in elite basketball players. *Nature Neuroscience*, *11*, 1109-1116.
- Aguiar, M., Botelho, G., Lago, C., Maças, V., & Sampaio, J. (2012). A Review on the Effects of Soccer Small-Sided Games. *Journal of Human Kinetics*, *33*, 103-113.
- Ali, A. (2011). Measuring soccer skill performance: a review. *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports*, *21*, 170-183.
- Allard, F., & Starks, J. L. (1980). Perception in Sport: Volleyball. *Journal of Sport Exercise Psychology*, *2*.
- Allen, R., McGeorge, P., Pearson, D., & Milne, A. B. (2004). Attention and expertise in multiple target tracking. *Applied Cognitive Psychology*, *18*, 337-347.
- Alvarez, G. A., & Cavanagh, P. (2005). Independent resources for attentional tracking in the left and right visual hemifields. *Psychological Science*, *16*, 637-643.
- Alves, H., Voss, M. W., Boot, W. R., Deslandes, A., Cossich, V., Salles, J. I., & Kramer, A. F. (2013). Perceptual-cognitive expertise in elite volleyball players. *Frontiers in Psychology*, *4*, 36.
- Appelbaum, L. G., Cain, M. S., Schroeder, J. E., Darling, E. F., & Mitroff, S. R. (2012). Stroboscopic visual training improves information encoding in short-term memory. *Attention, perception & psychophysics*, *74*, 1681-1691.
- Appelbaum, L. G., Schroeder, J. E., Cain, M. S., & Mitroff, S. R. (2011). Improved visual cognition through stroboscopic training. *Frontiers in Psychology*, *2*.
- Auclair, P. (2009). *Cantona: The Rebel Who Would Be King*: Pan Macmillan.
- Baker, J., Cote, J., & Abernethy, B. (2003a). Sport-Specific Practice and the Development of Expert Decision-Making in Team Ball Sports. *Journal of Applied Sport Psychology*, *15*, 12-25.
- Baker, J., Côté, J., & Deakin, J. (2005). Expertise in Ultra-Endurance Triathletes Early Sport Involvement, Training Structure, and the Theory of Deliberate Practice. *Journal of Applied Sport Psychology*, *17*, 64-78.

- Baker, J., Horton, S., Robertson-Wilson, J., & Wall, M. (2003b). Nurturing sport expertise: factors influencing the development of elite athlete. *Journal of sports science & medicine*, *2*, 1-9.
- Balser, N., Lorey, B., Pilgramm, S., Naumann, T., Kindermann, S., Stark, R., Zentgraf, K., Williams, A. M., & Munzert, J. (2014a). The influence of expertise on brain activation of the action observation network during anticipation of tennis and volleyball serves. *Frontiers in Human Neuroscience*, *8*, 568.
- Balser, N., Lorey, B., Pilgramm, S., Stark, R., Bischoff, M., Zentgraf, K., Williams, A. M., & Munzert, J. (2014b). Prediction of human actions: Expertise and task-related effects on neural activation of the action observation network. *Human Brain Mapping*.
- Bar-Eli, M., Plessner, H., & Raab, M. (2011). *Judgment, Decision-making and Success in Sport*. Wiley.
- Barker, K., Allen, R., & McGeorge, P. (2010). Multiple-object tracking: enhanced visuospatial representations as a result of experience. *Experimental Psychology*, *57*, 208-214.
- Baroncelli, L., Braschi, C., Spolidoro, M., Begenisic, T., Maffei, L., & Sale, A. (2011). Brain plasticity and disease: a matter of inhibition. *Neural Plasticity*, *2011*, 286073.
- Beauchamp, M. K., Harvey, R. H., & Beauchamp, P. H. (2012). An Integrated Biofeedback and Psychological Skills Training Program for Canada's Olympic Short-Track Speedskating Team. *Journal of Clinical Sport Psychology*, *6*, 67-84.
- Beier, K. P. (2001). Virtual football trainer. In University of Michigan.
- Berardi, N., Pizzorusso, T., & Maffei, L. (2000). Critical periods during sensory development. *Current opinion in neurobiology*, *10*, 138-145.
- Berry, J., Abernethy, B., & Cote, J. (2008). The contribution of structured activity and deliberate play to the development of expert perceptual and decision-making skill. *Journal of sport & exercise psychology*, *30*, 685-708.
- Bideau, B., Kulpa, R., Vignais, N., Brault, S., Multon, F., & Craig, C. (2010). Using virtual reality to analyze sports performance. *IEEE Computer Graphics and Applications*, *30*, 14-21.
- Bischoff, M., Zentgraf, K., Lorey, B., Pilgramm, S., Balser, N., Baumgartner, E., Hohmann, T., Stark, R., Vaitl, D., & Munzert, J. (2012). Motor familiarity: brain activation when watching kinematic displays of one's own movements. *Neuropsychologia*, *50*, 2085-2092.
- Bischoff, M., Zentgraf, K., Pilgramm, S., Krueger, B., Balser, N., Sauerbier, I., Stark, R., & Munzert, J. (2015). Anticipating action effects with different attention foci is reflected in brain activation. *Perceptual and motor skills*, *120*, 36-56.
- Calvo-Merino, B., Ehrenberg, S., Leung, D., & Haggard, P. (2010). Experts see it all: configural effects in action observation. *Psychological Research*, *74*, 400-406.
- Carling, C., Reilly, T., & Williams, A. M. (2009). *Performance assessment for field sports* (Oxford ed.). Routledge.
- Casanova, F., Oliveira, J., Williams, M., & Garganta, J. (2009). Expertise and perceptual-cognitive performance in soccer: a review. *Revista Portuguesa de Ciências do Desporto*, *9*, 115-122.
- Caserta, R. J., Young, J., & Janelle, C. M. (2007). Old dogs, new tricks: training the perceptual skills of senior tennis players. *Journal of sport & exercise psychology*, *29*, 479-497.
- Casile, A., & Giese, M. A. (2006). Nonvisual motor training influences biological motion perception. *Current Biology*, *16*, 69-74.

- Caspers, S., Zilles, K., Laird, A. R., & Eickhoff, S. B. (2010). ALE meta-analysis of action observation and imitation in the human brain. *NeuroImage*, *50*, 1148-1167.
- Cavanagh, P., & Alvarez, G. A. (2005). Tracking multiple targets with multifocal attention. *Trends in cognitive sciences*, *9*, 349-354.
- Chaddock, L., Neider, M. B., Voss, M. W., Gaspar, J. G., & Kramer, A. F. (2011). Do athletes excel at everyday tasks? *Medicine and Science in Sports and Exercise*, *43*, 1920-1926.
- Chang, D. H., & Troje, N. F. (2009). Acceleration carries the local inversion effect in biological motion perception. *Journal of Vision*, *9*, 19 11-17.
- Chase, W. G., & Simon, H. A. (1973). *Perception in Chess*: Department of Psychology, Carnegie-Mellon University.
- Chassy, P. (2013). Team Play in Football: How Science Supports F. C. Barcelona's Training Strategy. *Psychology*, *4*, 7-12.
- Chugani, H. T. (1998). A critical period of brain development: studies of cerebral glucose utilization with PET. *Preventive medicine*, *27*, 184-188.
- Clark, J. F., Ellis, J. K., Bench, J., Khoury, J., & Graman, P. (2012). High-performance vision training improves batting statistics for University of Cincinnati baseball players. *PLoS One*, *7*, e29109.
- Coghlan, A. (2003). Elite athletes are born to run. *New Scientist*, *179*, 4-5.
- Cotman, C. W., & Berchtold, N. C. (2002). Exercise: a behavioral intervention to enhance brain health and plasticity. *Trends in neurosciences*, *25*, 295-301.
- Craig, C. M., Bastin, J., & Montagne, G. (2011). How information guides movement: intercepting curved free kicks in soccer. *Human movement science*, *30*, 931-941.
- Culham, J. C., Brandt, S. A., Cavanagh, P., Kanwisher, N. G., Dale, A. M., & Tootell, R. B. (1998). Cortical fMRI activation produced by attentive tracking of moving targets. *Journal of neurophysiology*, *80*, 2657-2670.
- Dahlin, E., Neely, A. S., Larsson, A., Backman, L., & Nyberg, L. (2008). Transfer of learning after updating training mediated by the striatum. *Science*, *320*, 1510-1512.
- Davids, K., & Baker, J. (2007). Genes, environment and sport performance: why the nature-nurture dualism is no longer relevant. *Sports medicine*, *37*, 961-980.
- de Lussanet, M. H., & Lappe, M. (2012). Depth perception from point-light biological motion displays. *Journal of vision*, *12*.
- Detterman, D. K. (1992). The case for the prosecution: Transfer as an epiphenomenon. In S. E. Detterman (Ed.), *Transfer on trial* (pp. pp. 1-24). NJ: Ablex: Norwood.
- Deveau, J., Ozer, D. J., & Seitz, A. R. (2014). Improved vision and on-field performance in baseball through perceptual learning. *Current Biology*, *24*, R146-R147.
- Diaz, G. J., Fajen, B. R., & Phillips, F. (2012). Anticipation from biological motion: the goalkeeper problem. *Journal of experimental psychology. Human perception and performance*, *38*, 848-864.
- Dittrich, W. (1999). Seeing Biological Motion - Is There a Role for Cognitive Strategies? Gesture-Based Communication in Human-Computer Interaction. In A. Braffort, R. Gherbi, S. Gibet, D. Teil & J. Richardson (Eds.), (Vol. 1739, pp. 3-22): Springer Berlin / Heidelberg.
- Dittrich, W. H. (1993). Action categories and the perception of biological motion. *Perception*, *22*, 15-22.
- Draganski, B., & May, A. (2008). Training-induced structural changes in the adult human brain. *Behavioural Brain Research*, *192*, 137-142.

- Duffy, L. J., Baluch, B., & Ericsson, K. A. (2004). Dart performance as a function of facets of practice amongst professional and amateur men and women players. *International Journal of Sport Psychology*, *35*, 232-245.
- Epstein, D. (2013). *The Sports Gene: Inside the Science of Extraordinary Athletic Performance*: Penguin Group (USA) Incorporated.
- Erickson, K. I., Gildengers, A. G., & Butters, M. A. (2013). Physical activity and brain plasticity in late adulthood. *Dialogues in Clinical Neuroscience*, *15*, 99-108.
- Erickson, K. I., Voss, M. W., Prakash, R. S., Basak, C., Szabo, A., Chaddock, L., Kim, J. S., Heo, S., Alves, H., White, S. M., Wojcicki, T. R., Mailey, E., Vieira, V. J., Martin, S. A., Pence, B. D., Woods, J. A., McAuley, E., & Kramer, A. F. (2011). Exercise training increases size of hippocampus and improves memory. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, *108*, 3017-3022.
- Ericsson, K. A. (2000). Expert Performance and Deliberate Practice: an updated excerpt from Ericsson. In (Vol. Retrieved July 3, 2014).
- Ericsson, K. A. (2013). Training history, deliberate practice and elite sports performance: an analysis in response to Tucker and Collins review--what makes champions? *British journal of sports medicine*, *47*, 533-535.
- Ericsson, K. A., Krampe, R. T., & Tesch-Römer, C. (1993). *The role of deliberate practice in the acquisition of expert performance*: R. Th. Krampe.
- Ericsson, K. A., Nandagopal, K., & Roring, R. W. (2009). Toward a science of exceptional achievement: attaining superior performance through deliberate practice. *Annals of the New York Academy of Sciences*, *1172*, 199-217.
- Faubert, J. (2013). Professional athletes have extraordinary skills for rapidly learning complex and neutral dynamic visual scenes. *Scientific Reports*, *3*, 1154.
- Faubert, J., & Allard, R. (2013). Stereoscopy benefits processing of dynamic visual scenes by disambiguating object occlusions. *Journal of Vision*, *13*, 1292.
- Faubert, J., Giroud, M., Tinjust, D., & Allard, R. (2009). Elders can be trained to process fast moving objects in complex 3D scenes as well as untrained young adults. *Proceedings of the XIX IAGG World Congress of Gerontology and Geriatrics, Paris*, P 52.
- Faubert, J., & Sidebottom, L. (2012). Perceptual-Cognitive Training of Athletes. *Journal of Clinical Sports Psychology*, *6*, 85-102.
- Fehd, H. M., & Seiffert, A. E. (2008). Eye movements during multiple object tracking: where do participants look? *Cognition*, *108*, 201-209.
- Fehd, H. M., & Seiffert, A. E. (2010). Looking at the center of the targets helps multiple object tracking. *Journal of vision*, *10*, 19 11-13.
- Feria, C. S. (2012). Speed has an effect on multiple-object tracking independently of the number of close encounters between targets and distractors. *Attention, perception & psychophysics*, *13*, 13.
- Franks, I. M., & Hanvey, T. (1997). Cues for goalkeepers: high-tech methods used to measure penalty shot response. *Soccer Journal*, *42*, 30-33.
- French, K. E., & Thomas, J. R. (1987). The relation of knowledge development to children's basketball performance. *Journal of Sport Psychology*, *9*, 15-32.
- Gabbett, T., Rubinoff, M., Thorburn, L., & Farrow, D. (2007). Testing and Training Anticipation Skills in Softball Fielders. *International Journal of Sports Science and Coaching*, *2*, 15-24.

- Gabbett, T. J., Carius, J., & Mulvey, M. (2008). Does improved decision-making ability reduce the physiological demands of game-based activities in field sport athletes? *Journal of Strength and Conditioning Research*, *22*, 2027-2035.
- Gaspar, J. G., Neider, M. B., Crowell, J. A., Lutz, A., Kaczmariski, H., & Kramer, A. F. (2013). Are Gamers Better Crossers: An Examination of Action Video Game Experience and Dual Task Effects in a Simulated Street Crossing Task. *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*.
- Gibbons, T., & Committee, U. S. O. (2002). *The Path to Excellence: A Comprehensive View of Development of U.S. Olympians who Competed from 1984-1998*: United States Olympic Committee.
- Gobet, F., & Campitelli, G. (2007). The role of domain-specific practice, handedness, and starting age in chess. *Developmental Psychology*, *43*, 159-172.
- Gobet, F., & Simon, H. A. (1996). Templates in chess memory: a mechanism for recalling several boards. *Cognitive psychology*, *31*, 1-40.
- Goodale, M. A., & Milner, A. D. (1992). Separate visual pathways for perception and action. *Trends in Neurosciences*, *15*, 20-25.
- Gopher, D., Well, M., & Bareket, T. (1994). Transfer of Skill from a Computer Game Trainer to Flight. *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, *36*, 387-405.
- Green, C. S., & Bavelier, D. (2006). Enumeration versus multiple object tracking: the case of action video game players. *Cognition*, *101*, 217-245.
- Gretzky, W., Taylor, C., & Taylor, J. (1984). *Gretzky : from the Back Yard Rink to the Stanley Cup*: McClelland & Stewart.
- Helsen, W. F., & Starkes, J. L. (1999). A multidimensional approach to skilled perception and performance in sport. *Applied Cognitive Psychology*, *13*, 1-27.
- Hensch, T. K. (2004). Critical period regulation. *Annual review of neuroscience*, *27*, 549-579.
- Hohmann, T., Troje, N. F., Olmos, A., & Munzert, J. (2011). The influence of motor expertise and motor experience on action and actor recognition. *Journal of Cognitive Psychology*, *23*, 403-415.
- Hopwood, M., Mann, D., Farrow, D., & Nielsen, T. (2011). Does Visual-Perceptual Training Augment the Fielding Performance of Skilled Cricketers? *International Journal of Sports Science and Coaching*, *6*, 523-536.
- Howe, P. D., Horowitz, T. S., Morocz, I. A., Wolfe, J., & Livingstone, M. S. (2009). Using fMRI to distinguish components of the multiple object tracking task. *Journal of Vision*, *9*, 1-11.
- Hughes, M. D., & Bartlett, R. M. (2002). The use of performance indicators in performance analysis. *Journal Sports Sciences*, *20*, 739-754.
- Jackson, S., & Blake, R. (2010). Neural integration of information specifying human structure from form, motion, and depth. *The Journal of neuroscience : the official journal of the Society for Neuroscience*, *30*, 838-848.
- Jajtner, A. R., Hoffman, J. R., Scanlon, T. C., Wells, A. J., Townsend, J. R., Beyer, K. S., Mangine, G. T., McCormack, W. P., Bohner, J. D., Fragala, M. S., & Stout, J. R. (2013). Performance and muscle architecture comparisons between starters and nonstarters in National Collegiate Athletic Association Division I women's soccer. *Journal of strength and conditioning research*, *27*, 2355-2365.

- Jansen, P., Lehmann, J., & Van Doren, J. (2012). Mental rotation performance in male soccer players. *PLoS One*, *7*, e48620.
- Jarrard, L. E. (1995). What does the hippocampus really do? *Behavioural Brain Research*, *71*, 1-10.
- Johansson, G. (1973). Visual perception of biological motion and a model for its analysis. *Attention, Perception, & Psychophysics*, *14*, 201-211.
- Johnson, J. G., & Raab, M. (2003). Take The First: Option-generation and resulting choices. *Organizational Behavior and Human Decision Processes*, *91*, 215-229.
- Jones, P. D., James, N., & Mellalieu, S. D. (2004). Possession as a performance indicator in soccer. *International Journal of Performance Analysis in Sport*, *4*, 98-104.
- Kellman, P. J., & Garrigan, P. (2009). Perceptual learning and human expertise. *Physics of life reviews*, *6*, 53-84.
- Kioumourtzoglou, E., Kourtessis, T., Michalopoulou, M., & Derri, V. (1998). Differences in several perceptual abilities between experts and novices in basketball, volleyball and water-polo. *Perceptual and motor skills*, *86*, 899-912.
- Knudson, D., & Kluka, D. (1997). The impact of vision and vision training on sport performance. *Journal of Physical Education, Recreation & Dance*, *68*, 17-27.
- Kobilo, T., Liu, Q. R., Gandhi, K., Mughal, M., Shaham, Y., & van Praag, H. (2011). Running is the neurogenic and neurotrophic stimulus in environmental enrichment. *Learning & memory*, *18*, 605-609.
- Kramer, A. F., & Erickson, K. I. (2007). Capitalizing on cortical plasticity: influence of physical activity on cognition and brain function. *Trends in cognitive sciences*, *11*, 342-348.
- Kupers, R., Chebat, D. R., Madsen, K. H., Paulson, O. B., & Ptito, M. (2010). Neural correlates of virtual route recognition in congenital blindness. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, *107*, 12716-12721.
- Laby, D. M., Rosenbaum, A. L., Kirschen, D. G., Davidson, J. L., Rosenbaum, L. J., Strasser, C., & Mellman, M. F. (1996). The visual function of professional baseball players. *American Journal of Ophthalmology*, *122*, 476-485.
- Lago-Ballesteros, J., & Lago-Penas, C. (2010). Performance in Team Sports: Identifying the Keys to Success in Soccer. *Journal of Human Kinetics*, *25*, 85-91.
- Lange, J., & Lappe, M. (2007). The role of spatial and temporal information in biological motion perception. *Advances in cognitive psychology*, *3*, 419-428.
- Lavallee, D., Kremer, J., Moran, A. P., & Williams, M. (2004). *Sport psychology: Contemporary themes*: Palgrave Macmillan Basingstoke, UK.
- Lee, H., Voss, M. W., Prakash, R. S., Boot, W. R., Vo, L. T., Basak, C., Vanpatter, M., Gratton, G., Fabiani, M., & Kramer, A. F. (2012). Videogame training strategy-induced change in brain function during a complex visuomotor task. *Behavioural Brain Research*, *232*, 348-357.
- Legault, I., & Faubert, J. (2012). Perceptual-cognitive training improves biological motion perception: evidence for transferability of training in healthy aging. *Neuroreport*, *23*, 469-473.
- Legault, I., Troje, N. F., & Faubert, J. (2012). Healthy older observers cannot use biological-motion point-light information efficiently within 4 m of themselves. *iPerception*, *3*, 104-111.

- Levitt, H. (1971). Transformed up-down methods in psychoacoustics. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 49, Suppl 2:467+.
- Mahncke, H. W., Connor, B. B., Appelman, J., Ahsanuddin, O. N., Hardy, J. L., Wood, R. A., Joyce, N. M., Boniske, T., Atkins, S. M., & Merzenich, M. M. (2006). Memory enhancement in healthy older adults using a brain plasticity-based training program: a randomized, controlled study. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 103, 12523-12528.
- Mangine, G. T., Hoffman, J. R., Wells, A. J., Gonzalez, A. M., Rogowski, J. P., Townsend, J. R., Jajtner, A. R., Beyer, K. S., Bohner, J. D., Pruna, G. J., Fragala, M. S., & Stout, J. R. (2014). Visual Tracking Speed Is Related to Basketball-Specific Measures of Performance in NBA Players. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 28, 2406-2414.
- Mann, D. L., Ho, N. Y., De Souza, N. J., Watson, D. R., & Taylor, S. J. (2007a). Is optimal vision required for the successful execution of an interceptive task? *Human Movement Science*, 26, 343-356.
- Mann, D. T., Williams, A. M., Ward, P., & Janelle, C. M. (2007b). Perceptual-cognitive expertise in sport: a meta-analysis. *Journal of sport & exercise psychology*, 29, 457-478.
- Marteniuk, R. G. (1976). *Information processing in motor skills*.
- McPherson, S. L., & Thomas, J. R. (1989). Relation of knowledge and performance in boys' tennis: age and expertise. *Journal of experimental child psychology*, 48, 190-211.
- Memmert, D. (2009). Pay attention! A review of visual attentional expertise in sport. *International Review of Sport and Exercise Psychology*, 2, 119-138.
- Mitchell, S. A., Oslin, J. L., & Griffin, L. L. (2013). *Teaching Sport Concepts and Skills: A Tactical Games Approach for Ages 7 to 18*: Human Kinetics.
- Mitroff, S. R., Friesen, P., Bennett, D., Yoo, H., & Reichow, A. (2013). Enhancing Ice Hockey Skills Through Stroboscopic Visual Training: A Pilot Study. *Athletic Training and Sports Health Care*, 261-264.
- Mori, S., Ohtani, Y., & Imanaka, K. (2002). Reaction times and anticipatory skills of karate athletes. *Human Movement Science*, 21, 213-230.
- Munzert, J., Hohmann, T., & Hossner, E. J. (2010). Discriminating throwing distances from point-light displays with masked ball flight. *European Journal of Cognitive Psychology*, 22, 247-264.
- North, J. S., & Williams, A. M. (2008). Identifying the critical time period for information extraction when recognizing sequences of play. *Research Quarterly for Exercise and Sport*, 79, 268-273.
- Nougier, V., Stein, J.-F., & Bonnel, A.-M. (1991). Information processing in sport and "orienting of attention.". *International Journal of Sport Psychology*, 22, 307-327.
- Oksama, L., & Hyönä, J. (2004). Is multiple object tracking carried out automatically by an early vision mechanism independent of higher-order cognition? An individual difference approach. *Visual Cognition*, 11, 631-671.
- Oram, M. W., & Perrett, D. I. (1994). Responses of Anterior Superior Temporal Polysensory (STPa) Neurons to "Biological Motion" Stimuli. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 6, 99-116.

- Ouellette, M., Chagnon, M., & Faubert, J. (2009). Evaluation of human behavior in collision avoidance: a study inside immersive virtual reality. *Cyberpsychology & Behavior, 12*, 215-218.
- Parasuraman, R., & Galster, S. (2013). Sensing, assessing, and augmenting threat detection: behavioral, neuroimaging, and brain stimulation evidence for the critical role of attention. *Frontiers in human neuroscience, 7*, 273.
- Parsons, B., Magill, T., Boucher, A., Zhang, M., Zogbo, K., Berube, S., Scheffer, O., Beauregard, M., & Faubert, J. (2014). Enhancing Cognitive Function Using Perceptual-Cognitive Training. *Clinical EEG and neuroscience*.
- Pavlova, M., & Sokolov, A. (2000). Orientation specificity in biological motion perception. *Perception & psychophysics, 62*, 889-899.
- Poltavski, D., & Biberdorf, D. (2015). The role of visual perception measures used in sports vision programmes in predicting actual game performance in Division I collegiate hockey players. *Journal of Sports Sciences, 33*, 597-608.
- Ptito, M., Faubert, J., Gjedde, A., & Kupers, R. (2003). Separate neural pathways for contour and biological-motion cues in motion-defined animal shapes. *Neuroimage, 19*, 246-252.
- Ptito, M., Kupers, R., Lomber, S., & Pietrini, P. (2012). Sensory deprivation and brain plasticity. *Neural Plasticity, 2012*, 810370.
- Pylyshyn. (1989). The role of location indexes in spatial perception: a sketch of the FINST spatial-index model. *Cognition, 32*, 65-97.
- Pylyshyn, & Storm. (1988a). Tracking multiple independent targets: evidence for a parallel tracking mechanism. *Spatial vision, 3*, 179-197.
- Pylyshyn, Z. (1994). Some primitive mechanisms of spatial attention. *Cognition, 50*, 363-384.
- Pylyshyn, Z. W., & Storm, R. W. (1988b). Tracking multiple independent targets: evidence for a parallel tracking mechanism. *Spatial Vision, 3*, 179-197.
- Raab, M., & Johnson, J. G. (2007). Expertise-based differences in search and option-generation strategies. *Journal of experimental psychology. Applied, 13*, 158-170.
- Raine, L. B., Lee, H. K., Saliba, B. J., Chaddock-Heyman, L., Hillman, C. H., & Kramer, A. F. (2013). The influence of childhood aerobic fitness on learning and memory. *PLoS One, 8*, e72666.
- Rankinen, T., Roth, S. M., Bray, M. S., Loos, R., Perusse, L., Wolfarth, B., Hagberg, J. M., & Bouchard, C. (2010). Advances in exercise, fitness, and performance genomics. *Medicine and science in sports and exercise, 42*, 835-846.
- Rauner, R. R., Walters, R. W., Avery, M., & Wanser, T. J. (2013). Evidence that aerobic fitness is more salient than weight status in predicting standardized math and reading outcomes in fourth- through eighth-grade students. *Journal of Pediatrics, 163*, 344-348.
- Reid, R., Brooks, A., Blair, D., & van der Zwan, R. (2009). Snap! Recognising implicit actions in static point-light displays. *Perception, 38*, 613-616.
- Reilly, T. (2005). An ergonomics model of the soccer training process. *Journal of Sports Sciences, 23*, 561-572.
- Roca, A., Ford, P. R., McRobert, A. P., & Mark Williams, A. (2011). Identifying the processes underpinning anticipation and decision-making in a dynamic time-constrained task. *Cognitive processing, 12*, 301-310.

- Roca, A., Williams, A. M., & Ford, P. R. (2012). Developmental activities and the acquisition of superior anticipation and decision making in soccer players. *Journal of Sports Sciences, 30*, 1643-1652.
- Romeas, T., Guldner, A., & Faubert, J. (2015). 3D-Multiple Object Tracking task training improves passing decision-making accuracy in soccer players. *Psychology of Sport and Exercise*, In press.
- Ruediger, S., Vittori, C., Bednarek, E., Genoud, C., Strata, P., Sacchetti, B., & Caroni, P. (2011). Learning-related feedforward inhibitory connectivity growth required for memory precision. *Nature, 473*, 514-518.
- Sabel, B. A., Henrich-Noack, P., Fedorov, A., & Gall, C. (2011). Vision restoration after brain and retina damage: the "residual vision activation theory". *Progress in brain research, 192*, 199-262.
- Saunders, D. R., Williamson, D. K., & Troje, N. F. (2010). Gaze patterns during perception of direction and gender from biological motion. *Journal of Vision, 10*, 9.
- Savelsbergh, G. J., Van der Kamp, J., Williams, A. M., & Ward, P. (2005). Anticipation and visual search behaviour in expert soccer goalkeepers. *Ergonomics, 48*, 1686-1697.
- Savelsbergh, G. J. P., Williams, A. M., Van der Kamp, J., & Ward, P. (2002). Visual search, anticipation and expertise in soccer goalkeepers. *Journal of Sports Sciences, 20*, 279-287.
- Simion, F., Regolin, L., & Bulf, H. (2008). A predisposition for biological motion in the newborn baby. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 105*, 809-813.
- Simon, H. A., & Chase, W. G. (1973). Skill in chess. *American Scientist, 61*, 394-403.
- Smeeton, N. J., Ward, P., & Williams, A. M. (2004). Do pattern recognition skills transfer across sports? A preliminary analysis. *Journal of Sports Sciences, 22*, 205-213.
- Smith, A. D., & Zigmond, M. J. (2003). Can the brain be protected through exercise? Lessons from an animal model of parkinsonism. *Experimental neurology, 184*, 31-39.
- Smith, T. Q., & Mitroff, S. R. (2012). Stroboscopic training enhances anticipatory timing. *International Journal of Exercise Science, 5*, Article 4.
- Starkes, J. L., & Deakin, J. (1984). Perception in sport: A cognitive approach to skilled performance. In Lansing (Ed.), *Cognitive Sport Psychology* (Vol. 115-28). NY: Sport Science Associates.
- Starkes, J. L., & Ericsson, K. A. (2003). *Expert Performance in Sports: Advances in Research on Sport Expertise*: Human Kinetics.
- Starkes, J. L., & Lindley, S. (1994). Can We Hasten Expertise by Video Simulations? *Quest, 46*, 211-222.
- Tinjust, D., Allard, R., & Faubert, J. (2008). Impact of stereoscopic vision and 3D representation of visual space on multiple object tracking performance. *Journal of Vision, 8*, 509.
- Trick, L. M., Jaspers-Fayer, F., & Sethi, N. (2005a). Multiple-object tracking in children: The "Catch the Spies" task. *Cognitive Development, 20*, 373-387.
- Trick, L. M., Perl, T., & Sethi, N. (2005b). Age-related differences in multiple-object tracking. *The journals of gerontology. Series B, Psychological sciences and social sciences, 60*, P102-105.
- Troje, N. F. (2002). Decomposing biological motion: a framework for analysis and synthesis of human gait patterns. *Journal of Vision, 2*, 371-387.

- Troje, N. F., & Westhoff, C. (2006). The inversion effect in biological motion perception: evidence for a "life detector"? *Current Biology*, *16*, 821-824.
- Tucker, R., & Collins, M. (2012a). Athletic performance and risk of injury: can genes explain all? *Dialogues in Cardiovascular Medicine*, *17*, 31-39.
- Tucker, R., & Collins, M. (2012b). *Athletic performance and risk of injury: can genes explain all?* (Vol. 17). Neuilly sur Seine, FRANCE: Servier.
- Tucker, R., & Collins, M. (2012c). What makes champions? A review of the relative contribution of genes and training to sporting success. *British journal of sports medicine*, *46*, 555-561.
- Turella, L., Wurm, M. F., Tucciarelli, R., & Lingnau, A. (2013). Expertise in action observation: recent neuroimaging findings and future perspectives. *Frontiers in Human Neuroscience*, *7*, 637.
- Vaeyens, R., Lenoir, M., Williams, A. M., & Philippaerts, R. M. (2007). Mechanisms underpinning successful decision making in skilled youth soccer players: An analysis of visual search Behaviors. *Journal of Motor Behavior*, *39*, 395-408.
- Vaeyens, R., Lenoir, M., Williams, A. M., & Philippaerts, R. M. (2008). Talent identification and development programmes in sport : current models and future directions. *Sports medicine*, *38*, 703-714.
- Vaina, L. M., Solomon, J., Chowdhury, S., Sinha, P., & Belliveau, J. W. (2001). Functional neuroanatomy of biological motion perception in humans. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, *98*, 11656-11661.
- Verburgh, L., Scherder, E. J., van Lange, P. A., & Oosterlaan, J. (2014). Executive functioning in highly talented soccer players. *PLoS One*, *9*, e91254.
- Vestberg, T., Gustafson, R., Maurex, L., Ingvar, M., & Petrovic, P. (2012). Executive functions predict the success of top-soccer players. *PLoS One*, *7*, e34731.
- Viswanathan, L., & Mingolla, E. (2002). Dynamics of attention in depth: evidence from multi-element tracking. *Perception*, *31*, 1415-1437.
- Vivar, C., Potter, M. C., & van Praag, H. (2013). All about running: synaptic plasticity, growth factors and adult hippocampal neurogenesis. *Current Topics in Behavioral Neurosciences*, *15*, 189-210.
- Voss, M. W., Kramer, A. F., Basak, C., Prakash, R. S., & Roberts, B. (2010). Are expert athletes 'expert' in the cognitive laboratory? A meta-analytic review of cognition and sport expertise. *Applied Cognitive Psychology*, *24*, 812-826.
- Wallace, J. L., & Norton, K. I. (2014). Evolution of World Cup soccer final games 1966-2010: Game structure, speed and play patterns. *Journal of Science and Medicine in Sport*, *17*, 223-228.
- Wang, C.-H., Chang, C.-C., Liang, Y.-M., Shih, C.-M., Muggleton, N. G., & Juan, C.-H. (2013). Temporal Preparation in Athletes: A Comparison of Tennis Players and Swimmers With Sedentary Controls. *Journal of motor behavior*, *45*, 55-63.
- Ward, P., & Williams, A. M. (2003). Perceptual and cognitive skill development in soccer: The multidimensional nature of expert performance. *Journal of sport & exercise psychology*, *25*, 93-111.
- Ward, P., Williams, A. M., & Bennett, S. J. (2002). Visual search and biological motion perception in tennis. *Research Quarterly for Exercise and Sport*, *73*, 107-112.
- Ward, P., Williams, A. M., & Loran, D. F. C. (2000). The development of visual function in elite and sub-elite soccer players. *International Journal of Sports Vision*, *6*, 1-11.

- Wei, G., Zhang, Y., Jiang, T., & Luo, J. (2011). Increased cortical thickness in sports experts: a comparison of diving players with the controls. *PLoS One*, *6*, e17112.
- Wells, A. J., Hoffman, J. R., Beyer, K. S., Jajner, A. R., Gonzalez, A. M., Townsend, J. R., Mangine, G. T., Robinson, E. H. t., McCormack, W. P., Fragala, M. S., & Stout, J. R. (2014). Reliability of the dynavision d2 for assessing reaction time performance. *Journal of Sports Science and Medicine*, *13*, 145-150.
- Wiesel, T. N., & Hubel, D. H. (1963). Single-Cell Responses in Striate Cortex of Kittens Deprived of Vision in One Eye. *Journal of neurophysiology*, *26*, 1003-1017.
- Wilkins, L., & Gray, R. (2015). Effects of Stroboscopic Visual Training on Visual Attention, Motion Perception, and Catching Performance. *Perceptual and motor skills*, *121*, 57-79.
- Williams, A. M., Hodges, N. J., North, J. S., & Barton, G. (2006). Perceiving patterns of play in dynamic sport tasks: investigating the essential information underlying skilled performance. *Perception*, *35*, 317-332.
- Williams, A. M., Burwitz, L. (1993). Advance cue utilization in soccer. In J. C. T. Reilly, & A. Stibbe (Eds.) (Ed.), *Science and football II* (pp. pp. 239–244). London: E. & F. N. Spon.
- Williams, A. M., & Davids, K. (1997). Assessing cue usage in performance contexts: A comparison between eye-movement and concurrent verbal report methods. *Behavior Research Methods Instruments & Computers*, *29*, 364-375.
- Williams, A. M., Davids, K., Burwitz, L., & Williams, J. G. (1992). Perception and action in sport. *Journal of human movement studies*, *22*, 147-204.
- Williams, A. M., & Ford, P. R. (2008). Expertise and expert performance in sport. *International Review of Sport and Exercise Psychology*, *1*, 4-18.
- Williams, A. M., & Grant, A. (1999). Training perceptual skill in sport. *International Journal of Sport Psychology*, *30*, 194-220.
- Williams, A. M., Hodges, N. J., North, J. S., & Barton, G. (2006). Perceiving patterns of play in dynamic sport tasks: Investigating the essential information underlying skilled performance. *Perception*, *35*, 317-332.
- Williams, A. M., Ward, P., & Chapman, C. (2003). Training perceptual skill in field hockey: is there transfer from the laboratory to the field? *Research Quarterly for Exercise and Sport*, *74*, 98-103.
- Williams, A. M., Ward, P., Ward, J. D., & Smeeton, N. J. (2008). Domain specificity, task specificity, and expert performance. *Research quarterly for exercise and sport*, *79*, 428-433.
- Williams, M. A. (2000). Perceptual skill in soccer: implications for talent identification and development. *Journal of Sports Sciences*, *18*, 737-750.
- Williams, M. A., Davids, K., & Williams, J. (1999). *Visual perception and action in sport*. London: E & FN Spon.
- Wood, J. M., & Abernethy, B. (1997). An assessment of the efficacy of sports vision training programs. *Optometry and Vision Science: official publication of the American Academy of Optometry*, *74*, 646-659.
- Wright, M. J., Bishop, D. T., Jackson, R. C., & Abernethy, B. (2011). Cortical fMRI activation to opponents' body kinematics in sport-related anticipation: expert-novice differences with normal and point-light video. *Neuroscience Letters*, *500*, 216-221.

- Yang, N., MacArthur, D. G., Gulbin, J. P., Hahn, A. G., Beggs, A. H., Easteal, S., & North, K. (2003). ACTN3 genotype is associated with human elite athletic performance. *American Journal of Human Genetics*, *73*, 627-631.
- Yantis, S. (1992). Multielement visual tracking: attention and perceptual organization. *Cognitive psychology*, *24*, 295-340.
- Yin, R. K. (1969). Looking at Upside-down Faces. *Journal of Experimental Psychology*, *81*, 141-&.
- Zaichkowsky, L., Faubert, J., & Beauchamp, P. (2012). Visual Perception Training: Cutting Edge Psychophysics and 3D Technology Applied to Sport Science. In *Association for Applied Sport Psychology Proceedings*. Atlanta, Georgia.
- Zarebska, A., Sawczyn, S., Kaczmarczyk, M., Ficek, K., Maciejewska-Karlowska, A., Sawczuk, M., Leonska-Duniec, A., Eider, J., Grenda, A., & Cieszczyk, P. (2013). Association of rs699 (M235T) Polymorphism in the AGT Gene With Power but Not Endurance Athlete Status. *Journal of strength and conditioning research*, *27*, 2898-2903.
- Zhang, X., Yan, M., & Yangang, L. (2009). Differential performance of Chinese volleyball athletes and nonathletes on a multiple-object tracking task. *Perceptual and Motor Skills*, *109*, 747-756.

Annexe 1 : Les joueurs de soccer traitent et apprennent plus rapidement des scènes visuelles dynamiques, complexes et neutres

Les seuils de vitesse de 3D-MOT étaient comparés durant 15 sessions entre un groupe d'athlètes masculins de soccer universitaires (n=9) et un groupe de jeunes adultes masculins non-athlètes (n=12). Le protocole suivi était similaire pour ces deux populations à savoir que trois seuils de 3D-MOT étaient obtenus à chaque séance. Les séances étaient administrées à raison de deux fois par semaine.

Une analyse de variance ANOVA à mesures répétées avec le facteur inter-sujet Groupes (athlètes, non-athlètes) et le facteur intra-sujet Sessions (15 sessions) a été utilisée pour déterminer les différences dans les seuils de vitesse entre les groupes. La même analyse a été conduite pour examiner les seuils de vitesse normalisés en utilisant 14 sessions (exclusion de la session numéro 1).

L'analyse des seuils de vitesse a révélé une amélioration significative générale dans les deux groupes ($F[14, 266]=14.864$, $p<0.001$, $\eta^2=0.44$) et une interaction significative Groupes x Sessions confirmant des seuils de vitesse plus élevés chez le groupe de joueurs de soccer ($F[14, 266]=3.202$, $p<0.001$, $\eta^2=0.14$; Figure annexe 1A). Les résultats issus de l'analyse des seuils de vitesse normalisés ont confirmé un effet d'apprentissage général ($F[13, 247]=10.602$, $p<0.001$, $\eta^2=0.36$) et une capacité d'apprentissage significativement supérieure chez les athlètes ($F[13, 247]=3.022$, $p<0.001$, $\eta^2=0.14$; Figure annexe 1B).

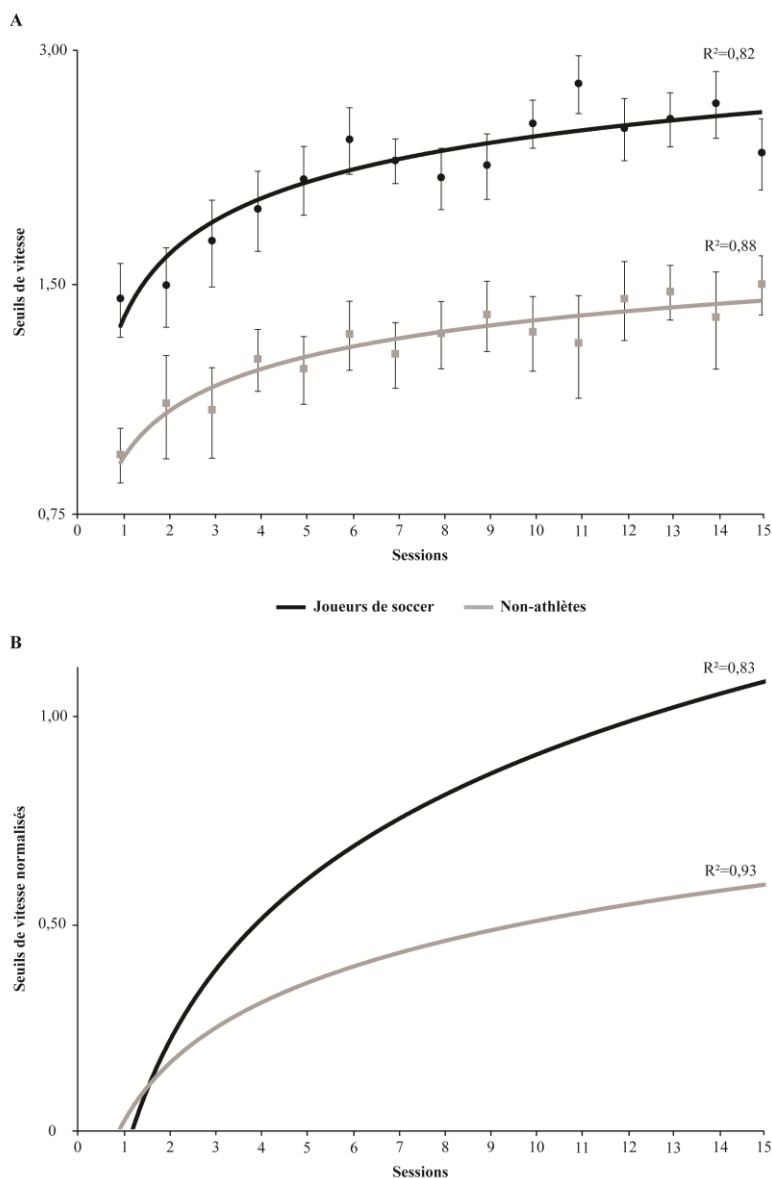


Figure annexe 1. A. Moyenne géométrique des seuils de vitesse au 3D-MOT chez des joueurs de soccer et des non-athlètes représentée sur une échelle logarithmique en fonction du nombre de sessions d'entraînement. Les barres d'erreurs représentent les erreurs standards. B. Moyenne des seuils de vitesse normalisés de 3D-MOT pour les joueurs de soccer et les non-athlètes en fonction du nombre de sessions d'entraînement.

Pour les deux graphiques, les ajustements de courbe représentent des fonctions de régression logarithmiques et le coefficient de détermination (R^2) correspond au montant de la variance expliquer par la courbe ajustée.

Annexe 2 : Données préliminaires : évaluation de la capacité perceptivo-cognitive de joueurs de soccer de différents âges et de jeunes adultes non-athlètes à l'aide du 3D-MOT

Les seuils de vitesse de 3D-MOT étaient comparés (Figure annexe 2) durant 10 sessions entre un groupe de joueurs de soccer âgés de plus de 13 ans (courbe noire, n=33), un groupe de joueurs de soccer âgés de 11 à 12 ans (courbe rouge, n=10) et un groupe de jeunes adultes non-athlètes (courbe grise, n=12).

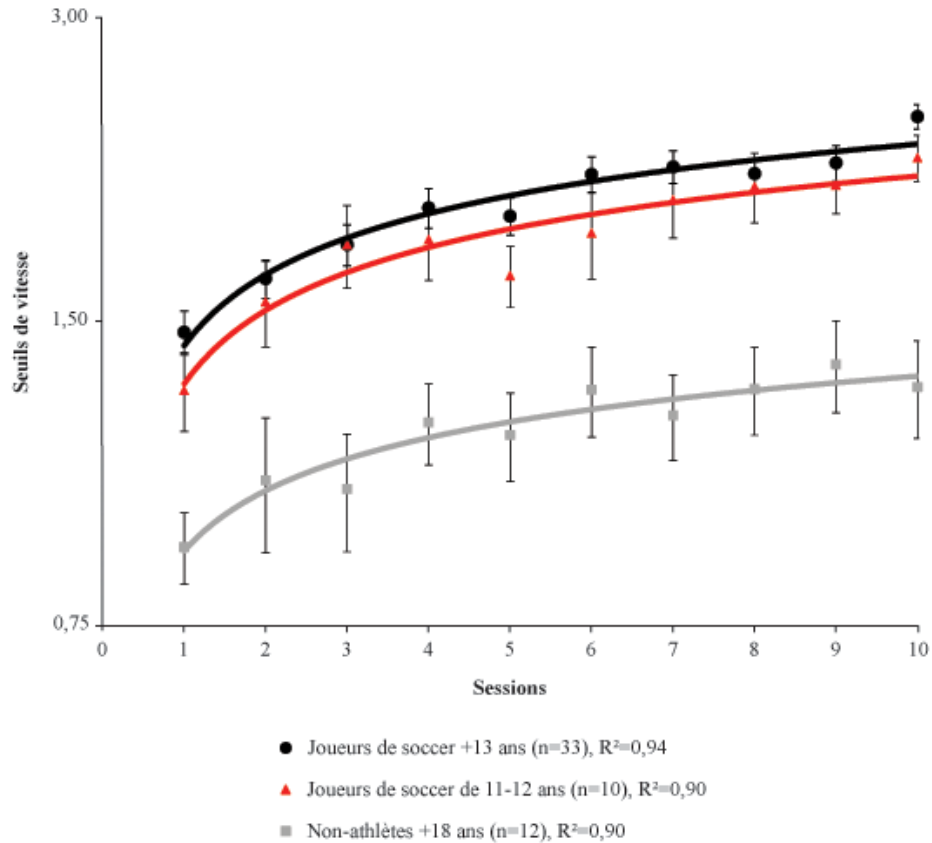


Figure annexe 2. Moyenne géométrique des seuils de vitesse au 3D-MOT chez des joueurs de soccer d'âges différents et chez des non-athlètes représentée sur une échelle logarithmique en fonction du nombre de sessions d'entraînement.

Les barres d'erreurs représentent les erreurs standards. Les joueurs âgés de plus de 13 ans (courbe noire) sont des joueurs d'une académie de soccer des groupes Espoirs B (13-14 ans), U18 (17-18 ans) et U23 (18-23 ans) ainsi que des joueurs de soccer universitaires (18-25 ans). Ils ont été regroupés car ils présentaient des seuils de performance comparables. Les joueurs de soccer âgés de 11 à 12 ans (courbe rouge) sont des athlètes de la même académie de soccer mais du groupe Espoirs A. Les jeunes adultes non-athlètes (courbe grise) sont des étudiants universitaires.